

Kostenreduktionspotenziale bei der Herstellung von PV-Modulen

Prof. P. Woditsch
Deutsche Solar GmbH
Rheinuferstr. 7-9
D-47829
Krefeld-Uerdingen
peter.woditsch.pw@bayer-ag.de

Erneuerbare Energien sind heute zur Sicherung der zukünftigen Energieversorgung nicht mehr umstritten. Studien von Shell oder BP haben zum Ergebnis, dass man bereits Mitte dieses Jahrhunderts mehr als 30% der Energie aus nachhaltigen Quellen decken muss. Die Nutzung der Sonnenenergie in unterschiedlichen Erscheinungsformen steht dabei im Vordergrund (Abb. 1).

in das Netz einspeisenden PV-Anlagen trugen aufgrund von staatlichen Fördermitteln das Wachstum in den letzten Jahren. Ausgelöst durch Demonstrationsanlagen und das erste 1.000-Dächerprogramm der Bundesregierung Anfang der 90er Jahre konnten PV-Systeme ihre Zuverlässigkeit zeigen. Insbesondere Module auf Basis von mono- und multikristallinem Silicium haben ihre Langzeitstabilität nachgewiesen (Abb. 3). Ausgehend von Reinstsilicium werden durch Kristallisation und Drahtsägen Siliciumscheiben, sogenannte Wafer, gefertigt. Daraus fertigt man Solarzellen, die zu Modulen verschaltet werden.

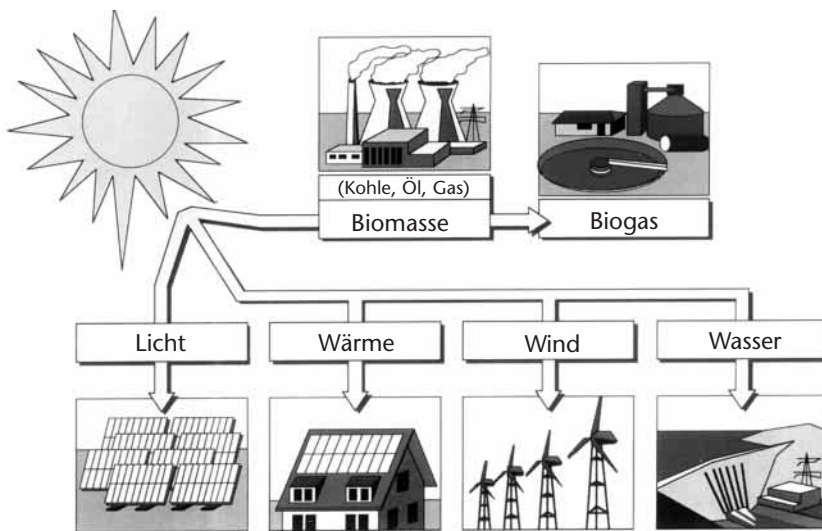


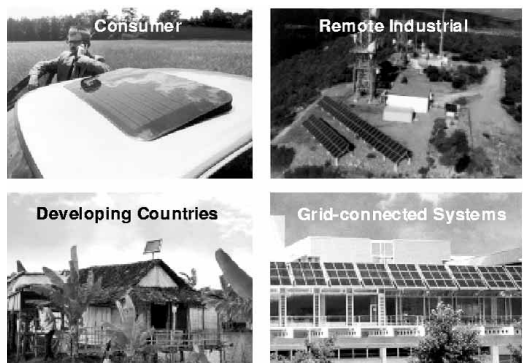
Abbildung 1
Erneuerbare
Energiequelle

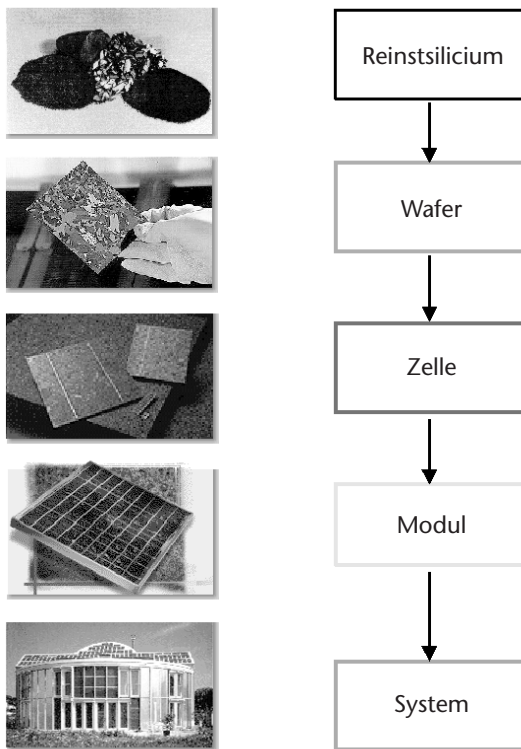
Biomasse, Wasser, Wind und Wärmekollektoren kommen dabei ebenso in Betracht wie die Photovoltaik (PV), die es erlaubt, direkt Licht in Strom umzuwandeln. Die Elektrizitätsversorgung erhält damit in netzfernen Gebieten neue Impulse.

Abbildung 2 →
Die 4 hauptsächlichen
Marktsegmente:
Konsumbereich,
Entwicklungsländer,
Stromversorgung im
Inselbetrieb,
netzgekoppelte
Anlagen

Seit Mitte der 70er Jahre wurde die Photovoltaik (PV) ständig weiterentwickelt und in den meisten Industrieländern breit gefördert. Das Wachstum erreichte seit Anfang der 80er Jahre im Durchschnitt 15%, was einer Verdopplung nach jeweils 5 Jahren entspricht. Die Märkte (Abb. 2) lassen sich in 4 Kategorien einteilen: Konsumbereich, industrielle Stromversorgung in entlegenen Gebieten, Entwicklungsländer ohne Netzinfrastruktur und die Systeme, die das Netz als Speicher nutzen. Insbesondere die

Die PV-Module sind die Stromlieferanten für die verschiedensten Systeme, vom Satelliten bis zur 1 MW Anlage in Herne oder in München auf den Dächern der Messehallen. Ein Problem der Photovoltaik sind die heute noch hohen Kosten, die wiederum pro erzeugte Kilowattstunde stark vom Standort einer solchen Anlage abhängen. In unseren Breiten liefern Solarmodule mit einer installierten Leistung von 1 W_p nur etwa 0,75 KWh, in Bereichen maximaler Sonneneinstrahlung mehr als das Doppelte. Eine Solarzelle von 10 x 10 cm und einem Wirkungsgrad von 13,5% ergibt damit einen Jahresertrag von 1 KWh bei Kosten von ca. 1,75 DM pro KWh. Wettbewerbsfähig ist der PV-Strom überall da, wo er mit Batterien oder kleinen Dieselaggregaten in Konkurrenz steht bzw. bewegliche





Einrichtungen, mit Strom zu versorgen sind. Das Kostenreduktionspotential war daher von Anfang an Gegenstand von Studien. Eine der ersten umfangreichen Kostenanalysen erfolgte durch das Bölkow-Systemhaus (Abb. 4) und wurde u.a. 1988 in der Zeitschrift Bild der Wissenschaft einem breiten Publikum zugänglich gemacht.

Für eine durchgehende Fertigung bis zum Kraftwerk ergeben sich dabei Gesamtkosten von 6,90 DM pro W_p installiert. Beim Solargenerator werden 4,57 DM pro W_p Herstellungskosten erwartet. Diese Studie wird durch eine Ausarbeitung von AD. Little, die auf der europäischen PV-Konferenz in Glasgow Anfang des Jahres 2000 vorgestellt wurde (Abb. 5), weitgehend bestätigt. Überraschend war das Ergebnis der ADL-Studie, dass Dünnschichtzellen in nächster Zeit zu keiner deutlichen Kostenreduktion führen. Und auch in der Bewertung der Zukunftsperspektiven wird ein

Abbildung 3 ←
Herstellungsprozess

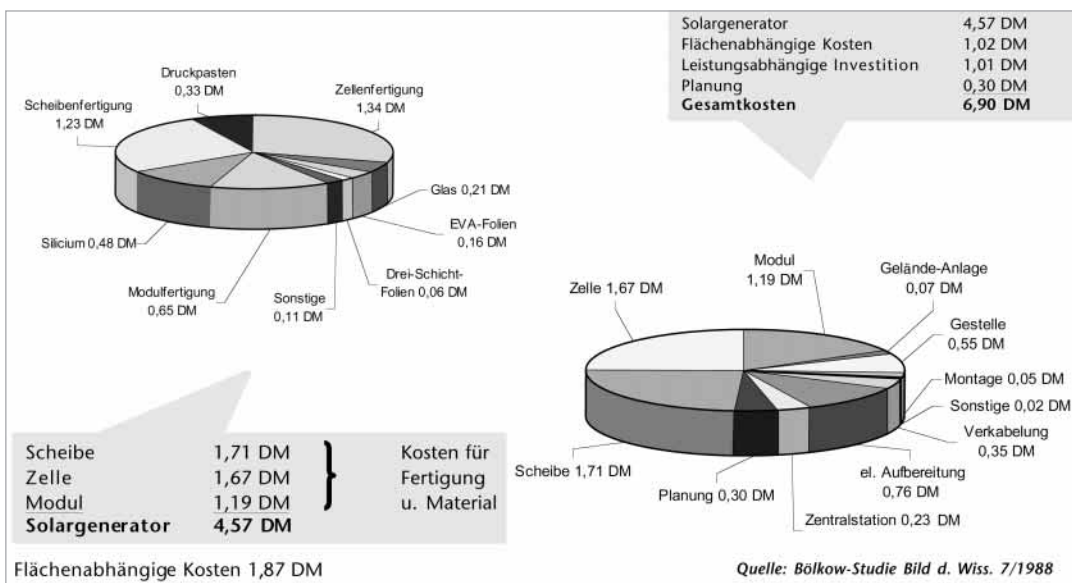


Abbildung 4
Kostenanalyse für
Photovoltaikkraftwerke
(Prognose für
35 MW Fertigung)

in DM/Wp	monokristallin	multikristallin	amorph	multikrist. (Bölkow) ²⁾
Wafer	2,00	1,64	0,64	1,71
Zelle	0,92	0,88	2,80	1,67
Modul	1,94	1,72	1,92	1,19
	4,86	4,24	5,36	4,57

