

Discussion Paper No. 08-087

**Inkrementelle versus
radikale Innovationen
am Beispiel der Kraftwerkstechnik**

Klaus Rennings, Peter Markewitz
und Stefan Vögele

ZEW

Zentrum für Europäische
Wirtschaftsforschung GmbH

Centre for European
Economic Research

Discussion Paper No. 08-087

**Inkrementelle versus
radikale Innovationen
am Beispiel der Kraftwerkstechnik**

Klaus Rennings, Peter Markewitz
und Stefan Vögele

Download this ZEW Discussion Paper from our ftp server:

<ftp://ftp.zew.de/pub/zew-docs/dp/dp08087.pdf>

Die Discussion Papers dienen einer möglichst schnellen Verbreitung von
neueren Forschungsarbeiten des ZEW. Die Beiträge liegen in alleiniger Verantwortung
der Autoren und stellen nicht notwendigerweise die Meinung des ZEW dar.

Discussion Papers are intended to make results of ZEW research promptly available to other
economists in order to encourage discussion and suggestions for revisions. The authors are solely
responsible for the contents which do not necessarily represent the opinion of the ZEW.

Das Wichtigste in Kürze

In der Diskussion um Innovationen für eine nachhaltige Entwicklung werden häufig radikale Innovationen gefordert, damit die Transformation der Gesellschaft hin zu einem als nachhaltig empfundenen System gelingen kann. Begründet wird dies mit einer höheren Umwelteffizienz dieser Innovationen. Empirische Evidenz für diese Hypothese ist allerdings kaum zu finden.

Dieses Papier prüft vor dem Hintergrund eines weltweit zunehmenden Einsatzes von Kohlekraftwerken und der dadurch zu erwarteten Umweltbelastungen die Hypothese, dass radikale Innovationen im Vergleich zu inkrementellen Innovationen überlegen sind. Anhand von Beispielen fossil befeuerter Kraftwerke wird untersucht, inwieweit sich radikale Innovationen im Kraftwerksbereich bisher durchsetzen konnten bzw. welche Hemmnisse ihnen grundsätzlich entgegenstanden. Hierzu werden u.a. die Druckkohlenstaubfeuerung als radikale Innovation und überkritische Kohlekraftwerke als inkrementelle Innovation miteinander verglichen.

Anhand einer Ex-Post Analyse lässt sich für den Kraftwerksbereich zeigen, dass sich umweltfreundliche Techniken, die radikale Neuerungen darstellen, nur sehr schwer durchsetzen konnten. Bezogen auf den Anwendungsfall liegt eine klassische Lock-in-Situation vor. Diese ist nicht gleichzusetzen mit dem bekannten Fall der Schreibmaschinentastaturen (QWERTY-Beispiel), bei dem sich das „schlechtere“ System aufgrund von Standardisierungsvorteilen in der technologischen Evolution durchsetzte. Die Druckkohlenstaubfeuerung ist vielmehr „zu Recht“ unterlegen, da sie in einem dynamischen Vergleich – nach ökonomischen wie auch nach ökologischen Kriterien - schlechter abschneidet. Hätte sie den Wettbewerb mit der ursprünglichen Referenztechnologie noch gewonnen, so wurde doch der technologische Fortschritt der „alten“ Technologie deutlich unterschätzt.

Die Analysen zeigen, dass mit der Dynamik des technischen Fortschritts auch die Entwicklung inkrementeller Innovation unterschätzt wurde. Vermeintliche Vorteile, die einer radikalen Innovation gegenüber inkrementeller Entwicklung zugeschrieben werden, ändern sich im Zeitverlauf von Forschungs- und Entwicklungsarbeiten (F&E). Eine Bewertung von Techniken, die sich in der F&E-Phase befinden, ist daher in zeitlichen Abständen sukzessive durchzuführen, da die Angabe von z.B. Effizienz- sowie Kostenpotenzialen stets als Momentaufnahme zu verstehen sind.

Mit anderen Worten: Neue Technologien müssen sich gegenüber „alten“ Technologien behaupten, dabei dürfen sie die alte Technologie nicht statisch

betrachten, sondern müssen in Betracht ziehen, dass auch die alte Technologie in Anbetracht der Konkurrenz durch die neue Technologie ebenfalls weiter verbessert wird. Diese Erfahrung aus der Innovationsforschung kann hier am Beispiel der Kraftwerkstechnik bestätigt werden. Es gibt durchaus eine Reihe weiterer Optionen zu einem Wechsel der technologischen Trajektorien, beispielsweise eine Reorientierung der bestehenden technologischen Trajektorien (hier der konventionellen Kohlekraftwerke). Bei einer solchen Reorientierung reagiert das bestehende System auf den selektiven Druck der Umwelt, indem Innovationen entlang des bestehenden Technologiepfades inkrementell weiterentwickelt werden.

Richtet man den Fokus allgemein auf die fossil befeuerten Kraftwerkstechniken, sind für die vergangenen drei Dekaden auf Komponentenebene einige radikale Innovationen festzustellen, die in den Markt diffundieren konnten. Jedoch lässt sich für diesen Technikbereich auf Systemebene keine radikale Innovation feststellen. Dies verdeutlicht die ausgeprägte Pfadabhängigkeit für diesen Bereich der Kraftwerkstechnik. Hieraus lassen sich auch Hinweise für zukünftige Forschungs- und Entwicklungsarbeiten ableiten. Das Risiko, dass neue Techniklinien sich nicht etablieren, ist besonders groß, wenn es sich um die Entwicklung neuer Komponenten oder eine Trendumkehr auf Komponentenebene handelt, die letztendlich eine radikale Innovation des Kraftwerkssystems bedeuten. Die Wahrscheinlichkeit, dass sich eine Neuentwicklung durchsetzt, ist auf dem Gebiet der fossilen Kraftwerkstechnik umso größer, je näher sie sich an den etablierten Techniklinien orientiert.

Die Zukunftspotenziale für radikale Innovationen auf dem Gebiet der Kraftwerkstechnik sind insbesondere aufgrund des relativ hohen Kostendrucks, der geringen Risikobereitschaft von Energieversorgungsunternehmen und der großen zeitlichen Dynamik des inkrementellen Fortschritts bei konventionellen Referenztechnologien als relativ gering anzusehen. Für zukünftige F&E-Arbeiten auf dem großtechnischen Kraftwerkssektor lässt sich folgern, dass die Wahrscheinlichkeit eines Erfolgs einer Neuentwicklung umso größer ist, je näher sie sich an den etablierten Techniklinien orientiert. Auch im Zuge der Energiemarktliberalisierung sind für diesen Technikbereich kaum radikale Neuerungen zu erwarten.

Non-technical summary

In the discussion on innovations for sustainable development, radical innovations are often seen as necessary to establish eco-efficient technological systems. It is assumed that only a regime shift from the existing (unsustainable) technological system to a more sustainable one can solve the ecological problems. In this perspective radical innovations are needed for a successful transition to a system perceived as sustainable.

The justification for radical change is the greater environmental efficiency of these innovations. This hypothesis is, however, not supported by empirical evidence. Against the background of a globally increasing use of coal-burning power plants and the environmental impacts to be expected, the hypothesis that radical innovations are superior to incremental innovations is reflected in this paper.

We examine the diffusion of radical innovations in the field of power plants and the basic obstacles these innovations were confronted with. As an example for the ex-post-analysis we select the case of pressurised pulverised coal combustion as a radical innovation and supercritical coal-fired power plants as an incremental innovation. The analysis shows that pressurised pulverised coal combustion did not fulfil the expectations. Although an improved economic and ecological performance of the radical innovation was expected *ex ante*, unforeseen innovations were developed for the old technology (supercritical coal-fired power plants). Thus the radical innovation failed.

It can be concluded that the dynamics of technical progress and the development of incremental innovations should not be underestimated. Assumed advantages for radical technologies should be verified, and the technology assessment should be regularly updated regarding cost and efficiency advantages.

In general the future potential of radical innovations in the field of power plant technology is to be regarded as relatively low, especially due to comparatively high cost-pressure, the reluctance of energy supply companies to take risks and the dynamics of technological progress facilitating incremental innovations on the basis of conventional reference technology. The conclusion for future research and development (R&D) work in the sector of large-scale power plants is that an innovation is more likely to succeed the more it is geared to established technological trajectories. In the context of energy market liberalisation, hardly any radical innovations are expected in this field of technology.

Inkrementelle versus radikale Innovationen

-

am Beispiel der Kraftwerkstechnik

Klaus Rennings, Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung (ZEW), Mannheim

Peter Markewitz, Stefan Vögele, Forschungszentrum Jülich, Institut für Energieforschung – Systemforschung und Technologische Entwicklung (IEF-STE)

Abstract

In der Diskussion um Innovationen für eine nachhaltige Entwicklung werden häufig radikale Innovationen gefordert, damit die Transformation der Gesellschaft hin zu einem als nachhaltig empfundenen System gelingen kann. Begründet wird dies mit einer höheren Umwelteffizienz dieser Innovationen. Empirische Evidenz für diese Hypothese ist allerdings kaum zu finden.

