

*Programmgruppe Systemforschung
und Technologische Entwicklung*

Angewandte Systemanalyse Nr. 67

**Umweltvorsorgeprüfung bei
Forschungsvorhaben
– Am Beispiel von Photovoltaik –**

Band 6:
Praktische Durchführung

Winfried Hirtz Werner Huber Gerhard Kolb

Handwritten text at the top of the page, possibly a header or title.

Handwritten text in the middle section of the page.

Handwritten text in the middle section of the page.

Handwritten text in the middle section of the page.

Handwritten text in the middle section of the page.

Handwritten text at the bottom of the page, possibly a footer or concluding remarks.

Angewandte Systemanalyse Nr. 67

**Umweltvorsorgeprüfung bei
Forschungsvorhaben
– Am Beispiel von Photovoltaik –**

**Band 6:
Praktische Durchführung**

Winfried Hirtz Werner Huber Gerhard Kolb

18. 11. 1941. 1941. 1941. 1941. 1941.

19. 11. 1941. 1941. 1941. 1941. 1941.

20. 11. 1941. 1941. 1941. 1941. 1941.

21. 11. 1941. 1941. 1941. 1941. 1941.

22. 11. 1941.

23. 11. 1941. 1941. 1941. 1941. 1941.

24. 11. 1941. 1941. 1941. 1941. 1941.

25. 11. 1941. 1941. 1941. 1941. 1941.

Kurzdarstellung

Das entwickelte Verfahren zur Umweltvorsorgeprüfung wurde am Beispiel der Photovoltaik getestet.

Beschrieben werden hier die Herstellung von technischem Silizium sowie von mono-, multikristallinen und amorphen Zellen und Modulen, zusätzlich mit geringerem Detaillierungsgrad Cadmiumtellurid-Solarzellen, jeweils mit der Auflistung der Eingangsmaterialien und der letztendlich an die Umwelt abgegebenen Stoffe.

Über die detaillierten Informationen zu den Stoffeinträgen in die Umwelt werden pro Umweltkompartiment und Variante für eine vergleichende Betrachtung quantitative Belastungszahlen ermittelt und diskutiert.

Als Beispiel für eine vergleichende Analyse werden die Emissionen von konventionellen PKWs verglichen mit Umweltbelastungen von Elektroautos, deren Batterien auf den Firmenparkplätzen teils solar über PV - Panels, teils über den Kraftwerksmix ("alte Bundesländer", Zeitraum um das Jahr 2005) geladen werden. Die Analysen zeigen, daß der Einsatz von Solarzellen aus Umweltgesichtspunkten wie folgt zu beurteilen ist:

1. Der Einsatz von Photovoltaik als Substitut für emittierende Energietechniken ist bereits bei der heutigen noch nicht voll ausgereiften Technik umweltentlastend.
2. Es ist ausreichend, die Photovoltaik-Herstellung bzgl. Arbeitsschutz, Unfallschutz und Emissionsüberwachung entsprechend den in der chemischen Industrie üblichen Regelungen zu überwachen.
3. Weitere Umweltentlastungen können über Materialeinsparungen bei der Implementierung der Panel erreicht werden. Bei Feldaufstellungen könnten Seilnetz-Konstruktionen einen geeigneten Weg darstellen.
4. Beim Betrieb von Solarmodulen auf Silizium-Basis ist keine Unfallart (Brand, Erdbeben etc.) vorstellbar, bei dem vom PV-Material selbst eine Umweltgefährdung ausgeht. Die Entsorgung der Module sollte problemlos möglich sein.
5. Bei Solarmodulen auf Basis von Verbindungshalbleitern (z.B. CdTe) sind Unfallrisiken bei der Herstellung, Betrieb und Entsorgung nicht auszuschließen. Bei bestimmungsgemäßen Betrieb und Verwendung der Module kann durch den hohen Wirkungsgrad und den geringeren Primärenergieaufwand als bei Si-Modulen mit einer noch höheren Umweltentlastung gerechnet werden als bei den Si-Modulen. Eine Absicherung dieser Aussage bedarf weiterer detaillierter Untersuchungen.
6. Photovoltaik-Einsatz im energiewirtschaftlich relevanten Umfang macht nur Sinn mit guten - möglichst besten - Modulwirkungsgraden und wenn die Stromnachfrage minimiert wurde, um hohe Solarbeiträge zu erreichen.

Die durchgeführten Arbeiten zeigen, daß das angestrebte Ziel "Entwicklung eines Hilfsmittels, welches zu einem frühen Zeitpunkt die Entscheidung erleichtert, welche Umweltaspekte relevant sind und ggf. als Ziele oder Kriterien formuliert Bestandteil der betrachteten Forschungsvorhaben werden sollen" erreicht wurde. Die Arbeiten zeigen aber, daß es noch erheblicher Anstrengungen bedarf, um die identifizierten methodischen Mängel und Wissensdefizite zu überwinden. Die Empfehlungen hierzu konzentrieren sich auf eine Verbesserung der organisatorischen Voraussetzungen (Informations- und Clearingstelle) sowie auf methodische Weiterentwicklungen (Beurteilungsverfahren) sowie auf eine EDV-mäßige Umsetzung der erarbeiteten Verfahren.

Vorwort

Das Vorhaben "Umweltvorsorgeprüfung bei Forschungsvorhaben - Am Beispiel der Photovoltaik" wird seit Anfang 1990 im Auftrag des Bundesministeriums für Forschung und Technologie durchgeführt. Es hat die Entwicklung eines Prüfverfahren zum Ziel, mit dem die Wirkungen auf Mensch und Umwelt einer durch ein Forschungsvorhaben intendierten technischen Entwicklung rechtzeitig aufgezeigt werden soll.

Die Beschreibung der durchgeführten Arbeiten und der detaillierten Ergebnisse erfolgt in mehreren Bänden:

Band 1	Zusammenfassung und Ergebnisdarstellung
Band 2	Methodische Überlegungen zur Umweltvorsorgeprüfung und Darstellung des gewählten Prüfverfahrens
Band 3	EDV-gestützte Instrumente
Band 4	Emissionen und Primärenergieaufwand konventioneller Bau- und Werkstoffe
Band 5	Hagedorn: Umweltrelevante Masseneinträge
Band 6	Praktische Durchführung
Band 7	Materialien zur Umwelterheblichkeitsprüfung

Die Aussagen zur Photovoltaik stützen sich auf eine Untersuchung der Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE) München mit dem Titel: "Umweltrelevante Masseneinträge bei der Herstellung verschiedener Solarzellentypen; eine vergleichende Analyse konventioneller und ausgewählter neuer Verfahren unter Berücksichtigung der Einsatzstoffe und Prozeßketten sowie der Entsorgungs- und Recyclingmöglichkeiten", die von G. Hagedorn und E. Hellriegel bearbeitet worden ist.

Die sehr detaillierten Untersuchungsergebnisse sind im Band 5 wiedergegeben.

Das Vorhaben "Umweltvorsorgeprüfung bei Forschungsvorhaben - Am Beispiel der Photovoltaik" wurde gefördert durch das BMFT und durchgeführt in Abstimmung mit:

- Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT)
 - Referat 312 Erneuerbare Energien
 - Referat 426 Technikfolgenabschätzung, Zukunftsaufgaben
- Projektträger für Biologie, Energie und Ökologie (BEO)
Forschungszentrum Jülich GmbH
5170 Jülich

Eine Literaturübersicht und Analyse der methodischen Ansätze aus der UVP-Forschung wurde vorgenommen von:

- UVP-Forschungsstelle
Fachgebiet Landschaftsökologie und Landschaftsplanung Fachbereich Raumplanung der Universität Dortmund
4600 Dortmund 50
 - Dipl.-Päd., Dipl.-Biol. Volker Kleinschmidt
- Fa. Pro Terra Team
HAMTEC - Münsterstr. 5
4700 Hamm 1
 - Dipl.-Ing. Joachim Heiderich
 - Dipl.-Ing. Frank T. Pietzka

Die Ermittlung der umweltrelevanten Masseneinträge bei der Herstellung der verschiedenen Solarzellen wurde in der Hauptsache ausgeführt von

- Forschungsstelle für Energiewirtschaft
Am Blütenanger 71
8000 München 50
 - Dr. U. Wagner
 - Dipl. Ing. Gerd Hagedorn
 - Dipl. Ing. E. Hellriegel
- Zur Datenerhebung der Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE) in München leisteten nachfolgende Firmen einen aktiven Beitrag:
 - Wacker-Heliotronic
Forschungs- und Entwicklungsgesellschaft für Solarzellen-Grundstoffe mbH
Postfach 1129
8263 Burghausen
 - Phototronics Solartechnik GmbH
Hermann-Oberth-Str. 9
8011 Putzbrunn
 - Siemens Solar, Energieerzeugung KWU
Postfach 3220
8520 Erlangen
 - Telefunken Systemtechnik (heute: Deutsche Aerospace AG)
Industriestr. 23-33
2000 Wedel

Aus der Vielzahl der Gespräche zur Methodik der Umweltvorsorge möchten wir als Diskussionspartner besonders hervorheben:

- UVP-Zentrum
Östingstr. 13
4700 Hamm 1
 - Herrn Edmund A. Spindler
- Bayer AG
Werksverwaltung Leverkusen, Umweltschutz/Produkte
5090 Leverkusen, Bayerwerk
 - Herrn Dr. R. Koch
 - Herrn Dr. M. Marsmann
 - Herrn Dr. R. Wilmes
- Gesellschaft für Gesundheits- und Umweltforschung mbH
Institut für Ökologische Chemie
Ingolstädter Landstr. 1
8042 Neuherberg
 - Prof. Dr. A. Kettrup

Im Laufe des Projektes wurde zu den methodischen Fragen ein Kolloquium im Wissenschaftszentrum in Bonn mit dem Titel 'Umweltvorsorgeprüfung im Forschungsbereich' durchgeführt /Hirtz 1991/.

Ein weiteres Kolloquium wurde in Zusammenarbeit mit dem Forum für Zukunftsenergien e.V. am 12.11.1991 in Jülich mit dem Titel 'Umweltauswirkungen bei der Herstellung und Nutzung von Solarzellen' durchgeführt /Kolb 1992/.

Der vorliegende Bericht basiert in großen Teilen auf mit den genannten Personen bzw. Institutionen geführten Diskussionen und auf von diesen Institutionen erarbeiteten Zwischenergebnissen.

Für die gewährte Unterstützung bedanken wir uns bei allen am Projekt beteiligten Institutionen, insbesondere bei unseren Gesprächspartnern aus Forschung und Industrie, aber auch bei unseren Kolleginnen B. Göbbel, B. Küppers, R. Pauls und N. Thomas für die Entwicklung der Software zum Prozeßkettenanalysemmodell, zur Stoff-Datenbank und zur Prüfung der Umwelterheblichkeit sowie bei Frau B. Winkler für die geduldige Abfassung der Texte und bei unseren studentischen Hilfskräften, den Herren I. Rey und T. Reetz, für die Zusammenstellung der Begriffserläuterungen und Daten sowie für die Erstellung von Abbildungen und Flußdiagrammen.

Inhaltsverzeichnis

1.0 Zusammenfassung	1
1.1 Problemstellung, Untersuchungsumfang, Vorgehensweise	1
1.2 Ergebnisse der Stoffstromanalysen	6
1.2.1 Emissionen im Vergleich	7
1.2.2 Primärenergieaufwendungen	9
1.3 Beurteilung der untersuchten Alternativen	10
1.3.1 Beurteilungskriterien	10
1.3.2 Vergleich der ermittelten Belastungszahlen	12
1.4 Schlußfolgerungen	21
1.4.1 Methode	21
1.4.2 Solarmodule auf Si-Basis	23
1.4.3 Solarmodule auf der Basis von CdTe	25
1.5 Weiterführende Aktivitäten, Empfehlungen	26
 2.0 Aufgabenstellung und Zielsetzung	 29
 3.0 Orientierungsphase	 31
3.1 Grundlagen	31
3.2 Übersicht zu Entwicklungslinien und Entwicklungsstand	32
3.3 Marktübersicht	35
3.4 Technisch-ökonomische Randbedingungen, Untersuchungsrahmen	40
3.4.1 Anwendungsbereiche und zu betrachtende Technikketten	40
3.4.2 Konkurrenztechniken	41
3.4.3 Diskussion von Szenarioannahmen	42
3.5 Stofflich-ökologische Randbedingungen	44
3.5.1 Bisherige Einschätzungen	44
3.5.1.1 Unfallrisiken	44
3.5.1.2 Wirkungen auf Mensch und Umwelt	46
3.5.1.3 Vorläufige zusammenfassende Einschätzung	48
3.5.2 Stoffidentifikation	50
3.6 Umwelterheblichkeitsprüfung	56
3.6.1 Kurzbeschreibung der Methode	57
3.6.2 Vorgehensweise zur Umwelterheblichkeitsprüfung	60
3.6.3 Ergebnisse zur Umwelterheblichkeitsprüfung	61
 4.0 Durchführungsphase (Umweltvorsorgeuntersuchung)	 71
4.1 Prozeßkettenanalysemodell (PROKAM)	71
4.2 Emissionsanalyse der Energiebereitstellung	72
4.3 Emissionsanalyse konventioneller Bau- und Werkstoffe	73
4.3.1 Flachglas	74
4.3.2 Zement und Beton	76
4.3.3 Aluminium	78
4.3.4 Stahlblech	79
4.4 Festlegung des Untersuchungsrahmens	81
4.5 Kristalline Silizium-Solarzellen	85

4.5.1	Technologie, Stand, Entwicklungsaussichten	85
4.5.2	Beschreibung der betrachteten Prozeßketten	98
4.5.2.1	Herstellung von technischem (MG-) Silizium	101
4.5.2.2	Herstellung von Elektronik-(EG-)Silizium	103
4.5.2.3	Herstellung von Silicium-Scheiben	105
4.5.2.4	Herstellung von Solarzellen	110
4.5.2.5	Herstellung von Photovoltaikmodulen	114
4.5.2.6	Herstellung von PV-Modulen mit multikristallinen Siliciumsolarzellen	114
4.5.3	Auswahl alternativer Herstellungsverfahren für Silicium-Solarzellen	119
4.5.4	Module mit MIS-Inversionsschicht-Solarzellen	120
4.5.4.1	Herstellung der Solarzellen	120
4.5.4.2	Herstellung der Module in Gießharztechnologie	124
4.6	Amorphe Silizium-Solarzellen	127
4.6.1	Technologie, Stand, Entwicklungsaussichten	127
4.6.2	Beschreibung der betrachteten Prozeßketten	131
4.7	Darstellung der Gesamtprozeßketten der Silizium-Zellen	135
4.7.1	Bilanz der Stoffmengen	135
4.7.2	Primärenergieaufwand	147
4.8	Cadmiumtellurid-Solarzellen	148
4.8.1	Technologie, Stand, Entwicklungsaussichten	148
4.8.2	Herstellung von Cadmiumtellurid-Solarzellen	148
4.8.3	Ökonomische und ökologische Aspekte zur Verwendung von Cadmium	151
4.8.4	Ökonomische und ökologische Aspekte zur Verwendung von Tellur	157
4.8.5	Vorläufige Einschätzung	159
5.0	Alternativenvergleich	161
5.1	Annahmen	161
5.1.1	Solartankstellen	163
5.1.2	Errichtung von PV-Anlagen	164
5.1.3	Daten der konventionellen Alternativen	167
5.1.3.1	"Mittlere Fahrzeugflotte"	167
5.1.3.2	Elektromobile	168
5.1.4	Eingangsdaten der alternativen Szenarien	168
5.2	Ergebnisse der Prozeßkettenanalysen zu den Solartankstellen	170
5.2.1	Solartankstelle Variante S1	172
5.2.1.1	Annahmen	172
5.2.1.2	Emissionen der gesamten Prozeßkette	172
5.2.1.3	Materialaufwand zum Bau der Solartankstelle	175
5.2.2	Solartankstelle Variante S2	176
5.2.2.1	Annahmen	176
5.2.2.2	Emissionen der gesamten Prozeßkette	176
5.2.2.3	Materialaufwand zum Bau der Solartankstelle	178
5.2.3	Solartankstelle Variante S3	179
5.2.3.1	Annahmen	179
5.2.3.2	Emissionen der gesamten Prozeßkette	179
5.2.3.3	Materialaufwand zum Bau der Solartankstelle	182
5.2.4	Solartankstelle Variante S4	183
5.2.4.1	Annahmen	183

5.2.4.2	Emissionen der gesamten Prozeßkette	183
5.2.4.3	Materialaufwand zum Bau der Solartankstelle	186
5.3	Ergebnisse der Prozesskettenanalysen zu den konventionellen PKW's	187
5.3.1	Benzin- und dieselbetriebene PKW	187
5.3.2	Elektromobile	187
5.4	Abschließende Ermittlung der umwelterheblichen Stoffe	189
6.0	Beurteilungsphase	195
6.1	Mengenvergleich der atmosphärischen Emissionen	196
6.2	Vergleich der Primärenergieaufwände	203
6.3	Beurteilung nach toxischen bzw. ökotoxischen Kriterien	207
6.3.1	Methodisches Vorgehen	207
6.3.1.1	Eingangsdaten	207
6.3.1.2	Die Beurteilungsverfahren	207
6.3.1.3	Einschätzung der erzielbaren Ergebnisse	210
6.3.2	Ermittlung der Belastungszahlen	210
6.3.3	Vergleich der ermittelten Belastungszahlen	211
6.3.3.1	Nach Grenz- und Richtwerten	212
6.3.3.2	Belastungszahlen Boden	217
6.3.3.3	Nach akuten Toxizitäten und Ökotoxizitäten	219
6.3.3.4	Nach Genotoxizitäten	221
6.4	Zusammenfassung der erhaltenen Ergebnisse	226
7.0	Nachkontrollphase	235
8.0	Ergebnisse, Schlußfolgerungen	237
8.1	Methode	237
8.1.1	Zielerreichung	237
8.1.2	Methodische Mängel	237
8.1.3	Umsetzungsschwierigkeiten am Beispiel der Photovoltaik	238
8.1.3.1	In der Orientierungsphase	238
8.1.3.2	In der Durchführungsphase	238
8.1.3.3	In der Beurteilungsphase	239
8.1.4	Aufwand	240
8.1.5	Weiterführende Aktivitäten, Empfehlungen	240
8.2	Photovoltaik	242
8.2.1	Weiterführende Aktivitäten, Empfehlungen	245
9.0	Literaturverzeichnis	249
Anhang A.	Ermittlung der Belastungszahlen	265
A.1	Nach Grenz- und Richtwerten	266
A.1.1	Variante S1	266
A.1.2	Variante S2	270
A.1.3	Variante S3	273
A.1.4	Variante S4	277
A.1.5	Variante B1	281
A.1.6	Variante B2	282

A.1.7 Variante B3	283
A.1.8 Variante D	284
A.1.9 Variante E1	285
A.1.10 Variante E2	287
A.2 Nach Toxizitäten	289
A.2.1 Variante S1	289
A.2.2 Variante S2	292
A.2.3 Variante S3	294
A.2.4 Variante S4	297
A.2.5 Variante B1	300
A.2.6 Variante B2	302
A.2.7 Variante B3	304
A.2.8 Variante D	306
A.2.9 Variante E1	308
A.2.10 Variante E2	310
A.3 Nach Ökotoxizitäten	312
A.3.1 Variante S1	312
A.3.2 Variante S2	313
A.3.3 Variante S3	314
A.3.4 Variante S4	315
A.3.5 Variante B1	316
A.3.6 Variante B2	317
A.3.7 Variante B3	318
A.3.8 Variante D	319
A.3.9 Variante E1	320
A.3.10 Variante E2	321
Anhang B. Vergleich der Alternativen anhand der Belastungszahlen	323
B.1 Nach Grenz- und Richtwerten	324
B.2 Nach Toxizitäten	326
B.3 Nach Ökotoxizität	328
Anhang C. Abkürzungsverzeichnis	329
Anhang D. Erläuterung der Begriffe	331

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.	Todesfallrisiko der Bevölkerung durch Unfälle	46
Abb. 2.	Todesfallrisiko der Bevölkerung durch Erkrankungen	46
Abb. 3.	Prüfverfahren zur Umwelterheblichkeit eines Stoffes	58
Abb. 4.	Prüfverfahren zur Umwelterheblichkeit eines gering persistenten Stoffes	59
Abb. 5.	Prüfverfahren zur Umwelterheblichkeit eines mäßig persistenten Stoffes	59
Abb. 6.	Prüfverfahren zur Umwelterheblichkeit eines hoch persistenten Stoffes	60
Abb. 7.	Prozeßketten zur Herstellung von photovoltaischen Kraftwerken	83
Abb. 8.	Stoffflüsse bei der Siliciumreduktion mit Kohlenstoff und dem Raffinieren mit Sauerstoff	102
Abb. 9.	Stoffflüsse bei der Herstellung von EG-Silicium	104
Abb. 10.	Stoffflüsse bei der Herstellung von multikristallinen Silicium-Scheiben	108
Abb. 11.	Stoffflüsse bei der Herstellung von monokristallinen Si-Scheiben	109
Abb. 12.	Stoffflüsse bei der Herstellung multikristalliner Solarzellen	112
Abb. 13.	Stoffflüsse bei der Herstellung monokristalliner Solarzellen	113
Abb. 14.	Stoffflüsse bei der Herstellung von PV-Modulen auf der Basis von multikristallinem Silicium	116
Abb. 15.	Stoffflüsse bei der Modulherstellung	118
Abb. 16.	Stoffflüsse bei der Herstellung von MIS-Inversionsschicht-Solarzellen	123
Abb. 17.	Stoffflüsse bei der Herstellung von MIS-Inversionsschicht-Modulen	126
Abb. 18.	Stoffflüsse bei der Herstellung amorpher Module	134
Abb. 19.	Cadmiumgewinnung im Rahmen der Zinkgewinnung	152
Abb. 20.	Verbleib von Cadmium in der Bundesrepublik Deutschland	153
Abb. 21.	Materialaufwand zum Bau der Solartankstelle	175
Abb. 22.	Materialaufwand zum Bau der Solartankstellen	178
Abb. 23.	Materialaufwand zum Bau der Solartankstelle	182
Abb. 24.	Materialaufwand zum Bau der Solartankstellen	186
Abb. 25.	Solare Deckungsbeiträge der betrachteten Solartankstellen	197
Abb. 26.	Spezifische Emissionen der einzelnen Versorgungsbeiträge	198
Abb. 27.	Emissionserwartungen im beruflich bedingten Personen-Nahverkehr	200
Abb. 28.	Emissionserwartungen im beruflich bedingten Personen-Nahverkehr	201
Abb. 29.	Primärenergieaufwand im beruflich bedingten Personen-Nahverkehr	205
Abb. 30.	Primärenergieaufwand im beruflich bedingten Personen-Nahverkehr mit Vorleistungen	206
Abb. 31.	Belastungszahlen Luft nach BUWAL	212
Abb. 32.	Belastungszahlen Luft nach VDI-Richtlinie Nr. 2310	213
Abb. 33.	Belastungszahlen Luft nach UBA, WHO, VDI	215
Abb. 34.	Belastungszahlen Wasser nach BUWAL	216
Abb. 35.	Belastungszahlen Wasser nach Trinkwasserverordnung	217
Abb. 36.	Belastungszahlen Boden	218
Abb. 37.	Belastungszahlen Toxizität LD	220
Abb. 38.	Belastungszahlen akute Toxizität	220
Abb. 39.	Belastungszahlen Ökotoxizität ohne Klasseneinteilung	221
Abb. 40.	Belastungszahlen Ökotoxizität mit Klasseneinteilung nach Gebler	221
Abb. 41.	Belastungszahlen Mutagenität	223
Abb. 42.	Belastungszahlen Cancerogenes Risiko	223

Abb. 43. Belastungszahlen Cancerogenität nach Gebler	224
Abb. 44. Relative Belastungskennzahlen der Variante B1	230
Abb. 45. Relative Belastungskennzahlen der Variante B2	230
Abb. 46. Relative Belastungskennzahlen der Variante B3	231
Abb. 47. Relative Belastungskennzahlen der Variante D	231
Abb. 48. Relative Belastungskennzahlen der Variante E1	232
Abb. 49. Relative Belastungskennzahlen der Variante E2	232
Abb. 50. Relative Belastungskennzahlen der Variante S1	233
Abb. 51. Relative Belastungskennzahlen der Variante S2	233
Abb. 52. Relative Belastungskennzahlen der Variante S3	234
Abb. 53. Relative Belastungskennzahlen der Variante S4	234

