

Bisherige Erfolge der Windenergienutzung in Deutschland

Forschungsergebnisse aus dem

Wissenschaftlichen Meß- und Evaluierungsprogramm (WMEP)¹⁾

Berthold Hahn, Projektbereich Windenergie

Die Folgen unseres Energieverbrauchs werden in den letzten Jahren immer deutlicher und auch immer intensiver diskutiert. Die Vorteile der Windenergie und die bisherigen Erfolge ihrer Nutzung lassen sich am besten vor diesem Hintergrund beschreiben. Zu Beginn dieses Beitrags sollen deshalb einige Fakten aufgezeigt werden.

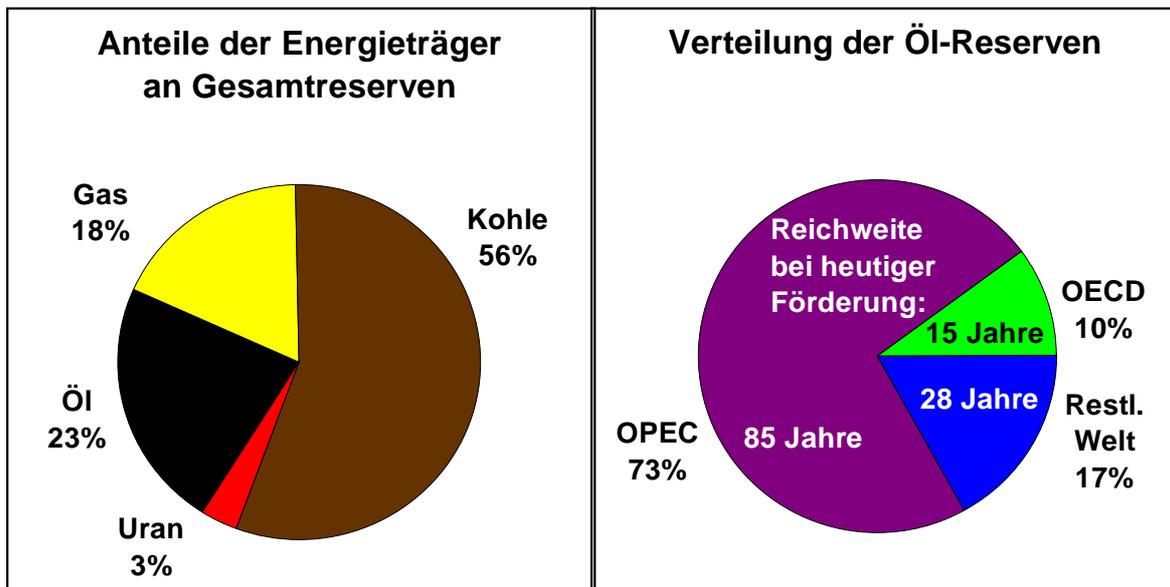
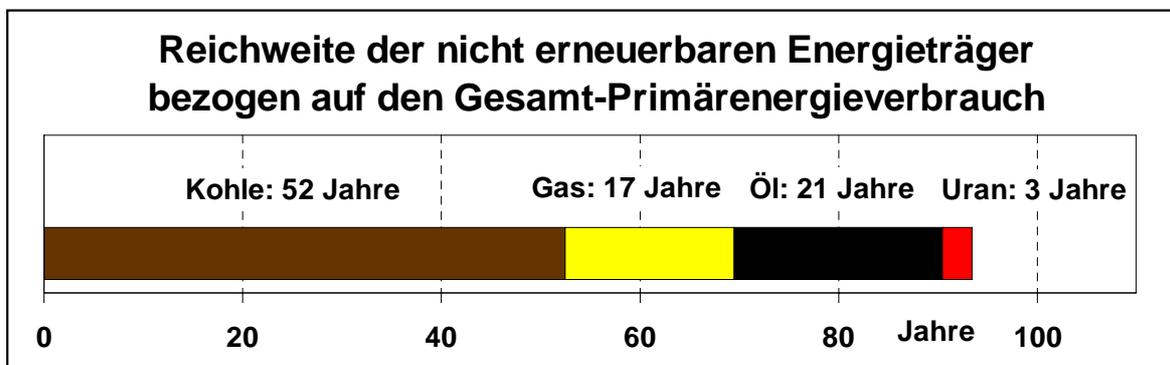
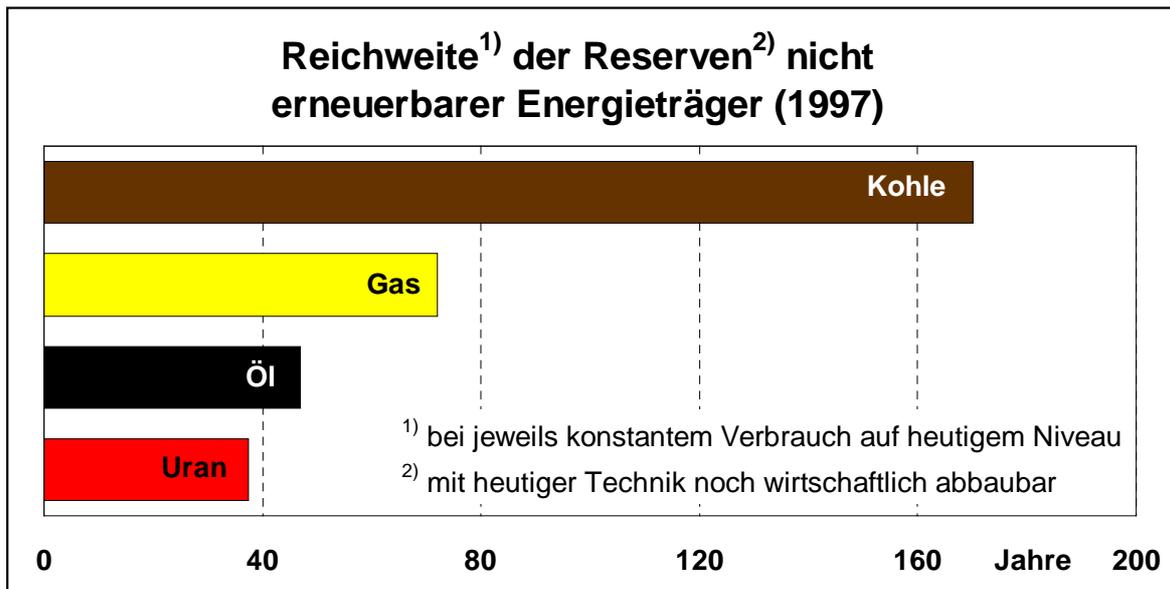
Ressourcenverknappung

Bekanntermaßen sind die Vorräte der heute vorwiegend genutzten Brennstoffe begrenzt. Die Geowissenschaft unterscheidet zwischen Reserven und Ressourcen, wobei die Reserven denjenigen Teil der vermuteten Gesamtressourcen ausmachen, der heute relativ genau bekannt ist und mit der heute verwendeten Technik in den jeweiligen Ländern wirtschaftlich abgebaut werden kann. Das Bundesamt für Geowissenschaft und Rohstoffe, Hannover, hat in 1998 einen Energiereport erarbeitet, der Reserven und Ressourcen darstellt. Der vorliegende Vortrag bezieht sich ausdrücklich auf die dort dargestellten Reserven. Den höheren Angaben zu den Ressourcen haftet der entscheidende Nachteil an, daß die tatsächlichen Mengen unbekannt sind, daß keine Techniken zur Förderung bekannt sind oder daß die Förderkosten weit über heutigen Weltmarktpreisen liegen würden.

Der weltweite Energieverbrauch bzw. die jährliche Förderung der Energieträger werden von der Energy Information Administration des US-amerikanischen Energieministeriums (Department of Energies) zur Verfügung gestellt. Die in Folie 1 gezeigten Auswertungen beider Datenquellen sind wegen der schwer abschätzbaren zukünftigen technischen und wirtschaftlichen Entwicklungen und aufgrund der von Datenquelle zu Datenquelle leicht schwankenden Angaben als Richtgrößen zu verstehen. Es zeigt sich, daß die heute im wesentlichen genutzten Energieträger noch knapp 40 bis 170 Jahre reichen würden, wenn ihre jeweiligen jährlichen Förderquoten auf dem Stand von 1997 eingefroren werden könnten (Folie 1, oberes Diagramm). Sowie sich allerdings einer der Energieträger verknappt, werden aufgrund des bestehenden Energiebedarfs die anderen Energieträger entsprechend stärker ausgebeutet werden. Das bedeutet, daß nach rund 100 Jahren auch die (unter heutigen Bedingungen abbaubaren!) Kohlereserven aufgebraucht sein werden, wenn bis dahin für die dann bereits erschöpften Gas-, Öl- und Uranreserven kein anderer Ersatz gefunden wurde (Folie 1, mittleres Diagramm).