Dieses Papier prüft vor dem Hintergrund eines weltweit zunehmenden Einsatzes von Kohlekraftwerken und der dadurch zu erwarteten Umweltbelastungen die Hypothese, dass radikale Innovationen im Vergleich zu inkrementellen Innovationen überlegen sind. Anhand von Beispielen fossil befeuerter Kraftwerke wird untersucht, inwieweit sich radikale Innovationen im Kraftwerksbereich bisher durchsetzen konnten bzw. welche Hemmnisse ihnen grundsätzlich entgegenstanden. Hierzu werden u.a. die Druckkohlenstaubfeuerung als radikale Innovation und überkritische Kohlekraftwerke als inkrementelle Innovation miteinander verglichen.

Anhand einer Ex-Post Analyse lässt sich für den Kraftwerksbereich zeigen, dass sich umweltfreundliche Techniken, die radikale Neuerungen darstellen, nur sehr schwer durchsetzen konnten. Die Zukunftspotenziale für radikale Innovationen auf dem Gebiet der Kraftwerkstechnik sind insbesondere aufgrund des relativ hohen Kostendrucks, der geringen Risikobereitschaft von Energieversorgungsunternehmen und der großen zeitlichen Dynamik des inkrementellen Fortschritts bei konventionellen Referenztechnologien als relativ gering anzusehen. Für zukünftige F&E-Arbeiten auf dem großtechnischen Kraftwerkssektor lässt sich folgern, dass die Wahrscheinlichkeit eines Erfolgs einer Neuentwicklung umso größer ist, je näher sie sich an den etablierten Techniklinien orientiert. Auch im Zuge der Energiemarktliberalisierung sind für diesen Technikbereich kaum radikale Neuerungen zu erwarten.

Keywords: inkrementelle Innovationen, radikale Innovationen, evolutorische Ökonomie, Kraftwerkstechnik

I Einleitung

In der Diskussion um Innovationen für eine nachhaltige Entwicklung werden häufig radikale Innovationen gefordert, damit die Transformation der Gesellschaft hin zu einem als nachhaltig empfundenen System gelingen kann (Vellinga, 2004). Begründet wird dies mit der Hoffnung, dass sich durch diese Innovationen die Umwelteffizienz um einen Faktor 10 erhöht, verglichen mit einem Faktor 2 für inkrementelle Innovationen (Geels, Elzen und Green, 2004).

In der Literatur ist allerdings kaum empirische Evidenz für diese Hypothese zu finden. Die Fürsprecher dieses Konzepts räumen jedoch ein, dass solche Veränderungen mindestens eine Generation benötigen, um sich durchzusetzen, da verschiedene Phasen durchlaufen werden müssen. Im Idealfall entwickeln sich die radikalen Innovationen zunächst in kleinen Marktnischen, bevor sie sich weiter

ausbreiten und die alte Technologie ablösen können. Dieses Innovationskonzept wird in der Literatur als Transition Management beschrieben (Geels, 2004). Vor dem Hintergrund des zunehmenden Einsatzes von Kohlekraftwerken und der dadurch zu erwarteten Umweltbelastungen stellt sich die Frage nach den Potenzialen und der Bedeutung für radikale Innovationen in diesem Bereich. Die Internationale Energieagentur IEA (IEA, 2006) geht davon aus, dass der weltweite Strom- und Kapazitätsbedarf auch in den nächsten Dekaden signifikant zunehmen werden und fossil befeuerte Kraftwerke weltweit die wesentliche Basis zukünftiger Stromproduktion darstellen werden.

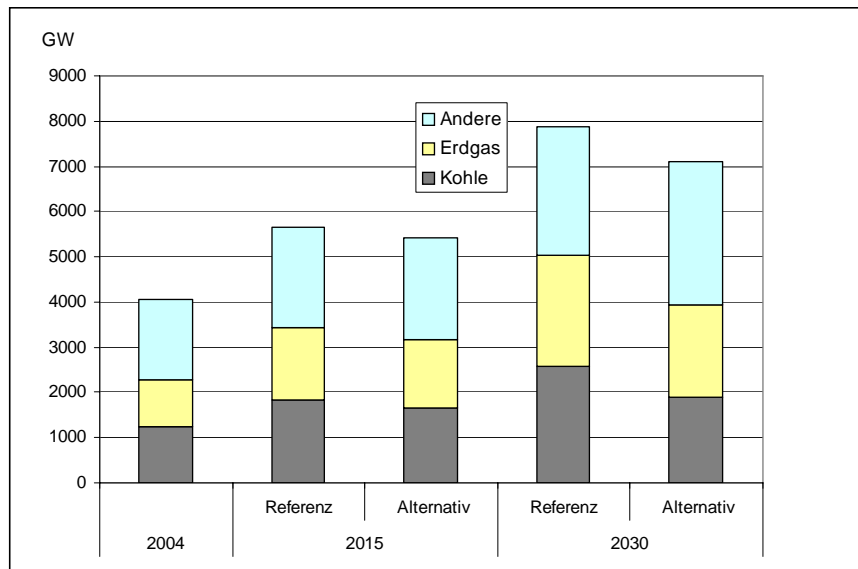


Abbildung 1: Prognostizierter weltweiter Kapazitätszuwachs [IEA, 2006]

Im Rahmen dieser Studie wird am Beispiel der Entwicklung von Kraftwerkstechniken in Deutschland mit Hilfe einer Ex-Post Analyse gezeigt, inwieweit sich radikale Innovationen durchsetzen konnten bzw. welche Hemmnisse ihnen entgegenstanden. Hierzu wird zunächst auf die Begriffe der radikalen und der inkrementellen Innovation vor dem Hintergrund der evolutionsökonomischen Innovationstheorien eingegangen. In Abschnitt 3 wird dann die Entwicklung des F&E Portfolios der letzten Dekaden analysiert. Am Beispiel der Druckkohlenstaubfeuerung und überkritischer Kohlekraftwerke wird die Entwicklung radikaler und inkrementeller Neuerungen analysiert.

II Inkrementelle und radikale Innovationen aus evolutionsökonomischer Sicht

Wenn von Neuheiten die Rede ist, muss nach Schumpeter (1934) zwischen ihrer Erfindung (Invention), Markteinführung (Innovation) und Verbreitung (Diffusion) unterschieden werden. Der gesamte Prozess über diese drei Phasen hinweg soll im Folgenden als Innovationsprozess verstanden werden. Streng genommen ist aus theoretischer Perspektive die Einführung einer bislang ungenutzten, aber bekannten Technik keine Innovation (Brozen, 1953). Da empirisch aber im Zweifelsfall nicht zu bestimmen ist, ob eine Innovation auf neuem Wissen basiert, wird im Allgemeinen jede Änderungen von Produktionsmethoden in Unternehmen oder in der Industrie als

Innovation bezeichnet (Hebert und Link, 2006). Falsch ist dagegen die Vorstellung, eine Innovation sei bereits ausgereift, wenn sie auf den Markt gebracht wird. Vielmehr wird sie typischerweise nach der Markteinführung in vielen kleinen Schritten weiter verbessert (Rosenberg, 1972).

Aus der Gesamtmenge werden als Umweltinnovationen jene technisch-ökonomischen, Institutionellen und/oder sozialen Neuerungen herausgegriffen, die zu einer Verbesserung der Umweltqualität führen (Klemmer et al, 1999). Inwieweit eine Verbesserung erreicht wird, kann unter anderem nach ihrem Grad an „Neuheit“ unterschieden werden. Nach Freeman (1992) sind inkrementelle Innovationen kontinuierliche Verbesserungen existierender technologischer Systeme (z.B. die Optimierung eines Abluffilters), während radikale Innovationen diskontinuierliche Prozesse darstellen (z.B. die Einführung von Brennstoffzellen). Der Ablauf von Innovationsprozessen wird in der Evolutionsökonomik mit den biologischen Begriffen Variation und Selektion beschrieben. Inventionen sind Variationen, die sich im evolutionären Prozess als erfolgreich oder unterlegen erweisen können, abhängig von bestimmten Selektionskriterien ihrer Umwelt (Nelson und Winter, 1977). Freeman (1992) teilt die selektierende Umwelt grob in drei Teilsysteme ein:

- Natürliche Umwelt: Anthropogene oder Umweltveränderungen können selektiven Druck zur Entwicklung neuer Technologien ausüben, z.B. Ersatzstoffe für Asbest und Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) oder Technologien zur Energieeinsparung.
- Infrastruktur und bestehender Kapitalstock: Diese haben häufig einen Lebenszyklus von mehreren Jahrzehnten, was Innovations- und Diffusionsprozesse erheblich verlangsamt.
- Institutionelle Umwelt: In Marktwirtschaften ist vor allem die Profitabilität von Umweltinnovationen ein Schlüsselkriterium des Erfolgs von Innovationen.