Abbildung 5
Herstellung¹⁾
für PV-Module.
(AD Little, Glasgow:
EU-PV-Konferenz,
Mai 2000)

¹⁾ohne Management, Verwaltung, Vertrieb, Stabsorganisation ohne Kapitalverzinsung

²⁾Bölkow-Studie, s. Bild d. Wiss. 7/1988

pro Wafer / US \$	A	B	C
Rohstoff	0,66	0,72	0,77
Kristall	1,16	1,38	1,56
Wafer Fertigung	0,90	1,02	1,04
	2,72	3,12	3,37
Zelle	1,20	1,29	1,35
Modul	2,40	2,53	2,60
Summe \$/Zelle	6,32	6,94	7,32
Summe \$/Wp 2,40 Wp	2,63	2,89	3,05

A günstiger Fall • C aktuelle situation Hochleistungszellen (16,5% Wirkungsgrad, 125 ps.qu. aus Ø 150 mm)

Abbildung 6
Kosten für PV Module
mit Hochleistungs-
zellen

"Kopf-an-Kopf-Rennen" erwartet. Wobei die Kosten für Dünnschichtsysteme noch schwer zu bewerten sind, da trotz 25-jähriger Forschung und Entwicklung noch keine 10 MW-Anlage im Dauerbetrieb produziert.

		1995	1997	1998	1999 ^{a)}	2000 ^{a)}	2001 ^{a)}	2002 ^{a)}	2003 ^{a)}
Jp	No.	1.065	5.654	6.352	18.126	33.000	50.000	75.000	110.000
	MWp	3,9	19,5	24,1	54	100	160	230	320
DE	No.	-	-	-	3.923	20.000	26.000	32.000	38.000
	MWp	-	-	-	10	50	65	80	95
Kosten In 2000			DE	13.500	DM/kWp	Systeme			
			Jp	18.000	DM/Wp	Systeme	(930.000 ¥/kWp)		
							100 ¥ = 1,93 DM		

^{a)} erwartet

- 1000 Dächer-Programm Germany (RPG) 1992/93, 100.000 RPG starting 2000
- 70.000 RPG Japan, Beginn 1994
- 1 Mio. RPG in der Diskussion USA
- 1 Mio. Dächer-Programm in der Diskussion: EU 0,5 MWp und Entwicklungsländer 0,5 MWp

Abbildung 7 ↑
PV-Programme für
den Wohnbereich in
Japan (Jp) und
Deutschland (DE)

Abbildung 8 →
Kosten und Preise
Photovoltaik

Standardanlage 2 kWp Netzeinspeisung	Kostenanteile Fertigungsschritte / Komponenten / etc.				
	von	in DM/Wp bis	Mittel	in %	
Silicium	0,75	0,88	0,82	10,3	6,0
Wafer	1,80	1,90	1,85	23,3	13,5
Standardzelle (Silicium)	1,75	2,20	1,98	24,9	14,5
Modul	1,30	1,90	1,60	20,2	11,7
Vertrieb	1,76	1,62	1,69	21,3	12,3
Endkundenpreis Modul Netto	7,36	8,50	7,94	100	58
Wechselrichter, Systemkosten	1,20	1,40	1,30		9,5
(Installation, Kleinteile)	2,24	2,90	2,56		18,7
Nettopreis Gesamtanlage	10,80	12,80	11,80		86,2
MwST 16%	1,73	2,05	1,89		13,8
Anlagenpreise	12,53	14,85	13,69		100

Monokristalline Siliciumsolarzellen erreichen heute im industriellen Fertigungsmaßstab bereits sichere 16,5% Wirkungsgrad und damit Modulherstellkosten (Abb. 6) von etwa 3,3 EURO pro Wp. Weitere Kostensenkungspotentiale liegen in der Automatisierung und Produktivitätsverbesserung sowie weiterer Steigerung des Wirkungsgrades, weniger in der Materialkostenreduktion, da Czochralski gezogene monokristalline Wafer kaum mehr Kostensenkungspotentiale aufweisen.

Das Wachstum der Photovoltaik wird in den letzten Jahren durch 2 große Programme (Abb. 7) getragen: das 70 Tausend-Dächerprogramm in Japan und das 100 Tausend-Dächerprogramm in Deutschland bzw. das Erneuerbare-Energien-Gesetz, das Strom in Deutschland aus PV-Anlagen mit 0,99 DM pro KWh fördert. Dabei erwartet man allein in diesen beiden Ländern im Jahr 2000 eine Nachfrage von etwa 150 MWp, was der gesamten weltweiten Produktion in 1998 entspricht. Die Marktentwicklung soll in den nächsten 3 Jahren auf über 400 MWp mehr als verdoppelt werden. Die Systemkosten pro KWp unterscheiden sich dabei aufgrund der Wechselkursveränderungen der letzten Jahre deutlich. Daraus entstehen Chancen für den Export aus Europa, wenn hier entsprechende Kapazitäten aufgebaut sind.

Die heutigen Systemkosten sind in Abb. 8 aufgeschlüsselt. Nimmt man den Anlagenpreis von 13.500 TDM pro KWp entfallen 13,8% auf

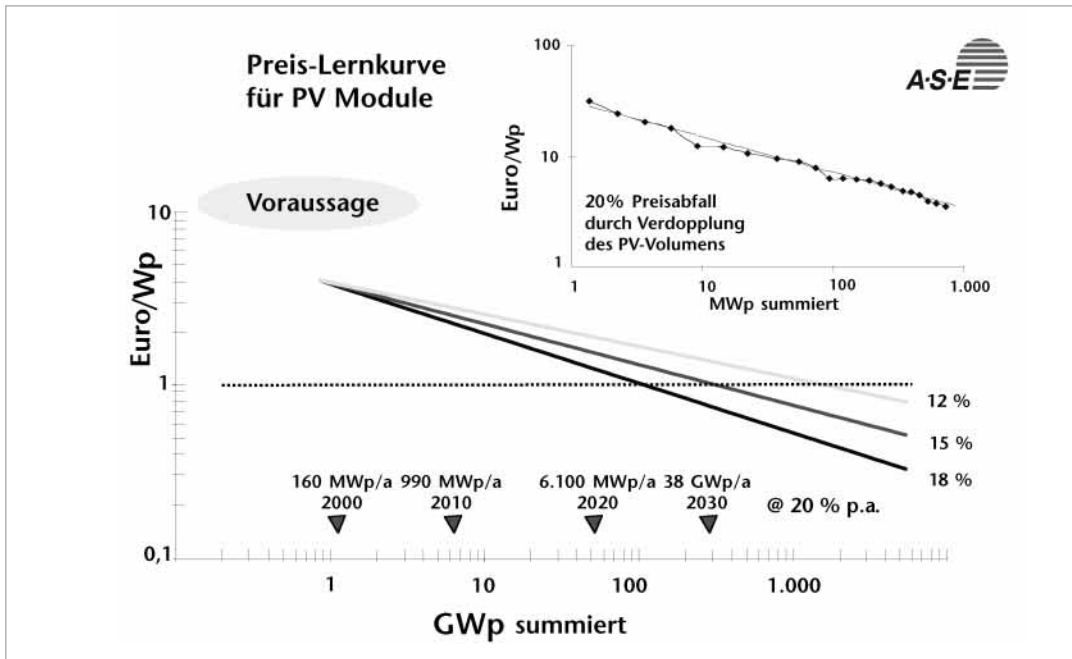


Abbildung 9
Preis-Lernkurve für PV Module

die Mehrwertsteuer, 28,2% auf Systemkosten und 58% auf die Module. Der Wafer ist mit 19,5% an den Systemkosten beteiligt, wobei 6% auf den Rohstoff entfallen.

7% pro Jahr plausibel, wenn entsprechende Mengensteigerungen von 15% gehalten werden können.