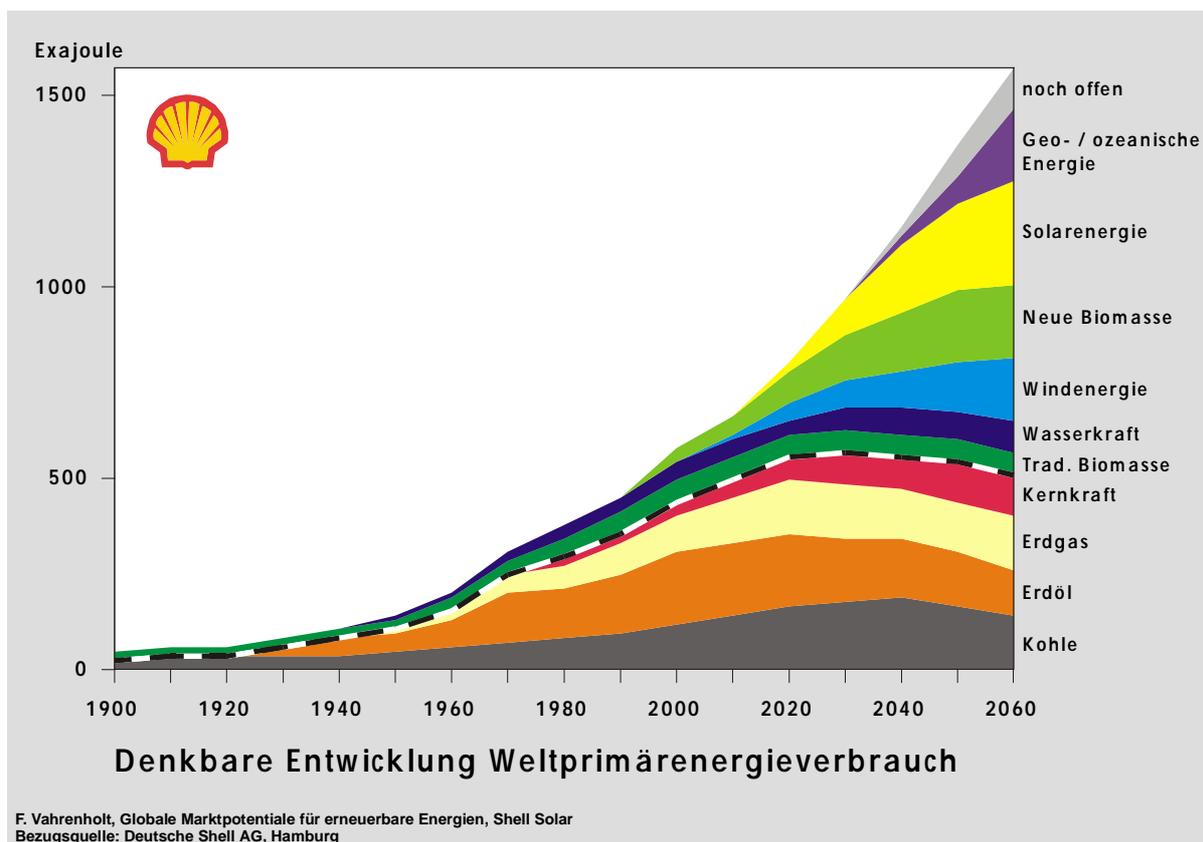
Die Darstellung der Anteile der Energieträger an den Gesamtreserven (Folie 1, Diagramm links unten) macht nochmals deutlich, daß dieses Problem weder mit dem als relativ umweltfreundlich erachteten Erdgas noch mit der CO₂-neutralen Nukleartechnik gelöst werden kann. Auf ein weiteres, eher politisches Problem unserer heutigen Energieversorgung macht die Darstellung der regionalen Verteilung der Ölreserven aufmerksam (Folie 1, Diagramm rechts unten). Fast drei Viertel der bekannten Ölreserven befinden sich in Regionen der OPEC. Die in der OECD organisierten starken Volkswirtschaften (Nordamerika, EU, Japan, Korea, Australien u.a.) verfügen dagegen nur über einen Anteil von 10 %, der schon in etwa 15 Jahren versiegen wird.

¹⁾ Begleitprogramm zur „250 MW Wind“ Fördermaßnahme des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie



Datenquellen: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
Energy Information Administration (USA)

G. Czisch, B. Hahn, 17.05.1999



Folie 2: Entwicklung des Weltenergieverbrauchs mit Prognose

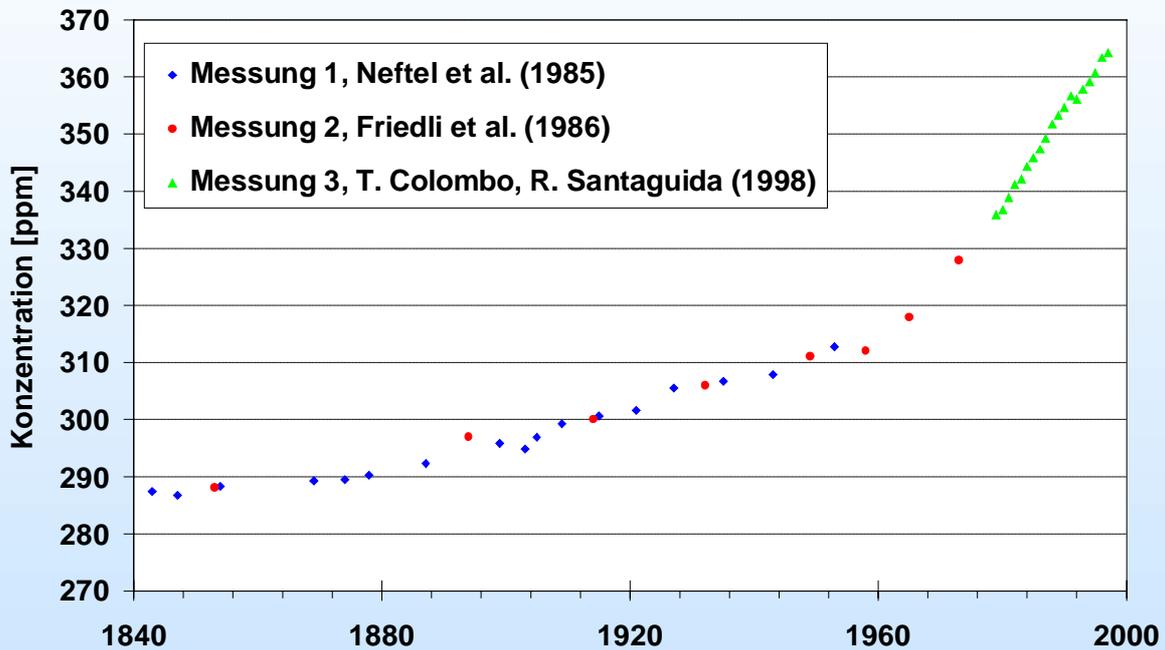
Alle bisherigen Aussagen beruhen auf der Annahme, der Energiebedarf könnte auf dem Stand von 1997 eingefroren werden. Aufgrund der wirtschaftlichen Entwicklung einiger bislang wirtschaftlich „unterentwickelter“ Länder, und aufgrund des weltweiten Bevölkerungswachstums gehen allerdings alle Zukunftsszenarien von einem weiteren Wachstum des Energieverbrauchs aus (Folie 2,). Das verkürzt die anzunehmende Reichweite der Energiereserven noch einmal drastisch. Dies soll hier jedoch nicht näher betrachtet werden, ebenso wenig wie mögliche technische Entwicklungen, die Förderung und Verarbeitung der zusätzlich zu den bekannten Reserven Teile der Ressourcen wirtschaftlich machen könnten.