Tabellenverzeichnis

Tab. 1. Emissionsfaktoren der zugrunde gelegten Fahrzeugflotten	5
Tab. 2. Grenzwerte für PKW nach einem Richtlinienentwurf der EG	5
Tab. 3. Jahresemissionen der gerechneten Varianten	7
Tab. 4. Primärenergieaufwendungen der betrachteten Varianten	9
Tab. 5. Relative Kennzahlen der verschiedenen Varianten	18
Tab. 6. Erreichte Wirkungsgrade technisch interessanter Solarzellen	34
Tab. 7. In Betrieb befindliche Photovoltaik Demonstrationsanlagen	36
Tab. 8. In Planung oder Bau befindliche Photovoltaik Demonstrationsanlagen ..	37
Tab. 9. Solarzellen-Produktionskapazitäten in Deutschland	39
Tab. 10. Prozeßketten konventioneller Systeme	42
Tab. 11. Prozeßschritt: Gewinnung und Aufbereitung von Quarzsand	50
Tab. 12. Prozeßschritt: Erzeugung von metallurgischem Silizium	50
Tab. 13. Prozeßschritt Herstellung von EG-Silizium und monokristalliner Scheiben	51
Tab. 14. Prozeßschritt Herstellung von monokristallinen Solarzellen	51
Tab. 15. Prozeßschritt Modulherstellung mit monokristallinen Solarzellen	52
Tab. 16. Prozeßschritt Herstellung von EG-Silizium und multikristalliner Scheiben	52
Tab. 17. Prozeßschritt Herstellung von multikristallinen Solarzellen	53
Tab. 18. Prozeßschritt Herstellung von multikristallinen Solarzellen	53
Tab. 19. Prozeßschritt Modulherstellung mit monokristallinen Solarzellen	53
Tab. 20. Prozeßschritt Herstellung von amorphen PV-Modulen (Dünnschicht) ...	54
Tab. 21. Prozeßschritt Herstellung von amorphen PV-Modulen	54
Tab. 22. Prozeßschritt Herstellung von Solarsilizium aus SiCl	54
Tab. 23. Prozeßschritt Herstellung von Solarsilizium aus gereinigtem SiO	55
Tab. 24. Materialien zur Herstellung von Solarzellen (Verbindungshalbleiter)	55
Tab. 25. Prozeßschritt Herstellung von MIS-Inversionsschicht-Solarzellen	56
Tab. 26. Prozeßschritt Modulherstellung mit MIS-Inversionsicht-Solarzellen	56
Tab. 27. UEP in der Orientierungsphase zur Herstellung monokristalliner Solarmodule (incl. Kraftwerks - Komponenten)	61
Tab. 28. UEP in der Orientierungsphase zur Herstellung multikristalliner Solarmodule (incl. Kraftwerks - Komponenten)	63
Tab. 29. UEP in der Orientierungsphase zur Herstellung amorpher Solarmodule (incl. Kraftwerks - Komponenten)	66
Tab. 30. UEP in der Orientierungsphase zur Herstellung von MIS-I-Solarmodule (incl. Kraftwerks - Komponenten)	67
Tab. 31. Luftbelastung fuer das gesamte Netz STROM bzgl. der Endnachfragen ..	73
Tab. 32. Abprodukte fuer das gesamte Netz STROM bzgl. der Endnachfragen ...	73
Tab. 33. Primaerenergieaufwand fuer das gesamte Netz STROM bzgl. der End- nachfragen	73
Tab. 34. Emissionen, Abprodukte und Primaerenergieaufwand der Flachglasherstellung	75
Tab. 35. Emissionen, Abprodukte und PEA zur Herstellung von Beton B15 mit HOZ	77
Tab. 36. Emissionen, Abprodukte und PEA der Aluminiumproduktion	79
Tab. 37. Emissionen, Abprodukte und PEA zur Produktion von STAHLBLECH ..	80
Tab. 38. Herstellungsschritte bei verschiedenen Solarzellen	87

Tab. 39. Herstellungskosten (DM / Wp) für herkömmliche pn-Si-Solarzellen im Vergleich zur MIS-Technologie	88
Tab. 40. Bänder- und Plattenverfahren, eingeteilt nach der Art der formgebenden Elemente	91
Tab. 41. Bänder- und Plattenverfahren, die in jüngster Zeit weltweit entwickelt wurden.	93
Tab. 42. Si-Solarzellen-Technologien	127
Tab. 43. Gesamtbilanz der eintretenden Stoffmengen zur Herstellung multikristalliner Module	135
Tab. 44. Gesamtbilanz der eintretenden Stoffmengen zur Herstellung monokristalliner Module	136
Tab. 45. Gesamtbilanz der eintretenden Stoffmengen zur Herstellung amorpher Module	138
Tab. 46. Gesamtbilanz der eintretenden Stoffmengen zur Herstellung MIS-I-Multi-Module	139
Tab. 47. Gesamtbilanz der eintretenden Stoffmengen zur Herstellung MIS-I-Mono-Module	140
Tab. 48. Gesamtbilanz der austretenden Stoffmengen bei der Herstellung multikristalliner Module	141
Tab. 49. Gesamtbilanz der austretenden Stoffmengen bei der Herstellung monokristalliner Si-Module	142
Tab. 50. Gesamtbilanz der austretenden Stoffmengen bei der Herstellung amorpher Si-Module	143
Tab. 51. Gesamtbilanz der austretenden Stoffmengen bei der Herstellung von MIS-I-Multi-Module	144
Tab. 52. Gesamtbilanz der austretenden Stoffmengen bei der Herstellung von MIS-I-Mono-Module	145
Tab. 53. Kumulierter Energieverbrauch zur Herstellung eines PV-Moduls	147
Tab. 54. Abscheidetechniken für die verschiedenen Zellen	148
Tab. 55. Wichtigste Hüttenproduzenten von Cadmium	153
Tab. 56. Cadmiumanwendungen in der Bundesrepublik	154
Tab. 57. Jahresproduktion von Tellur in Tonnen nach Ländern	158
Tab. 58. Materialaufwand SOLARTANKSTELLE Variante S1	166
Tab. 59. Materialaufwand SOLARTANKSTELLE Variante S2	166
Tab. 60. Materialaufwand SOLARTANKSTELLE Variante S3	166
Tab. 61. Materialaufwand SOLARTANKSTELLE Variante S4	167
Tab. 62. Materialbezogene Emissionsdaten	167
Tab. 63. Emissionsfaktoren der zugrunde gelegten Fahrzeugflotten	168
Tab. 64. Grenzwerte für PKW nach einem Richtlinienentwurf der EG	168
Tab. 65. Annahmen zu den gerechneten Varianten der Solartankstellen	169
Tab. 66. Luftbelastung fuer das gesamte Netz Variante S1	172
Tab. 67. Wasserbelastung fuer das gesamte Netz Variante S1	173
Tab. 68. Abprodukte fuer das gesamte Netz Variante S1	173
Tab. 69. Primaerenergieaufwand fuer das gesamte Netz Variante S1	174
Tab. 70. Wasserbelastung fuer das gesamte Netz Variante S2	176
Tab. 71. Luftbelastung fuer das gesamte Netz Variante S2	176
Tab. 72. Abprodukte fuer das gesamte Netz Variante S2	177
Tab. 73. Primaerenergieaufwand fuer das gesamte Netz Variante S2	177

Tab. 74. Wasserbelastung fuer das gesamte Netz Variante S3	179
Tab. 75. Luftbelastung fuer das gesamte Netz Variante S3	179
Tab. 76. Abprodukte fuer das gesamte Netz Variante S3	180
Tab. 77. Primaerenergieaufwand fuer das gesamte Netz Variante S3	181
Tab. 78. Wasserbelastung fuer das gesamte Netz Variante S4	183
Tab. 79. Luftbelastung fuer das gesamte Netz Variante S4	184
Tab. 80. Abprodukte fuer das gesamte Netz Variante S4	184
Tab. 81. Primaerenergieaufwand fuer das gesamte Netz Variante S4	185
Tab. 82. Emissionen der betrachteten konventionellen Varianten in Tonnen/a ...	187
Tab. 83. Luftbelastungen der Varianten E1 und E2 in Tonnen.	187
Tab. 84. Abprodukte der Varianten E1 und E2 in Tonnen.	188
Tab. 85. Primärenergieaufwand Varianten E1 und E2 in TWh.	188
Tab. 86. Umwelterhebliche Stoffe zur Herstellung der Solartankstelle, konventio- nelle Aufständigung und multikristalline Module	189
Tab. 87. Umwelterhebliche Stoffe zur Herstellung der Solartankstelle, konventio- nelle Aufständigung und amorphe Module	190
Tab. 88. Umwelterhebliche Stoffe zur Herstellung der Solartankstelle, Seilnetz- Aufständigung und amorphe Module	191
Tab. 89. Umwelterhebliche Stoffe zur Herstellung der Solartankstelle, Seilnetz - Aufständigung und MIS-I-Module	193
Tab. 90. Spezifische Emissionen der Varianten zur Strombereitstellung	199
Tab. 91. Jahresemissionen der gerechneten Varianten	199
Tab. 92. Primärenergieaufwendungen der betrachteten Varianten	204
Tab. 93. Ausgewählte Beurteilungsverfahren zur Bestimmung der Umweltgefähr- dung nach Richt- und Grenzwerten	208
Tab. 94. Relative Kennzahlen der verschiedenen Varianten	227
Tab. 95. Belastungszahl Luft nach BUWAL für Variante S1	266
Tab. 96. Belastungszahl Luft nach VDI für Variante S1	266
Tab. 97. Belastungszahl Luft nach Vorsorgestandards für Variante S1	267
Tab. 98. Belastungszahl Wasser nach BUWAL für Variante S1	267
Tab. 99. Belastungszahl Wasser nach TrinkwasserV für Variante S1	267
Tab. 100. Belastungszahl 'Boden' für Variante S1	268
Tab. 101. Belastungszahl Luft nach BUWAL für Variante S2	270
Tab. 102. Belastungszahl Luft nach VDI für Variante S2	270
Tab. 103. Belastungszahl Luft nach Vorsorgestandards für Variante S2	271
Tab. 104. Belastungszahl Wasser nach BUWAL für Variante S2	271
Tab. 105. Belastungszahl Wasser nach TrinkwasserV für Variante S2	271
Tab. 106. Belastungszahl 'Boden' für Variante S2	272
Tab. 107. Belastungszahl Luft nach BUWAL für Variante S3	273
Tab. 108. Belastungszahl Luft nach VDI für Variante S3	273
Tab. 109. Belastungszahl Luft nach Vorsorgestandards für Variante S3	274
Tab. 110. Belastungszahl Wasser nach BUWAL für Variante S3	274
Tab. 111. Belastungszahl Wasser nach TrinkwasserV für Variante S3	275
Tab. 112. Belastungszahl 'Boden' für Variante S3	275
Tab. 113. Belastungszahl Luft nach BUWAL für Variante S4	277
Tab. 114. Belastungszahl Luft nach VDI für Variante S4	277
Tab. 115. Belastungszahl Luft nach Vorsorgestandards für Variante S4	278
Tab. 116. Belastungszahl Wasser nach BUWAL für Variante S4	278

Tab. 117. Belastungszahl 'Boden' für Variante S4	279
Tab. 118. Belastungszahl Wasser nach TrinkwasserV für Variante S4	280
Tab. 119. Belastungszahl Luft nach BUWAL für Variante B1	281
Tab. 120. Belastungszahl Luft nach VDI für Variante B1	281
Tab. 121. Belastungszahl Luft nach Vorsorgestandards für Variante B1	281
Tab. 122. Belastungszahl Luft nach BUWAL für Variante B2	282
Tab. 123. Belastungszahl Luft nach VDI für Variante B2	282
Tab. 124. Belastungszahl Luft nach Vorsorgestandards für Variante B2	282
Tab. 125. Belastungszahl Luft nach BUWAL für Variante B3	283
Tab. 126. Belastungszahl Luft nach VDI für Variante B3	283
Tab. 127. Belastungszahl Luft nach Vorsorgestandards für Variante B3	283
Tab. 128. Belastungszahl Luft nach BUWAL für Variante D	284
Tab. 129. Belastungszahl Luft nach VDI für Variante D	284
Tab. 130. Belastungszahl Luft nach Vorsorgestandards für Variante D	284
Tab. 131. Belastungszahl Luft nach BUWAL für Variante E1	285
Tab. 132. Belastungszahl Luft nach VDI für Variante E1	285
Tab. 133. Belastungszahl Luft nach Vorsorgestandards für Variante E1	285
Tab. 134. Belastungszahl 'Boden' für Variante E1	286
Tab. 135. Belastungszahl Luft nach BUWAL für Variante E2	287
Tab. 136. Belastungszahl Luft nach VDI für Variante E2	287
Tab. 137. Belastungszahl Luft nach Vorsorgestandards für Variante E2	287
Tab. 138. Belastungszahl 'Boden' für Variante E2	288
Tab. 139. Belastungszahl nach Toxizitäten für Variante S1	289
Tab. 140. Belastungszahl akute Toxizität nach Gebler für Variante S1	289
Tab. 141. Belastungszahl cancerogenes Risiko für Variante S1	290
Tab. 142. Belastungszahl Cancerogenität nach Gebler für Variante S1	290
Tab. 143. Belastungszahl Mutagenität nach Gebler für Variante S1	291
Tab. 144. Belastungszahl nach Toxizitäten für Variante S2	292
Tab. 145. Belastungszahl akute Toxizität nach Gebler für Variante S2	292
Tab. 146. Belastungszahl cancerogenes Risiko für Variante S2	293
Tab. 147. Belastungszahl Cancerogenität nach Gebler für Variante S2	293
Tab. 148. Belastungszahl Mutagenität nach Gebler für Variante S2	293
Tab. 149. Belastungszahl nach Toxizitäten für Variante S3	294
Tab. 150. Belastungszahl akute Toxizität nach Gebler für Variante S3	294
Tab. 151. Belastungszahl cancerogenes Risiko für Variante S3	295
Tab. 152. Belastungszahl Cancerogenität nach Gebler für Variante S3	295
Tab. 153. Belastungszahl Mutagenität nach Gebler für Variante S3	296
Tab. 154. Belastungszahl nach Toxizitäten für Variante S4	297
Tab. 155. Belastungszahl akute Toxizität nach Gebler für Variante S4	297
Tab. 156. Belastungszahl cancerogenes Risiko für Variante S4	298
Tab. 157. Belastungszahl Cancerogenität nach Gebler für Variante S4	298
Tab. 158. Belastungszahl Mutagenität nach Gebler für Variante S4	299
Tab. 159. Belastungszahl nach Toxizitäten für Variante B1	300
Tab. 160. Belastungszahl akute Toxizität nach Gebler für Variante B1	300
Tab. 161. Belastungszahl cancerogenes Risiko für Variante B1	300
Tab. 162. Belastungszahl Cancerogenität nach Gebler für Variante B1	301
Tab. 163. Belastungszahl Mutagenität nach Gebler für Variante B1	301
Tab. 164. Belastungszahl nach Toxizitäten für Variante B2	302

Tab. 165. Belastungszahl akute Toxizität nach Gebler für Variante B2	302
Tab. 166. Belastungszahl cancerogenes Risiko für Variante B2	302
Tab. 167. Belastungszahl Cancerogenität nach Gebler für Variante B2	303
Tab. 168. Belastungszahl Mutagenität nach Gebler für Variante B2	303
Tab. 169. Belastungszahl nach Toxizitäten für Variante B3	304
Tab. 170. Belastungszahl akute Toxizität nach Gebler für Variante B3	304
Tab. 171. Belastungszahl cancerogenes Risiko für Variante B3	304
Tab. 172. Belastungszahl Cancerogenität nach Gebler für Variante B3	305
Tab. 173. Belastungszahl Mutagenität nach Gebler für Variante B3	305
Tab. 174. Belastungszahl nach Toxizitäten für Variante D	306
Tab. 175. Belastungszahl akute Toxizität nach Gebler für Variante D	306
Tab. 176. Belastungszahl cancerogenes Risiko für Variante D	306
Tab. 177. Belastungszahl Cancerogenität nach Gebler für Variante D	307
Tab. 178. Belastungszahl Mutagenität nach Gebler für Variante D	307
Tab. 179. Belastungszahl nach Toxizitäten für Variante E1	308
Tab. 180. Belastungszahl akute Toxizität nach Gebler für Variante E1	308
Tab. 181. Belastungszahl cancerogenes Risiko für Variante E1	308
Tab. 182. Belastungszahl Cancerogenität nach Gebler für Variante E1	309
Tab. 183. Belastungszahl Mutagenität nach Gebler für Variante E1	309
Tab. 184. Belastungszahl nach Toxizitäten für Variante E2	310
Tab. 185. Belastungszahl akute Toxizität nach Gebler für Variante E2	310
Tab. 186. Belastungszahl cancerogenes Risiko für Variante E2	310
Tab. 187. Belastungszahl Cancerogenität nach Gebler für Variante E2	311
Tab. 188. Belastungszahl Mutagenität nach Gebler für Variante E2	311
Tab. 189. Belastungszahl nach Ökotoxizitäten für Variante S1	312
Tab. 190. Belastungszahl Ökotoxizität nach Gebler für Variante S1	312
Tab. 191. Belastungszahl nach Ökotoxizitäten für Variante S2	313
Tab. 192. Belastungszahl Ökotoxizität nach Gebler für Variante S2	313
Tab. 193. Belastungszahl nach Ökotoxizitäten für Variante S3	314
Tab. 194. Belastungszahl Ökotoxizität nach Gebler für Variante S3	314
Tab. 195. Belastungszahl nach Ökotoxizitäten für Variante S4	315
Tab. 196. Belastungszahl Ökotoxizität nach Gebler für Variante S4	315
Tab. 197. Belastungszahl nach Ökotoxizitäten für Variante B1	316
Tab. 198. Belastungszahl Ökotoxizität nach Gebler für Variante B1	316
Tab. 199. Belastungszahl nach Ökotoxizitäten für Variante B2	317
Tab. 200. Belastungszahl Ökotoxizität nach Gebler für Variante B2	317
Tab. 201. Belastungszahl nach Ökotoxizitäten für Variante B3	318
Tab. 202. Belastungszahl Ökotoxizität nach Gebler für Variante B3	318
Tab. 203. Belastungszahl nach Ökotoxizitäten für Variante D	319
Tab. 204. Belastungszahl Ökotoxizität nach Gebler für Variante D	319
Tab. 205. Belastungszahl nach Ökotoxizitäten für Variante E1	320
Tab. 206. Belastungszahl Ökotoxizität nach Gebler für Variante E1	320
Tab. 207. Belastungszahl nach Ökotoxizitäten für Variante E2	321
Tab. 208. Belastungszahl Ökotoxizität nach Gebler für Variante E2	321
Tab. 209. Vergleich der Belastungszahlen Luft BUWAL	324
Tab. 210. Vergleich der Belastungszahlen Luft VDI, Mensch, 24-h-Mittelwerte	324
Tab. 211. Vergleich der Belastungszahlen Luft nach Vorsorgestandards	324
Tab. 212. Vergleich der Belastungszahlen Wasser nach BUWAL	325

Tab. 213. Vergleich der Belastungszahlen Wasser nach Trinkwasserverordnung ..	325
Tab. 214. Vergleich der Deponievolumina, ohne Wiederverwertungsraten	325
Tab. 215. Vergleich der Belastungszahlen nach Toxizitäten LD	326
Tab. 216. Vergleich der Belastungszahlen nach Toxizitäten (Gebler)	326
Tab. 217. Vergleich der Belastungszahlen nach cancerogenem Risiko	326
Tab. 218. Vergleich der Belastungszahlen Cancerogenität nach Gebler	327
Tab. 219. Vergleich der Belastungszahlen Mutagenität nach Gebler	327
Tab. 220. Vergleich der Belastungszahlen Ökotoxizität	328
Tab. 221. Vergleich der Belastungszahlen Ökotoxizität nach Gebler	328

1.0 Zusammenfassung

Untersuchungen zur Umweltverträglichkeit photovoltaischer Systeme sind bisher nur vereinzelt vorgelegt worden. In den USA hat insbesondere das Brookhaven National Laboratory (BNL) seit etwa 1980 Arbeiten zu diesem Bereich ausgeführt. Überwiegend konzentrierten sich diese Arbeiten auf Verbindungshalbleitern basierenden Solarzellen /Moskowitz 91/. In der Bundesrepublik wurde in 1989 eine Arbeit zum Gefährdungspotential bei der Herstellung von Silizium-Solarzellen an der Gesamthochschule Wuppertal ausgeführt /Tietze 89/. Eine Literaturstudie des Katalyse-Institutes beschäftigte sich mit den Umweltauswirkungen bei der Herstellung, Gebrauch und Entsorgung von CdTe-Solarzellen /Karus 92/. In der Schweiz befaßte sich die Gruppe Energie-Stoffe-Umwelt an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich in einer umfangreichen und detaillierten Semesterarbeit mit den Umweltaspekten bei der Herstellung von monokristallinen Silizium-Modulen /Häne 91/.

1.1 Problemstellung, Untersuchungsumfang, Vorgehensweise

Die entwickelte Methode zur Umweltvorsorgeprüfung und die hierzu erarbeiteten Hilfsmittel (vgl. Band 2 bzw. Band 3) waren am konkreten Beispiel "Photovoltaik" auf Aussagekraft und Handhabbarkeit zu testen.

Ziele der Arbeiten zur Umweltvorsorgeprüfung waren:

- ein Prüfverfahren zu entwickeln, welches dazu beiträgt, möglichst früh die Wirkungen auf Mensch und Umwelt einer durch ein Forschungsvorhaben intendierten technischen Entwicklung zu erkennen
- entsprechend dem breiten umweltpolitischen Konsens ein Instrument zu entwickeln, dem der Vorsorgegedanken ("Zukunftsverträgliche Entwicklung") als Richtschnur dient und gleichzeitig erlaubt, die Wissensbasis für eine vorsorgende Umweltforschung sowie zu umweltpolitischen Gestaltungsalternativen zu erweitern
- dem Entscheidungsträger ein Hilfsmittel an die Hand zu geben, das zu einem möglichst frühen Zeitpunkt die Entscheidung, welche der Umweltaspekte als relevant anzusehen sind und als Ziele oder Kriterien formuliert Bestandteil des Forschungsvorhaben werden sollen, zu verbessern hilft
- aus der Sicht der Umweltvorsorge F&E-Lücken aufzuzeigen

Zur Festigung der Beurteilungsbasis war für einen Teilbereich der Photovoltaik eine detaillierte Analyse der auftretenden Stoffströme vorzunehmen.

Die Durchführung dieser Arbeiten sollte neben dieser methodenbezogenen Zielsetzung zugleich auch konkrete Hinweise zur Umweltrelevanz photovoltaischer Systeme liefern sowie aus Umweltgesichtspunkten heraus ggf. Forschungslücken im Photovoltaik-Bereich aufzeigen.

Die Methode beinhaltet im Wesentlichen eine Beurteilung anhand einer vergleichenden Darstellung der konkurrierenden Techniken. Aus der Vielzahl der möglichen Anwen-

dungen (zentral, dezentral) und der Konkurrenztechniken konnte aus Kapazitäts- und Zeitgründen nur ein Anwendungsfall zum Alternativenvergleich herangezogen werden.

Das Elektroauto ("E-Auto") wurde als Beispiel gewählt, da es sich zur Zeit in intensiver wissenschaftlicher und politischer Diskussion befindet. Wegen der für praktische Zwecke kurzen Reichweite solcher Autos mit den heute verfügbaren Batterien ist vor allem an einen Einsatz in den hochbelasteten Innenstädten gedacht, was aber durchaus umstritten ist. Deshalb wird ein anderer Anwendungsfall im Detail vorgestellt, bei dem zum einen die täglich gefahrenen Kilometer - im Mittel - auch von E-Autos abgedeckt werden können und zum anderen auch eine solare Teilversorgung vorstellbar ist.

Als Vergleichsgröße wird das PKW-Verkehrsaufkommen durch "tägliche Berufsfahrten im Personennahverkehr (PNV)" herausgegriffen. Modellmäßig wird angenommen, daß der Berufsnahverkehr durch Elektroautos abgewickelt wird, deren Batterien auf den Firmenparkplätzen aufgeladen werden sollen. Diese Ladestationen mit Netzanschluß sollen durch PV-Panels versorgt werden. Überschußerzeugung zu Nichtarbeitszeiten (Wochenenden, Urlaubszeiten) soll ans Netz abgegeben, der Mehrbedarf über konventionelle Stromerzeugung aus dem Netz entnommen werden.

Hier wird folgender Analyseweg verfolgt: Es wird der PKW-Personennahverkehr (PNV) durch Berufsfahrten ("Pendler") des Jahres 1987 in den alten Bundesländern genommen, aber der technische Stand der PKWs im Jahr 2005 jeweils nach den Trend- und Reduktions-Szenario /nach Enquete 90/, angesetzt (ausgedrückt durch die Emissionen pro Personenkilometer an CO_2 , CO, NO_x , SO_2 , CH, Partikel). Zusätzlich wird auch der Öko-Polo von VW als zukünftige Diesel-betriebene Kleinwagenvariante in die Untersuchung einbezogen. Für das genannte Verkehrsaufkommen wird abgeschätzt, welche Emissionsreduktionen der Einsatz von Elektroautos mit solarer (Teil-)Versorgung bringen kann. Die Emissionen schließen neben dem direkten Einsatz der Treib- und Brennstoffe auch deren Bereitstellung ab Primärenergieressourcen ein. Andere Vorleistungen sind auf der "konventionellen" Seite (Bau der Kraftwerke, Raffinerien etc.) wegen Unerheblichkeit gegenüber dem Brennstoffdurchsatz beim Betrieb nicht berücksichtigt, ebenso keine Emissionen durch Unfälle. Bei den PV-Panels werden die Vorleistungen auch für die Abstützungen mit einbezogen. Betrachtungsraum sind die alten Bundesländer.

Betrachtete Varianten

Entsprechend der Zielsetzung ist für das definierte Teilsystem ein Vergleich für verschiedene Varianten (heutige Teilwelt gegen neue - PV-gestützte Teilwelt) durchgeführt worden.