Evolutionsökonomische Ansätze akzeptieren dabei die historische Bedingtheit von Entwicklungspfaden und sind so in der Lage, Zufälle oder Pfadabhängigkeiten in der Analyse technologischen Wandels zu berücksichtigen. Sie sind weniger an der Untersuchung von Gleichgewichten als vielmehr von Übergangs- und Lernprozessen interessiert. Das zentrale methodische Element stellen Ex-post-Analysen in Form von Fallstudien dar; der Erfolg einer bestimmten Technologielinie wird als nicht vorhersagbar betrachtet. Unvollkommene Information der Akteure wird akzeptiert, so dass grundsätzlich Unsicherheit über technologische Entwicklungen besteht. Damit verbunden ist eine grundsätzliche Skepsis gegen verallgemeinerbare Aussagen oder Prognosen, allgemein betont wird in der Regel eher die Kontextbezogenheit von Innovationsprozessen (Rennings, 2000).

Es ist wichtig zu beachten, dass die Variation-Selektion-Terminologie erstens auf technologische Innovationen fokussiert und zweitens komplexe Feedback-Prozesse zwischen Variationen und dem Selektionsumfeld außer Acht lässt. Folgt man zunächst der Variation-Selektion-Terminologie, dann kann selektiver Druck des Auswahlumfeldes dazu führen, dass sich eine bestimmte Technologielinie als dominantes technologisches Paradigma etabliert. Größen- und Transaktionskostenvorteile, Lernkurven, überlegene Kosten-Nutzen-Relationen und Kompatibilität mit bestehenden Lebensstilen, Infrastruktur und Institutionen führen zu Pfadabhängigkeiten und technologischen Paradigmen (Dosi 1988), d.h. zu Lock-in-Effekten, die die Entwicklung alternativer Optionen erschweren. Beispiele für technologische Paradigmen sind der Verbrennungsmotor oder Halbleiter.

Damit sich neben solchen etablierten Paradigmen neue Technologien entwickeln können, müssen folglich Widerstände überwunden werden. Politiken, die sich diesem

Ziel verschreiben, zielen auf die Öffnung („unlocking“) eines sozio-technischen Systems ab (Faber und Frenken, 2008). Kemp (1997, S. 279ff.) nennt als Determinanten und Erfolgsfaktoren technologischen Wandels neue wissenschaftliche Erkenntnisse (die neue technologische Möglichkeiten eröffnen), drückende technologische Engpässe (z.B. die Grenzen zusätzlicher Emissionsreduktionen durch additive Technologien, hohe Kosten der Weiterentwicklung einer Technologie- linie, wie etwa hohe Kosten einer Reduktion von Kohlendioxidemissionen, Nachfrageänderungen, Ressourcenknappheit, oder Arbeitskämpfe), unternehmerische Aktivitäten und institutionelle Unterstützung für radikale neue Technologien.

Wichtige Erfolgsfaktoren von Technologiewechseln sind die frühe Etablierung von Marktnischen sowie der Gebrauch vorhandenen Wissens und vorhandener Technik, d.h. eine gewisse Kompatibilität mit existierendem Know how, Erfahrungswissen und der bestehenden Infrastruktur. Aufgrund dieser Erfolgsfaktoren schlägt Kemp (2007, siehe auch Kemp und Rotmans, 2005) vor, einen Wandel zu umweltfreundlicheren Technologien durch eine Politik des Transitionsmanagements zu unterstützen. Der Ansatz des Transitionsmanagements hat in den letzten Jahren in den Niederlanden eine beachtliche Resonanz bei politischen Entscheidungsträgern hervorgerufen. Ausgangspunkt dieser Strategie ist der Versuch, Systeminnovationen im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung herbeizuführen. Gegenstand sind technisch, sozio- kulturell, regulativ und ökonomisch geprägte Systeme, die bestimmte gesellschaftliche Bedürfnisse erfüllen, beispielsweise nach Energie, Wohnen, Mobilität oder Ernährung.

Systeminnovationen sind grundlegend andere Technologien zur Erfüllung dieser Bedürfnisse; damit einher geht auch die Notwendigkeit, die ökonomischen, rechtlichen und sozio-kulturellen Rahmenbedingungen zu beeinflussen, die die jeweilige Technologie bestimmen (Rennings et al., 2004). Beispiele für System- innovationen sind der Übergang von der Segel- zur Dampfschiffahrt, von der Kohle- zur erdgasbasierten Energieversorgung etc. Systeminnovationen, und damit auch der Ansatz des Transitionsmanagements, sind langfristig angelegt (25 Jahre und mehr). Sie sollen mit einem klaren Bekenntnis der beteiligten Akteure zu langfristigen Zielen erreicht und in konkreten Projekten umgesetzt werden. Vor allem die Schaffung geschützter Räume für vielversprechende, aber noch unausgereifte Technologien wird als vielversprechendes Rezept angesehen. So sollen zeitlich begrenzte Pilotmärkte geschaffen werden, die durch Förderprogramme, Sub- ventionen oder andere regulatorische Maßnahmen geschützt werden.

Frans Berkhout et al. (2004) halten solche Wechsel von einem technologischen Regime zum nächsten aber keineswegs für zwingend. Ihrer Meinung gibt es eine Reihe weiterer Optionen, beispielsweise kann eine Re-orientierung der bestehenden technologischen Trajektorien erfolgen. Bei einer solchen Re-orientierung reagiert das bestehende System auf den selektiven Druck der Umwelt, indem Innovationen entlang des bestehenden Technologiepfades weiterentwickelt werden (Berkhout, 2005). Dass sich eine „alte“ Technologie vor bzw. nach Einführung einer „neuen“ Technologie beständig verbessert, nicht zuletzt aufgrund der neuen Konkurrenzsituation, ist eine vertraute Erfahrung in der Innovationsforschung (Rosenberg, 1972).

III Inkrementelle und radikale Innovationen in der Kraftwerkstechnologie in Deutschland

III.1 Vorbemerkungen

Bevor im Folgenden auf die Entwicklung von inkrementellen und radikalen Innovationen eingegangen wird, bedarf es einer Definition und Abgrenzung dieser Begriffe (Garcia et al. 2002). Der Begriff radikaler oder inkrementeller Innovation kann für eine Technik sowohl auf Komponentenebene oder aber auch auf den gesamten technischen Prozess angewendet werden. Abbildung 2 zeigt die unterschiedlichen Analyseebenen.