Die Lernkurve in den letzten 20 Jahren in Form der Preisreduktion als Funktion des installierten Volumens ist in Abb. 9 nach Hoffmann/ASE dargestellt. Sie entspricht einer durchschnittlichen Preisreduktion auf Modulebene von ca. 7% pro Jahr bzw. 20% bei Verdopplung des Volumens. Bei entsprechender Umsatzsteigerung erscheint eine Reduktion der Preise um

Die Kapazitäten der Solarzellenhersteller werden zur Zeit entsprechend ausgebaut (Abb. 10). Insbesondere in Japan entstehen Kapazitäten, die bereits in 2001 dem Weltmarkt von 1999 entsprechen. Es wird entscheidend darauf ankommen, dass Europa schnell mit der neuesten Zelltechnologie und größeren Kapazitäten mithält. Da die Solarzellentechnologie ein deutlich niedrigeres spezifisches Investment

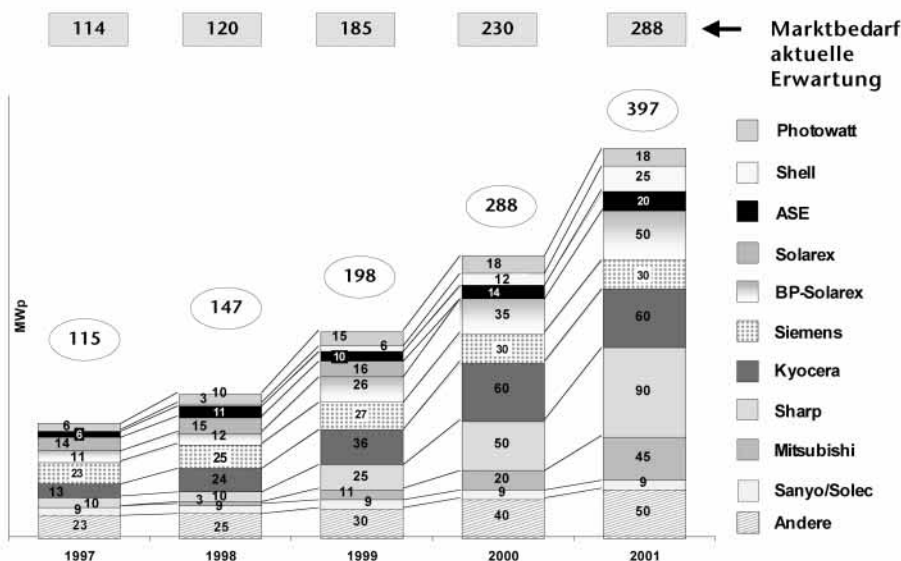
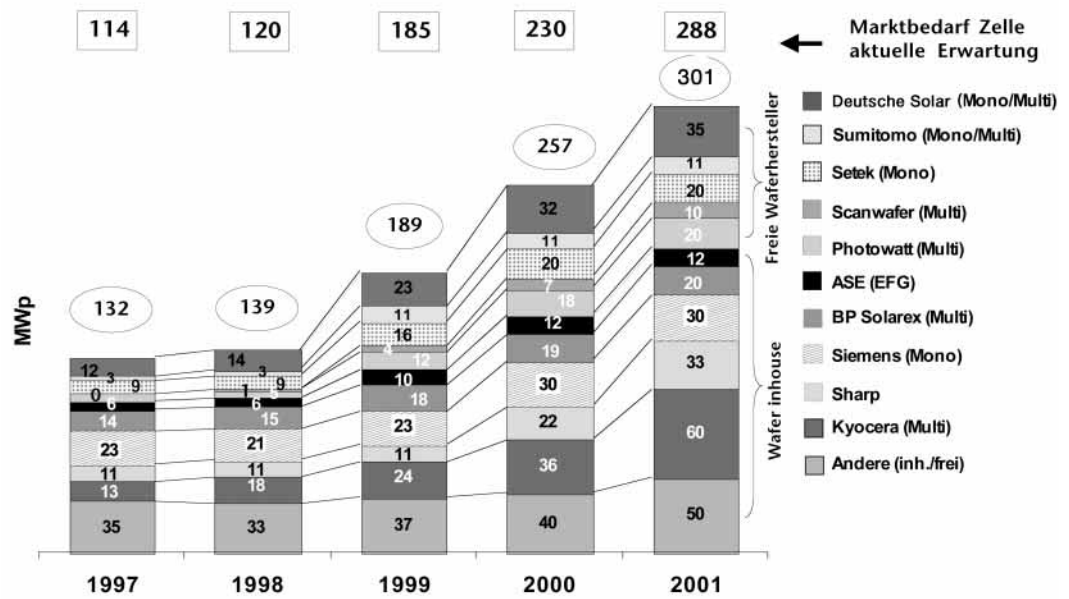


Abbildung 10
Kapazitäten der Solarzellenhersteller

Abbildung 11
Kapazitätsentwicklung
im Waferbereich

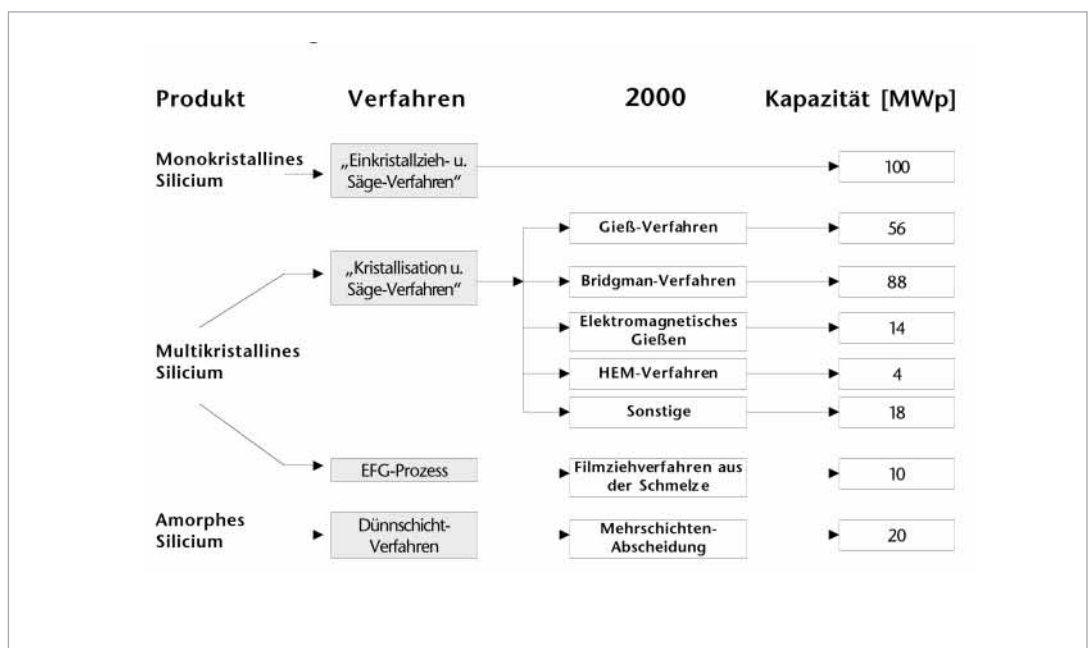


pro W_p erfordert als bei der Waferfertigung benötigt wird, ergibt sich ein zeitliches Nachhinken bei den Kapazitäten im Waferbereich (Abb. 11).

Im Wettstreit der verschiedenen Materialqualitäten (Abb. 12) erfolgt der Zubau neuer Kapazitäten vor allem beim multikristallinen Silicium. Insbesondere die Solarzellenhersteller setzen bei ihren Ausbauplänen mehr und mehr auf das multikristalline Material (Abb. 13).

Unabhängig von der Technologie wird das erwartete Marktwachstum (Abb. 14) nur eintreten, wenn die Kosten reduziert werden können und umgekehrt die Kosten werden nur sinken, wenn das Marktwachstum erhalten bleibt. Die notwendige Kostenreduktion kann nur erreicht werden, wenn alle Fertigungsstufen dazu beitragen. Welchen Beitrag kann nun der Siliciumwafer zur zukünftigen Entwicklung leisten? Da monokristalline Wafer bereits heute nur in abgeschrieben für die Elektronik nicht mehr

Abbildung 12
Herstellung von
Siliciumscheiden für
die Photovoltaik



Kristallin			
<i>Monokristalline Siliziumzellen</i>	Kapazität 2000 [MW]	Geplant bis 2001/2 [MW]	Land
BP Solarex	20	10	ESP, IND, AUS
Isofoton	8	8	ESP
Sharp	10		JP
Siemens Solar	25	5	US
Solec Intern.	10	10	US
Total	73	33	
<i>Polykristalline Siliziumzellen</i>			
ASE	6	6	DE
BP Solarex	20	10	FR
Ersol	2	8	D
Kyocera	36	20-30	JP
Mitsubishi Electric	10	12	JP
Photowatt	20		FR
Sharp	44	22	JP
Shell	12	25	DE
Total	150	103-113	
<i>Schicht- und Bandsilizium</i>			
ASE Americas	4		US
ASE GmbH	6		DE
Astropower	10	10	US
Ebara Solar	Pilotproduktion	5	US
Evergreen Solar	Pilotproduktion	5	US
Total	20	20	
Potenzial kristallin	223	156-166	384