Für die Analyse wurden, da auf dem Markt recht unterschiedliche Elektro-PKW ("E-PKW")-Größen angeboten werden /Weidmann 92, Scheurer 92, Burkner 92, Mobil E 92, Blandow 91/, im Sinne von "Benchmarks" zwei alternative Leistungsklassen betrachtet, die durch den mittleren Nachladebedarf (ab Steckdose) pro 100 Personenkilometer (Pkm) definiert sind:

1. 35 kWh(el)/100 Pkm "groß" (Bsp. VW-City STROMER)
2. 15 kWh(el)/100 Pkm "klein" (Bsp. Mini-el-City)

Hier handelt es sich um jahresdurchschnittliche Effektivzahlen unter Einschluß von Jahreszeiten und Heizbedarf für den beruflichen PNV. Im Band 5 sind fünf derzeit schon am Markt erhältliche PV- Modultypen auf Si-Basis näher beschrieben:

- "klassisch" multi- und monokristallin, amorph
- MIS-I multi- und monokristallin ("Metal-Insulator-Semiconductor-Inversionsschicht")

Im Sinne einer "Benchmark"-Analyse werden auch hier der Übersichtlichkeit halber 3 Extremfälle betrachtet:

- amorphes Si (Modul- η = 6%), weil es ein Sonderfall ist
- der niedrigste und der höchste kristalline Wirkungsgrad,

also

- "klassisch" multi (Modul- η = 9,6 %)
- MIS-I mono (Modul- η = 12,5 %)

Solartankstellen

Die Vorstellung der Applizierung der Module geht davon aus, daß die Panels - mehr oder weniger - eben parallel zu den Parkplätzen diese überdecken. Für zwei Aufständervarianten wurde der Materialaufwand abgeschätzt:

1. Optimierte 2-Bein-Aufständervariante einer PV-Anlage in Analogie zu Koborn-Gondorf
2. "Leichtes Flächentragwerk aus Seilnetzen" /Wecker 92/

Diese Vorleistungen bzw. die Emissionen bei deren Herstellung werden ebenfalls berücksichtigt. Die Erhebung von Fabrikationsemissionen bei Komponentenmaterialien (Flachglas, Aluminium, Stahl, Zement) war ebenfalls Bestandteil dieses Projekts (Band 4). Es verbleibt noch die Verknüpfung von Modultypen, Aufständervariante und E-PKW-Größe im Sinne der Benchmark (Mini-max-)Analyse, die schließlich zu 4 Varianten für den Alternativenvergleich führt:

1. Variante S1
K-multi, 2-Bein, 35 kWh/100 Pkm
2. Variante S2
Amorph, 2-Bein, 35 kWh/100 Pkm
3. Variante S3
Amorph, Seilnetz, 15 kWh/100 Pkm
4. Variante S4
MIS-I-mono, Seilnetz, 15 kWh/100 Pkm

Es wurden hier entweder alle "positiven" (emissionsarmen) oder alle "negativen" Eigenschaften kombiniert. Bezüglich der weiteren Größen, die den solaren Stromertrag der Solartankstelle bestimmen, sei hier noch folgendes angeführt:

- Parkplatzfläche pro E-PKW: 10 m^2 . Dieser Wert liegt eher auf der kleineren Seite gegenüber üblichen Parkplatzflächen.
PV-Panelfläche = Parkplatzfläche.
- Jährliche solare Jahreseinstrahlung/ m^2 : 1000 kWh(th) .
Diese sollen auch pro m^2 Panelfläche mit dem jeweiligen Modulwirkungsgrad "geerntet" werden, also zwischen $60 \text{ kWh(el)}/\text{m}^2 \cdot \text{a}(\text{amorph})$ über $96 \text{ kWh(el)}/\text{m}^2 \cdot \text{a}$ (K-multi) und $125 \text{ kWh(el)}/\text{m}^2 \cdot \text{a}$ (MIS-I-mono). Dies ist sicher eine optimistische Annahme über beschattungsfreie und dichte Aufständierungen der PV-Panels. Die Abhängigkeit des effektiven flächenbezogenen PV-Wirkungsgrads von Aufständierungsvarianten ist z.B. in /Brosthaus 90/ behandelt.
- Die durchschnittliche Tagesfahrstrecke der "Berufspendler" liegt inzwischen bei etwa 25 Pkm /Enquete 90/. Die ca. 220 Jahresarbeitstage führen damit zu einer Jahresstrecke als Berufspendler von etwa 5500 Pkm . Dies führt für die 2 E-PKW- Größen zu folgenden, jährlichen Nachladungen (aus der Steckdose) pro PKW (bzw. 10 m^2 Parkplatzfläche):

$$35 \text{ kWh}/100 \text{ Pkm} = = = = = > 1925 \text{ kWh(el)}/\text{a}$$

$$15 \text{ kWh}/100 \text{ Pkm} = = = = = > 825 \text{ kWh(el)}/\text{a}$$

Die Aufsplittung zwischen solarer und konventioneller Versorgung der E-PKWs wird im Kapitel „Eingangsdaten der alternativen Szenarien“ auf Seite 168 zusammen mit den anderen Eingangsdaten der Szenariorechnungen abgeleitet und angegeben. Die zur Errichtung der Solartankstellen notwendigen Materialaufwendungen sind in Tab. 58 auf Seite 166 bis Tab. 61 auf Seite 167 dargestellt.

Die hierfür erforderliche Datenerhebung hat die Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE), München ausgeführt. Diese Arbeit, die im Band 5 dokumentiert ist, beinhaltet eine eingehende Analyse der bei Herstellung verschiedener Solarzellentypen auftretenden Stoffflüsse. Neben dem direkten und indirekten prozeßbedingten Stoffumsätzen wurde in Zusammenarbeit mit den Herstellern die Angaben zu den spezifischen und kumulierten Energieverbräuchen bei der Herstellung der Solarzellen den aktuellen Produktionsbedingungen angepaßt. Diese Angaben gestatten die Ermittlung der umweltrelevanten, energetisch bedingten Emissionen.

Die Stoffeinträge in die Umwelt bei der Herstellung der Nicht- PV-Komponenten (Glas, Stahl, NE-Metalle, Kunststoffe, Beton etc.) wurden eigenen /Hantzsche 91a,b, Band 4/ und externen Untersuchungen /Fritsche 89c, Enquete 90/ entnommen. Die projektinternen Erhebungen sind im Kapitel „Emissionsanalyse konventioneller Bau- und Werkstoffe“ auf Seite 73 wiedergegeben.

Bei den konventionellen Alternativen handelt es sich um die PKW-Flotten mit Benzin-, Diesel- sowie Elektroantrieb.

Die "mittlere" Fahrzeugflotte, wie sie zum gewählten Betrachtungszeitraum 2000-2005 voraussichtlich aussehen wird, ist hier festgelegt nach den beiden Szenarien 'Trend' und 'Reduktion' nach /Enquete 90/. Als abrundende Vergleichsbasis für den E-PKW wird zusätzlich ein auf niedrigen Verbrauch getrimmter konventioneller PKW, der ÖKO-Polo von VW /Scheurer 92/ herangezogen. Hintergrund ist dabei die Überlegung, daß ein Vergleich von Zukunftsoptionen auch PKWs gleicher motorischer Leistung ein-

schließen sollte. E-PKWs liegen typischerweise zwischen 12- 35 kW, PKWs auf Treibstoffbasis im allgemeinen aber über 40 kW und sind in Reichweite, Beschleunigung und Höchstgeschwindigkeit den E-PKWs weit überlegen /Blümel 91, E-Wi 10/92/. Die spezifischen Emissionsdaten der Fahrzeugflotte und des ÖKO-Polo (Diesel) /Enquete 90, Scheurer 92, Brosthaus 90/ sind wie folgt, wobei die Emissionen der Treibstoffbereitstellung schon mitberücksichtigt sind:

Schadstoff	'87 (Variante B1)	"Trend" (Variante B2)	"Reduktion" (Variante B3)	"Öko-Polo" ¹ (Variante D)
CO ₂	182	166	132	121.5
HC	2,3	0.75	0.49	0.29
NO _x	2,1	0.49	0.38	0.66
SO ₂	0,14	0.057	0.046	0.21
CO	11	2.50	2.00	0.82
Partikel	0.13	0.048	0.012	0.002

Tab. 1. Emissionsfaktoren der zugrunde gelegten Fahrzeugflotten:

in g/Pkm nach /Enquete 90/, /Scheurer 92/

¹Beim ÖKO-Polo wurde der Vorleistungsbeitrag auf der Basis eines Verbrauchs von 4 l/100 Pkm berechnet.

Die von der Enquete-Kommission unterstellten Werte für die Fälle "Trend" und "Reduktion" entsprechen realistischen Abschätzungen. So werden in einem Richtlinienentwurf der EG vom Januar 1993 folgende Grenzwerte vorgeschlagen (vgl. Tab. 2).

Fahrzeugmotor	CO	HC + NO _x	Partikel
Benzinmotor	2.2	0.5	-
Dieselmotor indirekte Einspritzung	1.0	0.7	0.08
Dieselmotor Direkteinspritzung	1.0	0.9	0.10

Tab. 2. Grenzwerte für PKW nach einem Richtlinienentwurf der EG:

in g/km /Bundesrat 100/93 /

Für das Jahr 2000 wird ein umfassenderes Konzept für weitere Emissionssenkungen gefordert. Allerdings unterblieb bisher eine Konkretisierung.

Elektromobile (Varianten E1, E2)

Da als Anwendungsbeispiel für die Photovoltaik ein Ausschnitt aus dem Verkehrssektor genommen wird, dessen Kennzahlen (Verkehrsaufkommen, PKW-Emissionen etc.) nur für die alten Bundesländer abgeschätzt wurden (und derzeit auch nur für diese geschätzt werden können), bezieht sich auch der Mix des öffentlichen Kraftwerksparks nur auf die alten Bundesländer ("West"-BRD). Der unterstellte Kraftwerksmix und dazugehörige Emissionsfaktoren sind im Kapitel „Emissionsanalyse der Energiebereitstellung“ auf Seite 72 dargestellt.

1.2 Ergebnisse der Stoffstromanalysen

Für die Deckung von 90,4 Mrd Pkm B-PNV (Zeitraum um 2005, nur alte Bundesländer) stehen 10 Varianten zum Vergleich an:

- vier konventionelle PKW-Flotten:

Variante B1	KFZ-Bestand 1987
Variante B2	Trend-Szenario
Variante B3	Reduktions-Szenario
Variante D	Öko-Polo

- zwei E-PKW-Typen und Deckung des Strombedarfs über den Kraftwerk-Mix allein:

Variante E1	"Kleinwagen" (15 kWh/100 Pkm)
Variante E2	"Mittelklasse" (35 kWh/100 Pkm)

- zwei E-PKW-Typen und Deckung des Strombedarfs über "Solartankstellen" ("STS") mit vier verschiedenen Modultypen und Kraftwerk-Mix:

Variante S1	"Mittelklasse" (35 kWh/100 Pkm) Multikristalline Module Konventionelle Aufständerung
Variante S2	"Mittelklasse" (35 kWh/100 Pkm) Amorphe Module Konventionelle Aufständerung
Variante S3	"Kleinwagen" (15 kWh/100 Pkm) Amorphe Module Seilnetz-Aufständerung
Variante S4	"Kleinwagen" (15 kWh/100 Pkm) Monokristalline Module Seilnetz-Aufständerung

Die Umrechnung auf jährliche Emissionszahlen der Solarvarianten erfolgt unter der Annahme von 20 Jahren Lebensdauer der PV-Module.

1.2.1 Emissionen im Vergleich

Eine schnelle Übersicht zu den atmosphärischen Emissionen der 10 genannten Varianten gibt nachfolgende Tabelle:

Variante	CO ₂	CO	HC	NMVOC ¹	NO _x	SO ₂	Stäube
B1	16500	994	208	181	190	12	11
B2	15000	226	68	50	44.3	5.2	4.3
B3	11900	181	44.3	26	34.4	4.2	1.1
D	11000	74	26	13	60	19	0.2
E1	8035	1.7	20	0.3	6.3	6.7	0.7
E2	18740	4	46.7	0.6	14.7	15.7	1.7
S1 K ²	9393	2.0	23.4	0.3	7.4	7.9	0.9
S1 S ³	1439	6.8	0.5	0.1	3.5	3.6	1.0
S2 K ²	12880	2.7	32.1	0.4	10.1	10.8	1.2
S2 S ³	821	6.6	0.5	0.1	1.5	0.8	1.0
S3 K ²	2168	0.5	5.4	0.1	1.7	1.8	0.2
S3 S ³	592	1.9	0.4	0.1	0.8	0.8	0.3
S4 K ²	-	-	-	-	-	-	-
S4 S ³	820	1.4	0.2	0	1.9	2.5	0.2

Tab. 3. Jahresemissionen der gerechneten Varianten:
bezogen auf 90,4 Mrd Pkm des B-PNV in 1000 t/a
¹ = Non Methane Volatile Organic Compounds
² = Kraftwerksbedingt
³ = Solarbedingt über Vorleistungen

Ergebnisse des Emissionsmengenvergleichs

Aus dem Vergleich der quantitativen Ergebnisse sind unter anderem folgende Aussagen herzuleiten:

- Technische Rückhaltemaßnahmen und motorische Leistungsreduzierungen lassen eine deutliche Abnahme der Emissionen sowohl bei CO₂ als auch bei den "konventionellen" Luftschadstoffen erwarten. Der hier vorgestellte ÖKO-Polo ist den Mittelwerten der "Trend"- und "Reduktions"-Szenarios aus /Enquete 90/ deutlich überlegen mit Ausnahme von NO_x und SO₂ (Diesel!).
- Bei Versorgung der Elektro-PKW's aus dem Netz ist festzuhalten:
 1. Auch hier ist die Größe der Fahrzeuge (ihr spezifischer Energiebedarf) ein wesentlicher Faktor bei den Emissionen
 2. Die Struktur des Kraftwerksparks ist der entscheidende Faktor: Der Mix der alten Bundesländer mit seinem hohen fossilen Anteil führt bei großen E-PKW's zu sehr hohen CO₂-Emissionen. Bei kleinen E-PKW's liegen die Emissionen deutlich niedriger als bei den konventionellen PKW's - mit Ausnahme von SO₂ und eventuell HC. Bei anderen Kraftwerksparks würden die Relationen anders liegen. So wären z.B. in Bayern mit seinem starken Beitrag von Kernenergie und

Wasserkraft (allerdings ohne Berücksichtigung von Flächenverbrauch und Belastungen aus dem nuklearen Brennstoffkreislauf) deutlich günstigere Emissionsdaten anzusetzen /Wagner 92, Scheurer 92/..

An dieser Stelle sei nochmals auf die implizite Annahme hingewiesen, daß bei Einspeisung von solarem Überschußstrom ins Netz jeweils genau der Kraftwerksmix in Betrieb ist und gleichmäßig um die eingespeiste Solarleistung zurückgefahren wird. Bei einer detaillierten Analyse müßte der jeweilige Lastgang und der Einsatz der konventionellen Kraftwerkstypen berücksichtigt werden /Sporckmann 92/.

3. Uneinheitlich ist das Bild bei HC wegen der hohen CH_4 -Emissionen (durch die Bewetterung der Gruben) bei der Kohlebereitstellung. Die SO_2 -Emissionen sind bei den konventionellen PKWs relativ günstig, allerdings würde ein forciert Einsatz von Diesel heutiger Konsistenz ($\sim 0,5\%$ S) hier wieder einen Anstieg bringen.

- Bei den solar gestützten E-PKWs ("Solartankstellen") ist folgendes festzustellen:

1. Auch hier ist die Leistungsgröße ein wesentlicher Faktor für die Emissionen, gefolgt vom Wirkungsgrad der Solar- Module. Beide Größen bestimmen den solaren Deckungsgrad und damit den Beitrag der Kraftwerksemissionen.
2. Die Emissionen des Kraftwerkanteils überwiegen meist deutlich die Emissionen des PV-Teils mit den zwei wichtigen Ausnahmen CO und Stäube. (Der hohe CO-Ausstoß kommt im wesentlichen vom Materialaufwand bei der Aufständigung, vor allem vom Stahl).
3. Untereinander sind die Optionen mit und ohne PV nur für gleiche Leistungsklassen ("groß" bzw. "klein") vergleichbar:
 - Bezüglich einer reinen Kraftwerksversorgung sind CO_2 , NO_x und SO_2 bei solaren Teilversorgung niedriger, CO aber deutlich höher.
 - Im Vergleich zu den konventionellen PKWs liegt beim großen E- PKW SO_2 höher als bei den PKWs "Trend" und "Reduktion". Weiter würden beim großen E-PKW a-Si-Module mit heutigem Status keine CO_2 -Entlastung bringen. Die CO_2 -Emissionen wären wesentlich höher als beim "Reduktions"-PKW und beim ÖKO-Polo. Letzterer wäre sogar beim HC-Wert günstiger.
4. Staubemissionen (SiO_2 -Feinststäube bei der Herstellung von Roh-Si) sind die "atmosphärische" Schwachstelle der kristallinen Photovoltaik. Diese Staubwerte der PV liegen mindestens so hoch wie bei alleiniger Kraftwerksversorgung und vergleichbar mit den PKW-Werten. Allerdings ist noch ein erhebliches Minderungspotential bzgl. der Staubemissionen aus der Herstellung von PV zu vermuten.
5. Solarmodule mit hohem Wirkungsgrad zeigen gegenüber allen anderen Varianten ein günstigeres Emissionsverhalten.

1.2.2 Primärenergieaufwendungen

Die Berechnung des Primärenergieaufwands der 10 verschiedenen Varianten umfaßt hier folgende Anteile:

- Bei den "Solartankstellen" den gesamten Energieaufwand für die Erstellung der PV-Module und die "Tankstellen" Komponenten Aufständigung, Verkabelung, Gleichspannungsverteilung, Wechselrichter und Netzanschluß /Hagedorn 92/. Die Betriebsdauer der Solartankstellen wird mit 20 a vorausgesetzt. Erst danach sollen Anlagenteile zu ersetzen sein.
- Bei den Kraftwerken und den brennstoffmotorischen PKWs ist nur der Brennstoffeinsatz und dessen Bereitstellungsaufwand, jedoch keine Aufwendungen für Anlagen- oder PKW-Herstellung berücksichtigt.
- Beim Elektrofahrzeug wird ebenfalls kein Herstellungsaufwand angesetzt.

Damit errechnen sich folgende Primärenergieaufwendungen in TWh/a für die 90,4 Mrd Pkm/a (vgl. nachfolgende Tabelle):

Varianten	Kraftwerksmix	Solartankstelle	Gesamt
E1	41,1	-	41,1
E2	95,9	-	95,9
S1	48,1	13,7	61,8
S2	66,0	7,8	73,8
S3	11,1	6,6	17,7
S4	-	7,7	7,7
B1	-	-	63,8
B2	-	-	59,0
B3	-	-	46,2
B4	-	-	39,1

Tab. 4. Primärenergieaufwendungen der betrachteten Varianten:
bezogen auf 90.4 Mrd Pkm / a.

Für den ÖKO-Polo wurden 4 l/100 Pkm Dieseltreibstoff angesetzt (unterer Heizwert 35,65 MJ/l /Weidmann 92/, Wirkungsgrad der Bereitstellung 91,5 % /Blandow 91/. Nach /Blandow 91/ müßte man beim "kleinen" E-PKW ca. 12-18 TWh/a und beim "großen" E-PKW ca. 20-28 TWh/a zusätzlichen Primärenergieaufwand aus der Herstellung ansetzen, bei den normalen PKWs nur 7-12 TWh/a wegen der entfallenden Batteriespeicher. Diese Zahlen würden deutliche Korrekturen darstellen.

1.3 Beurteilung der untersuchten Alternativen

1.3.1 Beurteilungskriterien

Die Beurteilungsverfahren bauen auf drei unterschiedlichen Wertesystemen auf:

- Grenz- und Richtwerte
- toxikologische Daten
- ökotoxikologische Daten.

a) Nach Grenz- und Richtwerten

Es gibt eine Vielzahl von Bestimmungen, die Umweltbereichen zugeordnet werden können. Innerhalb dieser Umweltkompartimente kann nach Akzeptoren (Mensch, Flora, Fauna) unterschieden werden. Eine große Differenzierung (z.B. nach empfindlichen Pflanzen, sehr empfindliche Pflanzen etc.) ist insbesondere für Luftschadstoffe möglich. Je nach Fragestellung können somit unterschiedliche Grenz- bzw. Richtwerte für die Untersuchung herangezogen werden.

Die Belastungszahl ergibt sich aus der Division von Emission und Grenzwert. Diese Zahl gibt das kritische Volumen an, das zur Verdünnung der Stoffe notwendig ist, um den Grenzwert einzuhalten.

b) Nach Toxizitäten

Hierbei wird die Stoffmenge durch den LD-Wert dividiert, der am sensibelsten Organismus ermittelt wurde. Aufgrund der vorhandenen Daten empfiehlt es sich, als Toxizitätswert den LD_{50} oder LD_0 -Wert¹ zu nehmen.

Die so ermittelte Zahl gibt die kritische Biomasse an, die notwendig ist, damit die zugrunde gelegte Wirkschwelle nicht überschritten wird.

c) Nach Ökotoxizitäten

Zusätzlich zu der mit Hilfe der Toxizität ermittelten Belastungszahl wird die Persistenz sowie die Akkumulation (eingesetzt als Biokonzentrationsfaktor BCF) berücksichtigt.

Die so ermittelte Zahl gibt die kritische Biomasse an, die notwendig ist, damit die zugrunde gelegte toxikologische Wirkschwelle unter Berücksichtigung ökotoxikologischer Parameter nicht überschritten wird.

¹ letale Dosis einer Substanz, bei der nach der Versuchsdauer voraussichtlich 50 % bzw. der Erste der Spezies stirbt

Einschätzung der erzielbaren Ergebnisse

Die Beurteilungsverfahren ermöglichen eine vergleichende Darstellung der von den betrachteten Varianten ausgehenden Umweltbelastungen. Die quantitativen Umweltauswirkungen werden über den gesamten Lebenszyklus pro Schadstoff aufsummiert und zu einem Gesamtwert pro Kompartiment aufaddiert. Eine weitergehendere Aggregation erscheint nicht sinnvoll.

Die Beziehungen der einzelnen Verfahren untereinander sind dadurch gekennzeichnet, daß bei allen drei Typen von Beurteilungsverfahren ein Bezug zu einem limitierenden Wert hergestellt wird. Die Beurteilung der Technik erfolgt durch lineares Aufsummieren der einzelnen Belastungszahlen. Eine Berücksichtigung von nichtlinearen Einflüssen wie Synergismen und Antagonismen ist somit nicht möglich.

Die Ermittlung der Belastungszahlen erfolgt auf Basis der in den Kapiteln „Ergebnisse der Prozeßkettenanalysen zu den Solartankstellen“ auf Seite 170 und „Ergebnisse der Prozesskettenanalysen zu den konventionellen PKW's“ auf Seite 187 für die einzelnen Varianten genannten Zahlen.

Zur Beurteilung wurden folgende 13 Größen verwendet:

- Mengenbetrachtung: Erforderliches Deponievolumen
- Nach Grenz- und Richtwerten
 - Grenzwerte für Luftschadstoffe nach BUWAL ²
 - Grenzwerte für Luftschadstoffe nach der VDI-Richtlinie Nr. 2310
 - Richtwerte für Luftschadstoffe nach UBA, WHO, VDI
 - Grenzwerte für Wasserschadstoffe nach BUWAL
 - Grenzwerte für Wasserschadstoffe nach der Trinkwasserverordnung
- Nach Toxizitäten
 - Letale Dosen (LD_0)
 - Letale Dosen (t_x) nach Gebler
- Nach Ökotoxizitäten
 - Ohne Klasseneinteilung auf der Basis von Daten zu Akuter Toxizität (LD_0), sowie Akkumulationsvermögen und der Persistenz
 - Mit Klasseneinteilung auf der Basis von Daten zu Akuter Toxizität (t_x '), Cancerogenität und Mutagenität sowie Akkumulationsvermögen und der Persistenz
- Genotoxizität
 - Cancerogenes Risiko ³
 - Cancerogenität nach Gebler
 - Mutagenität nach Gebler

Die detaillierten Ergebnisse sind im Anhang A wiedergegeben.

² siehe Abkürzungsverzeichnis im Anhang C

³ Diejenige Konzentration, bei der bei einer lebenslangen Exposition statistisch ein zusätzlicher Krebsfall pro 1 Million Personen auftritt

1.3.2 Vergleich der ermittelten Belastungszahlen

Eine vergleichende zahlenmäßige Gegenüberstellung der einzelnen Varianten erfolgt im Anhang B. Die Diskussion erfolgt im Kapitel „Vergleich der ermittelten Belastungszahlen“ auf Seite 211 (vgl. Abb. 31 auf Seite 212 bis Abb. 43 auf Seite 224).

1. Beurteilungsverfahren 1

Im Beurteilungsverfahren 1 werden die maximalen Immissionskonzentrationen der Schweizerischen Bundesanstalt für Wasser, Abfall und Luft (BUWAL), die allgemein auf den Schutz von Mensch und Umwelt ausgerichtet sind, herangezogen. Die Stoffliste umfaßt 17 Stoffe bzw. Stoffklassen. Bei allen Varianten fallen NO_x und SO_2 entscheidend ins Gewicht. Alle übrigen Stoffe sind nach diesem Beurteilungsverfahren vernachlässigbar.

Bezüglich der von der BUWAL-Liste erfaßten Stoffe ist die Datenlage insbesondere im Blick auf die hier relevanten Stoffe SO_2 und NO_x als gut zu bezeichnen.

Bei den benzin- und dieselbetriebenen PKWs spielt NO_x die dominierende Rolle, während bei den übrigen Varianten SO_2 und NO_x in etwa zu gleichen Teilen zur Belastungszahl beitragen.

Im Gegensatz zu der konventionellen PKW-Flotte werden bei der Stromerzeugung die hier relevanten Schadstoffe SO_2 und NO_x spezifisch betrachtet effektiver zurückgehalten. Dies spiegelt sich auch im Vergleich der untersuchten Varianten wider. Die Varianten S3 und S4 zeigen die geringsten Belastungszahlen.

2. Beurteilungsverfahren 2

Im Beurteilungsverfahren 2 werden die maximalen Immissionskonzentrationen der VDI-Richtlinie 2310 zur Beurteilung herangezogen. Die hier festgelegten Grenzwerte sind definiert als diejenigen Konzentrationen in bodennahen Schichten der freien Atmosphäre bzw. bei Staub auch als diejenigen Niederschlagsmengen im Gelände, unterhalb derer nach dem heutigen Wissensstand Mensch, Tier, Pflanze und Sachgüter nach Maßgabe der Präambel sicher geschützt sind. Hier wurden nur die Grenzwerte zum Schutz des Menschen herangezogen. Die Stoffliste für den Menschen umfaßt 11 Stoffe. Die hier ermittelten Relationen spiegeln die Ergebnisse aus dem Beurteilungsverfahren 1 wieder.