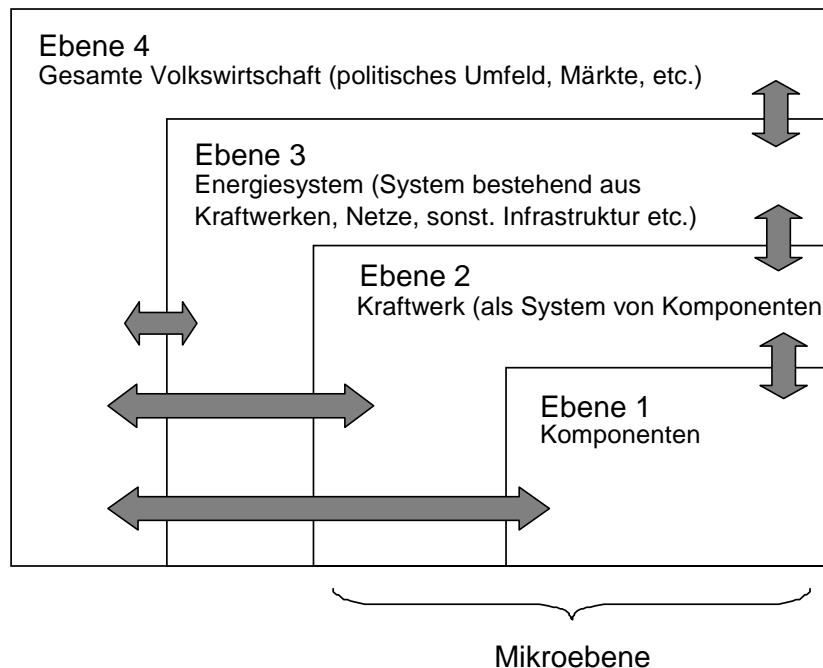


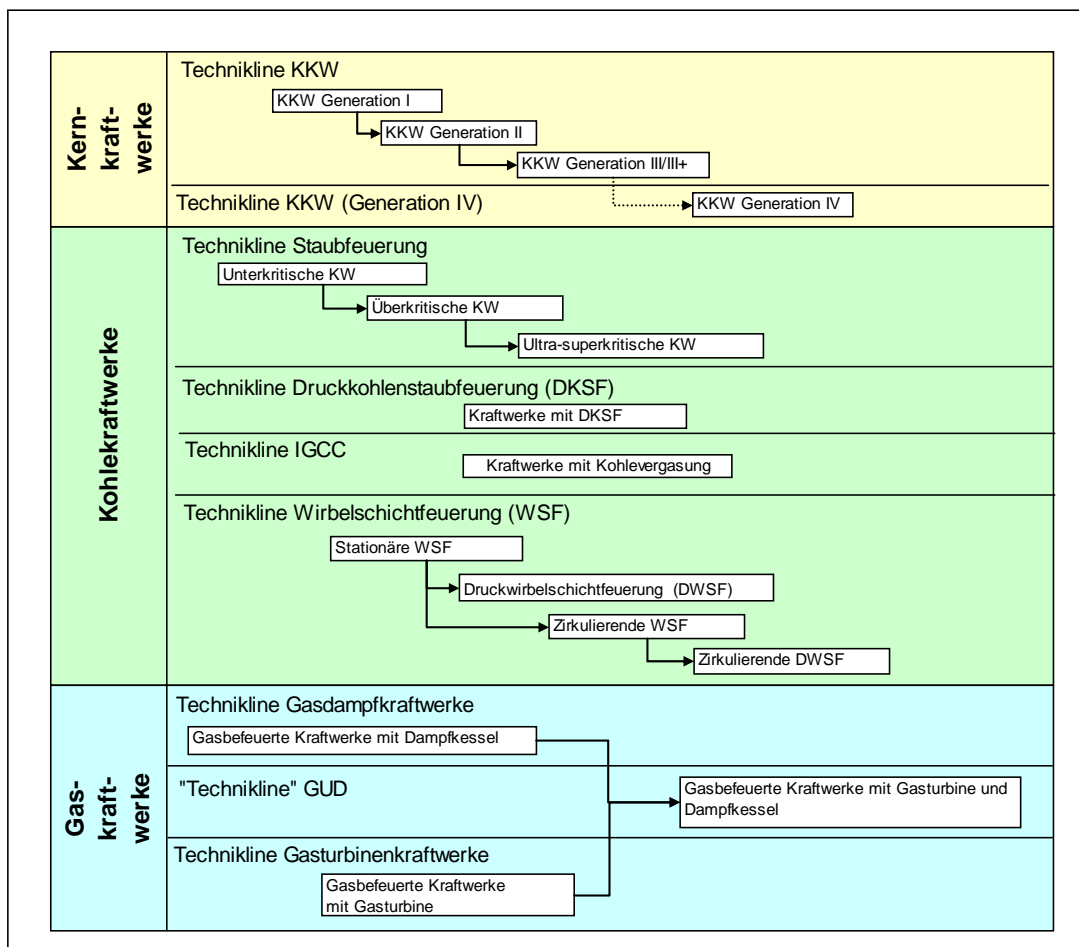
Abbildung 2: Analyseebenen für die Ex-post Betrachtung

Wie im Nachfolgenden gezeigt wird, muss eine radikale Innovation auf Komponentenebene nicht zwingend eine gleichartige Innovation auf Systemebene (Ebene 2) bedeuten. Jedoch ist sie eine notwendige Voraussetzung.

Die Motivation Technik(weiter)entwicklung zu betreiben, lässt sich aus dem Innovationsumfeld erklären, das durch Marktgegebenheiten für Betreiber und Hersteller, energie- und umweltpolitische Maßnahmen etc. bestimmt wird und in Abbildung 2 durch die Ebenen 3 und 4 dargestellt sind.

Gegenstand der nachfolgenden Betrachtungen bilden im Wesentlichen kohlebasierte Verstromungstechniken. Die Analyse findet also auf einer technikbasierten Mikroebene (Ebene 2) statt, die allerdings aus technischer Sicht eine sehr große Detailtiefe aufweist, da das zu untersuchende Techniksystem d.h. der Kraftwerksprozess in Komponenten zerlegt (Ebene 1) und analysiert wird (Garcia et al. 2002). Vor diesem Hintergrund liegt eine radikale Innovation dann vor, wenn die Neuentwicklung einer oder mehrerer Komponenten zu einer Änderung des Kraftwerkssystems führt, die letztendlich zu einer neuen Kraftwerkstechniklinie führt, die von den vorhandenen Techniklinien deutlich abweicht und signifikante Vorteile (z.B. Wirkungsgradsprung, niedrigere Emissionen, niedrigere Kosten etc.) aufweist. Ein Beispiel hierfür sind Kernkraftwerke, die in den 50er und 60er Jahren entwickelt wurden und ab den 70er

Jahren kommerziell eingesetzt wurden. Eine Übersicht über die verschiedenen Techniklinien zeigt Abbildung 3.



Abkürzungen: KKW Kernkraftwerk, KW Kohlekraftwerk, IGCC Intergrated Gasification Combined Cycle, GuD Gas- und Dampf-Kombikraftwerk

Abbildung 3: Wichtige Techniklinien in der Kraftwerkstechnik

Unter einer inkrementellen Änderung wird in dieser Arbeit die Weiterentwicklung einer Technologie verstanden, bei welcher der eingeschlagene Technikpfad nicht verlassen wird. So lässt sich für den Kraftwerksbereich über Jahrzehnte eine Weiterentwicklung von Turbinen beobachten, die von Innovationen aus anderen Bereichen (z.B. leistungsfähige Computer, die eine dreidimensionale Simulation erlaubte) profitierte und letztendlich eine Effizienzsteigerung nach sich zog. Ein anderes Beispiel ist die Entwicklung von Materialien, die eine Erhöhung von Dampfparametern ermöglichen und zu einer Erhöhung der Effizienz von fossil befeuerten Kraftwerken beitragen.

Im Folgenden wird im Rahmen einer Ex-post Analyse das deutsche F&E-Portfolio für den Bereich der großtechnischen Stromerzeugung in Hinblick auf die Entwicklung von radikalen bzw. inkrementellen Neuerungen untersucht. Der Blick richtet sich hierbei insbesondere auf die Forschungsaktivitäten, die mit öffentlichen Mitteln in den letzten Dekaden gefördert wurden. Das untersuchte F&E Portfolio stellt gleichzeitig einen Teil des industriellen F&E Portfolios dar, da eine Vielzahl von Projekten gemeinsam von öffentlicher Hand und Industrie gefördert wurden. Gegenüber der reinen Industrieforschung enthält das öffentliche Portfolio eine Vielzahl von Techniken und Techniklinien, die mit einem sehr viel größeren Entwicklungsrisiko

verbunden sind, so dass die industrielle Beteiligung auch im Sinne einer Risiko-
verteilung interpretiert werden kann.

In einem ersten Schritt wird der Entwicklungsverlauf in den Blick genommen und
analysiert, welche inkrementelle oder radikale Innovationen im Fokus von Forschung
und Entwicklung standen und ob bzw. inwieweit sie sich am Markt etablieren
konnten. Am Beispiel der Druckkohlenstaubfeuerung, die aufgrund ihrer großen
Effizienzpotentiale als vielversprechende Kohleverstromungstechnik galt, wird
aufgezeigt, dass radikale Innovationen trotz vermeintlicher Vorteile sich nicht
zwingend durchsetzen.

III.2 Das F&E-Portfolio

Tabelle 1 skizziert den Verlauf des F&E-Portfolios im deutschen Kraftwerksbereich
über mehrere Dekaden, wobei zwischen F&E-Portfolio, Kraftwerksneubau/Demo- u.
Pilotanlagen und Kraftwerksbestand unterschieden wird.

Bei der Interpretation dieser Tabelle ist zu beachten, dass in den einzelnen Dekaden
aus politischen Gründen teilweise unterschiedliche Forschungsschwerpunkte gesetzt
wurden: Während in den 70er Jahren die Ölpreiskrisen das Forschungsportfolio
durch Ressourcenschonung und Energieträgerwechsel bestimmte, war es in den
80er Jahren der Umweltschutz sowie in den 90er Jahren der Klimaschutz. Bis zum
Jahr 1998 war der Strommarkt ein monopolisierter Markt. Unter dieser
Rahmenbedingung wurde eine Vielzahl von Pilot- und Demonstrationsanlagen
realisiert. Demgegenüber lässt sich ab 1998 eine deutliche Abnahme bzw. Trend von
Demoanlagen hin zu kleineren und weniger kostenintensiven Techniken feststellen.
Die Gründe hierfür liegen auf der Hand: Während der monopolisierte Markt die
Abwälzung der Risiken auf den Endkunden einfach ermöglichte, ist dies nunmehr im
liberalisierten Markt nicht mehr möglich.

Bei einer erfolgreichen Etablierung durchläuft eine Technik die beiden Phasen „F&E-
Portfolio“, „Kraftwerksneubau/Demo- u. Pilotanlagen“ und ist letztendlich in signifi-
kanten Umfang Bestandteil des Kraftwerksbestandes. So waren beispielsweise die
Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur Entschwefelung und Entstickung, die eine
wesentliche Grundlage für die Umsetzung der Großfeuerungsanlagenverordnung
darstellten, von besonderem Erfolg gekrönt: Innerhalb einer Dekade wurde die F&E-
Phase sowie das Demonstrationsstadium durchlaufen, bis Anfang der 80er Jahre der
komplette bestehende deutsche Kohlekraftwerkspark mit Anlagen in groß-
technischem Maßstab nachgerüstet werden konnte.

Der Bau von Kernkraftwerken (Druck- und Siedewasserreaktoren) stellt ein weiteres
erfolgreiches Beispiel dar, wie sich eine radikale Innovation auf Systemebene am
Markt etablieren konnte.