Abbildung 13
Übersicht über den geplanten Kapazitätsausbau der wichtigsten PV-Unternehmen, gegliedert nach Technologie-Option

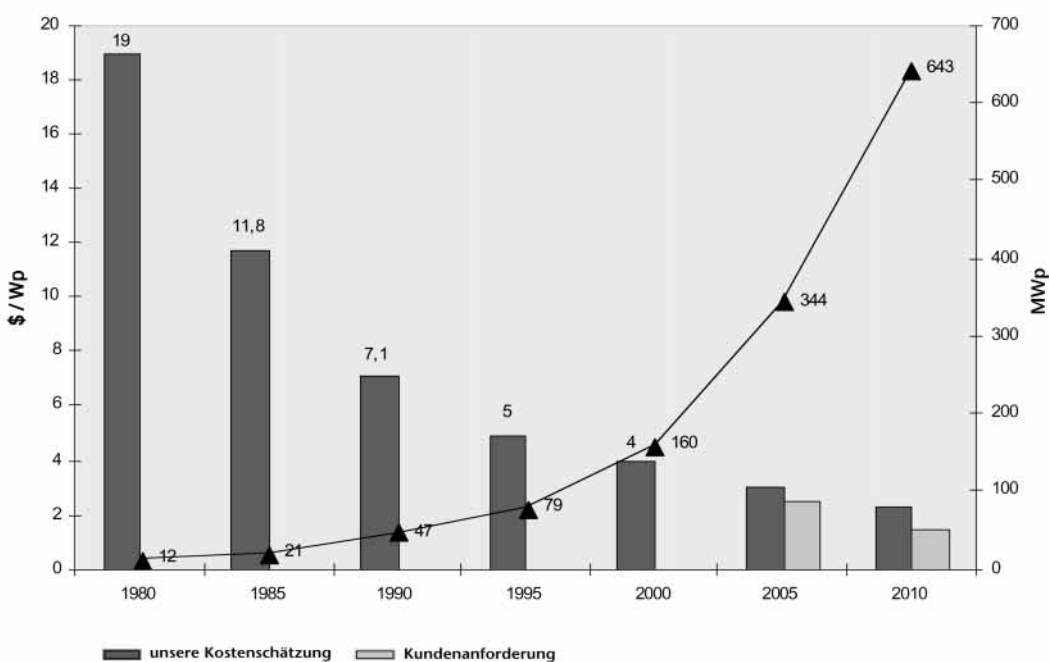


Abbildung 14
Marktentwicklung (kumulierte installierte Leistung) als Funktion der Modulpreise

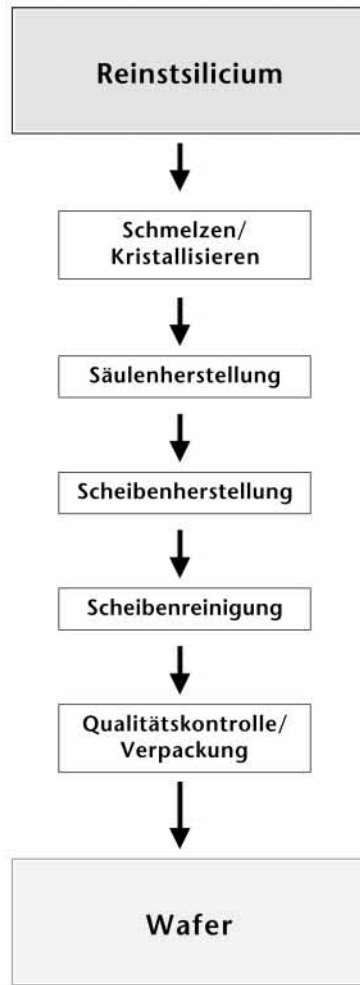


Abbildung 15
Herstellungsprozess
(vom Rohstoff bis
zum Wafer)

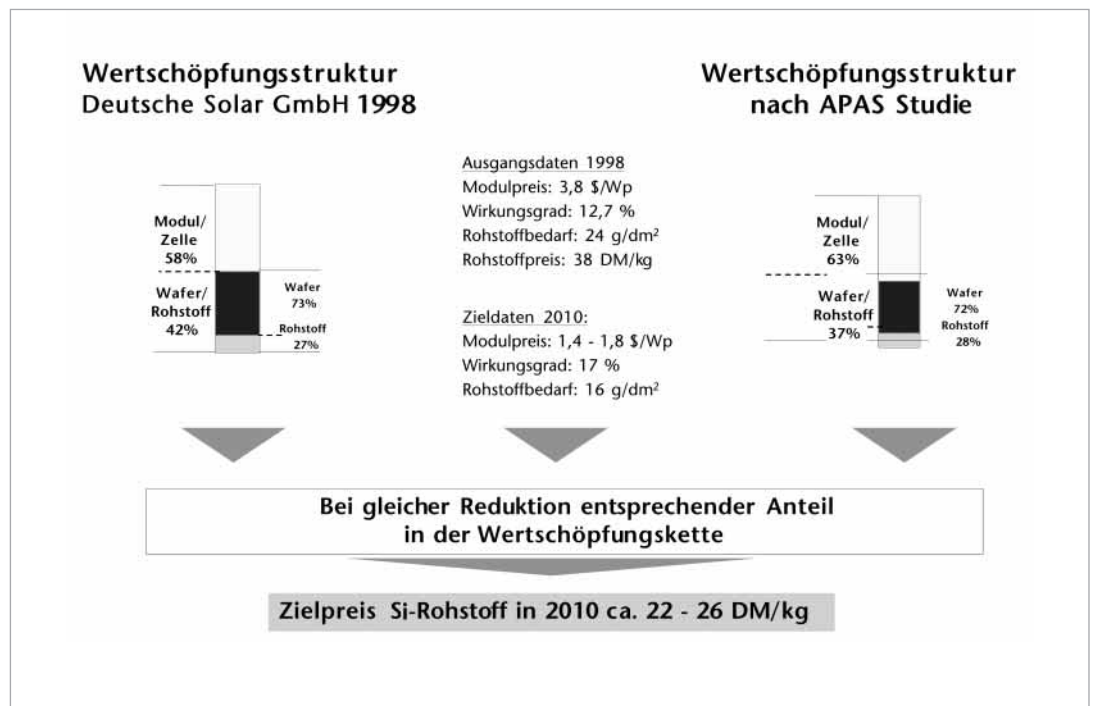
genutzten Anlagen weitgehend in Niedriglohnländern und bei niedrigen Energiekosten gefertigt werden, erscheint das Kostenreduktionspotential begrenzt.

Doch die junge Technologie zur Fertigung von multikristallinen Wafern sollte noch Kostenreduktionspotentiale durch Material- und Prozessverbesserung sowie Technologieentwicklung aufweisen.

Der Kostenreduktionsbeitrag der Deutschen Solar GmbH konzentriert sich auf die Waferfertigung (Abb. 15). Das Reinstsilicium wird geschmolzen, zu Blöcken kristallisiert und zu Säulen zersägt. Diese Säulen werden dann mit Drahtsägen in Wafer geschnitten. Nach einer Reinigung durchlaufen die Siliciumscheiben die Qualitätskontrolle, um anschließend an die Kunden ausgeliefert zu werden. Die Suche nach Kostenreduktion muss den gesamten Prozess umfassen und bei einer derart ehrgeizigen Zielsetzung von weniger als 2 EURO pro Wp im Modul, sind bereits an die Rohstoffkosten hohe Anforderungen zu stellen (Abb. 16).

Übereinstimmend kommen die Analysen der APAS-Studie und der Deutschen Solar GmbH über den Rohstoffanteil an den Kosten zu dem Schluss, dass ein Rohstoffpreis von unter