3. Beurteilungsverfahren 3

Die verwendeten Vorsorgewerte sind den Richtlinien von VDI 2310 (Fluor), WHO (SO_2) und UBA (NO_x) nach /Kühling 90/ entnommen. Diese Werte sollen den Schutz sehr empfindlicher Pflanzen sowie forstwirtschaftlicher Flächen und nährstoffarmer Vegetationsgesellschaften sicherstellen. Wichtigster Schadstoff bei allen Varianten ist NO_x . Nur bei der Variante S4 ist die entscheidende Komponente Fluor.

Für die drei genannten Stoffe ist die Datenlage im allgemeinen als gut zu bezeichnen. Die Fluor-Emissionen konnten aber nicht für alle Vorprodukte (z.B. Glas, Aluminium) in derselben Detaillierungstiefe wie für die Silizium-Prozeßkette erfaßt werden. Bei den konventionellen PKWs spielt NO_x die dominierende Rolle, während bei den Varianten S1 - S4 SO_2 und/oder Fluor einen signifikanten Anteil an den Belastungszahlen haben. Die Varianten S3 und S4 zeigen die geringsten Belastungszahlen.

4. Beurteilungsverfahren 4

Im Beurteilungsverfahren 4 werden die Grenzwerte Wasser der Schweizerischen Bundesanstalt für Umweltschutz, Wald und Landschaft (BUWAL) herangezogen, die allgemein für die Einleitung in Gewässer gelten und auf den Schutz von Oberflächengewässern zielen. Die Stoffliste umfaßt 23 Stoffe bzw. Stoffklassen. Auf der Basis der hier erfaßten Stoffe und der unterstellten Grenzwerte zeigen sich 'Un gelöste Stoffe' und Fluoride als relevante Stoffgruppen. Nur für die Varianten S1 - S4 konnten Belastungszahlen errechnet werden, wovon die Variante S3 die geringste Belastungszahl aufweist.

Das Ergebnis wird unseren Erachtens dadurch geprägt, daß die Gewässeremissionen bei der Bereitstellung von Strom aus dem Kraftwerksmix sowie bei der Bereitstellung der Endenergieträger Benzin und Diesel nicht berücksichtigt werden konnten. Hinzu kommt, daß die aus der Photovoltaik-Prozeßkette resultierenden Gewässeremissionen bei zukünftigen Produktionsanlagen noch erheblich gesenkt werden können. So steht z.B. kein ausreichendes Datenmaterial zu den Abwasser-Emissionen aus den Bereich der Brennstoffbereitstellung sowie aus den Rauchgasreinigungsanlagen bei Kraftwerken zur Verfügung. Eine grobe Auflistung der verschiedenen anfallenden Abwässer wird in /VDEW-VGB 90/ beschrieben. Allerdings fehlt eine Quantifizierung der Emissionen in die Gewässer.

Aus vorgenannten Aspekten ist ersichtlich, daß dieses Kriterium im vorliegenden Fall für eine vergleichende Betrachtung der Varianten keinen Beitrag zur Entscheidungsfindung liefern kann.

5. Beurteilungsverfahren 5

Die Trinkwasserverordnung legt die Anforderungen an die Beschaffenheit von Trinkwasser und von Brauchwasser für Lebensmittelbetriebe nach mikrobiologischen und chemischen Kriterien fest. Die Grenzwerte entsprechen Höchstkonzentrationen, die in der Regel nicht zu überschreiten sind. Sie umfaßt 34 Stoffe und Stoffgruppen. Im Gegensatz zum vorigen Beurteilungsverfahren ergeben sich hier für die vier analysierten solaren Strategien die Belastungszahlen aus Fluorid- und Tensidemissionen. Variante S3 weist die geringste Belastungszahl auf.

Die Verwendbarkeit dieses Kriteriums ist im vorliegenden Fall stark eingeschränkt, vgl. vorhergehendes Beurteilungsverfahren 4.

6. Beurteilungsverfahren 6

Für diese Belastungszahl wird das erforderliche Deponievolumen als Beurteilungsbasis herangezogen.

Das hier zugrunde gelegte Kriterium macht keine Aussage bzgl. der Toxizität der Abprodukte. Auch konnte nicht berücksichtigt werden, inwieweit eine umweltgerechte Verwertung möglich ist. In Einzelfällen, z.B. bei Kraftwerksnebenprodukten, werden Wiederverwertungsraten von nahezu 100% angestrebt, wodurch sich das Ergebnis deutlich verändern kann. Insofern kann dieses Kriterium nur als Hinweis auf mögliche Entsorgungsengpässe und damit verbundene Kosten verstanden werden. Die ausgewiesene Belastungszahl für die Variante S1 ergibt sich überwiegend aus Kraftwerksnebenprodukten (65 %) sowie zu 12 % aus Abprodukten aus der Stahlherstellung und zu 9 % aus der Silizium-Gewinnung. Bei der Variante S2 tragen Kraftwerks-Nebenprodukte zu ca. 80% und Abprodukte aus der Stahlherstellung zu ca. 11 % bei. Bei Variante S3 besitzen Abprodukte aus der Strombereitstellung einen Anteil von 52 %, aus der Stahlherstellung von 13 % und aus der Bereitstellung von Aluminium von 26 %. Der dominierende Anteil bei Variante S4 ist mit 46 % Aluminium, danach folgen Stahl mit 28 % und Silizium-Verbindungen aus der Silizium-Prozesskette mit 16 %. Der Kraftwerksanteil beträgt nur noch 4 %.

Für die konventionelle PKW-Flotte mit den Varianten B1-B3 und für die Variante D wurden nach /Enquete 90/ keine Abprodukte angegeben.

Für die Varianten E1 und E2 ergeben sich die hier berechneten Belastungszahlen aus der Bereitstellung des Energieträgers Strom. Es sei an dieser Stelle nochmals darauf hingewiesen, daß bei der Berechnung der spezifischen Emissionen und Abprodukte des Kraftwerkmixes die aus kerntechnischen Anlagen stammenden Emissionen und Abprodukte nicht erfaßt wurden.

Der mengenmäßige Anfall der Abprodukte ist gut bekannt. Allerdings wäre für eine fundierte Beurteilung die Kenntnis der Verwertungsraten sowie der Inhaltsstoffe und der Abfallart notwendig. Dies war in der hier durchgeführten Arbeit nicht möglich, da die Angabe nicht für alle Produktionsprozesse erhältlich war.

Der überwiegende Anteil der anfallenden Stoffe stammt bei den Varianten S1 - S3 aus dem bereitgestellten Strom des Kraftwerkmixes, bei der Variante S4 aus der Herstellung des Aluminiumrahmens.

Auch bei guter Datenlage bzgl. der Menge der anfallenden Abprodukte ist kritisch anzumerken, daß

- eine Einteilung in Wert- oder Abfallstoff nicht eindeutig möglich ist, und zudem oft von ökonomischen Überlegungen bestimmt ist
 - Konzentration und Art von Begleit- und Spurenstoffen meist unbekannt sind.
- Das Umweltverhalten und die Einstufung in Deponieklassen wird aber gerade durch diese Stoffe wesentlich mitgeprägt.

7. Beurteilungsverfahren 7-10

Für die Beurteilungsverfahren 7 bis 10 werden Toxizitäts- bzw. Ökotoxizitätswerte auf der Basis der letalen Dosen LD_0 herangezogen. Die verwendeten Werte stammen aus unterschiedlichen Literaturangaben:

- Beurteilungsverfahren 7: RTECS⁴
- Beurteilungsverfahren 8: Gebler
- Beurteilungsverfahren 9: RTECS, Umweltbundesamt, Rippen
- Beurteilungsverfahren 10: Gebler

Die akuten Toxizitäten werden bei Gebler einem Klassifizierungsschema unterworfen. Dies ist nach Gebler deswegen notwendig, um den LD-Werten den Charakter der Scheingenauigkeit zu nehmen und um eine verbesserte Trennschärfe zwischen verschiedenen Toxizitätsstufen zu erreichen. Nach dem Prinzip der pessimalen Annahme wird einem Stoff als Toxizitätsfaktor der untere Wert desjenigen Streubereiches zugeordnet, in welchen der LD-Wert fällt. Beispielsweise wird allen Stoffen mit LD-Werten zwischen 100 und 999 der Toxizitätsfaktor 100 zugewiesen /Gebler 90, S.54/.

Bei allen Varianten fällt die Dominanz von NO_x an der Belastungszahl auf. Daneben ist bei den Beurteilungsverfahren 7 und 8 im Gegensatz zu allen anderen Beurteilungsverfahren ein nicht unwesentlicher Beitrag durch Kohlenmonoxid gegeben. Alle übrigen Stoffe sind nach diesen Beurteilungsverfahren vernachlässigbar.

Bezüglich der von der Liste erfaßten Stoffe ist die Datenlage insbesondere im Blick auf die hier relevanten Stoffe NO_x und CO als gut zu bezeichnen.

Die geringsten Belastungszahlen weisen die elektrisch angetriebenen Fahrzeuge auf. Für die akute Toxizität der Stoffgruppe Kohlenwasserstoffe konnte kein Wert ermittelt werden. Es kann daher nicht ausgeschlossen werden, daß im Einzelfall je nach Zusammensetzung ein relevanter Beitrag zu den Belastungszahlen durch diese Stoffgruppe möglich ist. Dies ist insbesondere wichtig, wenn persistente und/oder akkumulierende Eigenschaften mit hoher Toxizität zusammenfallen.

8. Beurteilungsverfahren 11 und 12

Im Beurteilungsverfahren 11 wird die Belastungszahl anhand der mutagenen Eigenschaften nach Gebler ermittelt.

Zur Beurteilung wird der TDL_0 der jeweils empfindlichsten Organismen herangezogen und entspricht damit einem weitgehenden Vorsorgegedanken. Untersuchungsgegenstand der durchgeführten Tests ist zum einen das genetische Material (z.B. DNA, Chromosomen) und zum anderen die Möglichkeit der Übertragung von Genschäden auf nachfolgende Generationen.

Im Beurteilungsverfahren 12 wird abweichend hiervon auf das cancerogene Risiko beim Menschen abgestellt. Das vorliegende Datenmaterial basiert ausschließlich auf

⁴ RTECS = Registry of toxic effects of chemical substances

Studien am Menschen. Es handelt sich um errechnete Werte, die sicherstellen sollen, daß bei dieser Konzentration und einer lebenslangen Exposition statistisch ein zusätzlicher Krebsfall pro 1 Million Personen auftritt.

Um der noch unsicheren Datenlage zu entsprechen und um keine Scheingenauigkeit vorzutäuschen, werden die Stoffe entsprechend vorliegender Resultate (z.B. WHO, TRK) in die Klassen I, II oder III eingestuft. Sofern derartige Werte nicht vorlagen, wurden die Stoffe entsprechend den Stoffen mit ähnlichen chemischen Eigenschaften klassifiziert. Für Stoffgemische können nur grobe Abschätzungen erfolgen. So wurde beispielsweise NMVOC⁵ in Klasse II eingestuft, da neben Stoffen wie Benzol auch Stoffe wie Benzpyren enthalten sind.

Während das Beurteilungsverfahren 11 für alle Lebewesen relevant ist, ist das Beurteilungsverfahren 12 nur für den Menschen von Relevanz.

Bei beiden Beurteilungsverfahren ergaben sich als im Ergebnis gewichtige Stoffe die Organischen Verbindungen (NMVOC). Alle anderen Stoffe spielen im Ergebnis keine Rolle. Die im Vergleich hohen NMVOC-Emissionen der benzin- und dieselmotriebenen PKW bewirken, daß andere (durchaus auch zu beachtende) Emissionen hier im Vergleich keine Rolle spielen (vgl. Abb. 41 auf Seite 223 und Abb. 42 auf Seite 223).

Die Datenlage bzgl. des Cancerogenen Risiko ist sehr schmal. Die Zusammensetzung der Kohlenwasserstoff-Emissionen ist nicht bekannt. Die stark kanzerogene Fraktion der PAH⁶ ist jedoch vernachlässigbar klein. Das Beurteilungsverfahren zum Cancerogenen Risiko ist (noch) nicht belastbar. Die Ergebnisse können nur als Indiz gewertet werden.

Auch bei der Mutagenität waren nicht für alle hier zu beurteilende Stoffe belastbare Daten vorhanden. Die Datenlage erscheint aber für eine vergleichende Beurteilung ausreichend.

9. Beurteilungsverfahren 13

Im Beurteilungsverfahren 13 wird die Belastungszahl anhand der cancerogenen Eigenschaften nach Gebler ermittelt.

Zur Beurteilung wird der TDL₀ der jeweils empfindlichsten Organismen herangezogen und entspricht damit einem weitgehenden Vorsorgegedanken.

Der Schutz des Menschen steht bei diesem Kriterium im Vordergrund.

Bei allen betrachteten Varianten fällt die SO₂-Emission entscheidend ins Gewicht sowie mit geringerem Anteil die Staubemissionen. Bei den Varianten B1 - B4 sind zusätzlich organische Verbindungen relevant.

Die Stäube wurden einheitlich als Siliziumdioxid-Feinststaub beurteilt. Diesen Stäuben werden nach Gebler ein cancerogenes Potential vergleichbar wie Schwefeldioxid zugeordnet und ist damit relativ gering. Dennoch fallen die Stäube,

⁵ Non Methane Volatile Organic Compounds

⁶ Polycyclic Aromatic Hydrocarbons

insbesondere bei der Variante B1 (Fahrzeugflotte 1987), aufgrund der hohen Emissionsmenge ins Gewicht. Beim Vergleich der Staubwerte ist zu berücksichtigen, daß je nach Variante und Herkunft der Stäube (Kraftwerk, Herstellung der Bau- und Werkstoffe, Straßenverkehr) aufgrund der unterschiedlichen Inhaltsstoffe abweichende Beurteilungen zu berücksichtigen wären.

Die bei den Varianten B1 - B4 auftretenden organischen Verbindungen wurden auf der Basis von Benzol beurteilt. Bei genauerer Kenntnis der Zusammensetzung sind auch hier Abweichungen (bis Faktor 10) möglich.

Auffällig beim Vergleich der Belastungszahlen sind die hohen Werte für die Variante B1 (Fahrzeugflotte 1987) sowie für die Variante D (Öko-Polo). Nur wenig darunter liegt die Variante E2 (Elektro-PKW, Mittelklasse). Besonders günstig erscheinen nach diesem Kriterium die Varianten S3 (Elektroauto, Kleinwagen, Solartankstelle mit amorphen Modulen und Seilnetz-Aufständerung) und S4 (Elektroauto, Kleinwagen, Solartankstelle mit MIS-I-monokristallinen Modulen und Seilnetz-Aufständerung).

Die Beurteilung der Cancerogenität zeigt, daß nur drei Stoffe bzw. Stoffgruppen relevant sind. Beim Vergleich der hier dargestellten Belastungszahlen ist zu berücksichtigen, daß

- bei Schwefeldioxid Hinweise auf Cancerogenität bislang nur im Tierversuch vorliegen und noch keine abschließende Beurteilung zulassen
- bzgl. der Staubinhaltsstoffe insbesondere bei KFZ-Emissionen keine detaillierten Daten vorliegen
- bzgl. der Zusammensetzung der Kohlenwasserstoffe ebenfalls noch weiterer Klärungsbedarf besteht

Die bewertende Zusammenfassung der Einzelergebnisse soll nach Auffassung der Autoren den Entscheidungsträgern bzw. jedem Einzelnen, der sich mit den Ergebnissen der Umweltvorsorgeprüfung befaßt, überlassen bleiben.

Eine Wichtung der einzelnen Kriterien untereinander oder ob alle oder nur wenige der genannten Kriterien zur Bewertung herangezogen werden, kann wissenschaftlich nicht begründet werden. Hinzu kommt noch die teilweise unsichere Datenlage.

Zum Zwecke einer übersichtlichen quantitativen Vergleichbarkeit der neun Zukunftsvarianten werden in einem weiteren Aggregationsschritt dimensionslose relative Kennzahlen für insgesamt 15 Beurteilungskriterien (zu den 13 zuvor genannten kommt noch Kohlendioxid und der Primärenergieaufwand hinzu) gebildet (vgl. Tab. 5 auf Seite 18) und in 10 Polardiagrammen für jedes der neun Zukunftsvarianten (E1, E2,...) sowie für den PKW-Bestand 1987 (Szenario B1) wiedergegeben. Diese Kennzahlen sind prozentuale Werte pro Kriterium bezogen auf den Kriterienwert der jeweils schlechtesten (d.h. werthöchsten) Szenariovariante: Die Kennzahl 100 für eine Belastung einer Variante heißt, daß dieses Szenario für diese Belastung den höchsten auftretenden Wert hat. Die Kennzahl 0 für ein Kriterium bedeutet, daß diese Variante zu dieser Belastung nicht beiträgt. Da mit B1 der heutige Belastungsstand (bzw. von 1987) einbezogen ist, liefern die 10 Polardiagramme (Abb. 44 auf Seite 230 bis Abb. 53 auf Seite 234) auch einen Maßstab für die Bandbreite der grundsätzlichen Verbesserungen, die bis zum Jahr 2005

im angesprochenen Verkehrsbereich zu erwarten sind: Der Stand 1987 (Variante B1) ist (mit Ausnahme CO₂ und PEA) naturgemäß der "schlechte" Ist-Zustand.

Relative Belastungs-kennzahl	S1	S2	S3	S1	B1	B2	B3	D	E1	E2
Luft BUWAL	13	12	3	2	100	25	18	38	6	15
Luft VDI	8	8	2	2	100	24	19	34	4	11
Luft Vorsorge	9	8	2	3	100	24	18	34	4	11
Kohlendioxid	57	73	15	4	84	76	60	56	43	100
Primärenergieaufwand	64	77	19	8	67	62	48	41	43	100
Deponievolumen	78	84	23	9	0	0	0	0	43	100
Wasser BUWAL	100	58	11	15	0	0	0	0	0	0
Trinkwasserberordnung	46	22	21	100	0	0	0	0	0	0
Toxizität	6	7	1	1	100	19	15	28	4	9
Toxizität nach Gebler	4	4	1	1	100	15	12	21	2	5
Mutagenität	0	0	0	0	100	28	14	7	0	0
Cancerogenes Risiko	0	0	0	0	100	28	14	7	0	0
Kanzerogenität	59	59	15	15	100	41	24	85	32	76
Ökotoxizität nach Gebler	6	6	1	1	100	24	18	31	3	8
Ökotoxizität	7	8	1	1	100	24	16	28	4	8

Tab. 5. Relative Kennzahlen der verschiedenen Varianten

Das "Trend"-Szenario B2 zeigt eine ausgeprägte Verbesserung bei allen toxischen Emissionen bzw. deren Belastungszahlen auf nur noch etwa 15-40 %, nur die CO₂-Emissionen und der Primärenergieaufwände (PEA, Kapitel „Vergleich der Primärenergieaufwände“ auf Seite 203) sind unwesentlich besser. Die "Reduktions"-Variante B3 hat eine weitere deutliche Absenkung der Belastungszahlen auf maximal 24 % von B1 zur Folge, aber auch CO₂ und der PEA sind merklich zurückgegangen.

Demgegenüber ist die D-Variante (Öko-Polo) uneinheitlich: Die Kanzerogenität ist wegen der SO₂-Emissionen sehr hoch (85 % von B1) und auch die übrigen Belastungszahlen liegen wieder zwischen 21 und 38 % von B1. Hier ist der Hinweis angebracht, daß der Öko-Polo als Kleinvariante treibstoffbetriebener PKWs und damit als Direktkonkurrenz zum E-PKW angesehen wird. Der Diesel hat zwar seine Vorzüge - niedrigen CO₂-Ausstoß und PEA-, aber belastungsmäßig ist er wegen SO₂ und NO_x ziemlich ungünstig, insbesondere auch im Vergleich mit den netzbetriebenen E-PKWs und dies trotz des hohen fossilen Beitrags beim westdeutschen Kraftwerkmix, wie nachfolgend mit den Diagrammen "E1" und "E2" demonstriert wird.

Da nach gängiger Vorstellung E-Autos aus dem Netz versorgt werden, sollen als nächstes die beiden Varianten E1 (Klein E-PKW) und E2 (Groß-E-PKW) analysiert werden: Generell läßt sich feststellen, daß die E-PKW-Größen - hier ausgedrückt als Energiebedarf für 100 Pkm - die entscheidende Größe ist: Ein aus dem Netz versorgter Mittelklasse-E-PKW (hier "E2", 35 kWh/100 Pkm) führt bei einigen Kenngrößen zu Maximalwerten, so bei CO₂, PEA und Deponievolumen. Auch die - SO₂-

bedingte-Kanzerogenität ist sehr hoch. Die übrigen Gefährdungen sind rückhaltebedingt klein. Der kleine E-PKW ("E1", 15 kWh/100 Pkm) zeigt die große Entlastung der Umwelt, wenn die Nachfrage entsprechend reduziert wird. Man darf dabei aber nicht vergessen, daß die Leistungsgröße einen entsprechenden Einfluß auf den Gebrauchswert hat. Hier bedeutet "Kleinwagen" tatsächlich einen Einsitzer (z.B. Mini- El-City) mit einem Kinderplatz auf dem Rücksitz. Der "kleine" E-PKW ist also kein Beispiel für "rationelle Energieverwendung", wo gleicher Gebrauchswert bei vermindertem Energiebedarf angenommen wird!

Die Hauptvarianten dieses Projekts (vgl. Abb. 50 auf Seite 233 bis Abb. 53 auf Seite 234) sind die vier solar gestützten Szenarien S1/S2 (großer E-PKW) und S3/S4 (kleiner E-PKW). S1 bis S3 brauchen Netzunterstützung, S4 ist eine rein solare Variante (in dem Sinne, daß der Jahresbedarf im Mittel solar gedeckt ist - Netzankepfung für sonnen-schwache Zeiten ist natürlich immer notwendig). Es sei auch nochmals betont, daß die Datenerhebung für die PV- Herstellung wesentlich disaggregierter war als bei den Vergleichstechniken. Insbesondere wurden bei der PV auch die Abgaben an Wasser und Boden identifiziert. In dieser Detaillierungstiefe sind die PKW- und Kraftwerksemissionen nicht erhoben worden - mit der Ausnahme des Deponievolumens für die Kraftwerksentsorgung (die Berechnung enthält alle festen Reststoffe der Kohlekraftwerke). Zunächst können hier nur die jeweils gleichen Nachfragegrößen (gleiche E-PKW-Leistung) verglichen werden: Also S1, S2 und E2 (E-PKW groß) bzw. S3, S4 und E1 (E-PKW klein).

E-PKW-groß

(Abb. 50 auf Seite 233, Abb. 51 auf Seite 233 und Abb. 49 auf Seite 232):

S1 hat konventionell kristalline, S2 amorphe Modulen. Abgesehen von den wasserbezogenen Werten ist die reine Netzvariante E2 deutlich die ungünstigste, gefolgt vom amorphen Fall S2 mit seinem hohen Netzanteil. Die Kanzerogenität kommt im wesentlichen von den SO₂-Emissionen, mit merklichen Beiträgen durch Stäube bei der PV-Herstellung.

E-PKW-klein

(Abb. 52 auf Seite 234, Abb. 53 auf Seite 234 und Abb. 48 auf Seite 232):

S3 hat amorphe Modulen, S4 die fortgeschrittene kristalline Variante Mono-MIS-I-Modulen. Der Vergleich von S3 und S4 mit E1 zeigt - abgesehen von den Wasserbelastungen - die ökologische Überlegenheit der solar gestützten Varianten. Bei S4 - wo nur etwa 2/3 der E-PKW-Parkflächen überdeckt werden mußten, um die Jahresenergie von 13,6 TWh zu erbringen -, sind die Relativwerte der gemeinsamen Belastungsgrößen auf ihre Minimalwerte gesunken.

Zu den Wasserbelastungen der Solarstrategien S1 bis S4 ist einschränkend zu vermerken: Bei den kristallinen Modulen (S1, S4) tragen nach BUWAL etwa je zur Hälfte Fluoride und Feststoffe bei. Nach der Trinkwasserverordnung spielen bei S1 nur Fluoride, bei S2 und S3 nur und bei S4 überwiegend Tenside (Reinigungsmittel) die wesentliche Rolle. Zu diesen Tensiden sei erwähnt, daß laut Datenlage bei den konventionellen kristallinen Zellen die Tenside in die "Abwasserreinigung" gehen, bei den anderen Zelltypen aber direkt in die "Hydrosphäre". Im ersteren Fall wird angenommen, daß die Tenside abgebaut sind, bevor das Abwasser in den Vorfluter abgegeben wird. Hier ist eine gewisse Unschärfe in der Datenerhebung gegeben. Man kann wohl davon ausgehen, daß bei einer

PV-Fertigung im industriellen Maßstab immer eine Abwasserreinigung vorgenommen werden wird.

Insgesamt sind die Belastungen der Hydrosphäre durch PV- Produktion nicht als schwerwiegend anzusehen. Nach den hier erhobenen Daten würde über die Lebensdauer der PV-Module von 20 Jahren die jährliche Wassermenge eines Kleinflusses mit Trinkwasserqualität von ca. $3 \text{ m}^3/\text{s}$ nach der Trinkwasserverordnung zur schadlosen Verdünnung bei der Herstellung selbst von $13,6 \text{ GW}_e = 109 \text{ km}^2$ MIS-I-Modulen ausreichen. Werden die Tenside in einer Reinigungsstufe abgebaut, geht die erforderliche Verdünnungsmenge auf etwa 15 % zurück.

Man muß davon ausgehen, daß die Vorleistungen der Brennstoffversorgung bei den Alternativen (Brennstoffe für die Kraftwerke, Kraftstelle für den Verkehr) auch zu Wasserbelastungen führen, die hier mangels Daten aber nicht berücksichtigt sind.

1.4 Schlußfolgerungen

1.4.1 Methode

Zielerreichung

Die noch unzureichende vorsorgende Beachtung umweltrelevanter Aspekte in der F&E-Phase ist zum Teil auch durch die noch vorhandenen methodischen Schwächen der Instrumente zur Informationsbeschaffung und Entscheidungsvorbereitung begründet. Auch die hier vorgeschlagene Methode zur Umweltvorsorgeprüfung kann die vorhandenen Wissensdefizite nicht kompensieren, sondern bestenfalls offenlegen. Dennoch sind mit diesem Ansatz die Arbeitsziele (vgl. Seite 1) erreicht worden. Die noch bestehenden Mängel und Defizite sollten keinen Hinderungsgrund darstellen, diesen Weg konsequent weiterzuverfolgen.