Im Bereich der fossil befeuerten Kraftwerke konnte sich eine Vielzahl von Techniken
nicht über das Demo- und Pilotanlagenstadium hinaus etablieren. Es ist festzu-
stellen, dass sich in den letzten drei Dekaden auf Systemebene keine radikale
Innovation durchsetzen konnte. Dies gilt z.B. für Verstromungstechniken auf der
Basis von Kohlevergasung, die sich auch international nicht durchsetzen konnte.
Somit hat sich in den letzten Jahrzehnten im Bereich fossiler Kraftwerkssysteme kein
grundlegender Pfadwechsel (Wechsel einer Techniklinie) vollzogen, obwohl neue
Kraftwerkskonzepte (z.B. Kraftwerke mit integrierter Kohlevergasung, Druckkohle-
staubfeuerung) vorlagen, die als radikale Neuerungen zu verstehen sind und sich
durch höhere Effizienz oder bessere Umwelteigenschaften gegenüber etablierten
Techniken auszeichneten.

Auf Komponentenebene hingegen waren einige wenige Techniklinienwechsel zu
beobachten. Ein Beispiel aus dem Bereich der Kohlekraftwerke ist der Wechsel von

Schmelzfeuerungen hin zu Feuerungen mit trockenem Ascheabzug, der durch die Einführung der Großfeuerungsanlagenverordnung, die stringente Stickoxidgrenzwerte vorschreibt, ausgelöst wurde. Ebenfalls eine Reaktion auf die Vorgabe von Emissionsgrenzwerten ist die Neuentwicklung von entsprechenden Waschverfahren zur Rückhaltung von Schwefel- und Stickoxiden, die auf der Komponentenebene als radikale Innovation verstanden werden müssen, da sie vorher nicht existierten. Die genannten Veränderungen auf Komponentenebene führten jedoch nicht zu einer grundlegenden Änderung des eigentlichen Kraftwerksgesamtprozesses, so dass sie auf der Systemebene „Kraftwerk“ (Ebene 2) nicht als radikale Innovation verstanden werden können.

	Nationales F&E Portfolio	Kraftwerksneubau/Demo- u. Pilot-anlagen	Kraftwerksbestand
70er Jahre	Kohlevergasung Brüter, DWR, SWR, HTR <i>Fernwärme-KWK</i> <i>Effizienzverbesserung bei konv. Kraftwerkstechniken</i> Entstickungs- und Entschwefelungsverfahren	KDV Lünen (Versuchsanlage) AVR (Versuchsanlage) SWR, DWR <i>Konv. Kraftwerke auf Öl-, Gas- und Kohlebasis</i> Teilent Schwefelung Kohlekraftwerk Wilhelmshaven	SWR, DWR Gasturbinenkraftwerke <i>Konventionelle</i> <i>Dampfkraftwerke auf Öl-, Gas- und Kohlebasis</i> Wasserkraftwerke
80er Jahre	Kohlevergasung Kombikraftwerke (GT, Kohle) <i>Dampfkraftwerke mit Zwischenüberhitzung</i> <i>(Effizienzverbesserung bei konv. Kraftwerkstechniken)</i> Wirbelschichtfeuerung (WSF) Entstickung, Entschwefelung Fusion	THTR (Demoanlage) Brüter Kalkar (Demo) Kombi-Kraftwerk Gerstein (Demoanlage) Völklingen (stat. WSF) Kohlevergasung (Berrenrath) <i>DWR (Konvoibauweise)</i> <i>Dampfkraftwerke auf Kohlebasis</i> Windkraft (Growian)	SWR, DWR <i>Konventionelle</i> <i>Dampfkraftwerke auf Öl-, Gas- und Kohlebasis</i> Wasserkraftwerke
90er Jahre	Kohlevergasung (Kobra) Druckkohlenstaubfeuerung Wirbelschichtfeuerung <i>Effizienzverbesserung bei konv. Kraftwerkstechniken (DKW, Gasturbinen)</i> Windkraft (onshore) Biomasse, PV, Geothermie, Brennstoffzellentechnik Fusion	DWSF Cottbus (Demoanlage) <i>Konventionelle</i> <i>Braunkohlekraftwerke</i> <i>GuD-Kraftwerke</i> BZ-Projekte Geothermieprojekte	SWR, DWR <i>Konventionelle Kraftwerke auf Kohlebasis mit Entstickung und Entschwefelung</i> <i>Gasturbinen</i> <i>GuD-Kraftwerke</i> <i>Wasserkraftwerke</i> Windkraftwerke
Seit 2000	<i>Effizienzverbesserung bei konv. Kraftwerkstechniken (z.B. COMTES, AD700)</i> CO₂-Abscheidung Wirbelschichtfeuerung Druckkohlenstaubfeuerung (beendet 2005) Brennstoffzellentechnik Windkraft Offshore Geothermie, PV Fusion	<i>GuD-Kraftwerke</i> <i>BoA-Kraftwerk</i> <i>Windkraftwerke</i> <i>Biomassekraftwerke</i> BZ-Projekte Geothermieprojekte Kombikraftwerk (Vorschaltturbine)	SWR, DWR <i>Konventionelle Kraftwerke auf Kohlebasis mit Entstickung und Entschwefelung</i> <i>GuD Anlagen</i> <i>Wasserkraftwerke</i> <i>Windkraftwerke</i> <i>Biomassekraftwerke</i>

Fett: Radikale Innovationen, Kursiv: Inkrementelle Innovationen

Abkürzungen: BZ Brennstoffzelle, DWR Druckwasserreaktor, SWR Siedewasserreaktor, HTR Hochtemperaturreaktor, KWK Kraft-Wärme-Kopplung, KDV Katalytische drucklose Vergasung, AVR Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor, PV Photovoltaik, GT Gasturbine, THTR Thorium-Hoch-Temperatur-Reaktor, WSF Wirbelschichtfeuerung, DWSF Druckwirbelschichtfeuerung, BoA Braunkohlekraftwerk mit optimierter Anlagentechnik

Tabelle 1: Nationales F&E Portfolio (Auswahl wichtigster Techniken) und Kraftwerksentwicklung in der Bundesrepublik Deutschland

Andere Verfahren, die als Alternative zu den zuvor angesprochenen SO₂- und NO_x-Waschverfahren gesehen werden müssen, wie z.B. die Wirbelschichtfeuerung, setzten sich nicht wie erwartet durch, da ihr möglicher Einsatz auch neue Restriktionen (z.B. kleinere Leistungsgrößen) sowie einen massive Änderung des eigentlichen Kraftwerksprozesses (z.B. Ersatz bzw. grundlegende Modifikation des Dampferzeugers) zur Folge hat. Wirbelschichtfeuerungen sind in der Lage, ein

breites Brennstoffband zu nutzen und bedienen vor diesem Hintergrund heute einen Nischenmarkt. Die Weiterentwicklung fossiler Kraftwerkstechnik war bis auf wenige Ausnahmen inkrementeller Natur. So spielte die Effizienzsteigerung konventioneller Kraftwerkstechnik durch die Erhöhung der Dampfparameter Druck und Temperatur in allen Dekaden und unabhängig von energie- und umweltpolitischen Forderungen und Randbedingungen die entscheidende Rolle. Diese Entwicklung führte auch dazu, dass eine Kopplung von etablierten Gasturbinen- und Dampfprozessen (GuD Kraftwerke) möglich war, die signifikante Wirkungsgradsteigerungen ermöglichte. Im Folgenden wird exemplarisch am Beispiel der Druckkohlenstaubfeuerung untersucht, warum Techniken, die als radikale Innovation zu verstehen sind und gegenüber konventioneller Technik vermeintlich erhebliche Vorteile aufwiesen, sich nicht durchsetzen konnten.

III.3 Druckkohlenstaubfeuerung (DKSF) als radikale Innovation

Die Steigerung der Effizienz (Wirkungsgradsteigerung) stellt in vielen Fällen die Hauptmotivation für die Durchführung von F&E-Vorhaben dar. Ausgehend vom Stand der Technik zu Beginn eines F&E-Projekts werden im Allgemeinen im Vergleich zur etablierten Konkurrenztechnik Effizienzpotenziale angegeben, die in der Regel auch mittel- und langfristig gesehen werden. Gegenüber konventionellen Kohlekraftwerken handelt es sich bei der Druckkohlenstaubfeuerung um einen kombinierten Prozess, bei dem eine Gasturbine direkt mit einem druckbeladenen, aus einer Kohlefeuerung stammenden Rauchgas beaufschlagt wird. Verglichen mit konventionellen Prozessen, ist für die Realisierung eine Heißgasentstaubung bei höchsten Temperaturen (ca. 1400°C) notwendig, die zu Beginn der F&E-Arbeiten völliges Neuland darstellte. Darüber hinaus war für den druckaufgeladenen Betrieb ein verändertes Kesseldesign notwendig. Aufgrund von Emissionsgrenzwerten wurden nach 1985 nur noch Kraftwerke mit sogenannten Trockenfeuerungen ausgerüstet. Eine Realisierung des DKSF-Prozesses hätte eine Schmelzfeuerung erfordert, die eine Trendumkehr bedeutet hätte. Zusammenfassend kann man festhalten, dass der DKSF-Prozess aufgrund des neuen Konzepts, der die Entwicklung völlig neuer Komponenten (z.B. Heißgasreinigung) sowie die Änderung etablierter Komponenten (z.B. Dampferzeuger) erforderte, als radikale Innovation auf dem Gebiet der Kohlekraftwerke gesehen werden muss.