Abbildung 16
Preisforderung an
den Rohstoff in 2001



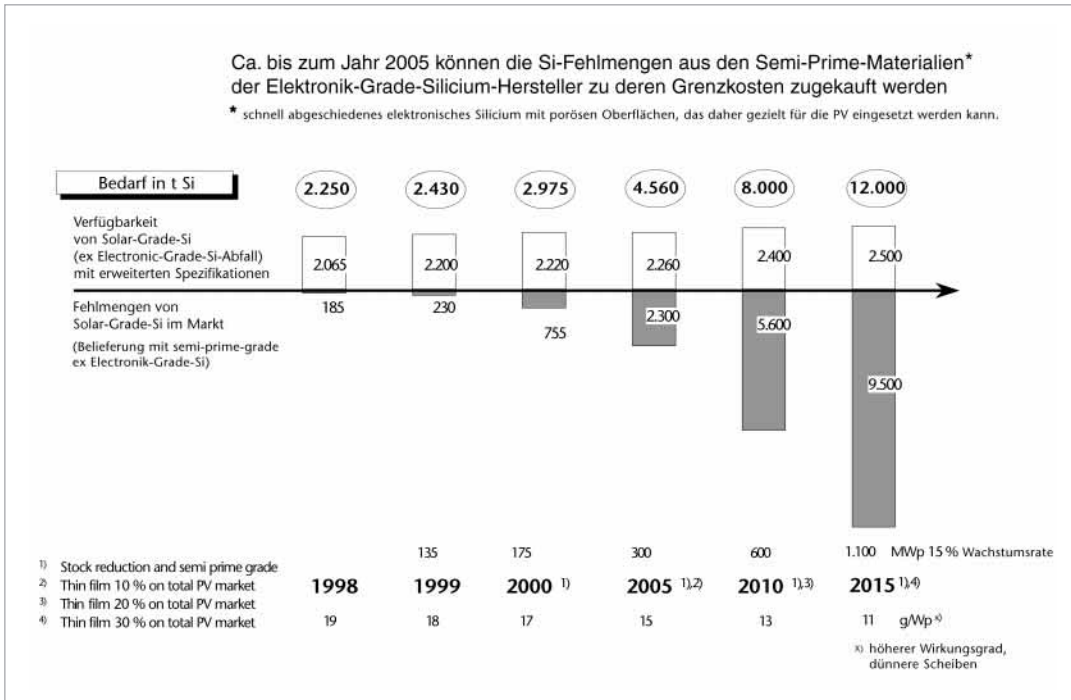


Abbildung 17
Verfügbarkeiten
Solar Silicium für die
Photovoltaik 1998
bis 2015

13 EURO für die Photovoltaik erreicht werden muss. Darüber hinaus ist die Rohstoffsicherung das Hauptanliegen und die Zukunftsaufgabe für alle PV-Firmen, da die heutigen Quellen für den Rohstoff sich nicht beliebig erweitern lassen (Abb. 17).

Internes Recycling bei den Waferproduzenten für die Elektronik, zunehmende Anteile von Epitaxie-Wafern und verbesserte Verfahrenstechnologie bei der Prime-Poly-Silicium-Herstellung lassen die für die PV verfügbaren Mengen selbst bei Verdopplung des Elektronikbedarfes kaum wachsen. Die Herausforderung besteht darin, dass die Photovoltaik-Industrie eine von der Elektronik unabhängige Rohstoff-Versorgung zu günstigen Kosten benötigt. Die Deutsche Solar GmbH verfolgt das Ziel, ein Verfahren zur Produktion eines Solarsiliciums mit Produktionskosten von weniger als 10 EURO/kg bei einem Produktionsvolumen von 5000mt/a bis 2001 zu entwickeln. Dabei sollen Preise unter 13 EURO pro kg realisiert werden. Die Verfahren zur Herstellung von hochreinem Silicium für die Elektronik sind in Abb. 18 als Übersicht wiedergegeben.

Gut zu reinigende gasförmige Verbindungen wie Trichlorsilan oder Silan werden anschliessend auf Silicium bei hohen Temperaturen zersetzt.

Gleichgewichtsreaktionen, hoher Energiebedarf und hohe Anforderungen an die Werkstoffe führen zu hohen Kosten. Da die Photovoltaik die hohen Kosten durch Flächenverkleinerung und höhere Integration wie bei der Elektronik nicht kompensieren kann, wurde bereits in den 80er Jahren nach alternativen kostengünstigeren Wegen für reines Silicium gesucht. Eine Übersicht der diskutierten Wege zeigen die Abb. 19 bis 21.

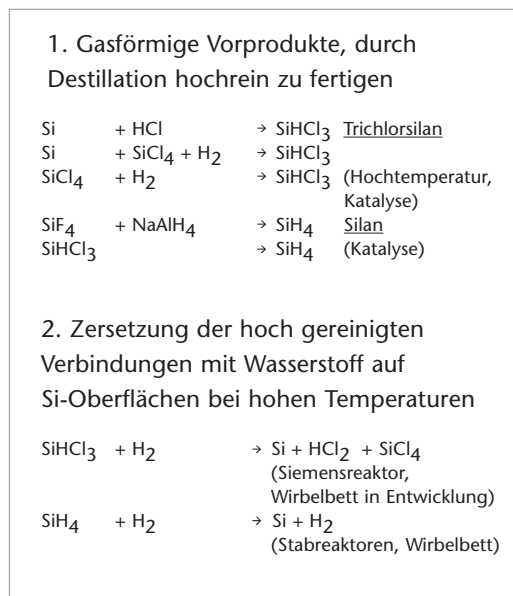


Abbildung 18
Verfahren zur
Herstellung von
Elektronik-Silicium

Zusammenfassend lässt sich festhalten, alle alternativen Wege scheiterten, das Problem eines kostengünstigen Solarsiliciums blieb ungelöst. Ausgelöst durch eine erneute Verknappung bei deutlich gestiegenem Bedarf, ist das Problem der Rohstoffsicherung Mitte der 90er Jahre wieder aufgegriffen worden:

- Der Weg, hochreines SiO₂ mit hochreinem Kohlenstoff direkt umzusetzen, durch Sintef/ECN,
- Die Kostenreduktion der bestehenden Verfahren für Elektroniksilicium (Abb. 22) durch Wacker und MEMC sowie
- in der Konzeptionsphase durch Tokuyama Corp.

Abbildung 20 → Verfahren zur Herstellung von Solar-Grade-Silicium - b

Abbildung 21 → Verfahren zur Herstellung von Solar-Grade-Silicium - c

Abbildung 19 → Verfahren zur Herstellung von Solar-Grade-Silicium - a

Abbildung 22 → Verfahren zur Herstellung von Solar-Grade-Silicium - d

Unabhängig davon, hat der Geschäftsbereich Chemikalien der Bayer AG durch Kombination verschiedener Möglichkeiten einen Weg gesucht, das ehrgeizige Kostenziel zu erreichen. In einem Verbundprojekt, gefördert durch den BMBF/BMWi wurden die Arbeiten konzipiert und im Labormaßstab die Einzelschritte bearbeitet. Entscheidend ist die Nutzung von Verfahren, die kontinuierlich betrieben werden

b
Zersetzung hochreiner Ausgangsverbindungen und eventuelle Nachreinigung

Siliciumtetrachlorid bzw. Fluorid mit Metallen (Aluminium, Zink, Natrium) Bayer, SRI, Batelle, Aerochem
Keine kostengünstige Lösung nachweisbar, Reinheitsanforderungen werden auf die zur Reduktion verwendeten Metalle verlagert.

Siliciumtetrachlorid mit Wasserstoff (Russland)
ungünstige Gleichgewichte, Trichlorsilan als Zwischenprodukt

Transportreaktion aus metallurgischem Silicium mit Brom oder Jod
Raumzeitausbeuten zu niedrig, teure Reagenzien

→ Einige Verfahren bis zur Pilotierung erprobt, keine wirtschaftliche Alternative bisher gefunden

c
Umsetzung von hochreinem Siliciumdioxid mit hochreinem Kohlenstoff unter reinen Bedingungen

Siemens: SiO₂-Reinigung durch Faserherstellung, Säure-Laugung
Hochreines SiO₂ mit Flammrußen granuliert
Lichtbogenreaktor
Prinzip machbar, Aufwand SiO₂-Reinigung, Problem Kohlenstoffgehalt im Silicium

Elkem: Reine SiO₂-Quellen mit Reinst-Grafit
Keine ausreichende Reinheit: Bor, Phosphor, Kohlenstoff

Sintef/ECN: SiO₂ und reine Kohlenstoffverbindung im Plasma-Reaktor Pilotierung angelaufen.

→ Bisherige Versuche wirtschaftlich nicht erfolgreich.
Erste Ergebnisse aus erneutem Versuch - Ende 2001

a
Reinigung von metallurgischem Silicium (Beispiele)

Heliotronic: (Wacker Siltronic)	Säure-Laugung, Schmelzen mit Schlackenextraktion, gerichtete Erstarrung
Bayer AG:	Säure-Laugung, Schmelzen mit Gasverblasen (H ₂ , H ₂ O, SiCl ₄), Vakuumgasen, gerichtete Erstarrung
Elkem:	Reine Ausgangsmaterialien, gerichtete Erstarrung, Säure-Laugung nach Zerkleinerung
Kawasaki Steel:	Reine Ausgangsprodukte, Schmelzen, Plasma-Behandlung mit H ₂ O-Gas, gerichtete Erstarrung, Schmelzen, Vakuumgasen, gerichtete Erstarrung

Kombination der verschiedenen Verfahren führt prinzipiell zum Erfolg an kleinen Proben. Reinigung des flüssigen Siliciums ist diffusionskontrolliert. Prozesszeit abhängig vom Verhältnis der Oberfläche zum Volumen. Verluste nehmen mit Chargengröße zu

→ Kein wirtschaftliches Verfahren bisher erreicht.

d
Umsetzung hochreiner Reaktanden (gasförmig) unter wirtschaftlich günstigeren Bedingungen oder durch Einsatz kostengünstiger Technologie