Methodische Mängel

Die angestrebte Expositionsanalyse im Rahmen der Umweltvorsorgeprüfung läßt sich zumindest bei marktfernen Vorhaben (ohne zumindest Pilotproduktion) bei einem vertretbaren Aufwand an Zeit und Mitteln nicht realisieren.

Ein noch weitgehend ungelöstes methodisches Problem, die Beurteilung der vielfältigen und unterschiedlichen Umweltbelastungen, mindert die Treffsicherheit der Instrumente zur Umweltvorsorge noch erheblich. Im vorliegenden Ansatz wurde davon ausgegangen, daß dem Anwender der Methode zur Umweltvorsorgeprüfung verschiedene Verfahren zur Beurteilung zur Verfügung gestellt werden. Eine vorläufige Einschätzung der verschiedenen Beurteilungsverfahren findet sich im Band 2. Die Aussagekraft einer vergleichenden Darstellung wird über die Verwendung mehrerer Beurteilungsverfahren deutlich verbessert.

Umsetzungsschwierigkeiten am Beispiel der Photovoltaik

1. In der Orientierungsphase

Der Wunsch bzw. die Aufgabenstellung, eine Methode zur Umweltvorsorgeprüfung zu entwickeln und gleichzeitig am Beispiel der Photovoltaik diese Methode zu überprüfen, führte zunächst zu methodenunabhängigen Schwierigkeiten:

So konnte für die Erhebung der Energie- und Stoffbilanzen der Photovoltaik-Prozessketten kein Hinweis für den notwendigen Detaillierungsgrad der Datenerhebung gegeben werden. Dies führte zu einem deutlich höheren Aufwand als der Aufgabenstellung angemessen. Das Ziel 'Schnelle Ergebnisse' konnte dadurch nicht erreicht werden.

Bei künftigen Umweltvorsorgeprüfungen werden diese Schwierigkeiten jedoch nicht mehr auftreten.

Weitere nur mit erheblichem Arbeitsaufwand zu überwindende Schwierigkeiten ergaben sich bei

- der Erarbeitung von Basiszahlen zu Bau- und Werkstoffen
Angaben zu den Primärenergieaufwendungen und den Umweltbelastungen bei der Bereitstellung von Bau- und Werkstoffen liegen nur unvollständig, zum Teil auf veralteter Datenbasis und mit unterschiedlichen Systemgrenzen vor. Für die Stoffe Glas, Zement, Aluminium und Stahl wurden auf Basis der vorliegenden Literatur neue Prozesskettenanalysen durchgeführt. Die Validität der erzielten Ergebnisse ist dennoch als nicht zufriedenstellend zu bezeichnen, aber nur durch gesonderte Untersuchungen zu verbessern.

- beim Zugriff auf Stoffdaten

Das o.g. (Wissensdefizite) gilt auch für die Prüfung auf **Umwelterheblichkeit** bei Stoffen.

Im Allgemeinen sind die benötigten Stoffdaten (Toxizitäten, Persistenz, etc.) nur unvollständig, uneinheitlich und mit unterschiedlicher Qualität vorhanden.

Neben den Daten zur Eigenschaft der Stoffe werden Angaben zu den in die Umwelt voraussichtlich eingebrachten Mengen benötigt. Die Abschätzung dieser Mengen ist aber stark von den gewählten szenarischen Annahmen (z.B. Technischer Stand, Marktdurchdringung, Zeithorizont, Wahl der Technikbausteine) abhängig.

Ist die Datenlage zu gering, so ist eine Beurteilung des Stoffes nicht möglich.

2. In der Durchführungsphase

Der Untersuchungsansatz, die umweltrelevanten Aspekte einer Technik nicht nur horizontal (die einzelnen Umweltbereiche übergreifend) sondern auch vertikal (von der Rohstoffgewinnung über die einzelnen Umwandlungsstufen bis hin zur Entsorgung) zu analysieren, erfordert im Regelfall die Betrachtung komplexer Technikketten. Sofern es erforderlich ist, die gesamte Prozeßkette jeweils neu zu erheben, wäre der zu treibende Aufwand prohibitiv hoch. Nicht nur der Datenumfang stellt einen begrenzenden Faktor dar. Begrenzend ist auch, daß bei marktfernen Vorhaben die umgesetzten Stoffmengen nur größenordnungsmäßig bekannt sind und zusätzlich oft aus Wettbewerbsgründen der Geheimhaltung unterliegen.

Im Laufe der Untersuchung zeigte sich, daß der gewählte Detaillierungsgrad bei der Untersuchung der Photovoltaik-Prozeßkette deutlich zu hoch angesetzt war. Dagegen weist die Analyse der Alternativketten einen vergleichsweise geringen Detaillierungsgrad auf. Daraus resultiert eine Schieflage der Wissensbasis, welche sich insbesondere bei der späteren Beurteilung störend bemerkbar macht.

Diese Schieflage in der Datenbasis - resultierend aus der gleichzeitigen Entwicklung und Erprobung dieser Methode am Beispiel der Photovoltaik - ist bei nachfolgenden Arbeiten zu vermeiden. Die Fokussierung der Arbeiten auf die umwelterheblichen Stoffe ist in der vorliegenden Arbeit ebenfalls aus den genannten Gründen nur teilweise gelungen. Sie ist aber für nachfolgende Umweltvorsorgeprüfungen aus Aufwands Gesichtspunkten heraus eine Notwendigkeit.

Ein gesondertes Problem stellt der Einbezug von Recycling- und Weiterverwertungsmöglichkeiten in die Analyse dar. Im vorliegenden Fall konnte dies noch nicht geleistet werden.

3. In der Beurteilungsphase

Die Beurteilung von Gemischen, von Stoffklassen und Sammelbegriffen führt mitunter zu großen Schwierigkeiten. So ist davon auszugehen, daß die Staubemissionen aus der Silizium-Herstellung anders zu beurteilen sind als Staubemissionen aus einem Kohlekraftwerk oder bei der Glasherstellung. In der vorliegenden Untersuchung konnte diese Unterscheidung wegen unzureichender Datenlage jedoch nicht getroffen werden. Ebenso schwierig gestaltete sich die Beurteilung von Kohlenwasserstoffemissionen, von NMVOC und Methan aus Kraftwerken und der Brennstoffbereitstellung im Vergleich zu den entsprechenden Emissionen bei Kraftfahrzeugen, da der jeweilige Anteil der Inhaltsstoffe (z.B. Methan, Benzol) mit Sicherheit verschieden, aber nicht im Detail bekannt ist. Hinzu kommt, daß relevante Spurenstoffe (z.B. Schwermetalle, Dioxine) nicht identifizierbar waren.

Ein gesondertes Problem der Beurteilung stellt die vergleichende Betrachtung verschiedener Entsorgungsmöglichkeiten dar. Je nach Recyclingstrategie wird i.a. eine Verlagerung von Umweltbelastungen von einem Kompartiment in ein anderes stattfinden. Die Vielzahl möglicher Entsorgungsstrategien (Deponie, Wieder- bzw. Weiterverwendung, Wieder- bzw. Weiterverwertung, Sekundärrohstoffgewinnung) sowie die geringe Wissensbasis erschweren eine fundierte Einschätzung. Es erscheint daher nur mit großem Aufwand möglich, die identifizierten Abprodukte dahingehend einzuschätzen, ob sie recyclingfähig, marktgängig oder Abfall oder Sonderabfall darstellen.

Im vorliegenden Fall konnte die Beurteilung der Abprodukte nicht an Inhaltsstoffen, sondern lediglich am potentiellen Deponievolumen festgemacht werden.

Aufwand

Neben den vorhandenen methodischen Schwächen der einzelnen Instrumente in der Anwendung sind insbesondere bei den mittelständigen und kleinen Betrieben sowohl die Informationsdefizite noch groß als auch die Anforderungen hinsichtlich der Interdisziplinarität und des Arbeitsumfangs bei der ersten Anwendung der Umweltvorsorgeinstrumente noch sehr hoch.

Eine Umsetzung der vorgeschlagenen Methode in die betriebliche Praxis mittelständischer oder auch großer Industriebetriebe sowie in den Arbeitsalltag forschungstreibender Institutionen ist nur dann möglich, wenn es gelingt, durch eine rechnergestützte Version, welche sowohl die Datengewinnung, die Datenverwaltung als auch die Datenanalyse interaktiv und flexibel unterstützt, die vorgeschlagene Verfahrensweise auch für den Fachspezialisten vor Ort handhabbar und attraktiv zu gestalten.

1.4.2 Solarmodule auf Si-Basis

Emissionen, Stoffumsätze

Die Komprimierung der Einzelergebnisse wurde im Kapitel „Zusammenfassung der erhaltenen Ergebnisse“ auf Seite 226 durchgeführt, indem die 9 Varianten unter Bezug auf B1 (d.h. Emissionsstand 1987) nach 15 Beurteilungskriterien analysiert worden sind. Diese Belastungszahlen (Luftgrenzwerte nach VDI und BUWAL, Vorsorgestandards für

Luft, CO₂, Primärenergieaufwand, Deponievolumen, Wassergrenzwerte nach BUWAL, Trinkwasserverordnung, Toxizitäten, akute Toxizitäten (Gebler), Mutagenität, cancerogenes Risiko, Kanzerogenität, Ökotoxizitäten nach Gebler, Ökotoxizitäten) sowie die entsprechenden Relativen Belastungszahlen (ausgedrückt in % des Maximalwertes), graphisch dargestellt in Form von Polardiagrammen für jedes der 9 zukünftigen Varianten und für den Emissionsstatus 1987 (siehe Kapitel „Zusammenfassung der erhaltenen Ergebnisse“ auf Seite 226) geben ein klares Bild von der positiven Umweltrelevanz der Photovoltaik auf Silizium-Basis, zumindest soweit sie fossil gestützte Alternativen (hier Kraftwerke und PKWs) ersetzt. Ohne nochmals im Detail die einzelnen Zahlenwerte zu kommentieren, werden hier aus Sicht der Autoren einige generelle Schlußfolgerungen gezogen:

1. Der Einsatz von PV als Substitut für emittierende Energietechniken ist umweltentlastend, aber PV ist (über ihre Fabrikation) kein Nullemittent: Beispielsweise bedingt die relativ energieintensive Herstellung konventioneller kristalliner Modulen samt Aufständering pro kWh_{el} etwa 15 % CO₂-Emission einer kWh_{el} des Kraftwerkmix der alten Bundesländer.
2. Die PV-Herstellung ist im wesentlichen ein chemischer Prozeß, der z.B. bei der Herstellung amorpher Solarzellen bezüglich Arbeitsschutz (Silane sind selbstentzündlich und giftig!) und Abgaben von Reststoffen an die Außenwelt sorgfältiger Überwachung und Handhabung bedarf /vgl. a. Tietze/.
3. PV-Einsatz im energiewirtschaftlich relevanten Umfang macht nur Sinn mit guten - möglichst besten - Modulwirkungsgraden. Amorphe Si-Modulen mit heutigem Entwicklungsstand ($\eta \leq 6\%$) sind dafür nicht geeignet.
4. Die aufwendige Aufständering heutiger PV-Kraftwerke bringt ebenfalls teilweise erhebliche Vorleistungsemissionen (z.B. Kohlenmonoxid von der Stahlherstellung). Dies spricht - soweit technisch ausgereift und im Materialbedarf deutlich niedriger - für eine Integration von PV-Panels in Hausfassaden und Dächer, bei einer Feldaufstellung für leichte seilnetzverspannte Flächentragwerke.
5. Vor einer PV-Anwendung im größeren Maßstab sollte zunächst - im Sinne rationaler Energieverwendung - die Stromnachfrage minimiert werden, um möglichst hohe Solarbeiträge zu erreichen.
Im analysierten Beispiel sind unter Umweltgesichtspunkten E-PKWs - vor allem mit kleinen Leistungen - für Nischen (hier: "Berufspendlerverkehr") vertretbar, weil dann ein deutlicher solarer Deckungsbeitrag vorstellbar ist (und auch schon eine alleinige Versorgung mit dem Kraftwerk-Mix der Alt-BRD umweltentlastend wäre).
6. Bei Si-Modulen ist im Betrieb keine Unfallart vorstellbar (Brand, Erdbeben etc.), bei der vom PV-Material selbst eine Umweltgefährdung (Giftigkeit, Klimaschädigung) ausgeht. Im Prinzip ist auch die Entsorgung unter Umweltgesichtspunkten problemlos, weil auch auf Deponien davon keine schädlichen Emissionen ausgehen können. Rückführungsstrategien sind dann vorzuziehen, wenn Vorteile hinsichtlich des Energieaufwandes und der Emissionen im Vergleich zu neuen Modulen zu erwarten sind.

Primärenergieaufwand

1. Gute Wirkungsgrade der PV-Tankstellen senken den energetischen Gesamtaufwand gegenüber einer reinen Netzversorgung der E-PKWs.
2. Gegenüber Normal-PKWs bringen aber nur "kleine" E-PKWs eine Absenkung, dann sogar ohne PV-Teilversorgung. Der - zitierte - Herstellungsaufwand für Normal- und E-PKW verringert die Differenz, hebt aber den Vorteil bei PV-Teilversorgung nicht auf.

1.4.3 Solarmodule auf der Basis von CdTe

Als vorläufige Einschätzung muß auf Basis der vorgenommenen Literatursichtung die Verwendung von Cadmium und von Tellur zur Herstellung von Solarzellen als umwelt-erheblich eingestuft werden. Beide Stoffe sowie ihre Verbindungen sind stark toxisch, persistent und liegen, wenn sie in die Umwelt gelangen, z.T. in pflanzenverfügbarer Form vor.

Das Inventar an Cadmium einer Photovoltaik-Anlage auf der Basis von CdTe-Solarzellen beträgt ca. 12 - 120 g/m² Modulfläche bzw. 0.12 - 1.2 t/MW_{peak}. Das Inventar an Tellur entspricht etwa 1/3 der Cadmiummenge /Bonnet 92a/.

Die Freisetzungsrate von Cadmium beträgt im Falle eines Großbrandes ca. 10 %, nach einer anderen Literaturquelle jedoch mehr als 50 % /Moskowitz 90, Karus 92/. Über die Freisetzung von Tellur und anderen Stoffen lagen keine Hinweise vor.

Die Wirtschaftlichkeit der CdTe-Solarzelle wird als sehr günstig beurteilt. Der Nutzungsgrad der CdTe-Solarzelle soll in etwa dem Nutzungsgrad einer kristallinen Si-Zelle entsprechen, der Primärenergieaufwand jedoch nur etwa 50 % einer amorphen Si-Solarzelle betragen. Gleichzeitig wird von vergleichsweise geringen Fertigungskosten ausgegangen /Bonnet 92a/.

1.5 Weiterführende Aktivitäten, Empfehlungen

1. Organisatorische Voraussetzungen

Zur Umsetzung der Forderung der Sachverständigen für Umweltfragen, statt der isolierten Betrachtung einzelner Produkte oder Produktionsprozesse, die Gesamtbelastung der Umwelt vom Rohstoff bis zum entstehenden Abfall in Form oder ähnlich einer Produktlinienanalyse in die Betrachtung einzubeziehen, sollte die Integration der vorgeschlagenen Umweltvorsorgeprüfung in ein betriebliches Umweltschutzsystem und in die Entscheidungsabläufe staatlicher und privater Forschungseinrichtungen exemplarisch bei einigen Einrichtungen unterstützt werden.

Um nicht jedesmal für jede Prozeßkettenanalyse alle Teilprozesse erneut untersuchen zu müssen, wäre es notwendig, die Daten zu einzelnen Techniken nach einem konsensfähigen Procedere zu erheben und allen Interessierten verfügbar zu machen. Die methodischen Weiterentwicklungen sollten möglichst schnell EDV-mäßig umgesetzt und allgemein verfügbar gemacht werden.

Wichtig wäre daher als Service-Funktion für die F&E-treibenden Institutionen eine Informations- und Clearingstelle zu schaffen, deren Aufgabe es u.a. sein könnte:

- Erarbeitung von Richtlinien, z.B. "Gütekriterien" zur Erstellung von Ökobilanzen, zur Durchführung von Umweltvorsorgeprüfungen, von Produktlinienanalysen etc. und zur Beurteilung von umweltrelevanten Aspekten
- Durchgeführte Produktlinienanalysen, Ökobilanzen, Umweltvorsorgeprüfungen ähnlich wie bei der Technikfolgenabschätzung zu sammeln und für Interessierte bereitzustellen.
- Umweltbezogene Hinweise (Umweltbelastung bei Herstellung, Verwendung und Entsorgung, Primärenergieaufwand, Verwertungsmöglichkeiten, etc.) von Bau- und Werkstoffen und andere Techniken zu sammeln, zu aktualisieren und über geeignete Hilfsmittel (Handbuch, Datenbank) bereitzustellen.
- Hilfsmittel (Prozeßkettenanalysemodell, Beurteilungsverfahren etc.) auf neuestem Stand verfügbar halten
- Vermeidungsmöglichkeiten und weniger umweltbelastende alternative Verfahren darzustellen
- Erprobte Branchenlösungen publik zu machen

Die Einrichtung einer derartigen Informations- und Clearingstelle sollte bei einer bestehenden Organisation (z.B. UVP-Zentrum, Hamm) erfolgen, damit bestehende Infrastrukturen und Vernetzungen genutzt werden können.

2. Methodische Weiterentwicklung

Die fundierte Beurteilung möglicher Folgen einer Technik auf die Umwelt setzt die Kenntnis der mit dem Betrieb einer Technik verbundenen Freisetzung von Stoffen und deren Expositionsbedingungen voraus. Bei marktfernen Forschungsvorhaben ist aber die Durchführung einer Expositionsanalyse derzeit kaum möglich. Diese Kenntnislücke sollte daher vorrangig geschlossen werden.

Die Bereitstellung EDV-gestützter Instrumente sollte weiter vorangetrieben werden. Uns ist kein kommerziell betriebenes Prozeßkettenmodell bekannt, welches die speziellen Anforderungen im Bereich Umweltvorsorgeprüfung, Ökobilanzen, Produktlinienanalysen ausreichend erfüllen würde.

Darüber hinaus bedarf es der Entwicklung von EDV-gestützten Verfahren zur Beurteilung der mit den Prozeßkettenmodellen erzielten umfangreichen numerischen Ergebnissen.

Der Einfluß der getroffenen Annahmen auf das Ergebnis muß offengelegt werden und einer möglichst breiten Diskussion zugeführt werden.

Die methodische Weiterentwicklung der Beurteilungsverfahren sollte insbesondere auf der Basis von Toxizitätsäquivalenten oder ähnlicher Ansätze erfolgen, wobei die Frage zu prüfen wäre, inwieweit die Expositionsbedingungen in die Beurteilung miteinbezogen werden können. Dies sollte auch die verbesserte Einschätzung der Umweltrelevanz von Abprodukten unter Berücksichtigung der Recyclingmöglichkeiten bzw. der Einschätzung nach Deponieklassen einschließen.

3. Solarmodule auf Si-Basis

- Da es noch keine großindustriell etablierte PV-Produktion gibt, bestehen noch erhebliche Wissensdefizite:

- Für jede der verfügbaren Basisvarianten, konventionell kristallin und amorph sowie MIS-I, wurden nur für jeweils eine Herstellungsart Daten erhoben.
- Verfahrenstechniken und Reststoffbehandlungen entsprechen nicht immer späteren Großproduktionen.
- Bei der Panel-Aufständigung, insbesondere in Form der seilnetzverspannten leichten Flächentragwerke liegen nur Grobangaben vor, deren Extrapolationen auf größere PV-Anlagen fragwürdig sind. Auch die Art der konventionellen Aufständigung steht nicht endgültig fest.
- Die Prozeßketten zu den materiellen Vorleistungen für Bau- und Werkstoffe sind unvollständig und teilweise auf nicht mehr ganz aktuelle Literatur abgestützt. Gewisse Aufwendungen wie Materialtransport sind gar nicht berücksichtigt.
- Nach Literaturangaben sind die Aufwendungen für den Bau von (E-) Fahrzeugen relativ hoch gemessen am Betriebsverbrauch und müßten insbesondere mit ihren Vorleistungsemissionen in die Analyse der E-PKW's (wegen der großen Batterien) einbezogen werden. Die verlässliche Datenerhebung ist aber auch dadurch eingeschränkt, daß die Herstellung von batteriebetriebenen Fahrzeugen noch nicht etablierte industrielle Technik ist.

- Weiterführende Aktivitäten, Empfehlungen

Die Analyse einer denkbaren Anwendung der Photovoltaik in einem energie-wirtschaftlich relevantem Ausmaß hat insbesondere die herausragende Bedeutung des Zellenwirkungsgrades aufgezeigt, um die Vorteile der PV - ihre relativ

sehr niedrigen anrechenbaren Emissionen - zum Tragen zu bringen. Daraus lassen sich die nachfolgenden Empfehlungen herleiten:

- Für die im Labormaßstab demonstrierten hohen Zellenwirkungsgrade sollten intensiv industrielle Fertigungsverfahren entwickelt und implementiert werden
- Fertigungsverfahren sollten in dem Sinne "flexibel" sein, daß sie relativ leicht dem technischen Fortschritt in Form stetig verbesserter Wirkungsgrade folgen können
- Auch bei den amorphen Zellen mit ihren kostengünstigen Depositionsverfahren ist dem Gesichtspunkt hoher stabiler Wirkungsgrade höchste Priorität zu schenken. Werte von mehr als 10 % sind in industriellen Fertigungsverfahren anzustreben
- Die (Weiter-)entwicklung von kostengünstigen wie auch materialmäßig aufwandsarmen Aufständern bzw. der Integration in Fassaden und Dächern sollte forciert werden, da damit die großflächige PV-Anwendung ohne zusätzlichen - horizontalen- Flächenverbrauch erreichbar ist.
- Generell sollten für PV-Module bzw. Panels unabhängig von ihrem Basismaterial Rückhol- und Entsorgungsstrategien entwickelt und implementiert werden.

4. CdTe-Solarmodule

Es werden folgende Wissensdefizite gesehen:

- Die mit der Produktion der Ausgangsmaterialien Cadmium und insbesondere Tellur verbundenen Energieaufwendungen und Stoffeinträge in die Umwelt sind noch weitgehend unbekannt. Wegen der Umweltrelevanz dieser Stoffe sollten die Prozeßkette von der Gewinnung bis zur Entsorgung kritisch geprüft werden.
- Die Herstellung von CdTe wird in Deutschland bisher nur im Labormaßstab durchgeführt. Die starke exotherme Reaktion des Herstellungsprozesses ist bei der großtechnischen Umsetzung als Risikoaspekt gesondert zu behandeln.
- Die Freisetzung von Tellur aus der Solarzelle bei der Verwendung (im Brandfall) und der Entsorgung ist nicht bekannt.
- Zur ökotoxikologischen Beurteilung von Tellur und seinen Verbindungen ist die Datenlage bei weitem nicht ausreichend.
- Das Auslaugverhalten von CdTe-Solarzellen auf Deponien ist noch ungeklärt.
- Konzepte zur Rezyklierung der Solarzellen fehlen.
- Entsorgungsstrategien sind zu entwickeln.
- Die Erarbeitung ökonomischer Instrumente zur Sicherung eines möglichst vollständigen Stoffkreislaufes steht noch aus.

2.0 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Die entwickelte Methode zur Umweltvorsorgeprüfung und die hierzu erarbeiteten Hilfsmittel (vgl. Band 2 bzw. Band 3) waren am konkretem Beispiel "Photovoltaik" auf Aussagekraft und Handhabbarkeit zu testen.

Zur Festigung der Beurteilungsbasis war für einen Teilbereich der Photovoltaik eine detaillierte Analyse der auftretenden Stoffströme vorzunehmen.

Neben dieser methodenbezogenen Zielsetzung sollte die Durchführung dieser Arbeiten zugleich auch konkrete Hinweise zur Umweltrelevanz photovoltaischer Systeme liefern sowie aus Umweltgesichtspunkten heraus ggf. Forschungslücken im Photovoltaik-Bereich aufzeigen.

Für die Auswahl der Photovoltaik als Untersuchungsgegenstand sprechen folgende Gründe:

- in zunehmendem Maße wird in der Öffentlichkeit die Einführung dieser Technik über Demonstrationsanlagen und Subventionierung privater Anlagen gefordert
- im energiewirtschaftlichen Raum wird die Photovoltaik als eine Option für eine langfristig umweltfreundliche Energietechnik diskutiert
- daneben sind vereinzelte Untersuchungen bekannt, die das Gefährdungsrisiko der Bevölkerung bei Nutzung der Photovoltaik als vergleichbar zu fossilen Energieträgern und deutlich höher als bei Nutzung der Kernkraft einschätzen
- im Bereich der Photovoltaik werden nennenswerte Forschungsmittel aufgewandt. So betrug die BMFT-Förderung:

1989	97 Mio DM
1990	105 Mio DM
1991	104 Mio DM
1992	111 Mio DM
1993	97 Mio DM (Planung)

Untersuchungen zur Umweltverträglichkeit photovoltaischer Systeme sind bisher nur vereinzelt vorgelegt worden. In den USA wurde insbesondere von Brookhaven National Laboratory (BNL) seit etwa 1980 Arbeiten zu diesem Bereich ausgeführt. Überwiegend konzentrierten sich diese Arbeiten auf Verbindungshalbleitern basierenden Solarzellen /Moskowitz 91/. In der Bundesrepublik wurde in 1990 eine Arbeit zum Gefährdungspotential bei der Herstellung von Silizium-Solarzellen an der Gesamthochschule Wuppertal ausgeführt /Tietze 90/. Eine Literaturstudie des Katalyse-Institutes beschäftigte sich mit den Umweltauswirkungen bei der Herstellung, Gebrauch und Entsorgung von CdTe-Solarzellen /Karus 92/. In der Schweiz beschäftigte sich die Gruppe Energie-Stoffe-Umwelt an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich in einer umfangreichen und detaillierten Semesterarbeit mit den Umweltaspekten bei der Herstellung von monokristallinen Silizium-Modulen /Häne 91/.