CO₂- und Schadstoffausstoß, Temperaturerhöhung

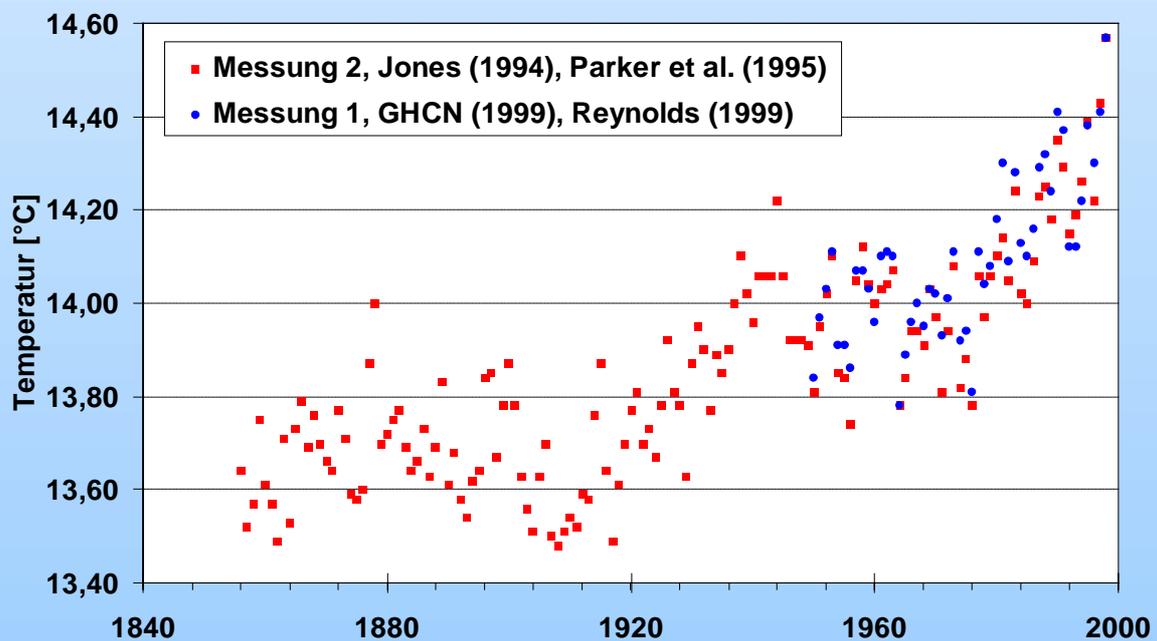
Als Folgen der Verbrennung fossiler Energieträger werden verschiedene Schadstoffe in der Atmosphäre freigesetzt. Besonders dem Verbrennungsprodukt CO₂ als sogenanntem Treibhausgas wird die Verursachung der weltweiten Temperaturerhöhung angelastet. Die beiden Diagramme auf Folie 3 zeigen, wie sich seit Beginn der Nutzung fossiler Brennstoffe die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre und die durchschnittliche weltweite Temperatur erhöht haben.

Neben dem Verbrennungsprodukt CO₂ werden allerdings noch einige weitere Schadstoffe freigesetzt. Dieser Mix verursacht seit Jahren Spuren in der Natur, die in der Form des Waldsterbens für jedermann deutlich sichtbar geworden sind. Die dramatische Entwicklung in den hessischen Baumbeständen zeigt Folie 4.

CO₂ - Konzentration in der Atmosphäre



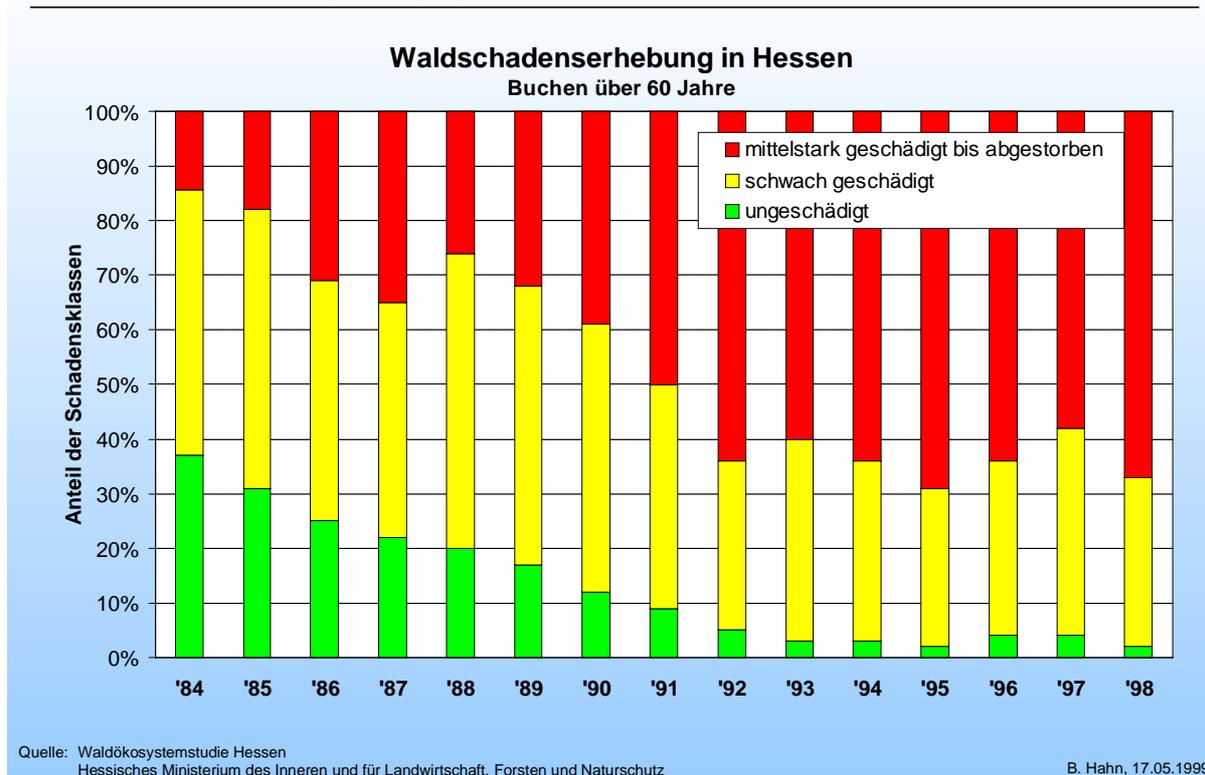
Entwicklung der Weltmitteltemperatur



Datenquelle: Institut für Meteorologie und Geophysik
 Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt/M.

B. Hahn, 18.05.1999

Folie 3: Anstieg von CO₂-Konzentration in der Atmosphäre und weltweiter Durchschnittstemperatur



Folie 4: Entwicklung der Walschäden in Hessen

Da andere Energieträger in ausreichendem Maße zur Verfügung stehen, ist es eigentlich nicht notwendig, die existierende Energieversorgung in der bestehenden Form beizubehalten. Neben enormen Einsparpotentialen in einigen Bereichen des Verbrauchs bieten sich die erneuerbaren Energieträger zur Verbesserung der problematischen Situation an.