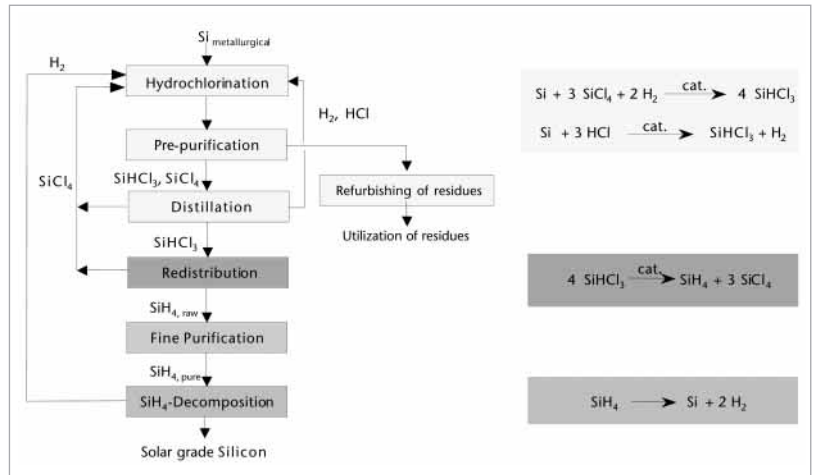
Wacker: Trichlorsilan - schnelle Abscheidung in Stabreaktoren, weniger Aufwand bei Nachreinigung und Analytik Entwicklung eines Wirbelbettreaktors für die Trichlorsilanzersetzung

MEMC: Silan - schnelle Abscheidung im Wirbelbett eventuell größere Reaktoren

Tokuyama Corp: Konzeptionsphase

Bayer AG: Konzeption eines kostengünstigen Weges über Trichlorsilan zu Silan und dessen Zersetzung im Wirbelbett Bearbeitung der Einzelschritte im Labor

Kostenziel:	Herstellung unter 10 EURO und Renditeziele mit 13 EURO zu erreichen
Kostenvorteile gegenüber der Elektronik-Silicium-Herstellung beruhen auf	
Konzeption:	Zusammenführung aller vorteilhaften Schritte und Details, die bisher bereits erprobt und teilweise auch realisiert sind.
Konti-Verfahren:	Minimierung der Personalkosten, maximale Anlagennutzung
Produktionsmaßstab:	5.000 mt pro Jahr in 2 Linien, niedrigere spezifische Investitionen
Reinheitsanforderungen:	Reduziert gegenüber Elektronik-Si-Fertigung, kostengünstigere Werkstoffe, geringerer Reinigungsaufwand, Verlagerung der Feinreinigung in die Silanstufe
Anlagenintegration:	Chemiepark-Modell mit vorhandener Versorgung und Entsorgung Möglichkeiten, Nebenprodukte zu nutzen zur weitere Wertschöpfung
Technologischer Fortschritt:	Wirbelbett-Technologie für kontinuierliche Prozesse, Katalytische Verfahren für Disproportionierung SiHCl_3 zu SiCl_4 und SiH_4



Nach der Machbarkeitsstudie und der Untersuchung der Einzelschritte wird eine durchgehende Pilotierung in einem chemischen Umfeld notwendig, um Ver- und Entsorgung zu sichern und Nebenprodukte im Verbund weiter zu verarbeiten.

Abbildung 23 ↑ Bayer Verfahren für ein kostengünstiges Solar Silicium

Der zweite Kostenblock nach dem Rohstoff, ist im Schmelzen und Kristallisieren zu sehen. Bei multikristallinem Silicium sind dies zwei Technologieverfahren, das Bridgman- und das Gießverfahren. Abb. 25 zeigt die prinzipiellen Unterschiede und geplanten Verbesserungen.

Abbildung 24 ← Bayer Verfahren für ein kostengünstiges Solar Silicium

können, die Feinreinigung auf der Stufe des Silans und die Zersetzung von Silan im Wirbelbett (Abb. 23). Gründe warum das Kostenziel erreichbar erscheint sind in Abb. 24 aufgeführt.

Beim Gießverfahren ist das Schmelzen des Siliciums von der Kristallisation getrennt, beim

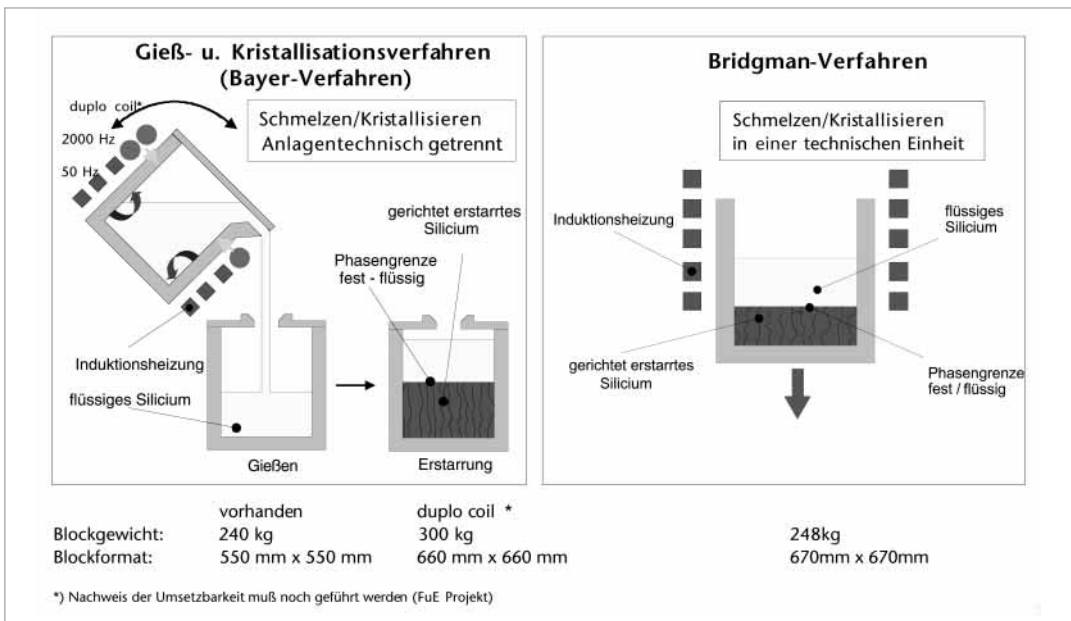


Abbildung 25 Verfahrensprinzipien Schmelzen/ Kristallisieren

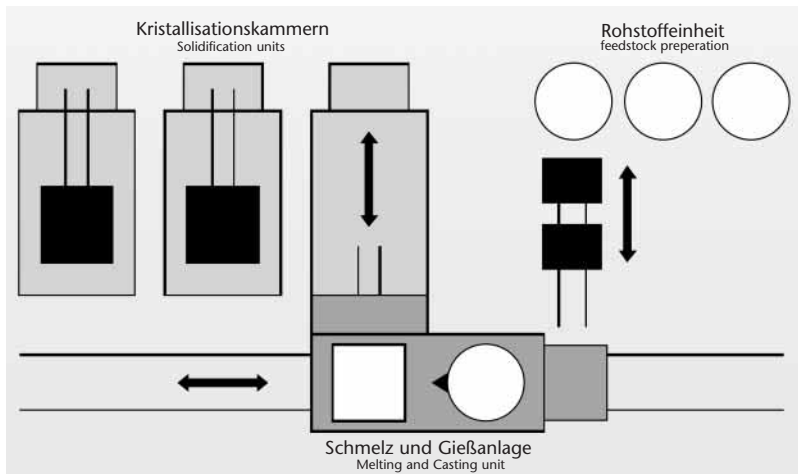


Abbildung 26
Kristallisation

Abbildung 28 →
Si-Blöcke und -Säulen

Abbildung 27
Anlagen für
Schmelzen und
Kristallisieren

Bridgman-Verfahren erfolgen sie nacheinander im gleichen Reaktor und im gleichen Tiegel. Die wesentlichen Vorteile des Gießverfahrens liegen in einer besseren Nutzung des erstarrten Siliciumblockes. Erreicht man beim Bridgman-