THE JOURNAL OF THE

AMERICAN MEDICAL ASSOCIATION
PUBLISHED WEEKLY
CHICAGO, ILL., U.S.A.
Vol. 41, No. 1, January 1, 1924

Subscription price, \$5.00 per annum in advance.
Single copies, 15 cents.
Entered as Second-Class Matter, June 26, 1902.
Postpaid.

Published by the
AMERICAN MEDICAL ASSOCIATION
535 North Dearborn Street
Chicago, Ill.
Acceptance for mailing at
special rate of postage provided
for in Act of October 3, 1917.
Postage paid at Chicago, Ill.

The Journal of the American Medical Association is published weekly, except on Sundays and public holidays. It is published by the American Medical Association, 535 North Dearborn Street, Chicago, Ill. The subscription price is \$5.00 per annum in advance. Single copies are 15 cents. The Journal is entered as second-class matter, June 26, 1902. It is postpaid. The Journal is published by the American Medical Association, 535 North Dearborn Street, Chicago, Ill. The subscription price is \$5.00 per annum in advance. Single copies are 15 cents. The Journal is entered as second-class matter, June 26, 1902. It is postpaid.

3.0 Orientierungsphase

Zur Einengung des Untersuchungsfeldes und zur Fokussierung der Arbeiten auf die wesentlichen Aspekte sind Fragestellungen aus dem technisch-ökonomischem Bereich wie auch aus dem Umweltbereich zunächst eher qualitativ einzuschätzen. Anhand dieser Abschätzungen sollte festgelegt werden können, welche der denkbaren Prozeßketten und in welcher Detaillierungstiefe bearbeitet werden sollten.

U.a. werden Fragen folgender Art zu bearbeiten sein:

- Technisch-stoffliche Fragestellungen
 - Alternative technische Entwicklungslinien
 - Bestehende Konkurrenztechniken
 - Zu betrachtende Prozeßketten
- Wirkungen auf Mensch und Umwelt
 - Welche Wirkungen auf Mensch und Umwelt können durch Herstellung Verwendung und Entsorgung der betrachteten Technik ausgelöst werden
 - Welche positive oder negative Auswirkungen sind durch die Substitution der bisherigen Technik zu erwarten
- Technisch-ökonomische Randbedingungen
 - Welche technische Entwicklungsrichtungen werden derzeit verfolgt
 - Sind deren technische Prinzipien und damit deren mögliche Umweltauswirkungen sehr ähnlich oder grundsätzlich verschieden
 - Welche bisherigen Techniken, Materialien oder Produkte werden bei Erfolg substituiert
 - Welcher Substitutionsgrad wird erwartet
 - Wie erfolgt die Markteinführung (Zeithorizont)

3.1 Grundlagen

Unter Photovoltaik versteht man die Direktumwandlung von Lichtenergie in elektrischen Strom mit Hilfe von Halbleiterbauelementen, den Solarzellen. Die Umwandlung von Lichtenergie in elektrischen Strom beruht auf dem sogenannten Photoeffekt, vgl. /Jäger 90/.

Der Photoeffekt (elektrische Phänomene bei elektromagnetischer Bestrahlung von Materie: Aufladung - äußerer Effekt, Veränderung der elektrischen Leitfähigkeit bis zur Abgabe elektrischer Leistung bei Halbleitern - innerer Effekt, Photoionisation bei freien Atomen - atomarer Effekt) wurde 1839 von Alexander E. Becquerel, Sohn des Entdeckers der natürlichen Radioaktivität, Henry Becquerel, entdeckt.

PV-Zellen nutzen den inneren Photoeffekt, sind also Halbleiter, die durch eine geeignete innere Struktur bei Lichteinfall elektrische Energie abgeben. Dazu sind folgende Bedingungen erforderlich:

- der Festkörper muß Licht absorbieren,
- durch die Absorption entstehen freie Ladungsträger,
- ein inneres elektrisches Feld im Halbleiter trennt die Ladungsträger,

- an der Ober- und Unterseite der Zelle müssen elektrische Kontakte zur Stromabnahme existieren.

Eine der Grundvoraussetzungen der Solarzelle ist also das Vorhandensein eines inneren elektrischen Felds, um im Halbleiter den photovoltaischen Effekt nutzen zu können.

Das notwendige elektrische Feld entsteht

- beim Verwenden eines einheitlichen Materials durch unterschiedliche schichtweise Eindotierung von Fremdatomen, wodurch in der einen Schicht die negativen Elektronen (n-leitende Schicht) und in der anderen Schicht die positiven Löcher (p-leitende Schicht) überwiegen und zwischen diesen Schichten der p-n-Übergang als Sperrschicht wirkt.
- beim Kontakt zweier unterschiedlicher Halbleiter (Heterokontakt)
- beim Kontakt eines Halbleiters mit einem Metall (Schottkykontakt)

Den PV-Effekt zeigen Elemente der 4. Hauptgruppe des periodischen Systems, sowie Verbindungen der 3. und 5., der 2. und 6. und der 1., 3. und 6. Gruppe des Periodensystems (III-V bzw. II-VI bzw. I-III-VI Verbindungshalbleiter (VHL) genannt). Die erste Solarzelle aus Silizium wurde 1954 mit einem Zellenwirkungsgrad von 6 % für Weltraumzwecke (Satellitenversorgung) entwickelt. Die Entwicklung für terrestrische Zwecke begann erst nach 1973 mit dem Ziel einer drastischen Senkung der Herstellungskosten und einer wesentlichen Erhöhung des Wirkungsgrades. Bisher kamen fast ausschließlich PV-Zellen auf Siliziumbasis zum Einsatz, in Entwicklung sind auch einige VHL-Materialien.

Bei der Auswahl geeigneter Materialien zur Herstellung von Solarzellen standen bisher technische und wirtschaftliche Kriterien wie Dotierbarkeit, Lebensdauer, Herstellbarkeit, Möglichkeiten der Reinstdarstellung, Leistungsfähigkeit, Wirkungsgrad, Materialkosten und Fertigungskosten im Vordergrund. Weitere wichtige Gesichtspunkte waren die Möglichkeiten der Kontaktierung und die Auswahl geeigneter Antireflexschichten.

3.2 Übersicht zu Entwicklungslinien und Entwicklungsstand

In Produktion und/oder Entwicklung befinden sich folgende Typen:

- Silizium: Mono-, multi-, poly-kristallin, amorph (Dünnschicht)
- (multi: grob-, poly: fein-kristallin)
- Verbindungshalbleiter (VHL) (Dünnschicht):
 - III-V: GaAs (ein-, polykristallin)
 - II-VI: (CdS)/CdTe
 - I-III-VI: (CdZnS)/CuInSe₂ (= CIS)
 (In Klammern: Partner in Hetero-Verbindung).

Während kristalline Si-Zellen für terrestrische Anwendungen wie Telekommunikation, Hobbymarkt, Stromversorgung in Entwicklungsländern, für Demonstrationsprojekte sowie für die Raumfahrt im Leistungsbereich eingesetzt werden, finden "amorphe" Si-Zellen ihre Anwendung im wesentlichen im Bereich der sogenannten Konsumerelektronik, d.h. für Taschenrechner, Batterie-Aufladegeräte, Uhren etc.. Amorphe Si-

Dünnschichtzellen haben bisher wenig Außenanwendung gefunden, weil sie im Einsatz einen ausgeprägten Wirkungsgradabfall zeigen, beispielsweise beim Modul von 8 % auf 5-6 % über die ersten 50-100 h.

Ziel der Photovoltaikforschung ist die Entwicklung billiger, stabiler und gleichzeitig hocheffizienter Solarzellen, die zur Umwandlung von Strahlungsenergie der Sonne in elektrische Energie in einem breiten Anwendungsbereich einsetzbar sind. In den letzten Jahren wurde eine drastische Kostenreduktion bei der Herstellung von kristallinen Solarzellen erreicht, doch noch immer sind die derzeit käuflich erhältlichen Zellen zu teuer, um mit den traditionellen Strompreisen uneingeschränkt konkurrieren zu können. Zur Kostenreduktion werden zur Zeit eine Reihe von Konzepten verfolgt. Besonders vielversprechend ist dabei die Entwicklung von Dünnschichtsolarzellen. Als Dünnschichtsolarzellen bezeichnet man Zelltypen, bei denen die lichtabsorbierende Halbleiterschicht nur wenige Mikrometer (typisch 1 μm) stark ist. Ein Vergleich mit Schichtdicken von selbsttragenden kristallinen Si-Zellen (ca. 300 μm) zeigt sofort, daß bei Dünnschicht-Solarzellen eine enorme PV-Materialersparnis möglich ist. Um solche Bauelemente kostengünstig herstellen zu können, muß die Herstellung der Zellen in einem einfachen, automatisierbaren Verfahren bei hohem Durchsatz erfolgen.

Vorteile dieser Zelltypen sind:

1. Materialersparnis
2. Einfachere Herstellungstechnologie
3. Billige Substratmaterialien
4. Neue Zelltypen wie Tandem- bzw. Multigap-Zellen

Für Dünnschicht-Solarzellen bieten sich Materialien an, die ein hohes Absorptionsvermögen für Sonnenlicht haben. Besonders vielversprechend erscheinen gegenwärtig:

1. Amorphes-Silizium (a-Si:H)
2. Gallium-Arsenid (GaAs)
3. Cadmium-Tellurid (CdTe)
Cadmium-Sulfid (CdS)
4. Kupfer-Indium-Diselenid (CuInSe_2)

Am weitesten fortgeschritten ist die Entwicklung von Zellen aus amorphem Silizium, die inzwischen für breite Anwendungen von verschiedenen Herstellern angeboten werden.

Der Entwicklungsstand von 1991 - z.T. auch von 1992 - wird in der nachfolgenden Tabelle übersichtsartig wiedergegeben:

Material	Wirkungsgrad im Labor	Wirkungsgrad in der Produktion	Entwicklungs- stand	Literatur
Silizium				
- Einkristallin	24.2	17.0	GP	Beyer 92
--- Telefunken /Green	20	18.0	PP	Aulich 90
--- Green	23.3	-	Labor	Knobloch 92
--- Siemens	-	14.0	1 MW/a	Aulich 90
--- Inversionss.(MIS)	17.9	15.0	PP	Aulich 90
--- ISE-LBSF	20.9	-	Labor	Beyer 92
- Konzentratorzelle	28.4	17.2	GP	Fhg 89
--- Stanford	22-29	-	Labor	Aulich 90
- Multikristallin	20.0	14.2	GP	Eyer 92
--- Telefunken	-	11.8	3 MW/a	Aulich 90
--- Telefunken /Green	-	15.0	PP	Aulich 90
--- Inversionss.(MIS)	-	13 - 14	PP	Aulich 90
--- EFG-Band	14.7	13 - 14	KP	Enquete 90
--- Dendritic Web	17.0	15.5	KP	BINE 92
--- ISE-SSP	13.0	-	Labor	Eyer 92
--- Spin-cast	-	12.0	PP	Eyer 92
- Polykristallin	17.8	13	PP	Urban 93
Amorphes Si	12.0	5-7 ¹	GP	Urban 93
--- Tandem Poly Si	16.4	-	Labor	Wagner 91
--- Tandem 2-Schicht	10.0	-	Labor	Wagner 91
--- Tandem 3-Schicht	13.7	-	Labor	Wagner 91
Galliumarsenid (III-V)				
- Einkristallin	29	19.0	KP	BMFT 90
- Konzentratorzelle	29.3	17.2	PP	Enquete 90
- Poly Dünnschicht	8.8	-	Labor	Enquete 90
- GaAs/GaSb	37 ² /17.6	16.5	PP	Sauer 89
				BINE 92
II-VI-Verbindungen				
- CdS/Cu ₂ S	9.2	-	Labor	Zweibel 90
- CdS/CdTe	14.8	-	Labor	Urban 93
- CdTe/CdS	12.3	7.3	PP	Jäger 90
- CdZnS/CuInSe ₂	15.4	-	Labor	Urban 93
- CIS/(Zn,Cd)S	12.0	-	Labor	Jäger 90
- CIS-Zelle (Arco-S)	14.1	11.7	PP	Aulich 90
- Tandem (a-Si/CIS)	15.6	-	Labor	Aulich 90
- Tandem (GaAs/CIS)	21.3	-	Labor	Schöfthaler 90

Tab. 16. Erreichte Wirkungsgrade technisch interessanter Solarzellen:

Stand Anfang 1993

(GP= Großtechnische Produktion, KP= Kleintechnische Produktion, PP= Pilotproduktion)

¹ Wert nach Degradation

² 37 % nur im konzentrierten Licht

Eine Übersicht der zum Untersuchungsbeginn geförderten Vorhaben findet sich im Anhang des 1. Zwischenberichtes.

Die Anzahl der geförderten Vorhaben verteilte sich auf die verschiedenen Bereiche wie folgt:

Basismaterial kristallines Silizium	(4)
Herstellung von Flächensilizium	(4)
Zusatzwerkstoffe für die Materialtechnologie	(2)
Solarzellen- und Modultechnik kristallines Silizium	(10)
Kalibrierung von Solarzellen	(3)
Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen	(1)
Solarzellen auf der Basis von amorphen Silizium	(13)
Sonstige Dünnschichtsolarzellen (außer a-Silizium)	(14)
Solarzellen auf der Basis von organischen Halbleitern	(2)
Zusatzwerkstoffe für die Zellentechnologie	(5)
Systemtechnologie und Demonstrationsprojekte	(15)

Nach dieser Übersicht liegt bzw. lag der Schwerpunkt der Forschungsförderung bei der Dünnschichttechnologie. Auffällig ist die hohe Zahl der Vorhaben im Bereich der Systemtechnologie und Demonstrationsprojekte.

3.3 Marktübersicht

Die Photovoltaik ist immer noch aufgrund der Kostensituation weit von einem Marktdurchbruch entfernt. Dennoch werden schon jetzt größere Demonstrationsvorhaben betrieben. Auf der Nordseeinsel Pellworm war 1983 eine 300 KW Anlage in Betrieb genommen worden, seit Sommer 1992 steht für diese Anlage eine auf 600 kW erweiterte PV-Leistung zur Verfügung.

In Kobern-Gondorf betreibt das RWE eine 340 KW Anlage im Netzverbund. Hierbei wurden zu Erprobungszwecken die unterschiedlichsten Solarzellentypen und Hersteller berücksichtigt. Am Neurather See bei Grevenbroich hat in 1991 eine weitere RWE-Anlage mit 360 KW Kapazität den Betrieb aufgenommen.

Zur Erprobung der solaren Wasserstoff-Wirtschaft ist in Neunburg vorm Walde 1990 eine große Demonstrationsanlage (268 KW) in Betrieb gegangen. Betreiber ist die Solar Wasserstoff Bayern GmbH (SWB), Hersteller der Photovoltaikkomponenten sind die Firmen Telefunken System Technik (Heute: Deutsche Aerospace AG) und Siemens Solar /Aulich 1990/. In der für die Zeit 1993 - 1996 vorgesehenen Phase 2 werden weitere 82,5 KW hinzukommen /Szyszka 92/.

Im kleineren Leistungsbereich werden verschiedenste Solaranlagen vom BMFT gefördert (vgl. Tab. 7 auf Seite 36 und Tab. 8 auf Seite 37), weitere werden folgen, so daß in absehbarer Zeit 43 Anlagen mit einer Gesamtkapazität von ca. 1333 KW_{peak} in Betrieb sein werden. Weitere Kleinanwendungen, die über die Zentralstelle für Solartechnik (ZfS) gefördert werden sowie das laufende 1000-Dächerprogramm (auf 2250 Häusern einschließlich der neuen Bundesländer aufgestockt) sind in dieser Zahl nicht enthalten. In diesem Programm sollen standardisierte Anlagen im Leistungsbereich von ca. 1-5 KW_{peak} im Netzverbund erprobt werden /Menzen 93/.

Lfd. Nr.	Betreiber	Leistung /KW _e /	Anwendungsfall	Standort
1	Pfalzwerke AG	18.1 9.1 2 × 5 4.7 4.7	Bewässerung Belüftung Schweinestall Olligolyse Schweinegüllyse Rindergüllyse	Limburgerhof BASF Versuchsgut Rehhütte BASF Neumühle
2	Bayernwerk	300.0 40.0	H ₂ -Elektrolyse Autarkes PV-System	Neunburg
3	Stadtwerke Saarbrücken	7.7	Direkter Netzverbund	Ensheim
4	Energie Anlagen Berlin	9.4	Netzverbund mit Batteriespeicherung	Berlin
5	Telefunken Systemtechnik	22 10 140	Tiefenwasserbelüftung Direkter Netzverbund mit Aufladung von Batterien für Elektrofahrzeuge PV - Wind - Gasmotor - Hybridanlage zur Versorgung des Klärwerkes	Ratzeburg Messegelände Hannover Fehmarn
6	Isar-Amperwerke AG	10.4 8.8	PV- Diesel - Hybridanlage zur Versorgung eines Bauernhofes Autarkes PV System	Brunnenbach
7	Fränkische Überlandwerke	5 2 2 6 2 5 4.0 5.0	Netzverbund mit Batteriespeicher Autarke Anlage (Treibhaus) Mobile autarke Anlage zur Versorgung eines Futterautomaten Netzverbund mit Batteriespeicherung, Nachführsystem Anlage zur Teichbelüftung H ₂ -Elektrolyse Schweinehaltung Hauswirtschaft	Triesdorf
8	Stadt Frankfurt	5 2 × 10	Direkter Netzverbund Anlage mit Batteriespeicherung und automatischer Nutzumschaltung	Frankfurt
9	Hochschule Bremerhaven	1.9	Versuchsanlage zur Spitzenabdeckung	Bremerhaven
10	Stadt Meckenheim	5.1	Direkter Netzverbund	Meckenheim bei Bonn
11	Stadtwerke Pirmasens	10 12.0	Anlage für Belüftungszwecke Netzeinspeisung	Pirmasens
12	Hamburgische Elektrizitätswerke	3	Direkter Netzverbund	Hamburg
13	Gemeinde Pellworm	600	Kombinierte Anlage zur Spitzenabdeckung	Pellworm
14	Stadt Ratzeburg	22.0	Tiefenwasserbelüftung	Ratzeburg
15	Stadtwerke Hannover	15.0	Solartankstelle	Hannover
16	Stadt Burg auf Fehmarn	140.0	PV-Wind-Gasmotor	Burg Fehmarn

Lfd. Nr.	Betreiber	Leistung /KW _p /	Anwendungsfall	Standort
17	Jugendwerkstatt Felsberg	5.1	24V-Beleuchtung, Netzkopplung	Felsberg
18	Solid GmbH	8.5	Info- u. Demo-Zentrum	Fürth
19	Lechwerke AG	30.0	direkte Netzkopplung	Wendelstein
20	Wasser und Maschinenamt	70.5	Tunnelbeleuchtung	Rendsburg
21	Schleswag	30.0 300	Lärmschutzwand, Netzkopplung direkte Netzkopplung	Rellingen Pellworm
21	VVS - Saarbrücken	50.0	PV + BHKW, Netzkopplung	Saarbrücken
22	Forstamt Schluchsee	4.5	Autarkes System	Schluchsee
23	Wessling	36.4	direkte Netzkopplung	Bochum
24	Stadt Ribnitz-Damgarten	250	direkte Netzkopplung	Körkwitz
25	Wilkhahn	4.0	direkte Netzkopplung	Bad Münde
26	Daisenberger	4.5	Inselhaus	
27	HEW	16.8	direkte Netzkopplung	Hamburg

Tab. 7. In Betrieb befindliche Photovoltaik Demonstrationsanlagen:
nach /Menzen 93/

Lfd. Nr.	Betreiber	Leistung /KW _p /	Anwendungsfall	Standort
1	Fränkische Überlandwerke AG	1.5 2.0 2.0	Saatzucht, mobile Anlage Rinderhaltung, mobile Teichwirtschaft	Triesdorf
2	GTZ	6.0	diverse Anwendungen	Eschborn
3	Hans Grohe	100.0	direkte Netzkopplung	Schiltbach
4	Frenz	1.1	Inselhaus	Schwäbisch - Hall
5	Stein	5.0	Inselhaus	Dachau
6	SOS Kinderdorf	6.0	direkte Netzkopplung	Zwickau
7	HEW	60.0	PV-Pumpspeicher	Geesthacht

Tab. 8. In Planung oder Bau befindliche Photovoltaik Demonstrationsanlagen:
nach /Menzen 93/

In der aktuellen Diskussion zu CO₂-Emissionen und Klimaveränderungen wird oft ein verstärkter Einsatz regenerativer Energietechniken gefordert. Ein größerer Anteil der regenerativen Energien am Primärenergiebedarf als 7 % bis zum Jahr 2000 wird jedoch nicht erwartet. Weltweit wurden 1990 bzw. 1991 ca. 47 MW bzw. über 55 MW Photovoltaik-Leistung verkauft /PV News 93/. In Prognosen wird eine jährliche Steigerung von 20 - 30 % für möglich gehalten. Allerdings gab es 1992 einen Einbruch des Trends, da die weltweite PV-Produktion nur um 5 % auf ca. 58 MW gestiegen ist, mit regional sehr unterschiedlichen Entwicklungen /PV News 93/:

USA	+ 6 %
Europa	+ 22 %
Japan	- 6 %
Übrige	- 8 %

In dieser Quelle werden die Gründe dieser regionalen Trends erläutert. Der Ausblick auf die weitere Entwicklung ist also schwieriger geworden. Bisherige Erwartungen kann man wie folgt zusammenfassen:

Für 1995 wird eine Jahreskapazität von 450 MW genannt /vgl. Aulich 1990/. Für das Jahr 2000 wäre bei gleichbleibenden Steigerungsraten mit einer Produktionskapazität von über 1000 MW/a zu rechnen.

PV-Produktionskapazität in Deutschland

Während 1988 die PV-Produktion erst 1 MWp betrug /Enquete 90/, ist die Bundesrepublik Deutschland dabei, den klassischen PV-Ländern Japan und Amerika den Rang abzulaufen. Nirgendwo wird soviel staatliches Geld für Forschung und Entwicklung bereitgestellt wie in der Bundesrepublik. In den kommenden Jahren werden es jährlich ca. 100 Millionen DM sein (vgl. Kapitel „Aufgabenstellung und Zielsetzung“ auf Seite 29). Das Budget der US-Regierung belief sich für 1989 auf 35 Millionen \$ (65 Mio. DM). In Japan sind die Ausgaben von einem Höhepunkt mit 100 Mio. DM im Jahr 1985 auf 75 Mio. DM zurückgegangen. Die starke Stellung der Bundesrepublik wird durch das zunehmende Engagement der Industrie untermauert. An erster Stelle ist hier der Kauf von ARCO Solar durch Siemens zu nennen. Damit ist der Münchner Konzern durch die Gründung der Siemens-Solar-International Übernahme nun selbst zum Marktführer geworden /FH Jülich 90/.

SIEMENS-Solar ist mit einer 1992 produzierten Leistung von ca. 9.6 MW monokristalliner Solarzellen der größte Solarzellenproduzent der Welt. Der jährliche Ausstoß von Siemens-Solar entsprach 1992 ca. 17 % der Weltproduktion, gefolgt von der japanischen Firma Sanyo (6.5 MW). 1993 will die US-Firma Advanced Photovoltaic Systems eine 10 MW/a-Produktionsanlage für a-Si-Solarzellen in Betrieb nehmen.

Der andere deutsche Solarzellenhersteller ist die zum Daimler Konzern gehörende AEG. Zum 1. Juli 1989 wurden alle Solaraktivitäten von AEG und Telefunken unter dem Dach der Deutschen Aerospace zusammengefaßt. Dort arbeitet man nun intensiv an der Weiterentwicklung der multikristallinen Siliziumzellen. Mit der erwarteten Eingliederung von MBB würde Daimler auch Aktivitäten auf dem Gebiet der amorphen Zellen erwerben. Die Phototronics in Putzbrunn bei München, ein Gemeinschaftsunternehmen von MBB und der französischen TOTAL, betreibt seit 1991 eine Pilotfertigung mit einer Kapazität von 1 MW/Jahr.

Als dritter Produzent kam die NUKEM in Hanau auf den Markt. Dort arbeitet man daran, eine an der Universität Erlangen neuentwickelte multikristalline Siliziumzelle, die sogenannte Inversionsschichtzelle, zur industriellen Produktionsreife zu bringen. An der NUKEM ist RWE mit 55 % beteiligt. Die Pilotproduktion beträgt ebenfalls 1 MW/Jahr.

Wie man sieht, wird der Photovoltaik-Markt von den größten Konzernen der Bundesrepublik beherrscht. Daimler und Siemens sind die umsatzstärksten deutschen Unternehmen, die RWE ist der größte Stromversorger /Sauer 89/.

Der noch 1992 für Deutschland aktuelle Planungsstand ließ eine Jahreskapazität von 28 MWp/a noch vor Ende des Jahrhunderts erwarten. Doch Entscheidungen des Hauses Siemens - Aufgabe der Planungen in Wackersdorf (20 MW) und der Auflösung von PV-Electric (1 MW a-Si) - ist die tatsächliche deutsche Produktionskapazität sogar von 8 auf 7 MW/a zurückgefallen. Die Aussichten für eine Aufstockung sind derzeit unklar.