Windenergie in Deutschland

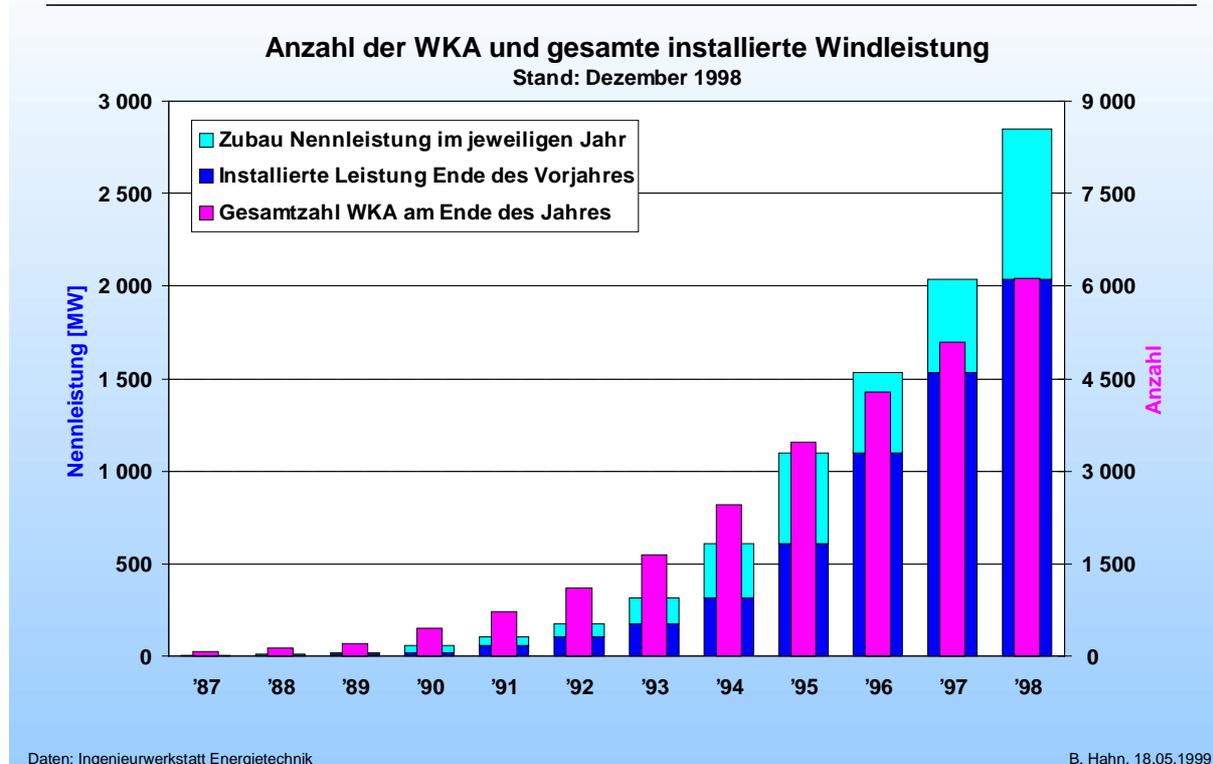
Im Bereich der Produktion elektrischer Energie ist die Windenergie nach der Wasserkraft diejenige unter den erneuerbaren Energieträgern, die in Mitteleuropa die niedrigsten Stromgestehungskosten erreichen läßt. Folgerichtig wurde die Windenergienutzung in Deutschland in den neunziger Jahren durch mehrere Maßnahmen unterstützt.

- Seit 1989 fördert die „250 MW Wind“ - Maßnahme des Ministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) jede produzierte Kilowattstunde der in dieser Maßnahme berücksichtigten Windkraftanlage (WKA) mit DM 0,06 zusätzlich zur Einspeisevergütung.
- Anfang 1991 trat das Stromeinspeisungsgesetz in Kraft, das jeder WKA eine Mindesteinspeisevergütung garantiert, die sich am Endverbraucherpreis für Strom orientiert.
- Zusätzlich zu diesen beiden besonders wirksamen Maßnahmen fördern bzw. förderten einige Bundesländer die Errichtung von WKA mit Investitionskostenzuschüssen.

All diese Maßnahmen ermöglichten zusammen mit der sich rapide entwickelnden Anlagentechnik einen enormen Aufschwund der Windenergienutzung in Deutschland. Diese Entwicklung wird vom Institut für Solare Energieversorgungstechnik (ISET) mit dem Wissenschaftlichen Meß- und Evaluierungsprogramm (WMEP), das vom BMWi als Begleitmaßnahme zur o. g. „250 MW Wind“ Förderung finanziert wird, intensiv beobachtet. Daten und andere Grundlagen für die folgenden Darstellungen wurden im Rahmen dieses Programms erarbeitet bzw. zusammengetragen. Die Ergebnisse des WMEP werden in den regelmäßigen Jahresauswertungen und im Internet (<http://www.iset.uni-kassel.de:888>) veröffentlicht.

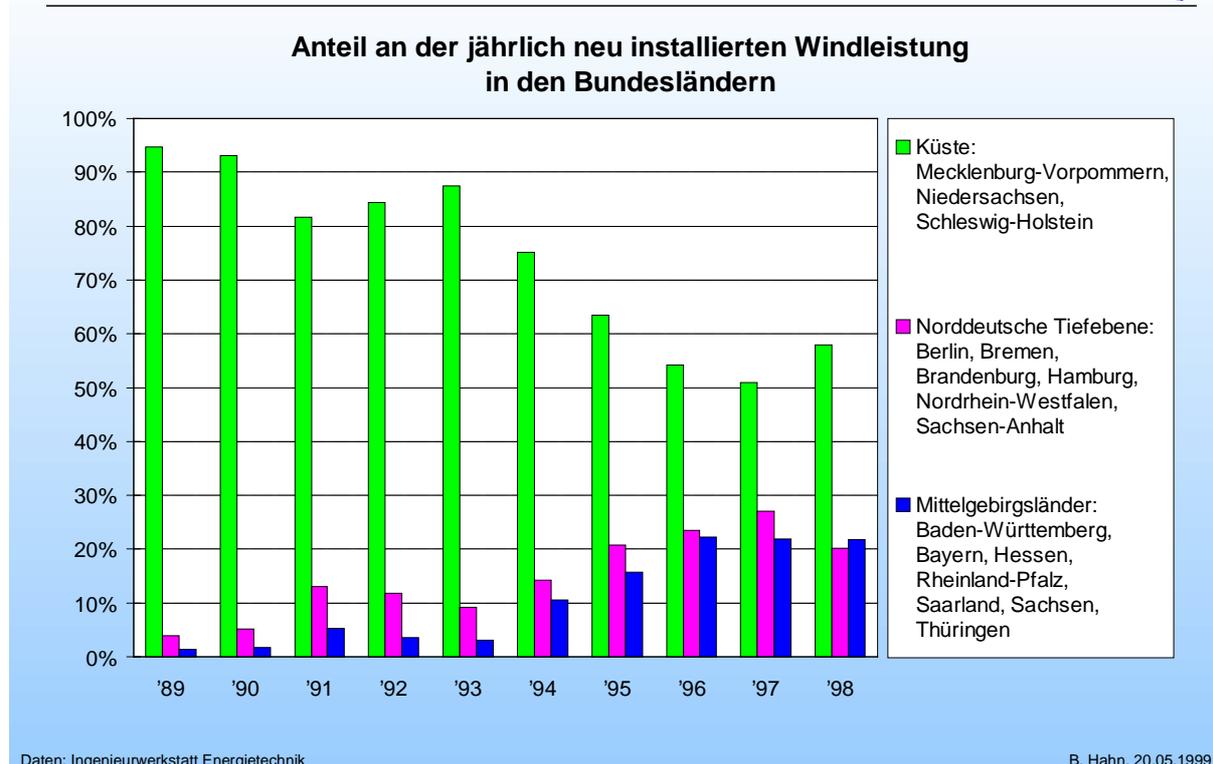
Seit Anfang der neunziger Jahre wird die Windenergienutzung in Deutschland mit großen Wachstumsraten gesteigert (Folie 5). Ende 1998 waren rund 6.000 WKA mit einer maximalen Leistung von zusammen fast 2.900 MW in Betrieb.

Wissenschaftliches Meß- und Evaluierungsprogramm (WMEP) zur "250 MW Wind" Fördermaßnahme des BMWi



Folie 5: Entwicklung der Windenergienutzung in Deutschland

Wissenschaftliches Meß- und Evaluierungsprogramm (WMEP) zur "250 MW Wind" Fördermaßnahme des BMWi