Mit den Forschungs- und Entwicklungsarbeiten wurde im Rahmen eines Forschungsverbundprojekts mit großer Industriebeteiligung (Betreiber und Hersteller) Ende der 80er Jahre begonnen. Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten wurden jedoch im Jahr 2003 eingestellt und der vielversprechende Kraftwerksprozess, dessen Entwicklungskosten etwa 90 Mio € betragen, wurde nie realisiert.

Tabelle 2 enthält Wirkungsgradangaben zum Stand der Technik Ende der 80er Jahre sowie Wirkungsgradprojektionen für verschiedene Kraftwerkstechniken aus dieser Zeit. Deutlich zu erkennen sind die signifikanten Vorteile der Druckkohlenstaubfeuerung. Gegenüber konventioneller Kraftwerkstechnik versprach die Druckkohlenstaubfeuerung Wirkungsgradverbesserungen von 5 bis 10 Prozentpunkten, was die eigentliche Motivation für eine Projektbeteiligung von Industrie und öffentlichen Fördermittelgebern war. Geht man vom heutigen Stand der Technik aus, zeigt sich ein verändertes Bild. So wird deutlich, dass die Wirkungsgradentwicklung konventioneller Kraftwerkstechnik deutlich unterschätzt wurde. Dies hatte zur Folge, dass der ursprünglich angenommene Wirkungsgradvorsprung der Druckkohlenstaubfeuerung im Laufe der Zeit deutlich kleiner wurde. Fortschritte in der Materialforschung sowie in der Computersimulation, von denen die konventionelle

Technik in besonderem Maße profitierte, wurden von den Experten in dem eingetretenen Ausmaß nicht erwartet. Geht man von heutigen Wirkungsgradprojektionen aus, die ebenfalls in Tabelle 2 enthalten sind, liegt der Wirkungsgradvorsprung nur noch bei etwa 2 Prozentpunkten. Da sich mit konventioneller und erprobter Technik ähnliche Wirkungsgrade erreichen lassen und zugleich eine hohe technische Verfügbarkeit gewährleistet werden kann, wurden die F&E-Arbeiten zur Druckkohlenstaubfeuerung nach fast 15 Jahren andauernder Forschungs- und Entwicklungsarbeit eingestellt. Das eigentliche Problem der Druckkohlenstaubfeuerung, die Heißgasaschereinigung, wurde im Versuchsanlagenstadium gelöst. Der nächste Schritt wäre der Bau einer Pilotanlage und danach der Bau einer Demonstrationsanlage gewesen. Die in allen Projektphasen allerdings mit abnehmender Tendenz beteiligte Industrie sowie die öffentlichen Fördermittelgeber waren hierzu nicht mehr bereit.

	1989		2003	
	Stand der Technik	Projektionen 1989 - 2020	Stand der Technik ²⁾	Projektionen ^{2),4)} 2003 – 2020
<i>GuD (Erdgas)</i>	52% ¹⁾	54% ^{7),8)}	58%	65%
<i>Konv. Kohlekraftwerk (Braunkohle)</i>	36% ¹⁾	k.A.	43,5%	50%
<i>Konv. Kohlekraftwerk (Steinkohle)</i>	40% ¹⁾	44% ⁶⁾	46,9%	53%
<i>IGCC (Braunkohle)</i>	-	49% ^{1),3)}	45 - 48%	54 - 57%
<i>IGCC (Steinkohle)</i>	-	45 – 47% ^{1),3)}		
<i>DWSF</i>	-	44% ^{1),3)}	-	53 - 55% ⁵⁾
<i>DKSF</i>	-	49 – 53% ^{1),3)}	-	53 - 55%

Anmerkungen: 1) [Pruschek, 1990] 2) [COORETEC, 2003] 3) Turbineneintrittstemperatur: 1150°C 4) Angaben für das Jahr 2020 5) sogenannte zweite Generation 6) [Lezuo, 1989] 7) [Martin, 1988], 8) Turbineneintrittstemperatur: 1300°C
Abkürzungen: GuD: Gas- und Dampfprozess, IGCC: Integrated Gasification Combined Cycle, DWSF: Druckwirbelschichtfeuerung DKSF: Druckkohlenstaubfeuerung

Tabelle 2: Netto-Wirkungsgrade (Stand der Technik und Projektionen) zu Beginn und zum Ende der F&E-Arbeiten zur Druckkohlenstaubfeuerung für verschiedene Kraftwerkslinien

Ein ähnliches Bild lässt sich auch für Kraftwerke mit integrierter Kohlevergasung (IGCC) zeichnen, von denen zur Zeit einige Großanlagen z.B. in den Niederlanden (Buggenum), Spanien (Puertollano) und in den USA betrieben werden. Da die Anlagen die für den Wettbewerb notwendige technische Verfügbarkeit nicht besitzen und der Betrieb somit ein hohes Risiko aufweist, das sich unmittelbar auf die Profitabilität auswirkt, sind sie in den Anlagenportfolios der weltweiten Kraftwerksbetreiber nicht zu finden. Die wenigen gebauten Anlagen bedienen heute eher Nischenmärkte (Raffinerien etc.).

III.4 Superkritische Kohlekraftwerke als inkrementelle Innovation

Die zuvor skizzierten Ergebnisse lassen sich auch auf inkrementelle Technikänderungen, wie z.B. den Übergang zu überkritischen Dampfparametern, übertragen. Die Entwicklung hin zu höheren Dampftemperaturen und –drücken führt zu einer unmittelbaren Effizienzverbesserung und erstreckte sich über viele Dekaden, wie in Abbildung 3 gezeigt ist.

Die in der Abbildung aufgeführten Einzelanlagen sind als Meilensteine der Entwicklung zu verstehen. Überkritische Dampfparameter, wie sie schon ab Ende der 50er in einigen Kraftwerken (Pioniere) realisiert wurden, waren erst ca. 30 bis 40 Jahre später marktreif. Ein wesentlicher Grund war zum einen der Einsatz von teuren austenitischen Stählen. Zum anderen zeigten die mit den Pionieranlagen gemachten Erfahrungen mangelhafte wärmetechnische Eigenschaften der eingesetzten Werkstoffe, was die technische Verfügbarkeit signifikant minderte. Erst durch Fortschritte auf dem Gebiet der Materialwissenschaften war es möglich, Werkstoffe zu entwickeln, die die wärmetechnischen Anforderungen erfüllen und zudem preiswerter sind. Während sich der Übergang zu überkritischen Dampfzuständen bei den Steinkohlekraftwerken in den 80er Jahren vollzog, wurde er in den 90er Jahren auch für braunkohlegefeuerte Kraftwerke eingeleitet. So besitzen alle in Deutschland neu gebauten Braunkohlekraftwerke überkritische Dampfzustände, die neben anderen Maßnahmen Netto-Wirkungsgrade von bis zu 42% ermöglichen. Intensive Forschungsarbeiten werden derzeit durchgeführt, um eine weitere Steigerung der Frischdampfparameter (350 bar, 700°C) zu ermöglichen. Für sogenannte ultrakritische steinkohlebefeuerte Kraftwerke werden Wirkungsgrade von über 50% für möglich gehalten (vgl. Tabelle 2). Der Effizienzvorteil konkurrierender neuer Kraftwerkslinien wird hierdurch kontinuierlich geringer.