Firma	Standort	Zellentyp	Wirkungsgrad	Kapazität (MW/a)	Inbetriebnahme
Deutsche Aerospace AG	Wedel / Heilbronn	Multikristallin	12.4 %	4	In Betrieb
Siemens Solar / Bayernwerke AG	München	Monokristallin	14 %	1	In Betrieb
Nukem	Alzenau	MIS multikr. ¹	12 %	1	Ende 1991
Phototronics	München	Amorphes Silizium	6 % ²	1	1991

Tab. 9. Solarzellen-Produktionskapazitäten in Deutschland:

¹ MIS = Metal-Insulator-Semiconductor

² Spitzenwert

Interessant sind auch die Prozentanteile an Zellentypen am weltweiten PV-Verkauf /PV-News 93/:

Zelltyp	1991	1992
a-Si	24.9 %	25.6 %
Mono-Si	35.6 %	37.1 %
Multi-Si	37.8 %	34.9 %
CdTe u.a.	1.7 %	2.4 %

Bemerkenswert ist zum einen der Trend zu Mono-Si auf Kosten von Multi-Si, das seine führende Position verlor. Zum anderen expandiert derzeit a-Si in die terrestrische Anwendung, insbesondere in den USA bei EVU-Projekten (z.B. 480 kW in Davis, Kalifornien). Trotz eines Anteils von 1.7 % für CdTe-Solarzellen werden über die nächsten 5 Jahre keine Marktgefährdungen von Si-Zellen durch andere Optionen erwartet.

3.4 Technisch-ökonomische Randbedingungen, Untersuchungsrahmen

3.4.1 Anwendungsbereiche und zu betrachtende Technikketten

Während bei der konventionellen Stromerzeugung und Kraftstoffbereitstellung die indirekten Emissionen nur eine untergeordnete Rolle spielen, ist dies bei der Photovoltaik aufgrund des Fehlens von direkten Emissionen sowie der geringen Energiedichte, der daraus resultierenden hohen Flächenbelegung und den damit verbundenen hohen Materialaufwendungen genau umgekehrt.

Bei der Analyse der mit der Nutzung und Bereitstellung photovoltaischer Systeme verbundenen Auswirkungen auf Mensch und Umwelt ist daher die Prozeßkette 1. Ordnung nur insoweit zu berücksichtigen, als damit die zu betrachtenden Prozeßketten 2. Ordnung festgelegt werden. Sofern ein Backup-System eingebunden ist, sind dessen Emissionen mit in den Vergleich einzubeziehen.

Bei der Prozeßkette 1. Ordnung (Betrieb der Anlage) zählen hierzu:

- der Verwendungsbereich
Hierdurch werden in der Regel die zu verwendenden Systemkomponenten (z.B. Solarzellentyp, Notwendigkeit eines Energiespeichers, etc.) festgelegt. Gleichzeitig wird damit auch die herkömmliche Technik deutlich, die im Vergleich zu betrachten ist:
- die mit dem Betrieb verbundene Bereitstellung von Betriebsmitteln
z.B. für Backup-Systeme oder Energietransport
- die Entsorgung
z.B. falls als Backup-System ein Kohlekraftwerk in Betracht kommt

Bei der Prozeßkette 2. Ordnung (Herstellung der Anlage) sind folgende Ebenen zu betrachten.

- die Installation der nichtphotovoltaischen Systemkomponenten
 - Energiespeicher
 - Elektrische Komponenten
- die Herstellung der nichtphotovoltaischen Systemkomponenten
 - Energiespeicher
 - Elektrische Komponenten
- die Installation der photovoltaischen Anlage
- die Herstellung der photovoltaischen Anlagenkomponenten
 - Tragegerüst
 - Elektrische Komponenten (Schutzdiode, Laderegler, Batterie, Spannungsaufbereitung)
 - Solarmodul bzw.-panel
- Demontage und Entsorgung der Anlagenteile

In der Prozeßkette 3. Ordnung sind dann die Prozesse zur Bereitstellung der Materialien zu betrachten. Konventionelle Baustoffe werden allerdings nicht mehr im Einzelnen betrachtet. Der Beitrag dieser Materialien zur Umweltbelastung wird über

Emissionsfaktoren, die aus der Literatur (vgl. z.B. /Geiger 89, Fritsche 89a, Fritsche 89b, Fritsche 89c, Giesen 89, Wagner 89a, Wagner 89b/) entnommen werden, abgeschätzt. Die bei der Herstellung der Solarzelle und bei der Herstellung der Ausgangsmaterialien und der Hilfsstoffe anfallenden Emissionen sind noch weitgehend unbekannt. Es wird daher in diesem Bereich eine detaillierte Analyse versucht. Das Arbeitsfeld kann dabei anhand der eingesetzten Materialien strukturiert werden:

- Basismaterial Silizium
 - Monokristallines Silizium (Wafertechnik)
 - Polykristallines Silizium (Wafertechnik)
 - Polyepitaktisches Silizium (Kristalline Dünnschichttechnik)
 - Amorphes Silizium
- Verbindungshalbleiter (VHL)
 - III-V-VHL
 - GaAs, InP, InSb
 - II-VI-VHL
 - CdTe, CdSe, CdS
 - WS, WSe, MoS, MoSe
 - ZnS, FeS, ZnTe, ZnCdS, ZnSeTe
 - I-III-VI-VHL
 - CuInSe₂/CdS, CuGaSe, CuInS

3.4.2 Konkurrenztechniken

Der Einsatz von Solarzellen kann generell nach folgenden Anwendungsfällen eingeteilt werden:

- Dezentrale, stationäre, kleine Anlagen im direkten Netzverbund ohne Speicher
- Dezentrale Kleinanwendungen im Inselbetrieb mit Speicher (Batterie) für spezielle stationäre Anwendungen, z.B. Fernmelde-Umsetzer, Beschilderung an Autobahnen, etc.
- Dezentrale Kleinanwendungen im Inselbetrieb mit Speicher (Batterie) für mobile Anwendungen (z.B. Auto, Camping, Hobby, etc.)
- Einsatz mit Backup-System ohne Netzanbindung, z.B. dörfliche Energieversorgung in Entwicklungsländern oder auf Inseln
- Zentrale, große Anlagen zur Strombereitstellung
- Zentrale, große Anlagen zur Wasserstofferzeugung

Entsprechend diesen Anwendungsfällen treten unterschiedliche, konventionelle Techniken als Konkurrenztechniken auf. Als Vergleichsbasis werden hierbei die Prozeßketten mit den für den jeweiligen Anwendungsfall größtem Marktanteil herangezogen (vgl. Tab. 10 auf Seite 42).

System	Energie- gewinnung	Transport	Energie- umwand- lung	Verteilung Sekundär- energie	Endenergie	Nutzung
Konven- tionelle Stromer- zeugung und An- wendung	Kohle- bergbau	Eisenbahn Schiff	Kraftwerk	Stromnetz	Elektri- zität	Haushalte
Stromer- zeugung im Insel- betrieb	Erdöl	Schiff Pipeline	Raffinerie	LKW	Heizöl L	Dörfliche Stromver- sorgung über Ge- nerator (Insel)
Individual- verkehr	Erdöl	Schiff Pipeline	Raffinerie	LKW	Kraftstoffe	PKW

Tab. 10. Prozeßketten konventioneller Systeme

3.4.3 Diskussion von Szenarioannahmen

Aus zeitlichen Gründen können nicht alle oder auch nur mehrere der konventionellen Prozeßketten zum Alternativenvergleich herangezogen werden. Derzeit - Sommer 1992 - ist die Diskussion über die Optionen zur Reduzierung der konventionellen Stromerzeugung durch PV-Anlagen sehr im Fluß. Es ist danach offen, ob zentrale Anlagen nach der Art von Kobern-Gondorf, Neurather See oder Neunburg vorm Wald oder mehr eine großflächige, aber dezentrale, netzgekoppelte Erzeugung auf Dächern und Fassaden von Gebäuden die dominierende Variante sein werden.

Ein weiteres Anwendungsbeispiel, welches sich zur Zeit in intensiver wissenschaftlicher Diskussion befindet, ist das Elektroauto ("E-Auto").

Wegen der für praktische Zwecke kurzen Reichweite solcher Autos mit den heute verfügbaren Batterien ist vor allem an einen Einsatz in den hochbelasteten Innenstädten gedacht, was aber durchaus umstritten ist [Zängl 92]. Deshalb wird (im Kapitel 5) ein anderer Anwendungsfall im Detail vorgestellt, bei dem zum einen die täglich gefahrenen Kilometer - im Mittel - auch von E-Autos abgedeckt werden können und zum anderen auch eine solare Teilversorgung vorstellbar ist. Aus der Tab. 10 wird ein Bereich des Systems "Individualverkehr" (vom "Erdöl" bis zur "Kraftstoffnutzung im PKW") herausgegriffen und zwar das PKW-Verkehrsaufkommen durch "tägliche Berufsfahrten im Personennahverkehr (PNV)". Modellmäßig wird angenommen, daß der Berufsnahverkehr durch Elektroautos abgewickelt wird, deren Batterien auf den Firmenparkplätzen aufgeladen werden sollen. Diese Ladestationen mit Netzanschluß sollen durch PV-Panels versorgt werden. Überschussezeugung zu Nichtarbeitszeiten (Wochenenden, Urlaubszeiten) soll ans Netz abgegeben, der Mehrbedarf über konventionelle Stromerzeugung aus dem Netz entnommen werden. Neben den hier angenommenen PV-Panel überdachten Parkplätzen ist noch vorstellbar, daß auch weitere Flächen an Firmengebäuden, wie Dächer oder Fassaden PV-bestückt sein können. Letzteres wird aber hier nicht weiter berücksichtigt.

Im Band 7 "Konzeptionelle Fortentwicklung des Verkehrsbereichs" der Studie "Energie und Klima" im Auftrag der Enquete-Kommission "Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre" des Deutschen Bundestages werden detaillierte Analysen des Verkehrssektors der alten Bundesrepublik für das Jahr 1987 mit einigen Entwicklungsszenarien für das Jahr 2005 (und auch bis 2050) vorgestellt. Insbesondere wurden dort für 1987 die gefahrenen PKW-Personenkilometer nach Bedarfsarten (wie z.B. Berufsverkehr) angegeben und für 2 Hauptszenarien ("Trend" und "Reduktion") unter anderem die Weiterentwicklung des Verkehrsaufkommens und die Weiterentwicklung der konventionellen PKW-Technik, ausgedrückt in Emissionszahlen an Schadstoffen pro Personenkilometer, abgeschätzt:

"Das Trend-Szenario beinhaltet einen weitgehend eingriffslosen Selbstlauf des Systems; absehbare Entwicklungen wurden jedoch als gegeben angesetzt. Dies bedeutet, daß auch im Trendfall Entwicklungen enthalten sind, die erheblichen Einfluß auf den Energieverbrauch und die Emission klimarelevanter Schadgase haben; ausdrücklich ausgeschlossen sind jedoch solche Maßnahmen, denen derzeit ohne Berücksichtigung des Klimaproblems wenig Realisierungschancen einzuräumen sind."

Das Reduktions-Szenario dagegen soll in erheblichem Umfang die Möglichkeiten ausloten, durch gezielte Maßnahmen eine Reduktion der klimarelevanten Emissionen herbeizuführen. Hierfür konnten durchaus weitreichende Maßnahmenansätze formuliert werden, gleichwohl dürfen sie aus heutiger Sicht nicht unplausibel erscheinen; insbesondere wurde zwar eine verstärkte Änderung der Einstellungen und Verhaltensweisen in Richtung auf eine ökologisch angepaßte Lebensweise zugrunde gelegt, wobei jedoch gleichzeitig die derzeitigen Grundstrukturen des Wirtschaftens und des Konsums als weiterhin bestehend angesetzt wurden /Enquete 90, Brosthaus 90/.

In beiden Szenarien sind beispielsweise alle Benzin-PKW's mit geregelten 3-Wege-Kat ausgestattet, aber die Emissionszahlen im Trendszenario sind höher, da von größeren PKW-Leistungen als im Reduktions-Szenario auszugehen ist.

Hier wird folgender Analyseweg verfolgt:

Es wird der PKW-PNV durch Berufsfahrten ("Pendler") des Jahres 1987 genommen, aber der technische Stand der PKWs im Jahr 2005 nach dem Trend-Szenario angesetzt (ausgedrückt durch die Emissionen pro Personenkilometer an CO_2 , CO, NO_x , SO_2 , CH, Partikel). Für das genannte Verkehrsaufkommen wird abgeschätzt, welche Emissionsreduktionen der Einsatz von Elektroautos mit solarer (Teil-)Versorgung bringen kann. Die Emissionen schließen neben dem direkten Einsatz der Treib- und Brennstoffe auch deren Bereitstellung ab Primärenergieressourcen ein. Bei den PV-Panels werden die Vorleistungen auch für die Abstützungen berücksichtigt.

Betrachtungsraum sind nur die alten Bundesländer, da sich nur für diese derzeit einigermaßen der generelle Entwicklungstrend im Verkehrsaufkommen abschätzen läßt. Hier wird nun angenommen, daß zumindest für den PNV die Zahlen des Jahres 1987 auch für das Jahr 2005 repräsentativ sind. Zwar läßt der derzeitige Trend eher ein Anwachsen erwarten, aber im politischen Raum werden intensiv Maßnahmen diskutiert zur Beschränkung des privaten PKW-Verkehrs zugunsten öffentlicher Verkehrsmittel. Dazu

läßt auch die Expansion des Dienstleistungssektors mittelfristig einen Beitrag zur Kompensation des bestehenden Trends zur Ausweitung des PKW- Verkehrs erwarten.

Die detaillierte Darstellung der betrachteten Prozeßketten, der analysierten Solarzellen und konkurrierender Prozeßketten wird bei der Durchführung der Umweltvorsorgeuntersuchung im Kapitel „Durchführungsphase (Umweltvorsorgeuntersuchung)“ auf Seite 71 gegeben.

3.5 Stofflich-ökologische Randbedingungen

Schon 1980 wurde vom Rat der Sachverständigen für Umweltfragen /Queisser 1980 / versucht die möglichen Umweltbelastungen für den Fall einer kommerziellen Nutzung der Photovoltaik aufzuzeigen. In der umfassend angelegten Expertise, in der nachfolgende Umweltaspekte angesprochen wurden:

- Landschaftsverbrauch
- Ästhetik
- Feuerrisiko bei der Verwendung
- Unfälle durch Wartung
- Risiken bei der Herstellung der Solarmodule
- Regionaler bzw. globaler Wärmehaushalt
- Auswirkungen auf Pflanzen und Tiere
- Luftbelastung
- Wärmebelastung
- Wasserbelastung
- Lärmbelastung
- Strahlenbelastung

wird zusammenfassend ausgeführt:

„Die großen Flächen unschön wirkender Solarzellen stellen die stärkste Belastung dar, der sich möglicherweise auch unerwünschte Veränderungen der Biosphäre und des Mikroklimas wie auch repressive Kontrollmaßnahmen zugesellen könnten.“

Weiter wird ausgeführt:

„Bei einem weltweiten Einsatz der Solarenergie werden an Stelle des Öls andere Rohstoffe ausgebeutet und erschöpft werden. Diese Erschöpfung unserer Rohstoffe scheint der Preis für die Lösung unserer Energieprobleme zu sein.“

3.5.1 Bisherige Einschätzungen

3.5.1.1 Unfallrisiken

Während in einigen Publikationen die Photovoltaik (PV) als der Hoffnungsträger für eine zukünftige umweltverträgliche Energieerzeugung bezeichnet wird, werden in anderen Publikationen die Risiken der Stromerzeugung mittels PV in vergleichbarer Höhe mit den Risiken der Stromerzeugung durch fossile Kraftwerke eingeschätzt (vgl. Abb. 1 auf Seite 46 und Abb. 2 auf Seite 46).

Allerdings ist eine detaillierte und vergleichende Darstellung der einzelnen Teilrisiken eher die Ausnahme. Hinzu kommt, daß der Begriff Risiko selbst als Maßstab für eine vergleichende Bewertung nicht unumstritten ist.

Wie schon ausgeführt ist zur Ermittlung der mit einer Technik verbundenen Umwelt- und Gesundheitsgefahren zunächst die gesamte Prozeßkette zur Produktion des betrachteten Produktes unter Einschluß der Bereitstellung der Vorprodukte und der Materialien zum Bau der benötigten Anlagen sowie deren Entsorgung zu betrachten. Auf jeder dieser Stufen können sowohl bei Normalbetrieb als auch bei Störfällen Stoffe in die Umwelt freigesetzt werden.

Die freigesetzten Stoffe wirken dann direkt oder indirekt über die Verteilungs- und Akkumulationsmechanismen in der Ökosphäre auf Mensch, Tier und Pflanze sowie auf die Bestandteile unserer künstlichen Umwelt (Gebäude, Denkmäler, etc.) ein.

Beim Vergleich der auftretenden Schäden ist zu unterscheiden nach der Wirkungsart (physikalische (Elektrischer Schlag, Explosion, Brand etc.) oder chemische Effekte (Toxizität)), nach ihrem zeitlichen Ablauf (kurzzeitig, langfristig, reversibel) und ob reale Schäden oder potentielle Schäden, die über Risikobetrachtungen erfasst werden müssen, auftreten.

Erst ein detaillierter Vergleich in all diesen Aspekten ließe eine Aussage wie in Abb. 2 auf Seite 46 bzw. Abb. 1 auf Seite 46 zu.

Aufgrund der lückenhaften Datenbasis und der inhärenten Bewertungsproblematik ist es u.E. (noch) nicht möglich eine derartige Rangfolge aufzustellen. Hier bedarf es weiterer wissenschaftlicher Arbeit.

Eine Analyse in dieser Detaillierungstiefe kann sicherlich nur in Einzelfällen durchgeführt werden, ist aber glücklicherweise im Rahmen der Umweltvorsorgeprüfung auch nicht notwendig. Die Umweltvorsorgeprüfung stellt vielmehr darauf ab, durch den Vergleich mit konkurrierenden Techniken den Blick auf etwaige (wesentliche) Problembe-
reiche zu fokussieren.

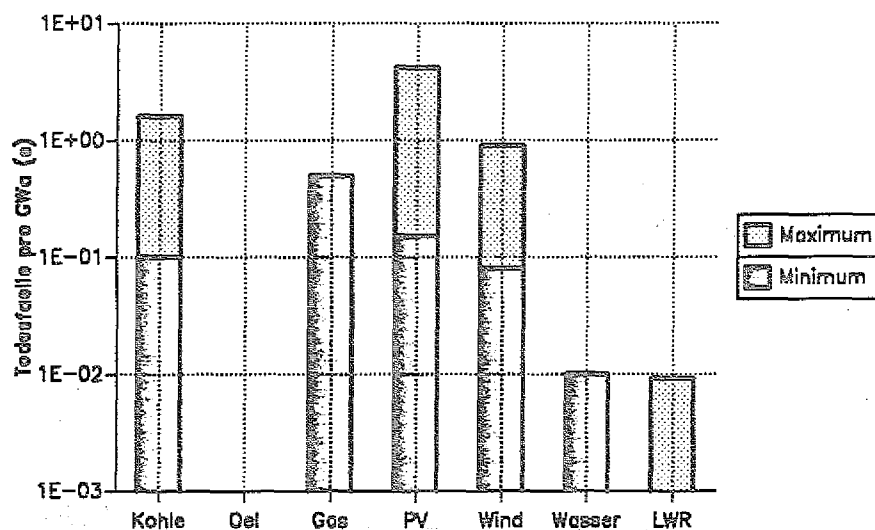


Abb. 1. Todesfallrisiko der Bevölkerung durch Unfälle

: Bezogen auf ein GWh elektrischer Energieproduktion für verschiedene Energieerzeugungssysteme (ohne Großunfälle, jeweils über die gesamte Prozeßkette) nach /Fritzsche 1988/, zitiert in /Grawe 1990/.

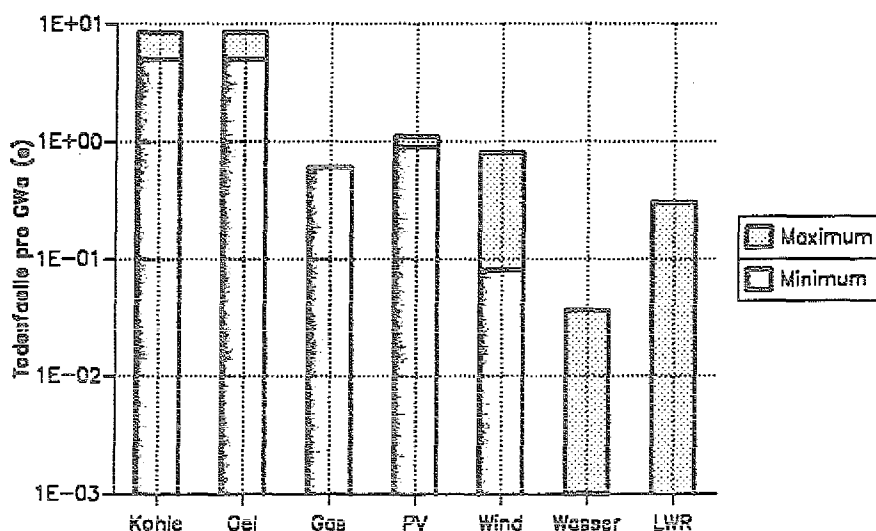


Abb. 2. Todesfallrisiko der Bevölkerung durch Erkrankungen

: Bezogen auf ein GWh elektrischer Energieproduktion für verschiedene Energieerzeugungssysteme (ohne Großunfälle, jeweils über die gesamte Prozeßkette) nach /Fritzsche 1988/, zitiert in /Grawe 1990/.

3.5.1.2 Wirkungen auf Mensch und Umwelt

Mit der am 17. Oktober 1988 in Betrieb genommenen 340 kW_{peak} -Anlage in Koblen-Gondorf /Beyer 1988, Beyer 1989/ werden u.a. auch die angesprochenen ökologischen

Aspekte untersucht. Untersucht werden folgende Themenbereiche, vgl. /Diefenbach 1989/:

- Einfluß der technischen Einrichtungen auf Fauna und Flora unter den Photovoltaik-Modulen
- Einfluß unterschiedlichen Bodensubstrats auf die Entwicklung der Vegetation
- Ansaaterfolg verschiedener Samenmischungen im Vergleich zu sautfreien Flächen
- Vegetationsentwicklung auf sautfreien Flächen
- Auswirkung von Pflegemaßnahmen
- Besiedlung mit Tierarten
- Machbarkeit von Artenhilfsprogrammen

Zielsetzung dieser Arbeiten ist es nachzuweisen, daß bei einem Flächenverhältnis der ökologisch gestalteten Fläche zur Modulfläche von etwa 10:1 diese Landflächen dem Naturschutz zugeführt und als Biotope gestaltet werden können. Es besteht die Hoffnung, daß derartige Biotope eine viel größere Artenvielfalt von Pflanzen und Tieren als land- oder forstwirtschaftliche Monokulturen ermöglichen und seltenen und gefährdeten Arten einen Fluchraum bieten.

In der neueren Literatur wird daher nur noch wenig auf die Aspekte Landschaftsverbrauch und Ästhetik eingegangen. Besondere Beachtung finden dagegen denkbare Stoffeinträge in die Umwelt bei Herstellung und Nutzung der Solarzellen, z.B. /Grawe 90, S.574/.

Die Umweltaspekte ("environment, health and safety") der PV werden in den USA schon seit etwa 1980 im Auftrag des Department of Energy (DoE) von der Biomedical and Environmental Assessment Group des Brookhaven National Laboratory (BNL), Upton, New York, analysiert, bewertet und in Empfehlungen umgesetzt /Moskowitz 85/. BNL hat auch eine Literaturbank zu diesem Thema (wobei aber die meisten einschlägigen Veröffentlichungen ohnehin von BNL sind) und auch ein Photovoltaic Health and Safety Electronic Bulletin Board (BBS) als ein EDV-gestütztes Forum zum themenbezogenen Informationsaustausch eingerichtet /Moskowitz 89/.

Die wesentlichen Aspekte für Umwelt, Gesundheit und Sicherheit bei Herstellung, Nutzung und schließlich Entsorgung von PV-Modulen umfassen nach /Moskowitz 90/ :

- inhärente biologische Gefahren durch stoffliche Einwirkung,
- Gesundheit und Sicherheit der Beschäftigten in den PV- Fabriken,
- Gefährdung der Öffentlichkeit durch an die Umwelt abgegebene Herstellungsabfallprodukte und durch Folgeprodukte von Bränden in PV-Anlagen
- Umweltgefahren durch die Deponierung von Herstellungsabfall und Endlagerung von Modulen.

Im Forschungsbericht 1 "Sonnenenergie" der Akademie der Wissenschaften zu Berlin werden für die Weiterentwicklung der Photovoltaik folgende ökologische Forderungen genannt /Dickmann 91/:

1. Ungiftigkeit des Solarzellenmaterials

Weder das Solarzellenmaterial selbst noch seine wichtigsten Verbindungen (z.B. Oxide) sollten toxisch sein, da große Flächen bedeckt werden müssen. Insbesondere scheiden aber Verbindungen aus, die Schwermetalle wie Pb, Cd, Hg, oder aber das Element As enthalten.

Am günstigsten erscheinen dagegen Elemente, die selbst dann unbedenklich sind, wenn sie in die Nahrungskette gelangen und/oder in geringen Konzentrationen als unschädliche Spurenelemente im menschlichen Körper vorkommen.

2. Ungiftigkeit der Herstellungsprozesse

Es sollen keine giftigen oder gefährlichen (z.B. explosive) Ausgangsstoffe, Zwischen- oder Nebenprodukte verwendet werden (wie z.B. Silan, Phosphin bei bestimmten Herstellungsverfahren von amorphen Silizium).

3. Wiederverwendbarkeit der Zellen- und Modulenmaterialien

Es sollen von vorneherein keine Wegwerfzellen oder -module hergestellt werden, sondern es ist ein modularer Aufbau von Arrayflächen anzustreben, damit defekte Einzelzellen und Modulteile ausgetauscht und die Materialien wiederverwendet werden können.

4. Kein zusätzlicher Landschaftsverbrauch

Nach Möglichkeit sollen bereits überbaute Flächen oder aride Zonen genutzt werden. Ökologische Gesichtspunkte legten es daher auch nahe, daß photovoltaische Stromerzeugung in unseren Breiten dezentral betrieben würde.