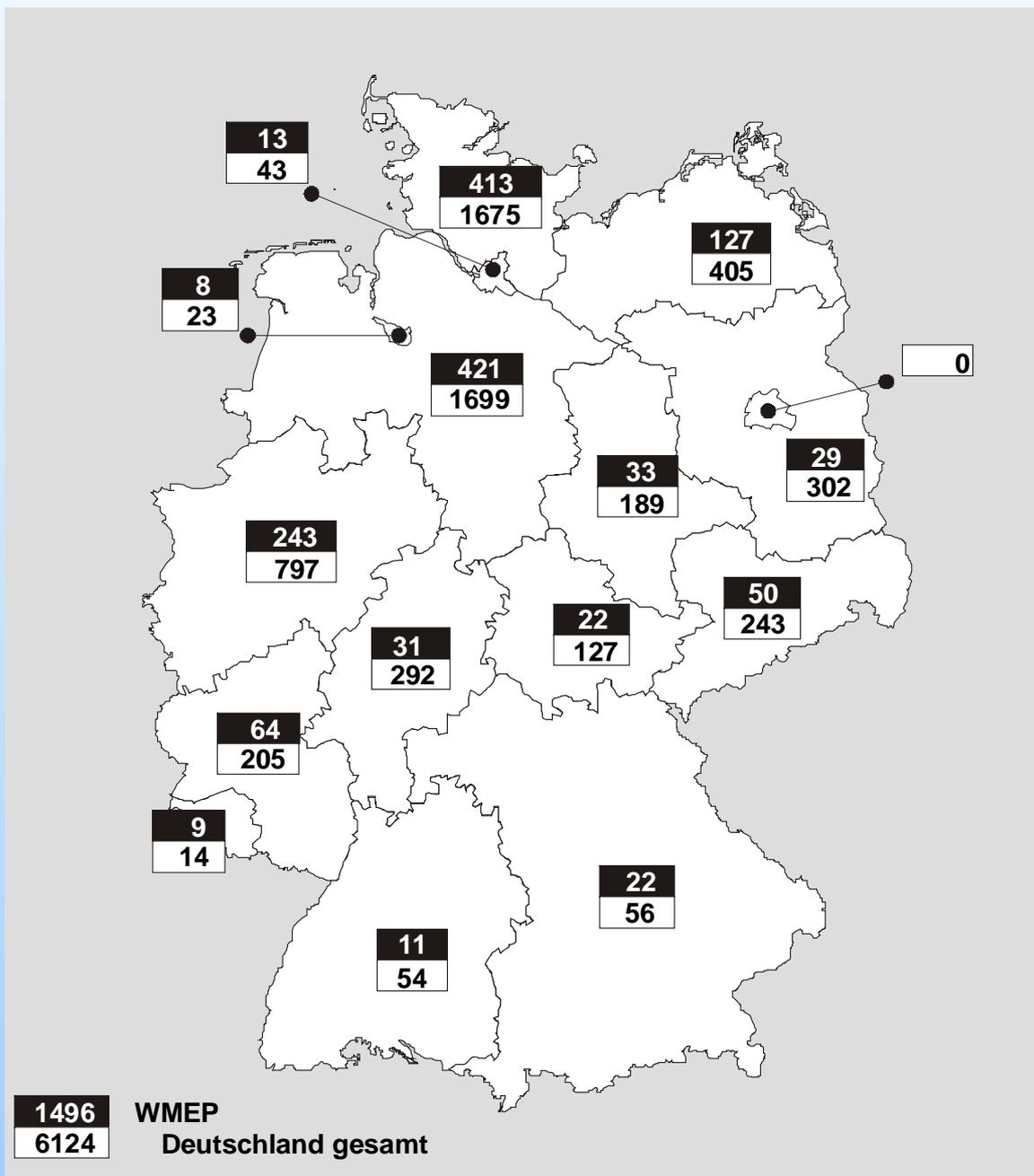
Folie 6: Zunehmender Anteil der Windinstallationen im Binnenland

Aufgrund der gegebenen Windverhältnisse begann die Windenergienutzung in den nördlichen Bundesländern. In den letzten Jahren wurde sie aber auch in den weiter im Binnenland gelegenen Bundesländern immer stärker ausgeweitet (Folie 6). Folie 7 zeigt die regionale Verteilung der installierten WKA in Deutschland.

Wissenschaftliches Meß- und Evaluierungsprogramm (WMEP)
zur "250 MW Wind" Fördermaßnahme des BMWi



Anzahl der in den Bundesländern installierten Windkraftanlagen Ende 1998



Daten: Ingenieurwerkstatt Energietechnik
Institut für Solare Energieversorgungstechnik

B. Hahn, 21.05.1999

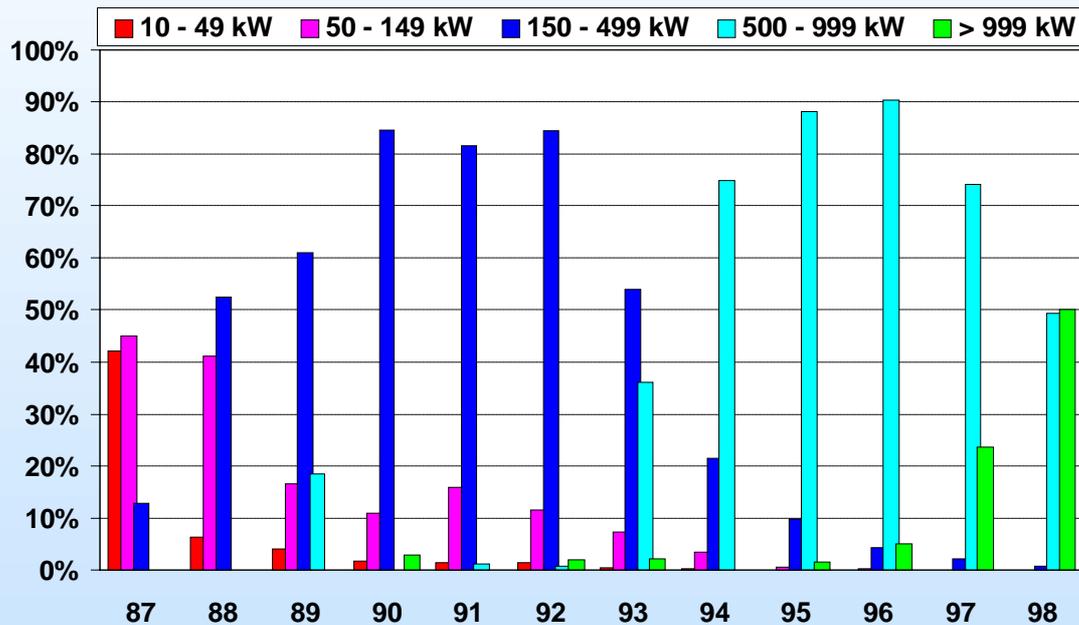
Entwicklung der Windkraftanlagentechnik

Im Zuge des rapiden Ausbaus der Windenergienutzung fand auch eine intensive technische Weiterentwicklung der Windkraftanlagentechnik statt. Diese äußert sich in einer stetigen Anlagenvergrößerung, einer steigenden Effizienz und gleichzeitiger Kostenreduktion (Folie 8).

Wissenschaftliches Meß- und Evaluierungsprogramm (WMEP)
zur "250 MW Wind" Fördermaßnahme des BMWi



Anteil der Leistungsklassen an der neu installierten WKA-Leistung



Konzentration auf weniger Konstruktionsprinzipien

	bis 1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998
Anzahl ausgewerteter WKA	132	70	244	272	380	547	808	1017	811	810	1032
Blattzahl											
2-Blatt	40%	20%	12%	16%	9%	8%	6%	2%	2%	0%	0%
3-Blatt	58%	76%	87%	82%	90%	91%	93%	98%	98%	100%	100%
4-Blatt	2%	0%	1%	2%	1%	1%	0%	0%	0%	0%	0%
Rotorposition											
lee	7%	19%	7%	6%	4%	2%	1%	0%	0%	0%	0%
luv	93%	81%	93%	94%	96%	98%	99%	100%	100%	100%	100%
Leistungsregelung											
stall	52%	39%	50%	57%	62%	65%	57%	55%	54%	44%	39%
pitch	48%	60%	50%	43%	38%	35%	43%	45%	46%	56%	61%
Generatorbauart											
asynchron	64%	49%	74%	71%	71%	82%	75%	68%	68%	59%	63%
synchron	36%	51%	26%	29%	29%	18%	25%	32%	32%	41%	37%
Drehzahlverhalten											
konstant/gestuft	56%	34%	64%	65%	66%	77%	71%	66%	67%	57%	54%
variabel	44%	66%	36%	35%	34%	23%	29%	34%	33%	43%	46%

Daten: Ingenieurwerkstatt Energietechnik
Institut für Solare Energieversorgungstechnik

B. Hahn, 21.05.1999

Folie 8: Größere Anlagen mit luvseitig montierten 3-Blattrotoren erobern den Markt