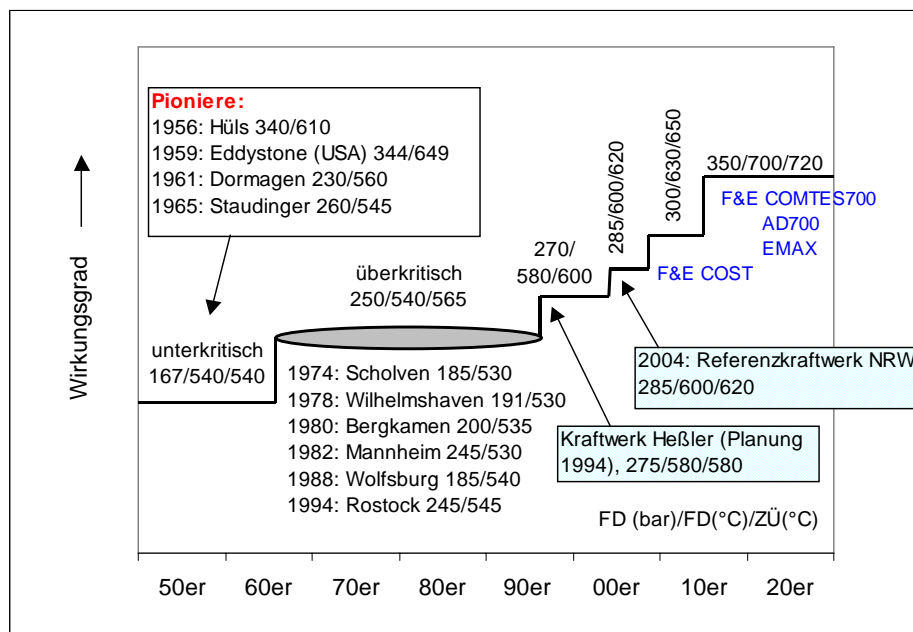


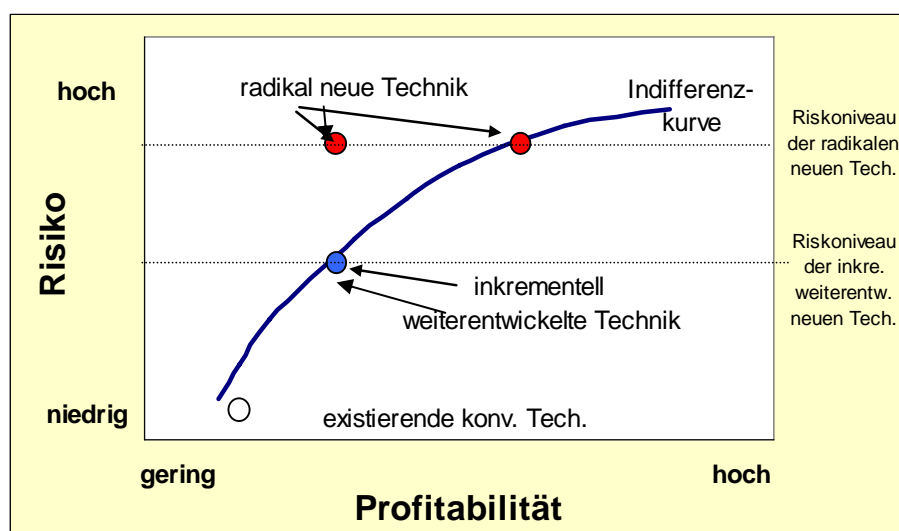
Abbildung 3: Entwicklung von Dampfparametern steinkohlebefuerter Kraftwerke

Neben der Effizienzsteigerung durch Erhöhung von Temperatur und Druck ist auch noch auf weitere Verbesserungen hinzuweisen. So wurden das Design von Gas- und Dampfturbinen sowie deren Komponenten optimiert, was durch 3-D Simulationen erfolgte, die durch leistungsfähigere Computer ermöglicht wurden. Gleiches gilt auch für die Auslegung anderer Komponenten (z.B. Kühlturm) sowie für die Optimierung des gesamten Kraftwerksprozesses. Diese Einzelentwicklungen führten in der Summe zu beträchtlichen Effizienzsteigerungen der etablierten Kraftwerkstechniklinien (COORETEC, 2003).

IV Schlussfolgerungen

Grundsätzlich kann bei inkrementellen Innovationen vorhandenes Know-how der Entwicklung der Technik, bei der Umsetzung in ein marktfähiges Produkt und bei der Einschätzung der Entwicklung auf der Nachfrageseite genutzt werden. Das mit solchen Neuerungen verbundene Risiko fällt entsprechend geringer aus als das Risiko bei radikalen Innovationen.

Unterstellt man ein risikoaverses Verhalten eines potenziellen Investors, so wird er bei gleichem Profitabilitätsniveau eine inkrementelle Neuerung einer radikalen Neuerung vorziehen (Abbildung 4). Damit der Investor die radikale Neuerung einer inkrementellen Neuentwicklung vorzieht, muss mit der radikalen Entwicklung grundsätzlich eine höhere Profitabilität erzielbar sein.



Quelle: IEF-STE 2007

Abbildung 4: Risiko/Profitabilität

Bezogen auf den Anwendungsfall der Kraftwerkstechnik liegt also eine klassische Lock in-Situation vor. Diese ist zwar nicht gleichzusetzen mit dem bekannten Fall der Schreibmaschinentastaturen (QWERTY-Beispiel), bei dem sich das „schlechtere“ System aufgrund von Standardisierungsvorteilen in der technologischen Evolution durchsetzte (David, 1985). Die Druckkohlenstaubfeuerung ist dagegen zu Recht unterlegen, da sie in einem dynamischen Vergleich schlechter abschneidet. Hätte sie den Wettbewerb mit der ursprünglichen Referenztechnologie noch gewonnen, so wurde doch der technologische Fortschritt der „alten“ Technologie deutlich unterschätzt.

Wie zuvor schon angedeutet, muss davon ausgegangen werden, dass die 1998 eingeleitete Strommarktliberalisierung nicht zu einer Erhöhung der Risikobereitschaft führen wird, da die Unternehmen nunmehr einem harten Wettbewerb ausgesetzt sind, der Fehlentscheidungen nicht verzeiht. Gegenüber dem monopolisierten Markt wird dem Kriterium der Profitabilität noch größere Bedeutung zugemessen.

Vor diesem Hintergrund gelangt die Verbundforschung, bei der Konkurrenten zusammen arbeiten, immer größere Bedeutung. Eine derartig angelegte Verbundforschung stellt sicher, dass das Entwicklungsrisiko auf mehrere Schultern verteilt wird, was im weiteren Sinne als „Risiko sharing“ interpretiert werden kann. Zum anderen bildet die Beteiligung an solchen Verbundvorhaben die Möglichkeit, den

Zugang zu Informationen, der letztendlich einen Wettbewerbsvorsprung bedeuten kann. Ein Beispiel ist das Forschungsprojekt COMTES700 (Entwicklung von ultrakritischen Kraftwerken), an dem neben Forschungsinstituten eine Vielzahl nationaler und internationaler Energieversorgungsunternehmen (z.B. E.ON, EdF etc.) und Kraftwerkshersteller beteiligt sind (Jäger, 2005).

Viele der in den 70er und 80er Jahren gebauten steinkohlegefeuerten Kraftwerke sind als maßgeschneiderte Unikate einzustufen, die den individuellen Bedürfnissen der jeweiligen Kraftwerksbetreiber Rechnung trugen. Durch die starke globale Kraftwerksnachfrage aber auch durch die Strommarktliberalisierung haben sich die Rahmenbedingungen für die europäischen Herstellunternehmen geändert. Übergeordnetes Ziel ist die globale Wettbewerbsfähigkeit (Ebene 4). Durch die Standardisierung von Kraftwerken, Reduzierung von Redundanzen sowie die Verkürzung von Bauzeiten etc. wurden und werden die Investitionskosten weiter gesenkt. Die Auslegung der Kraftwerke orientiert sich an den Bedürfnissen der globalen (vor allem asiatischen) Nachfrager, die die neuen Technologietreiber darstellen. Die Forderung nach hoher technischer Anlagenverfügbarkeit spielt auch hier eine entscheidende Rolle und ist von den Herstellerfirmen zu garantieren, was für diese mit einem hohen finanziellen Risiko verbunden ist. Dies führt ebenfalls zu einer sehr vorsichtigen Risikobereitschaft seitens der Hersteller, neue „Technikexperimente“ zu wagen. Neue oder weiterentwickelte Techniken müssen erst in den Herstellerländern demonstriert und erprobt werden, bevor sie exportiert werden können. Ein erfolgreiches Beispiel hierfür ist die Einführung überkritischer Steinkohlekraftwerke in China. Während bereits in den 90er Jahren in Europa nur noch überkritische Kraftwerke gebaut wurden, waren es in China ausschließlich Anlagen mit unterkritischen Dampfparametern. Erst mit einem Zeitverzug von etwa 10 Jahren werden seit dem Jahr 2000 in China in großem Maßstab überkritische Kraftwerke gebaut.

Die Ex-Post Analyse belegt, dass radikale Innovationen gegenüber denen inkrementeller Natur trotz offensichtlicher Vorteile (z.B. umweltfreundlicher, effizienter) sich in den meisten Fällen nicht durchsetzen konnten. Dies gilt insbesondere auf der Ebene der Kraftwerkssysteme. Richtet man den Fokus auf die fossil befeuerten Kraftwerkstechniken, sind für die vergangenen drei Dekaden auf Komponentenebene einige radikale Innovationen festzustellen, die in den Markt diffundieren konnten. Jedoch lässt sich für diesen Technikbereich auf Systemebene keine radikale Innovation feststellen. Dies verdeutlicht die ausgeprägte Pfadabhängigkeit für diesen Bereich der Kraftwerkstechnik. Hieraus lassen sich auch Hinweise für zukünftige Forschungs- und Entwicklungsarbeiten ableiten. Das Risiko, dass neue Techniklinien sich nicht etablieren, ist besonders groß, wenn es sich um die Entwicklung neuer Komponenten oder eine Trendumkehr auf Komponentenebene handelt, die letztendlich eine radikale Innovation des Kraftwerkssystems bedeuten. Die Wahrscheinlichkeit, dass sich eine Neuentwicklung durchsetzt, ist auf dem Gebiet der fossilen Kraftwerkstechnik umso größer, je näher sie sich an den etablierten Techniklinien orientiert.