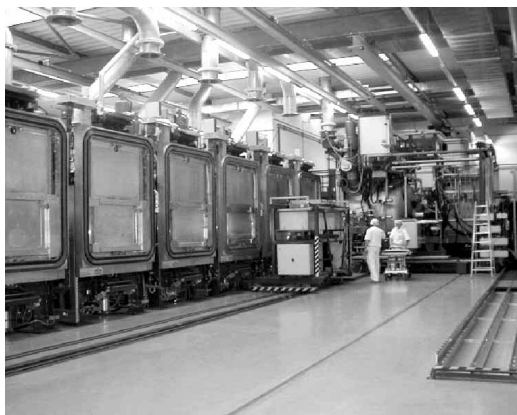
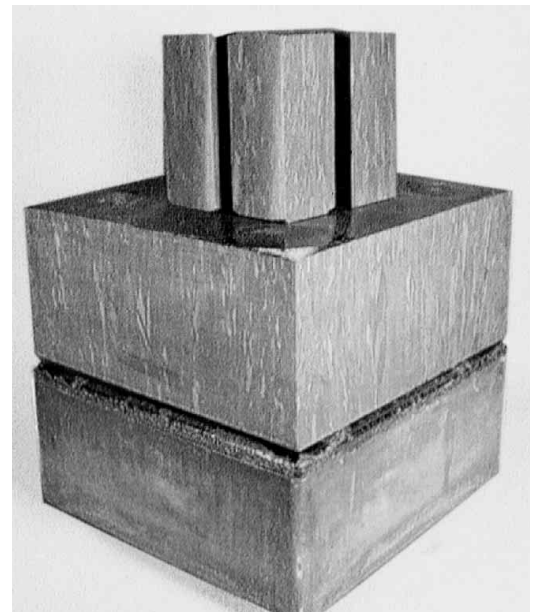
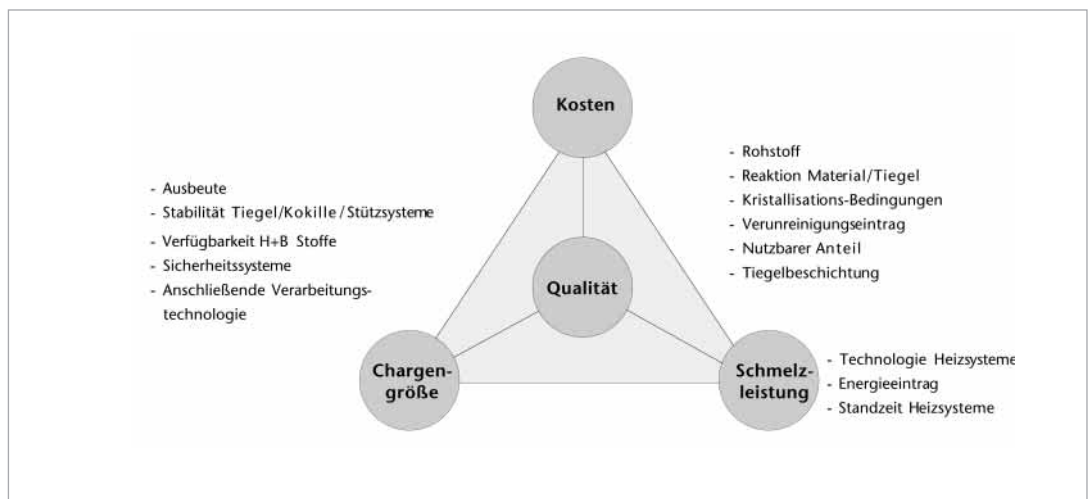


Abbildung 29
Weiterentwicklung
der Kristallisations-
technologie



Verfahren ca. 60% Ausbeute bei der Säulenherstellung, sind beim Gießverfahren 70%, bei Weiterentwicklung sogar mehr als 75% verwendbar. Die neue Gießtechnologie in Freiberg wird anhand der Abb. 26 und 27 gezeigt. Die geringen Randverluste können aus Abb. 28 abgeleitet werden.

Entscheidend für die zukünftige Technologie sind die Kosten und hier sehen wir noch weitere Technologieentwicklungsmöglichkeiten (Abb. 29).

Die Zerteilung der Siliciumblöcke zu Säulen ist durch eine eigene Technologieentwicklung der



Abbildung 30 (links)
Anlage zur
Grobzerteilung

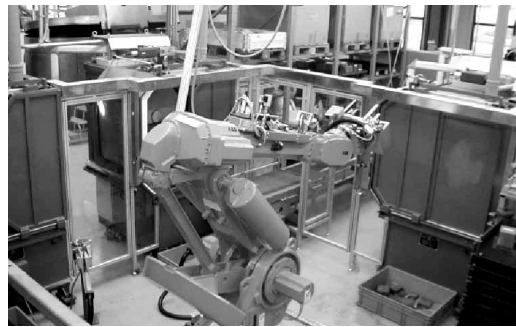


Abbildung 31 (rechts)
Säulenherstellung

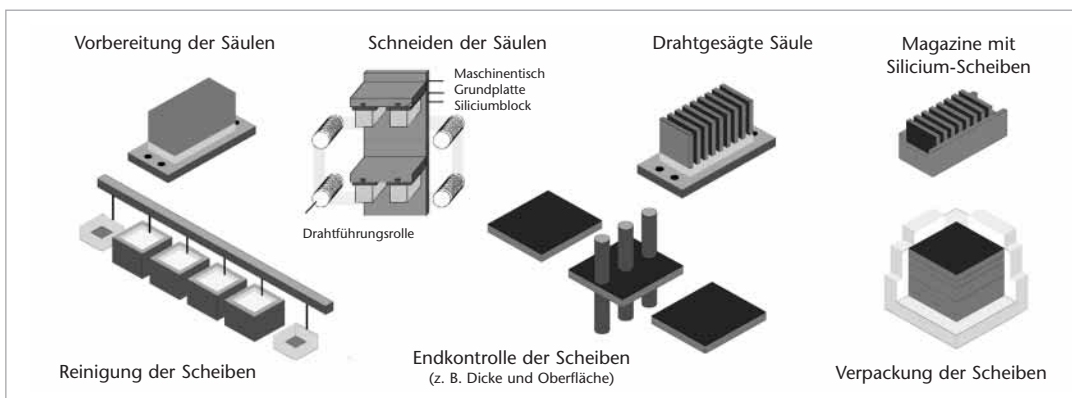


Abbildung 32
Produktionsschritte
in der Scheiben-
herstellung

Firma Deutsche Solar GmbH optimiert. Bandsägen mit hoher Produktivität und hoher Schnittgenauigkeit erfordern nur noch Detailoptimierungen (Abb. 30). Das Abtrennen der Kappen und Böden, festgelegt nach Qualitätskriterien, konnte mit einem Roboter einer ersten Automatisierung zugeführt werden (Abb. 31).

end für eine Kostensenkung. Aufgeklebte Siliciumssäulen (Abb. 32) werden mit Hilfe eines Drahtgatters mit SiC Suspensionen zu Scheiben durchgeläpft, abgelöst, vereinzelt in Carrier (Behälter zum Transport von Wafers), eingeordnet und nach Reinigung sowie Qualitätsinspektion verpackt.

Qualität, Produktivität und Anlagenverfügbarkeit beim Drahtsägen sind ebenfalls entschei-

Die entscheidenden, die Wirtschaftlichkeit bestimmenden Faktoren sind in der Abb. 33 auf-

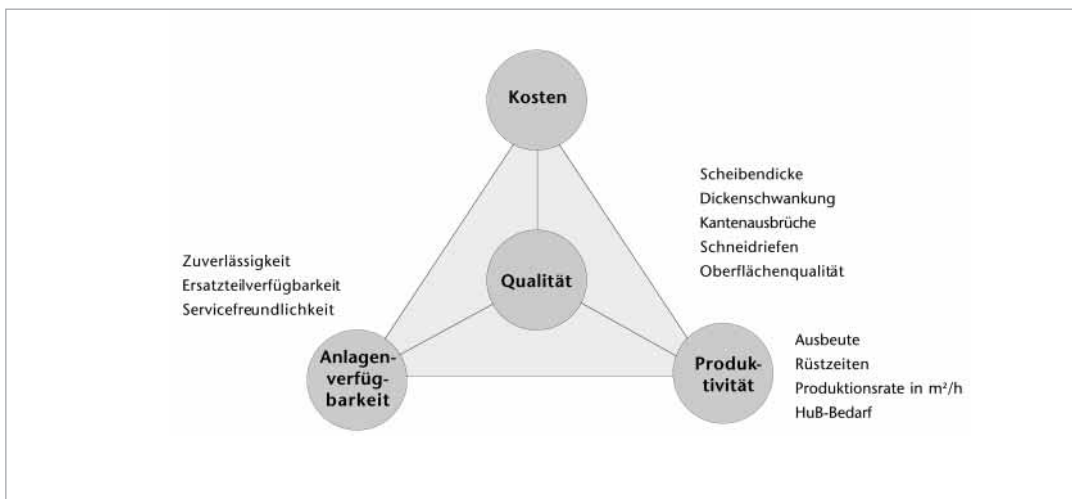
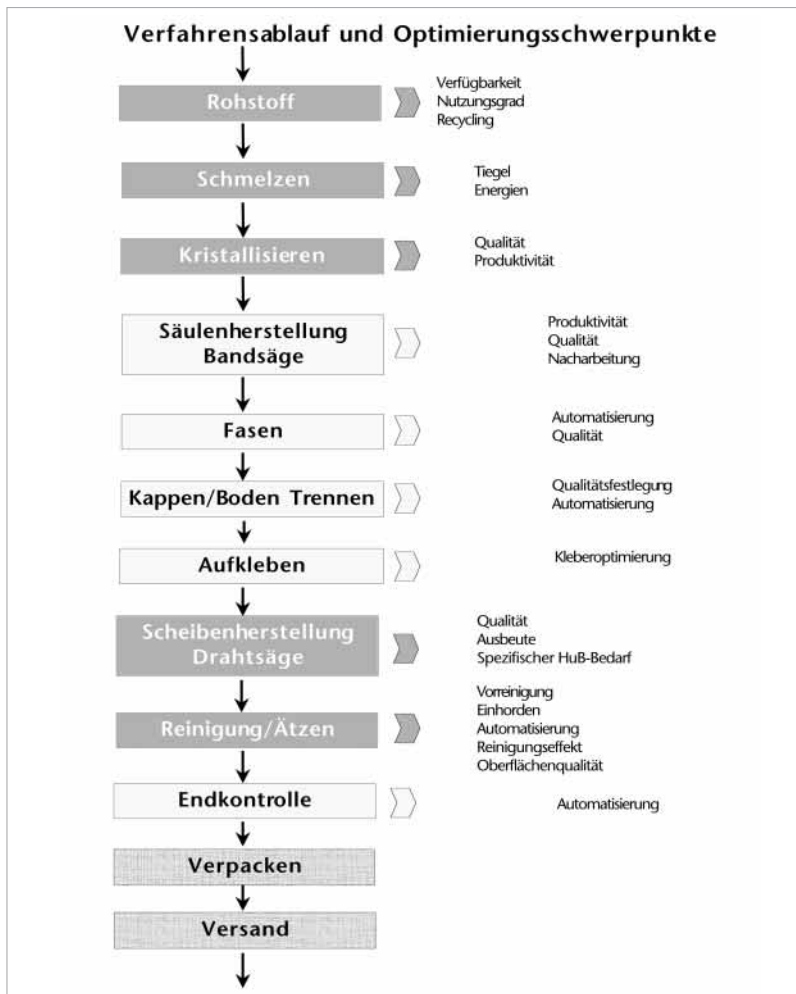


Abbildung 33
Weiterentwicklung der
Drahtsägetechnologie



geführt, wobei eine Vielzahl von Parametern gegenläufig sind und das richtige Optimum erarbeitet werden muss.