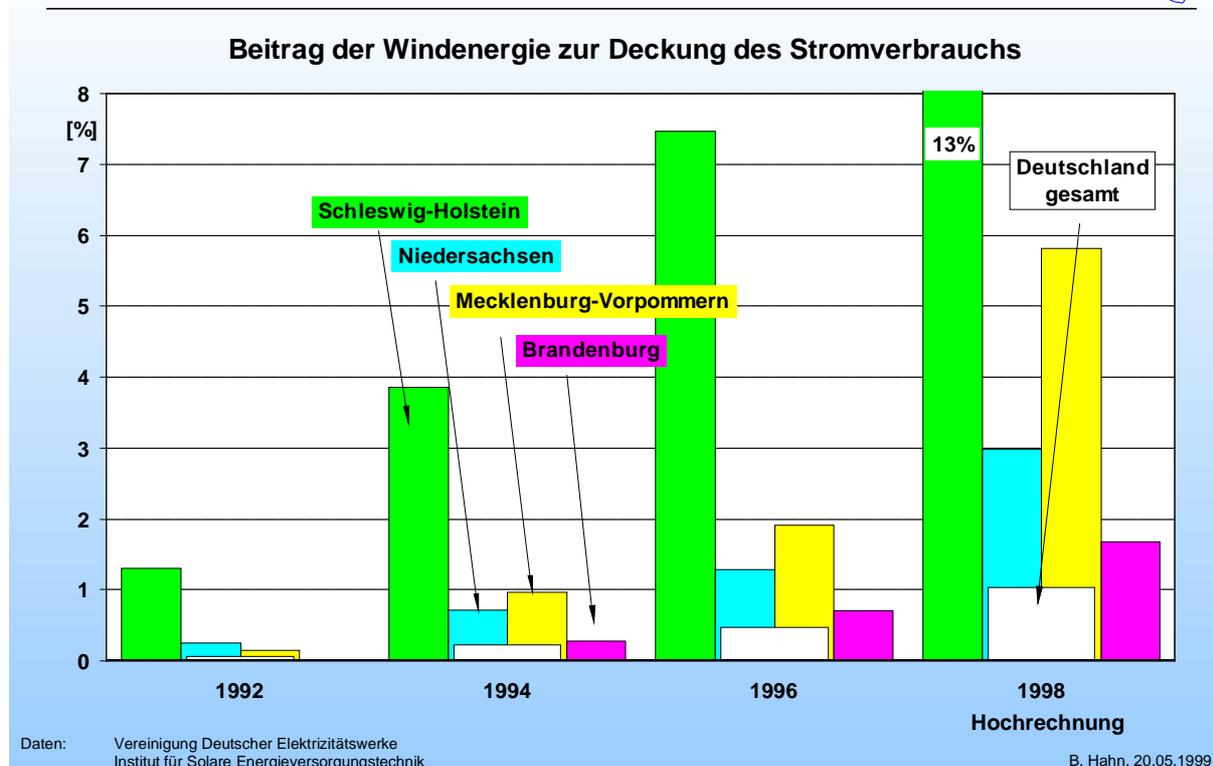
Die in den letzten Jahren aufkommenden WKA mit Nennleistungen über 1000 kW finden auch in den Mittelgebirgen viele Käufer. Die dort oft sehr kleinen zusammenhängenden Flächen, die für die Windenergienutzung geeignet sind, aber nur für wenige oder sogar nur einzelne Anlagen Platz bieten, können mit diesen Maschinen besser ausgenutzt werden. Da diese sehr großen Anlagen allerdings spezifisch (bezogen auf die jeweilige Rotorfläche oder die zu erwartende Jahresenergielieferung) zur Zeit noch nicht oder noch nicht viel preiswerter sind als die Vorläufer mit rund 600 kW, bleibt es abzuwarten, ob diese beiden Anlagengrößen längere Zeit nebeneinander existieren, oder ob die MW-Anlagen ihre Vorläufer ebenso schnell ablösen wie diese seinerzeit die WKA mit 150 bis 500 kW abgelöst hatten.

Im Laufe der Entwicklung setzten sich nur wenige Konstruktionsprinzipien durch. Zweiblattrotoren, wie sie früher relativ häufig eingesetzt wurden, sind zuletzt völlig vom Markt verschwunden. In 1998 wurden praktisch ausschließlich 3-Blattrotoren eingesetzt, die - aus Windrichtung gesehen - vor dem Anlagenturm positioniert sind. Weniger Übereinstimmung besteht über das beste Konstruktionsprinzip in Bezug auf die WKA-Regelung. Nach wie vor werden viele Anlagen mit fester oder gestufter Rotordrehzahl und einer Leistungsbegrenzung durch Strömungsabriß bei hohen Windgeschwindigkeiten (Stall-Effekt) gebaut. Diese Anlagen sind dann in der Regel mit Asynchrongeneratoren ausgerüstet. Davon grenzt sich ein technisch eleganteres, aber auch aufwendigeres System ab, bei dem der Rotor seine Drehzahl in weiten Bereichen den aktuellen Windgeschwindigkeiten anpassen kann und die Rotorblätter bei hohen Windgeschwindigkeiten zur Leistungsbegrenzung verdreht werden können (Pitch-Regelung) (Folie 8).

Energielieferung durch Windkraftanlagen

Die von WKA jährlich eingespeiste Menge elektrischer Energie konnte parallel zum Ausbau der installierten Leistung ebenfalls drastisch gesteigert werden. Besonders interessant ist dabei, welchen Beitrag die Windenergie zur Deckung des Stromverbrauchs erbringen kann. Abhängig vom Windangebot und vom elektrischen Energieverbrauch in den verschiedenen Regionen erreicht dieser Beitrag teilweise schon beachtliche Werte.

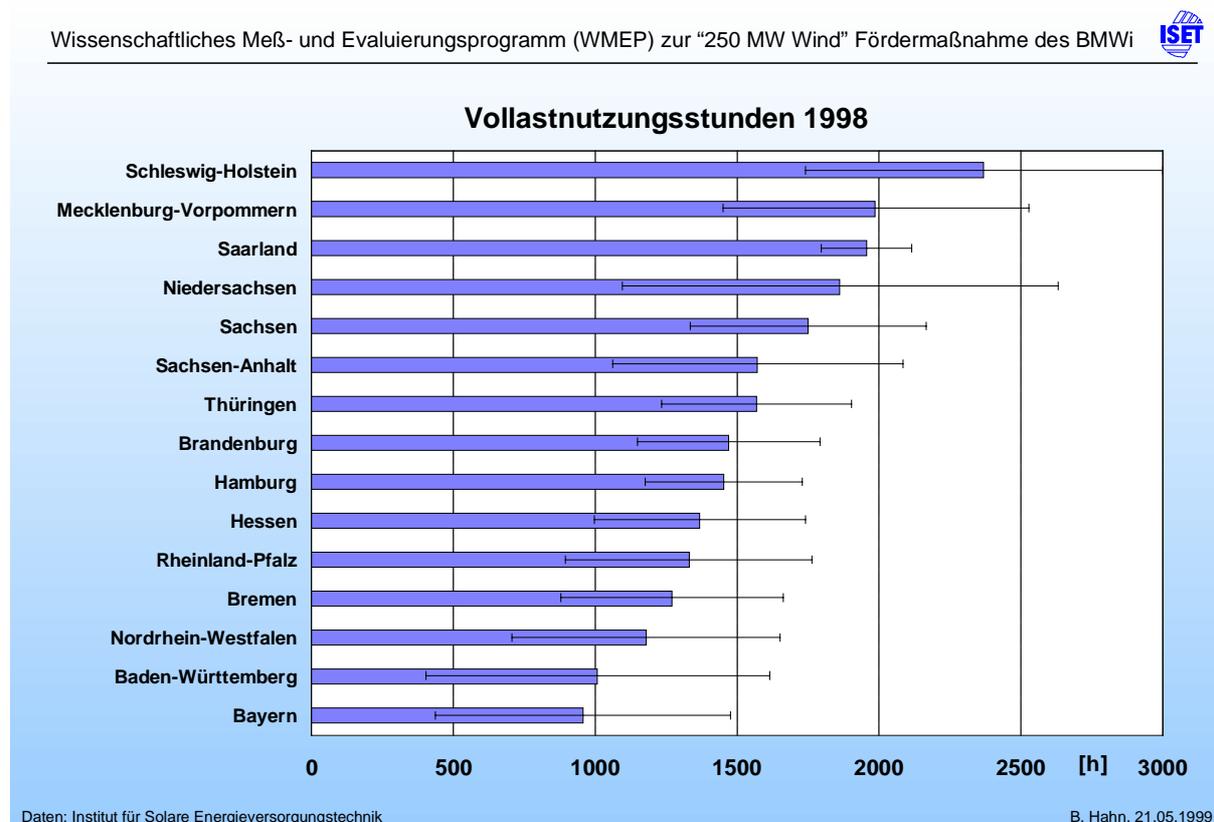
Wissenschaftliches Meß- und Evaluierungsprogramm (WMEP) zur "250 MW Wind" Fördermaßnahme des BMWi



Folie 9: Der Deckungsbeitrag der Windenergie zum Stromverbrauch beträgt teilweise schon deutlich mehr 10%

Allerdings ist das Windangebot in den Bundesländern sehr unterschiedlich. Immerhin können gute Mittelgebirgsstandorte mehr als 60% der Energielieferung guter Küstenstandorte erbringen. Die

besonders günstig positionierten WKA im Saarland, die in das WMEP aufgenommen wurden, zeigen das deutlich. Durchschnittlich liegt das nutzbare Windangebot der Standorte im Süden Deutschlands bei rund 50% des Angebots an der Küste (Folie 10).