Die Analysen zeigen auch, dass in vielen Fällen die Dynamik des technischen Fortschritts und damit die Entwicklung inkrementeller Innovation unterschätzt wurden. Vermeintliche Vorteile, die einer radikalen Innovation gegenüber inkrementeller Entwicklung zugeschrieben werden, ändern sich im Zeitverlauf von Forschungs- und Entwicklungsarbeiten. Eine Bewertung von Techniken, die sich in der F&E-Phase befinden, ist daher in zeitlichen Abständen sukzessive durchzuführen, da die Angabe von z.B. Effizienz- sowie Kostenpotenzialen stets als Momentaufnahme zu verstehen sind.

Mit anderen Worten: Neue Technologien müssen sich gegenüber „alten“ Technologien behaupten, dabei dürfen sie die alte Technologie nicht statisch betrachten, sondern müssen in Betracht ziehen, dass auch die alte Technologie in Anbetracht der Konkurrenz durch die neue Technologie ebenfalls weiter verbessert wird. Diese Erfahrung aus der Innovationsforschung wurde am Beispiel der Kraftwerkstechnik bestätigt. Insofern ist die Skepsis von Berkhout et al. (2004) gegenüber einem Wechsel von einem technologischen Regime zum nächsten zu teilen. Es gibt durchaus eine Reihe weiterer Optionen, beispielsweise kann eine Re-orientierung der bestehenden technologischen Trajektorien (hier der konventionellen Kohlekraftwerke) erfolgen. Bei einer solchen Re-orientierung reagiert das bestehende System auf den selektiven Druck der Umwelt, indem Innovationen entlang des bestehenden Technologiepfades inkrementell weiterentwickelt werden (hier in Form von superkritischen Kohlekraftwerken).

Eine wesentliche Motivation für die Entwicklung neuer Techniken im Kraftwerksbereich stellt die Verbesserung der Effizienz dar. Dies gilt unabhängig von den jeweiligen energie- und umweltpolitischen Randbedingungen. Allerdings zeigt die Ex Post Analyse, dass dieses Kriterium in der Regel überschätzt und andere Eigenschaften (z.B. Verfügbarkeit), die einen wirtschaftlichen Kraftwerksbetrieb und damit die Profitabilität signifikant beeinflussen, zu wenig Beachtung fanden.

Eine wesentliche Änderung des Umfeldes stellt die Strommarktliberalisierung dar. Es lässt sich deutlich feststellen, dass der Bau von Pilot- und Demonstrationsanlagen deutlich ausgeprägter waren, als nach der Liberalisierung. Der Grund hierfür ist, dass mögliche Kosten eines Scheiterns in einem monopolisierten Markt einfacher umgewälzt werden können. Das Risiko, eine radikale Innovation auf Systemebene zu entwickeln und implementieren, dürfte daher zukünftig deutlich geringer ausgeprägt sein.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich herzlich für eine Förderung im Rahmen des Projektes „Entscheidungskriterien für effiziente F&E Förderstrategien – Innovationsökonomische Grundlagen und praktische Anwendung für neue Energietechnologien“ des Forschungsverbundes EDUARD (**E**nergie-**D**aten und **A**nalyse **R**&**D**) des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi).

V Literaturverzeichnis

- BERKHOUT, F. (2005) Technological Regimes, Environmental Performance and Innovation Systems: Tracing the Links. In: M. Weber, J. Hemmelskamp (Eds.) Towards Environmental Innovation Systems. Springer, Berlin, 57 - 80.
- BERKHOUT, F., A. SMITH, A. STIRLING (2004), Socio-technical regimes and Transition Contexts. In: B. Elzen, F.W. Geels, K. Green, System Innovation and the Transition to Sustainability - Theory, Evidence and Policy. Edward Elgar, Cheltenham, 48 - 75.
- BROZEN, Y. (1953) Determinants of the Direction of Technological Change. American Economic Review, Papers and Proceedings, XLIII (2), May, 288-302.
- COORETEC (2003) Forschungs- und Entwicklungskonzept für emissionsarme fossil befeuerte Kraftwerke. BMWA Dokumentation Nr. 527, www.bmwi.bund.de.
- DAVID, P. A. (1985) Clio and the Economics of QWERTY. American Economic Review, Papers and Proceedings, 75 (2), May, 332 - 337.

- DOSI, G. (1988) The Nature of the Innovation Process, in: G. Dosi/C. Freeman/R. Nelson/G. Silverberg/L. Soete, Technical Change and Economic Theory, London, 221 - 238.
- FABER, A., K. FRENKEN (2008) Models in evolutionary economics and environmental policy: Towards an evolutionary environmental economics. in: Technological Forecasting & Social Change, doi: 10.1016/j.techfore.2008.04.009
- FREEMAN, C. (1992) The Economics of Hope, London, New York.
- GARCIA, R., CALANTONE, R. (2002). A critical look at technological innovation typology and innovativeness terminology: a literature review. The Journal of Product Innovation Management 19(2002), 110- 132
- GEELS, F.W. (2004) Understanding System Innovations: a critical literature review and a conceptual synthesis, in: Elzen, B., Geels, F.W., Green K. (Eds) "System Innovation and the Transition to Sustainability - Theory, Evidence and Policy, Edward Elgar, Cheltenham, 19 - 47.
- GEELS, F.W., B. ELZEN, K. GREEN (2004) General Introduction: system innovation and transitions to sustainability. in: Elzen, B., Geels, F.W., Green K. (Eds) "System Innovation and the Transition to Sustainability - Theory, Evidence and Policy, Edward Elgar, Cheltenham, 1 - 16.
- HÉBERT, R. F., A. N. LINK (2006) The Entrepreneur as Innovator, Journal of Technology Transfer, 31, 589-597.
- IEA (2006) World Energy Outlook 2006. International Energy Agency, www.iea.org.
- JÄGER, G. (2005) Großversuch in Scholven. Brennstoff-Wärme-Kraft (BWK), Vol. 57:Heft 10, 36-37.
- KEMP, R. (1997) Environmental Policy and Technical Change. Edward Elgar. Cheltenham, Brookfield.
- KEMP, R. (2007) An Example of "Managed Transition": The Transformation of the Waste Management Subsystem in the Netherlands (1960-2000), in: M. Lehmann-Waffenschmidt, Innovations Towards Sustainability - Conditions and Consequences. Physica Verlag, Heidelberg, 87 - 94.
- KEMP, R., J. ROTMANS (2005) The Management of the Co-Evolution of Technical, Environmental and Social Systems, in: M. Weber, J. Hemmelskamp (Eds), Towards Environmental Innovation Systems. Springer-Verlag, Berlin, 33 - 55.
- KEMP, R., D. LOORBACH (2005) Dutch Policies to Manage the Transition to Sustainable Energy. in: Innovationen und Nachhaltigkeit, Jahrbuch Ökologische Ökonomik, Bd. 4, Metropolis Verlag, Marburg, 123 - 150.
- KLEMMER, P., U. LEHR, K. LÖBBE (1999) Umweltinnovationen: Anreize und Hemmnisse. Berlin.
- LEZUO, A., ET AL. (1989) Entwicklungstendenzen steinkohlebefeuerter Kraftwerke Brennstoff-Wärme-Kraft (BWK), Vol. 41:Heft 1/2, 13-21.
- MANSFIELD, E. (1968) Industrial Research and Technological Innovation: An Econometric Analysis, New York. New York, W.W. Norton.
- NELSON, R. R., S. G. WINTER (1977) In Search of Useful Theory of Innovation, Research Policy, 6 (1), January, 37 - 76.
- MARTIN, H. (1988) Steigerung Prozesswirkungsgrades kohlegefeuerter Kraftwerke. VGB Kraftwerkstechnik, Vol. 79:Heft 5, 69-74.
- PRUSCHEK, R., ET AL. (1990) Kohlekraftwerke der Zukunft. Stand und Entwicklung, Erprobung und Planung neuer Kohlekraftwerks-Technologien. Studie im Auftrag des Ministers für Wirtschaft, Mittelstand und Technologie des Landes NRW

- RENNINGS, K. (2000) Redefining Innovation – Eco-Innovation Research and the Contribution from Ecological Economics. In: Ecological Economics 32 (2000), 319 – 332.
- RENNINGS, K., R. KEMP, M. BARTOLOMEO, J. HEMMELSKAMP, D. HITCHENS (2004): Blueprints for an Integration of Science, Technology and Environmental Policy. ZEW, Mannheim
- ROSENBERG, N. (1972) FACTORS AFFECTING THE DIFFUSION OF TECHNOLOGY, Explorations in Economic History, 10 (1), Fall, 3-33.
- SCHUMPETER, J. A. (1934) THE THEORY OF ECONOMIC DEVELOPMENT, translated by R. Opie from the 2nd German edition (1926), Cambridge, Harvard University Press.
- STAMATELOPOULOS, G. N. (2005) Optionen für die Verstromung von Kohle. Brennstoff-Wärme-Kraft (BWK), Vol. 57:Heft 10, 49-53
- VELLINGA, P. (2004) Foreword, in: Elzen, B., Geels, F.W., Green K. (Eds) "System Innovation and the Transition to Sustainability - Theory, Evidence and Policy, Edward Elgar, Cheltenham, p. XVIII