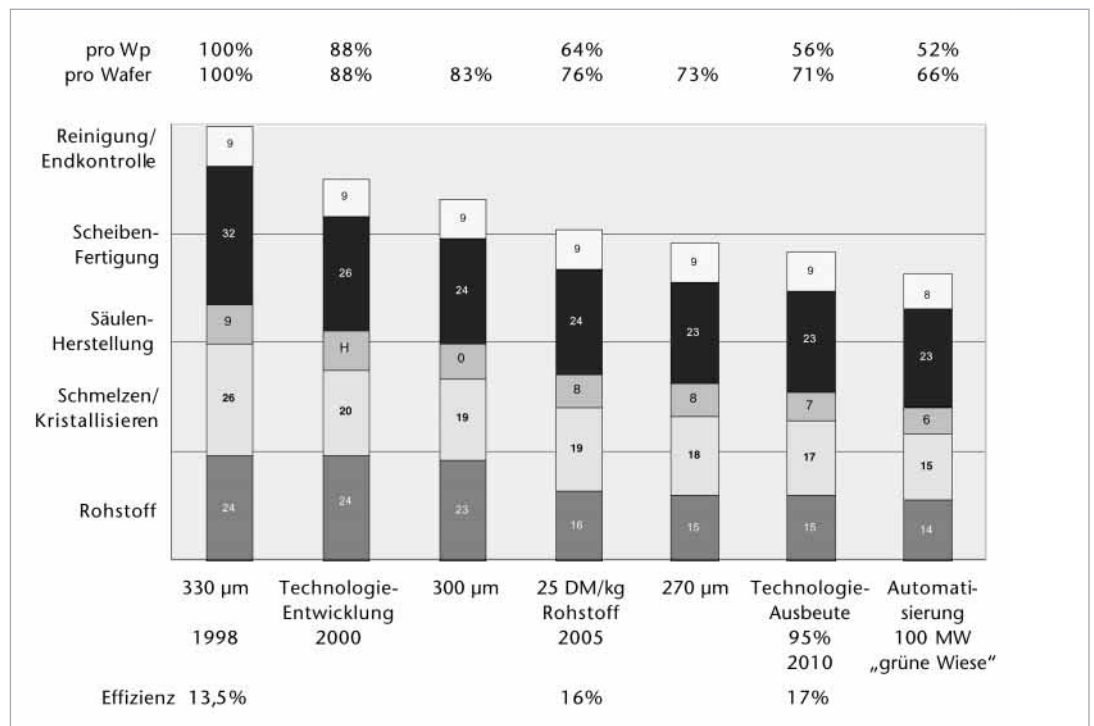
Fasst man den gesamten Verfahrensablauf zusammen, bleiben für die nächsten Jahre noch eine Reihe von Problemen zu lösen. *Abb. 34* zeigt die einzelnen Problemkreise. Qualität, Ausbeute und Automatisierung sind wiederkehrende Aufgaben. Dabei erfordert der Aufwand für die Problemlösung eine große Kapazität, um die Kosten auf viele Wafer zu verteilen und eine kritische Masse an Geld und personellen Ressourcen einsetzen zu können.

Ein roadmapping, wie die von Kunden, Verbrauchern und Politikern geforderte Kostenreduktion aus Sicht eines Waferproduzenten begleitet werden kann, zeigt *Abb. 35*. Ausgehend von der heutigen Kostenstruktur pro Wp bzw. pro Wafer in dm² erscheint eine Kostenreduktion auf 52% pro Wp durch Technologieverbesserung, Waferdickenreduktion und Wirkungsgradsteigerung möglich.

Ein kritischer Pfad *Abb. 36*, mit einem Wirkungsgrad von 17% im Jahr 2010 scheint dabei als eine recht konservative Annahme unter der Erkenntnis, dass einer der Kunden der Deutschen Solar GmbH auf der IEEE-PV-Tagung in Alaska

Abbildung 34 ↑
Verfahrensablauf und
optimierungsschwer-
punkte

Abbildung 35 →
Kostenreduktions-
möglichkeiten bei
der Silicium-Wafer-
Herstellung für
Solarzellen



	Situation 2000	Plan 2005	Erwartung 2010	
Siliciumscheibe	2,75	2,00	1,55	45%
Zelle	1,90	1,20	0,90	26%
Modul	<u>1,90</u>	<u>1,30</u>	<u>1,00</u>	<u>29%</u>
Gesamt	6,55	4,50	3,45	100%
Voraussetzungen				
Wirkungsgrad (%)	13,5	16	17	
Scheibendicke (µm)	330	300	270	
Rohstoff (DM/kg)	40	30	25	
Ausbeuten (%)	85	90	95	
Anlagengröße (MW)	20	60	100	

Abbildung 36
Entwicklungspotential
der Preise für
Solarmodule ab Werk
in DM/Wp

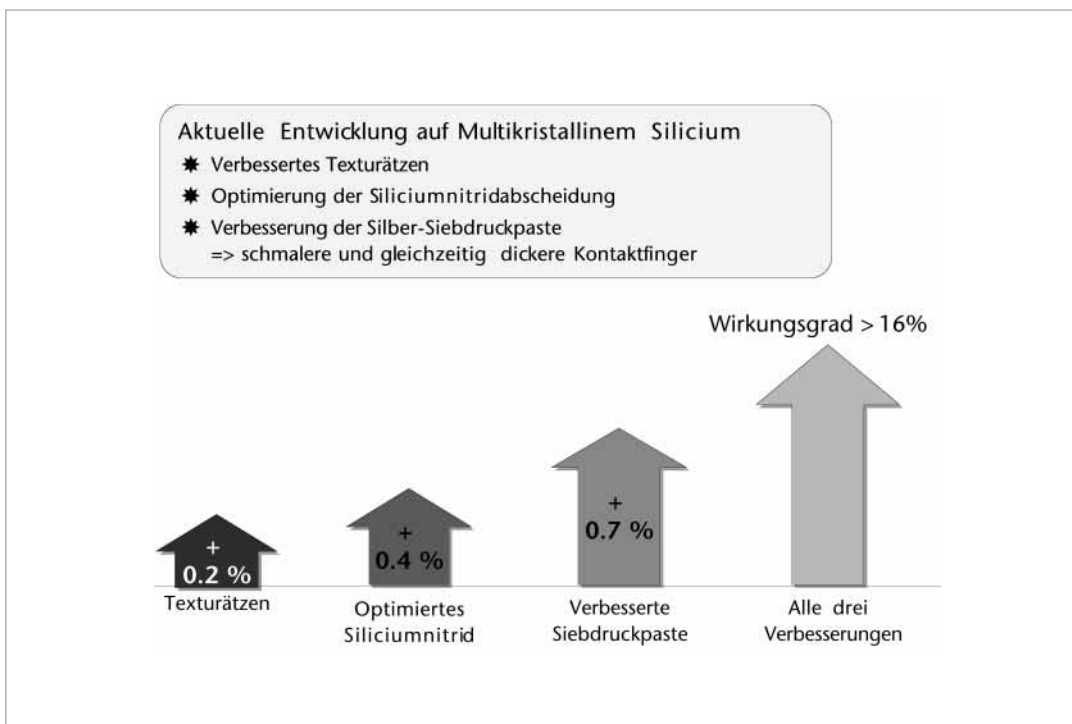


Abbildung 37
Weiterentwicklung der
Siebdruck Solarzelle

einen Zellprozess vorgestellt hat (Abb. 37), mit dem auf 150 x 150 mm großen multikristallinen Wafern 16,5% Wirkungsgrad erreicht werden. Damit wird der Unterschied zwischen multi- und monokristallinem Silicium weitgehend aufgehoben und es gilt die Kostensenkungspotentiale bei der Herstellung von multikristallinem Silicium mit aller Konsequenz umzusetzen.