Folie 10: Die besten WKA-Standorte in Baden-Württemberg können mit denen in Hamburg, Hessen oder Bremen verglichen werden

Zuverlässigkeit von Windkraftanlagen

Die im WMEP beobachteten WKA erreichen eine technische Verfügbarkeit von 98% bis 99%. Das bedeutet, daß eine durchschnittliche Anlage jährlich für Wartungs- und Instandsetzungsarbeiten 4 bis 7 Tage stillgesetzt wird. In der restlichen Zeit speist sie, insofern ausreichend Wind weht, Strom in die Versorgungsnetze ein (Folie 11).

Angesichts der enormen Laufzeiten, die die WKA - vollautomatisch und fast ohne Betriebspersonal - erreichen, sind gelegentliche Schadenfälle nicht auszuschließen. Folie 12 zeigt, daß elektrische Komponenten häufiger durch Schäden betroffen sind als mechanische Komponenten.

Trotz der bisherigen technischen Entwicklung und der Erfolge beim Ausbau der Windenergienutzung ist festzustellen, daß die eingesetzte Technik noch nicht endgültig ausgereift ist. Eine Untersuchung der Ausfallraten der WKA im WMEP im Laufe der jeweiligen Betriebszeit ergibt, daß die einzelnen Anlagen mit zunehmender Betriebsdauer - zumindest in den ersten Jahren - zuverlässiger werden. Startschwierigkeiten und Kinderkrankheiten schleichen sich offenbar auch bei den modernen Konstruktionen immer noch ein. In Folie 13 ist für zwei verschiedene Größenklassen die Entwicklung von Schadenshäufigkeit und Betriebskosten dargestellt. Die spezifischen Kosten der größeren Anlagen liegen dabei weit unterhalb der älteren, kleineren Anlagen. Geschäftsführungskosten und Steuern sind bei dieser Darstellung ausgeklammert.

Technische Verfügbarkeit der WKA 1998

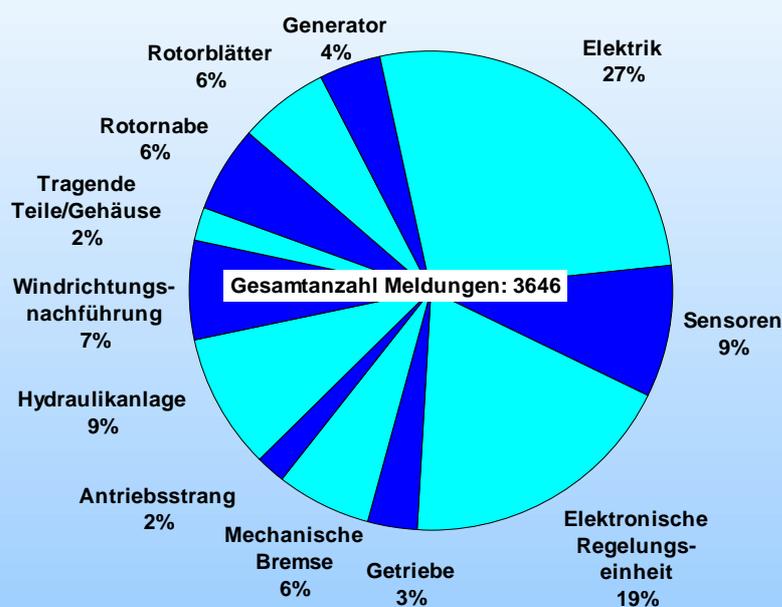
Anlagenalter [Jahre]	WKA-Anzahl im WMEP	WKA-Anzahl mit Bericht	Summe Stillstandzeiten in 1998 [h]	Summe Nennzeiten in 1998 [h]	Technische Verfügbarkeit in 1998	Mittlere Nichtverfügbarkeit pro WKA [h]
1	6	6	1.174	39.648	97,0%	196
2	10	9	1.594	78.840	98,0%	177
3	48	47	4.023	411.720	99,0%	86
4	142	141	13.339	1.235.160	98,9%	95
5	266	263	20.930	2.303.880	99,1%	80
6	312	308	32.793	2.698.080	98,8%	106
7	292	281	32.433	2.461.560	98,7%	115
8	233	223	38.037	1.953.480	98,1%	171
9	172	159	19.387	1.392.840	98,6%	122
10	15	15	1.071	131.400	99,2%	71
Summe	1.496	1.452	164.780	12.706.608	98,7%	113

Daten: Institut für Solare Energieversorgungstechnik

B. Hahn, 21.05.1999

Folie 11: Durchschnittlich weniger als 5 Tage standen die WKA 1998 für Wartung und Instandsetzung still

Anteil der Komponenten an Wartungs- und Reparaturmaßnahmen 1998

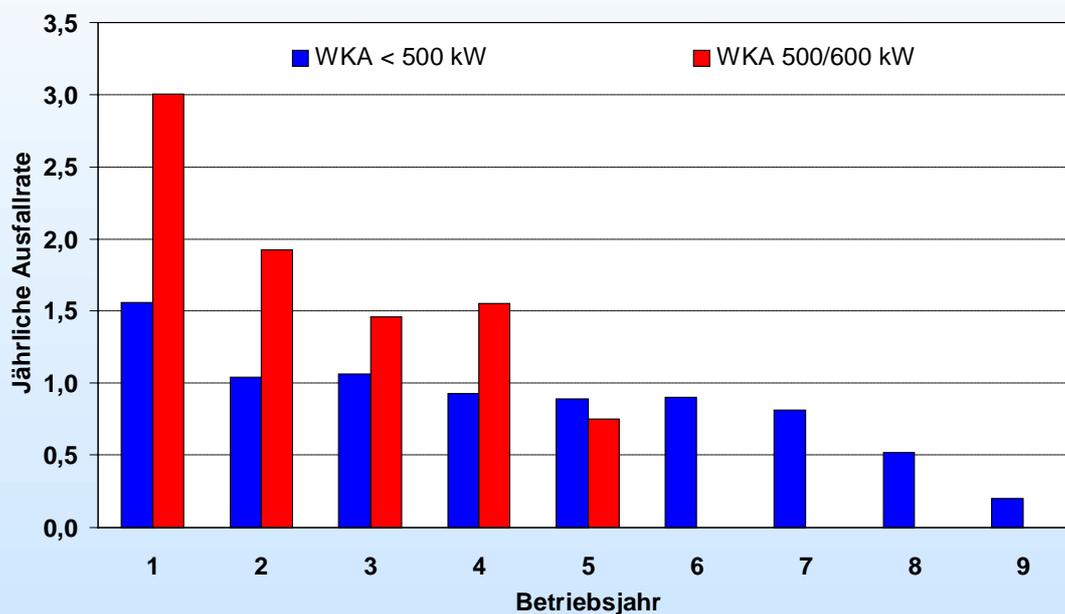


Daten: Institut für Solare Energieversorgungstechnik

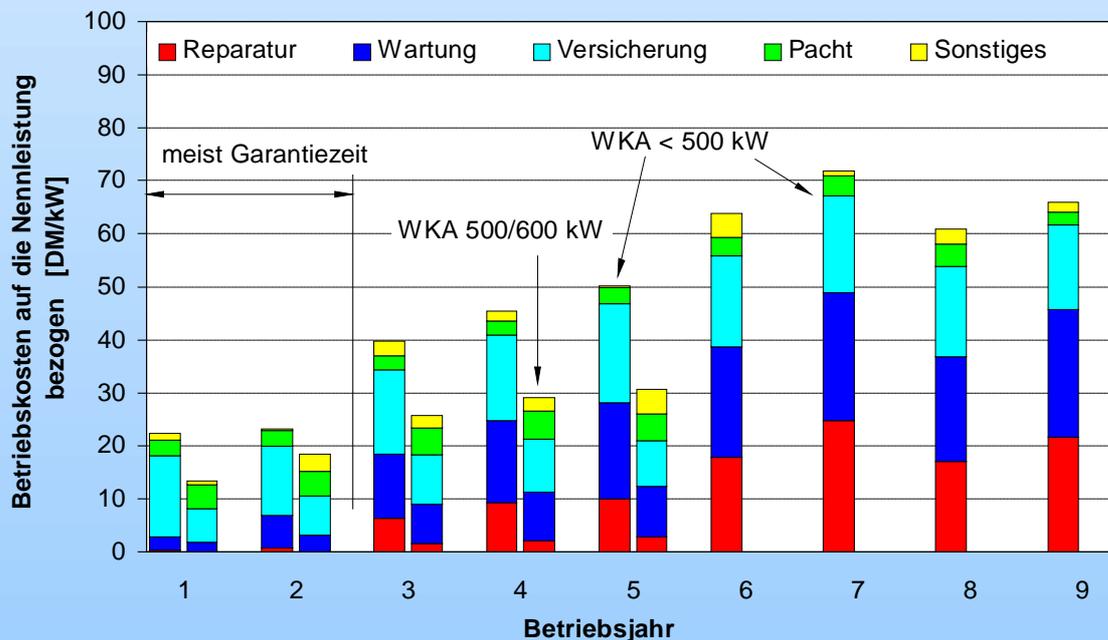
B. Hahn, 21.05.1999

Folie 12: Über die Hälfte der Wartungs- und Instandsetzungsmaßnahmen entfielen 1998 auf die elektrischen Komponenten

Schadenshäufigkeit



Betriebskosten



Daten: Institut für Solare Energieversorgungstechnik

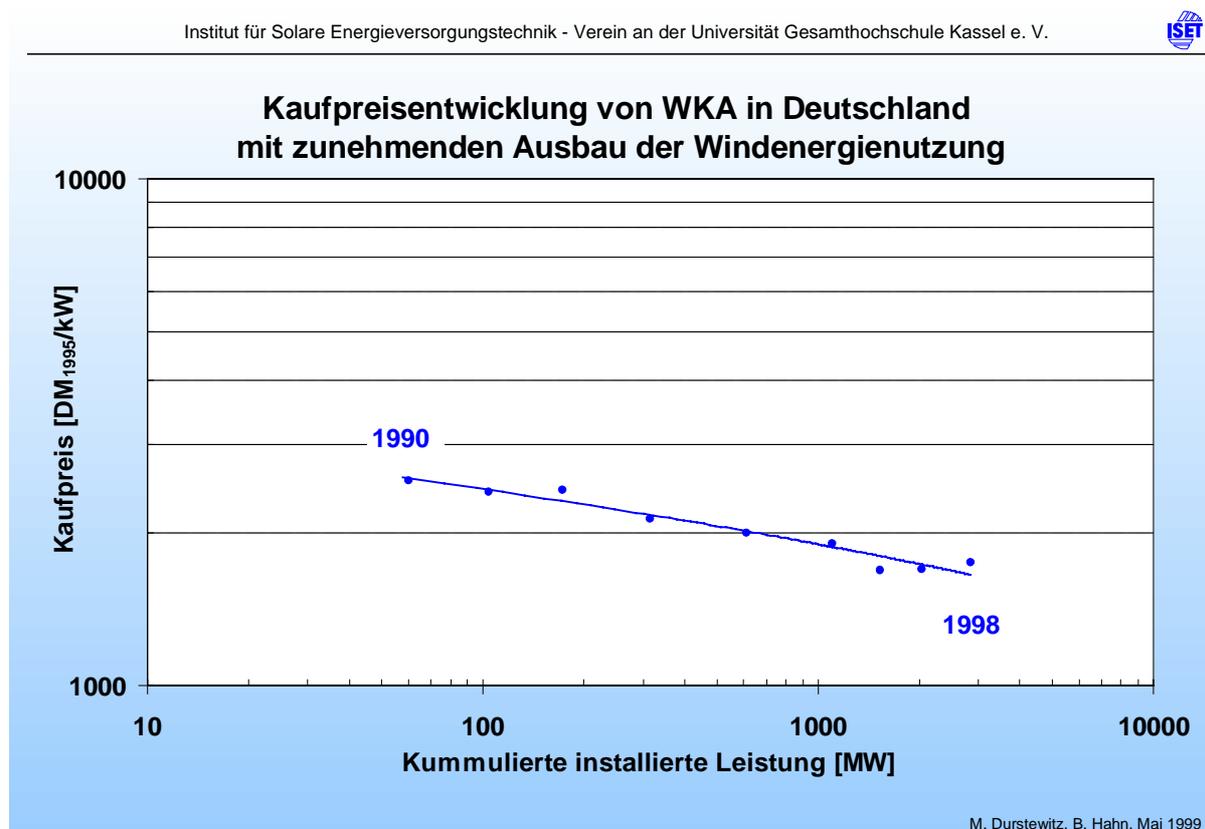
B. Hahn, 21.05.1999

Folie 13: Kinderkrankheiten und Anfangsschwierigkeiten sorgen in den ersten Betriebsjahren für erhöhte Ausfallraten. Nach Ablauf der - je nach Hersteller unterschiedlich langen - Garantiezeit pendeln sich die Betriebskosten ein. (Ohne Geschäftsführungskosten und Steuern)

Die Vergangenheit zeigt also eine stetige Entwicklung der Windenergienutzung und eine ständige Verbesserung der Anlagentechnik. Dies führte dazu, daß Windkraftanlagen heute eine sehr zuverlässige Technik zur Nutzung erneuerbarer Energien bieten.

Kostenentwicklung der Windenergienutzung

Die Gestehungskosten für Windstrom werden im wesentlichen durch die anfänglichen Investitionskosten geprägt. Diese wiederum resultieren zu rund drei Vierteln aus dem Kaufpreis der Anlage und zu einem weiteren Viertel aus Investitionsnebenkosten, z. B. Fundamentierung, Netzanbindung, Planungs- und Vorbereitungskosten. Die Kostenreduktion technischer Systeme, die auf der Verbesserung der Technik und auf der Ausweitung der Produktion beruht, kann mit Hilfe einer sogenannten Lernkurve dargestellt werden (Folie 14).



Folie 14: Je Verdopplung der insgesamt in Deutschland installierten Windleistung sanken die WKA-Kaufpreise um 8%.

Es wird deutlich, wie stark die Preise, und damit die Stromgestehungskosten aus Windenergie, in den letzten Jahren gesunken sind (seit 1990 um 30%), und es ist zu erwarten, daß sie mit dem zukünftigen Ausbau der Windenergienutzung auch weiter sinken werden.

Schlußfolgerungen

Sowohl die weltweite als auch die nationale derzeitige Energieversorgung werden langfristig zu nicht unerheblichen Problemen führen. Die Ressourcenverknappung läßt Verteilungsprobleme erwarten, die Schadstoffbelastung sorgt heute schon für erhebliche Waldschäden und aufgrund des CO₂-Ausstosses steigen die Temperaturen weltweit immer schneller an. Die vorhandenen Potentiale der erneuerbaren Energieträger bieten mittel- bis langfristig eine wichtige Alternative.

Eine wirkungsvolle Strategie für eine zukünftige Gestaltung der Energieversorgung muß gleichzeitig die wirtschaftlichen Möglichkeiten als auch den zwingend erforderlichen Klima- und Ressourcenschutz stärker beachten. Frühzeitige Investitionen in Energieeinsparung und erneuerbare Energien machen sich

langfristig bezahlt, da sie einerseits das Ressourcen- und Klimaproblem zu entschärfen helfen, und weil sie den neuen Techniken die notwendige Entwicklungszeit lassen.

Die Nutzung der Windenergie gehört sicher zu denjenigen Techniken, die zukünftig einen wichtigen Beitrag zur Energieversorgung leisten können. Abgesehen von der ohnehin schon oft sehr kostengünstigen Wasserkraftnutzung kommt die Windenergienutzung unter den erneuerbaren Energien der Wirtschaftlichkeit heute am nächsten und ist technisch bereits weit ausgereift.

In Deutschland hat die Windenergienutzung bereits in den meisten Regionen begonnen. Viele Anlagen werden in Deutschland bereits ohne staatliche Förderung gebaut, allerdings ist in den weniger exponierten Lagen der Mittelgebirge eine wirtschaftliche Windenergienutzung ohne staatliche Förderung oft noch nicht möglich. Damit die Windenergie zu einem wirklichen Standbein der Energieversorgung werden und die deutsche Windkraftanlagentechnik noch bessere Exporterfolge erzielen kann, ist eine fortgesetzte Unterstützung notwendig. Diese Unterstützung muß weiterhin auf finanzieller Ebene erfolgen, muß aber gleichzeitig auch in der Schaffung bzw. Wahrung der notwendigen energie- und planungsrechtlichen Rahmenbedingungen bestehen.