3.5.1.3 Vorläufige zusammenfassende Einschätzung

Wie beschrieben wurden insbesondere von Moskowitz et.al. Arbeiten zu möglichen Umweltbelastungen bei Herstellung, Verwendung und Entsorgung der Photovoltaik-Module ausgeführt. Allerdings liegt eine umfassende Öko-Bilanz solcher Anlagen bislang nach unserer Kenntnis nicht vor.

Bisher vorliegende Risiko-Abschätzungen (z.B. /Fritzsche 1988/) sind u.E. daher aufgrund der lückenhaften Datenbasis und der inhärenten Bewertungsproblematik (noch) nicht geeignet eine Rangfolge aufzustellen. Hier bedarf es weiterer wissenschaftlicher Arbeit.

Die ebenfalls teilweise kontrovers geführte Diskussion zur energetischen Amortisation der Photovoltaik-Anlagen dürfte indes zugunsten der Photovoltaik entschieden sein.

In einer detaillierten und fundierten Arbeit unter Mitarbeit von Solarzellenherstellern wird von /Hagedorn 1989/ für heutige Produktions- und Sonneneinstrahlungsbedingungen in der Bundesrepublik für kristalline Si-Zellen eine energetische Amortisationszeit von ca. 3-7 Jahren errechnet. Es ist abzusehen, daß dieser Zeitraum innerhalb der nächsten zehn Jahre durch Verringerung der Schichtdicken und Verbesserung der Wirkungsgrade der Solarzellen noch erheblich reduziert werden kann.

Mit der Verringerung des Materialaufwandes und der Verbesserung der Wirkungsgrade kann auch eine Verringerung der spez. Umweltbelastungen erwartet werden.

Herstellung

Die auftretenden Risiken für Betriebspersonal und Bevölkerung in der näheren Umgebung einer Anlage (z.B. zur Herstellung amorpher Si-Solarzellen) wird den Risiken jeder chemischen Anlage, in welcher mit toxischen und explosiblen Gasgemischen umgegangen wird, entsprechen.

Eine Übertragung der negativen Erfahrungen mit der Elektronik- Industrie in Kalifornien (Silicon-Valley) auf die Photovoltaik-Industrie unter deutschen Verhältnissen ist auf keinen Fall der realen Situation angemessen.

Verwendung

Im Brandfall können insbesondere beim Einsatz von Verbindungshalbleitern (z.B. Kupferindiumdiselenid, Galliumarsenid, Cadmiumtellurid) toxische Stoffe in die Umwelt freigesetzt werden. Es ist anzumerken, daß alle heute in Betrieb befindlichen Photovoltaikanlagen Silizium verwenden, also keine Verbindungshalbleiter.

Allerdings dürften diese Emissionen bei Bränden von Einzelgebäuden aufgrund der geringen Mengen und insbesondere im Vergleich zu den in heutigen Gebäuden schon vorhandenen Schadstoffpotential (z.B. Polyvinylchlorid ummantelte Kupferkabel, sonstige Kunststoffserzeugnisse, etc.) keine nennenswerte Rolle spielen.

Für große Anlagen (Photovoltaik-Kraftwerke) ist im Falle der Verbindungshalbleiter durch Einsatz geeigneter (heute verfügbarer) Feuerschutztechniken möglich, das Risiko großflächiger Brände sehr gering zu halten, ggf. müssen jedoch Mindestabstände zu Wohnbereichen oder empfindlichen anderen Nutzungen eingehalten werden.

Entsorgung

Im Fall der Verbindungshalbleiter muß sowohl für die Entsorgung der bei der Produktion anfallenden Rückstände als auch für die Entsorgung der Solarmodule selbst vorsorgend ein Konzept entwickelt werden.

Die auf Silizium basierenden Solarmodule dürften dagegen ähnlich wie bei heutigen Sondergläsern in der Deponie keine Probleme aufwerfen.

In /Diekmann 91/ wird die Verwendung giftiger Halbleitermaterialien sehr kritisch gesehen. Es wird ausgeführt:

".....In jedem Fall sollten zukünftige Zellen mit alternativen, neuartigen Materialien mit schlechteren intrinsischen Eigenschaften als Silizium (z.B. Vorkommen, Toxizität, Stabilität) nur dann für zukünftige Solarzellenforschung in Betracht kommen, wenn andere sehr ungewöhnliche Vorteile erwartet werden können. Vielmehr sollte ein alternatives Solarzellengrundmaterial alle Vorteile des ein- und polykristallinen Silizium wie z.B. Verfügbarkeit, Ungiftigkeit, Stabilität, hohe Lebensdauer, keine Degradation, großflächige Herstellbarkeit, hohe potentielle Wirkungsgrade und eine passivierbare Oberfläche aufweisen.

Ob sich derartige Materialien finden lassen, bleibt abzuwarten. Nach heutigem Kenntnisstand dürften Kompromisse in dem einen oder anderen Fall unverzichtbar sein.

3.5.2 Stoffidentifikation

Die nachfolgenden Tabellen zeigen beispielhaft die Vielzahl der verwendeten Materialien und Chemikalien auf.

Input	Einträge in die Umwelt		Output
	Atmosphäre	Hydrosphäre	
Sand Frischwasser	Staub Stickoxide Schwefeloxide Kohlenmonoxid	Feststoff Wasser	Sand Quarzsand

Tab. 11. Prozessschritt: Gewinnung und Aufbereitung von Quarzsand: /Hagedorn 92/

Input	Einträge in die Umwelt		Output
	Atmosphäre	Hydrosphäre	
Quarzkies Holzkohle Kohle (Low Ash Coal) Petrokokk Holzschnitzel Hartbranntelektroden Aluminium ¹ Aluminiumoxid ¹ Salzsäure ¹	Kohlenmonoxid Wasser flüchtige Bestandteile ² Kohlenstoff Aschebestandteile		MG-Silizium Siliziumoxid ³ Siliziumhaltige Schlacke

Tab. 12. Prozessschritt: Erzeugung von metallurgischem Silizium: /Hagedorn 92/

¹ /Tietze 89/

² Wasserstoff, Methan, Kohlenmonoxid, Kohlendioxid, Ethan.

³ Wird später zu SiO₂ oxidiert und über Abgasreinigung ausgefiltert.

Input	Einträge in die Umwelt		Output
	Atmosphäre	Hydrosphäre	
MG-Silizium Quarztiegel Graphittiegel Graphitheizelement Graphitträger Graphit Kunststoffe ¹ Baumwolle Chlorwasserstoff Kühl-/Waschwasser Salpetersäure Essigsäure VE-Wasser ² Aceton Vakuum-Pumpenöl Epoxid-Kleber Stadtwasser Reinigungsmittel Wasserstoff Argon	Argon Aceton Wasserstoff	Kalziumnitrat Essigsäure Aceton Reinigungsmittel Natriumhydroxid Natriumacetat Wasser Chlorwasserstoff Abwasser Kühlwasser in Abwasserreinigung Kieselensäure Metallchloride	Trichlorsilan Siliciumtetrachlorid Wasserstoff in Sondermüll ----- Kalziumfluorid Silizium-Abrieb (Schlamm) Epoxid-Kleber Vakuum-Pumpenöl Polyethylen Kunststoffe ¹ in Industriemüll ----- Silizium-Rest Quarztiegel Graphittiegel plus Heizelemente Graphitträger Graphit Baumwolle in Metallschrott ----- Sägeblätter Diamantenschleif- blätter Innenlochsäge- scheiben Metalle

Tab. 13. Prozeßschritt Herstellung von EG-Silizium und monokristalliner Scheiben: /Hagedorn 92/

¹Polyethylen u.a.

²Voll-Entsalzt

Input	Einträge in die Umwelt		Output
	Atmosphäre	Hydrosphäre	
Monokristalline Si-Scheiben Kaliumhydroxid Fluorwasserstoff Siebdruckpaste (Ag, Al) Siebdruckpaste (Al) Aceton SiO ₂ -Emulsion Zitronensäure Ethylacetat-Xylol Ethanol Isopropanol VE-Wasser Sauerstoff gereinigte Luft Stickstoff	Luft CO ₂ , H ₂ , (C, C _n H _m) Lösemitteldämpfe (Ethanol, Ethylacetat) Lösemitteldämpfe (Terpentinöl, Ethylenglykolmono- ethylether) Fluorwasserstoff Wasserstoff Sauerstoff Stickstoff	Kaliumhydroxid Kaliumsiloxan Aceton Siliziumdioxid Zitronensäure Kalziumhydroxid Wasser	Monokristalline Solarzellen in Sondermüll ----- Reinigungsmittelreste Pastenreste Kalziumfluorid Kalziumphosphat in Industriemüll ----- defekte Wafer

Tab. 14. Prozeßschritt Herstellung von monokristallinen Solarzellen: /Hagedorn 92/

Input	Einträge in die Umwelt		Output
	Atmosphäre	Hydrosphäre	
Monokristalline Solarzellen Verbindungsbändchen Lot Verbinderstreifen Glasscheiben (4 mm) EVA ¹ -Folie (0,5 mm) Rückseitenfolie Schrumpfschläuche Quarzmehl Aluminiumrahmen Kunststoffwinkel Profilgummi Anschlußdose (Aluminium) Trennfolie Lotpaste Epoxid-Harzmasse Kleber Silicon-Kautschuk Wasser AC-Waschmittel (Tenside und Komplexbildner) Freon	Freon Vernetzungsprodukte	AC-Waschmittel Waschwasser	monokristalline PV-Module in Industriemüll ----- defekte Module EVA ¹ -Folienreste Rückseitenfolienreste Trennfolien Foliengummireste zur Wiederaufbereitung ----- Freon

Tab. 15. Prozeßschritt Modulherstellung mit monokristallinen Solarzellen: /Hagedorn 92/ :
¹Ethylen-Vinyl-Acetat

Input	Einträge in die Umwelt		Output
	Atmosphäre	Hydrosphäre	
MG-Silizium (99 %) Graphit Kunststoffe Baumwolle Glas Siliziumcarbid Papier Messing Diamant Stahl Ölbinder Schärfsteine Chlorwasserstoff (100 %) Kühl- Waschwasser Mineral- Silikonöl Ethylenglykol Aceton Waschmittel, Kaltreiniger, Tensid Ameisensäure Ölbinder Wasserstoff (100 %) Argon	Argon Wasserstoff	Kühlwasser Chlorwasserstoff in Abwasserreinigung: ----- Kieselsäure Metallchloride Abwasser Waschmittel Tensid Ameisensäure Sandstein	Trichlorsilan (TCS) Siliziumtetrachlorid (STC) in Sondermüll ----- Papier Kunststoffe Siliziumcarbid Mineral- Silikonöl Ethylenglykol Ölbinder in Industriemüll ----- Graphit Siliziumoxide Glas Silizium Siliziumcarbid Baumwolle Sekundärrohstoffgewinnung ----- Stahlschrott Messing

Tab. 16. Prozeßschritt Herstellung von EG-Silizium und multikristalliner Scheiben: /Hagedorn 92/ ¹ Polyethylen, Polyurethane, Polyvinylchlorid u.a.

Input	Einträge in die Umwelt		Output
	Atmosphäre	Hydrosphäre	
Kaliumhydroxid Siebdruckpasten Salpetersäure (65 %ig) Trichlorphosphan Fluorwasserstoff Tetraisobutyltitanat (TPT) VE-Wasser Pumpenöl Isopropylalkohol Wasserstoff Tetrafluorkohlenstoff Stickstoff Sauerstoff	Terpentinöl, Dibuthylphthalat CO ₂ , H ₂ , (CO, C _n H _m NO _x) Sauerstoff Stickstoff Isopropylalkohol Wasserstoff Wasser Stickoxide Kohlendioxid	Kaliumsiloxan Kaliumchlorid Natriumnitrat Natronlauge Natriumfluorid Siliziumdioxid Natriumchlorat Natriumdihydro-phosphat Wasser Titanoxide	Multikristalline Solarzellen ----- in Sondermüll ----- fluoriertes Altöl Isopropylalkohol + Pastenreste Kalziumfluorid Kalziumhydroxid ----- in Industriemüll ----- defekte Wafer Titanoxide

Tab. 17. Prozeßschritt Herstellung von multikristallinen Solarzellen: /Hagedorn 92/

Tetrafluormethan, Siliziumtetrafluorid, Titandioxid, Bor, Phosphor, Phosphorchlorat, Salpetersäure, Fluor, Fluorwasserstoff, Fluorwasserstoffsäuren, Chlorwasserstoff, Silber, Ethylvinylacetat, Polyvinylbutyral, Silikon

Tab. 18. Prozeßschritt Herstellung von multikristallinen Solarzellen:
/Tietze 89/

Input	Einträge in die Umwelt		Output
	Atmosphäre	Hydrosphäre	
Multikristalline Solarzellen Glasscheiben (2 mm) EVA ¹ -Folie (0.5 mm) Verbinderstreifen (Al, Cu/Ag) Edelstahlrahmen Anschlußdose (Polyester) Trennfolie (Polyethylen) Glasreinigungsmittel Dichtmasse (Polysulfidelastomer) Silikonkleber Sekunden-Kleber (Cyanacrylat) Beschleuniger Wasser (entsalzt) Methylenchlorid	Methylenchlorid Vernetzungsprodukte	Wasser (entsalzt)	multikristalline PV-Module ----- in Industriemüll: ----- EVA ¹ -Folienreste Trennfolie Dichtmassenreste Cyanacrylat Silikonkleber defekte Module ----- in Sondermüll: ----- Polysulfidelastomer-reste Methylenchlorid ----- zur Wiederaufbereitung ----- Methylenchlorid mit Polysulfid- Elastomerresten

Tab. 19. Prozeßschritt Modulherstellung mit monokristallinen Solarzellen: /Hagedorn 92/ :
¹Ethylen-Vinyl-Acetat

Input	Einträge in die Umwelt		Output
	Atmosphäre	Hydrosphäre	
Glasscheibe (3 mm, SnO ₂ -beschichtet) Rückkontakt (Silber) Rückkontakt (Nickel) Kupferbändchen EVA-Folie Rückseitenglas (3 mm) Trennfolie (HD- Polyethylen) VE-Wasser Waschmittel Paste (Titanoxid) Silberleitleber Pumpenöl Silan Trimethylbor Methan Phosphin Wasserstoff Stickstoff Sauerstoff Argon	Lösemittel (Terpentinöl) Vernetzungsprodukte Stickstoff Sauerstoff Argon Zinnoxid Siliziumdioxid Kohlendioxid Wasser	Waschmittel Wasser Paste (Terpentinöl)	PV-Module in Sondermüll ----- Siliziumdioxid Phosphorpentoxid (P ₂ O ₅) Phosphorpentoxid (P ₄ O ₁₀) Boroxid Pumpenöl in Industriemüll ----- Titanoxide-Schlamm Trennfolie (HDPE) defekte Module ----- Sekundärrohstoffgewin- nung ----- Silber Nickel

Tab. 20. Prozessschritt Herstellung von amorphen PV-Modulen (Dünnschicht): /Hagedorn 92/

Titandioxid, Silan, Diboran, Methan, Phosphin, Aceton, Isopropanol, Lithiumwasserstoff, Chlorwasserstoff, Fluorwasserstoff, Flußsäure, Salpetersäure, Phosphorsäure, Kaliumhydroxid, Natriumhydroxid, Zinnoxid, Tetramethylzinn, Ethylvinylacetat, Polyvinylbutyral, Silikon

Tab. 21. Prozessschritt Herstellung von amorphen PV-Modulen: /Tietze 89/

Input	Einträge in die Umwelt		Output
	Atmosphäre	Hydrosphäre	
Aluminium (99 %ig) Adsorptionsmittel* Siliziumtetrachlorid Stickstoff	Stickstoff Chlorwasserstoff	Wasser Natriumsiloxan Natriumhydroxid Natriumchlorid Verunreinigungen	Solarsilizium Aluminiumchlorid Adsorptionsmittel Verunreinigungen

Tab. 22. Prozessschritt Herstellung von Solarsilizium aus SiCl₄ und Aluminium: /Hagedorn 92/

Input	Einträge in die Umwelt		Output
	Atmosphäre	Hydrosphäre	
Siliziumdioxid Kalziumcarbonat Kalziumsilikat ¹⁾ Natriumcarbonat Aluminiumoxid Zuschlagstoffe Ruß Phenolharz Quarztiegel Heizelement Sägebänder Graphitteile Chlorwasserstoff* VE-Wasser* Fluor-Chlor-Wasserstoffverbind. ¹ Argon	Staub Fluoride Chloride Kohlendioxid Wasser Argon Spuren Phenol Spuren Formdehyd Siliziumdioxid-Feinstaub	Natriumchlorid Kalziumchlorid Wasser	Solarsilizium in Sondermüll ----- Aluminiumoxid (Filterschlamm) ----- in Wiederaufbereitung ----- Aktivkohlefilter ----- in Industriemüll ----- Graphitteile Silizium-Reste ----- Sekundärrohstoffgewinnung ----- Sägebänder amorphe Kieselsäure

Tab. 23. Prozessschritt Herstellung von Solarsilizium aus gereinigtem SiO₂ und Kohlenstoff: /Hagedorn 92/ :
¹/Tietze 89/

Herstellung Kupfersulfid/Cadmiumsulfid - Solarzellen	Herstellung Silizium/Cadmiumsulfid - Solarzellen
Kupfersulfid Cadmiumsulfid Cadmiumchlorid Natriumchlorid Kupferchloridlösung Kupferoxid Hydraziniumchlorid Salzsäure Bromwasserstoffsäure Nickel Gold Kupfer organische Lösungsmittel Chrom Titan Äthylvinylacetat Polyvinylbutyral Silikon	Silizium Cadmiumsulfid Äthylvinylacetat Polyvinylbutyral Silikon

Tab. 24. Materialien zur Herstellung von Solarzellen (Verbindungshalbleiter):
 /Tietze 89/

Input	Einträge in die Umwelt		Output
	Atmosphäre	Hydrosphäre	
Silizium-Wafer (mono- oder multikristallin) Aluminium Cäsiumchlorid Nickel-Masken Kaliumhydroxid Kaliumcarbonat Fluorwasserstoff Chlorwasserstoff Wasserstoffperoxid VE-Wasser Wasserstoff Silan Ammoniak Stickstoff Sauerstoff Ätzgas (TCA) Ätzgas (NF3)	Wasserstoff Chlorwasserstoff, Methylenchlorid Wasser, Kohlendioxid Stickstoff, Siliziumtetrafluorid Sauerstoff	Cäsiumchlorid Kaliumchlorid Wasser	MIS-I-Solarzelle in Sondermüll ----- Aluminiumoxid Siliziumdioxid in Industriemüll ----- defekte Wafer ----- Sekundärroh- stoffgewinnung ----- Aluminium Nickel-Masken Fluorwasserstoff

Tab. 25. Prozeßschritt Herstellung von MIS-Inversionsschicht-Solarzellen: /Hagedorn 92/

Input	Einträge in die Umwelt		Output
	Atmosphäre	Hydrosphäre	
MIS-Inversionsschicht- solarzellen Glasscheiben (3 mm) Verbinderstreifen Anschlußdose Acryl-Gießharz Dichtmasse (Butyl-Kautschuk) Wasser (entsalzt) Phthalsäureester	Dimethylphthalat	Abwasser	Photovoltaik-Modul in Industriemüll ----- Acryl-Gießharz-Reste in Dimethylphthalat Butyl-Kautschuk-Reste defekte PV-Module

Tab. 26. Prozeßschritt Modulherstellung mit MIS-Inversionsicht-Solarzellen: /Hagedorn 92/

3.6 Umwelterheblichkeitsprüfung

Über eine Betrachtung der Verfahrenstechnik ist zunächst zu ermitteln, welche Stoffe in welches Kompartiment eingebracht werden und welche Mengen größenordnungsmäßig zu erwarten sind. Als umwelterheblich werden Stoffe eingestuft, die umweltgefährlich sein können und/oder die relevanten Konzentrationen in der Umwelt überschreiten. Als umweltgefährlich werden Stoffe eingestuft, wenn sie ein sehr hohes Wirkungspotential für Ökosysteme haben, oder in der Umwelt längere Zeit stabil sind bzw. sich anreichern, und die in der Umwelt entstehenden Konzentrationen zu schädlichen Langzeitwirkungen für Ökosysteme führen können.

3.6.1 Kurzbeschreibung der Methode

Die Prüfung auf Umwelterheblichkeit von Stoffen bei marktfernen Vorhaben verlangt Kenntnis über

- das Verhalten der Chemikalien in der Umwelt
 - Eintrag der Chemikalie in die Umwelt
 - die Verteilungstendenz in das jeweilige Umweltkompartiment
 - Akkumulation
 - Persistenz ⁷
- die Wirkung von Chemikalien in der Umwelt
 - eingebrachte Menge
 - Toxizitäten (akute-chronische Toxizität, Genotoxizität)

Zur Ermittlung

- der umwelterheblichen Kompartimente
- der Persistenzgrade
- der Akkumulationsvermögen
- der Toxizitätsgrade

eines Stoffes werden stark vereinfachte Schemata benützt.

Die zentrale Rolle der Persistenz bei der Beurteilung einer Umweltchemikalie ergibt sich aus der Definition der Umwelt, als dem nicht "steuerbaren" Bereich (im Gegensatz zum "steuerbaren" Bereich der Technosphäre) und der Tatsache, daß die einmal in die Umwelt eingebrachten Chemikalien und Stoffe im Regelfall nicht rückholbar sind.

Dies bedeutet, wenn die Schadwirkung eines Stoffes erst zu einem späteren Zeitpunkt erkannt wird, daß negative Spätfolgen auf Biota und abiotische und biotische Bestandteile von Ökosystemen aufgrund ihrer Komplexizität und der vielfältigen Vernetzungen nicht mehr vermieden werden können. Besonders betroffen ist meist der Mensch, der nicht nur Teil des Ökosystems, sondern auch Endpunkt vieler Nahrungsketten ist. Die Exposition des Menschen kann dann nicht oder nur mit extrem hohem Aufwand beendet werden.

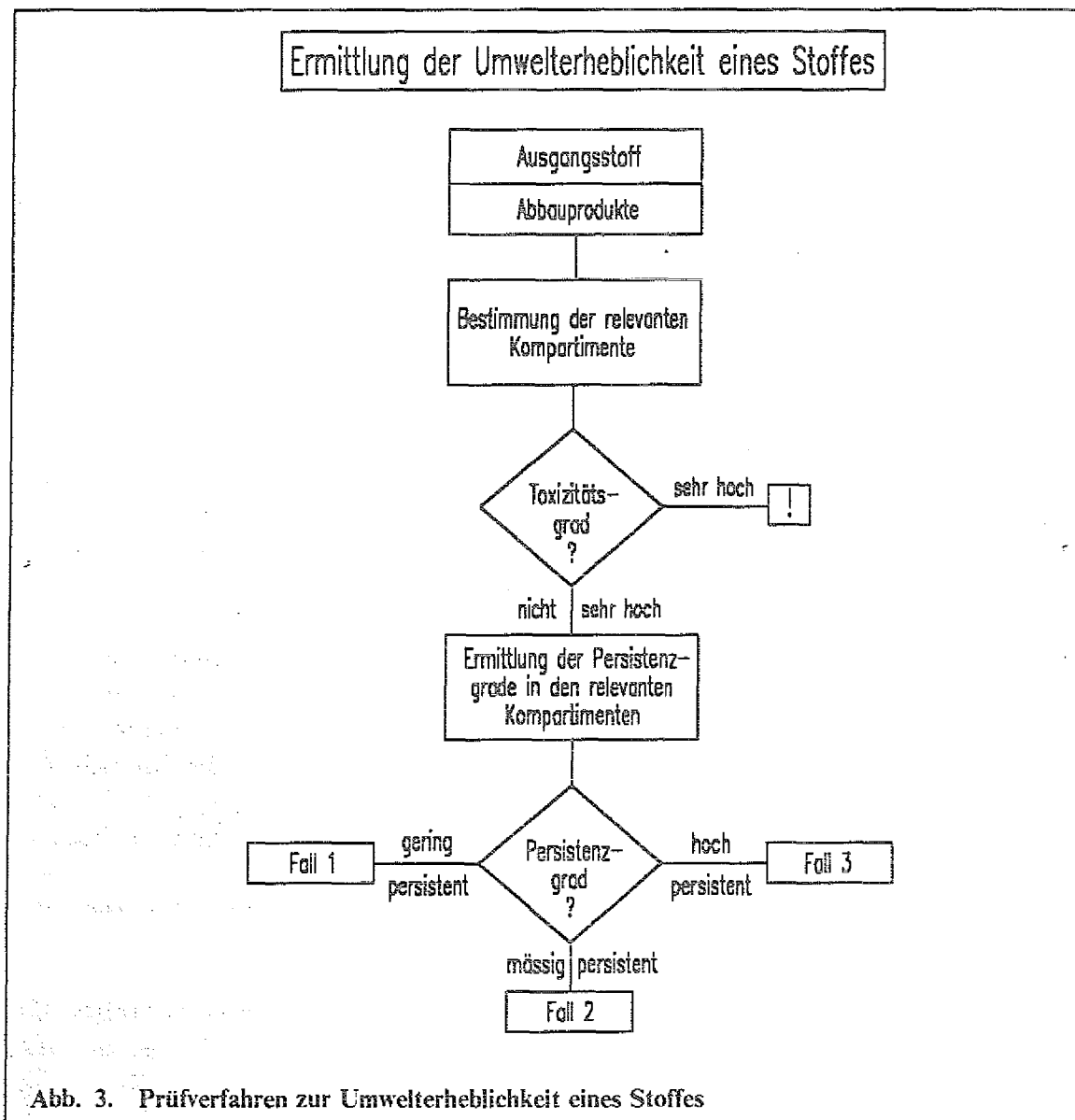
Besonderes Augenmerk ist dabei auf Stoffe zu richten, die grenzüberschreitend oder global verteilt werden können

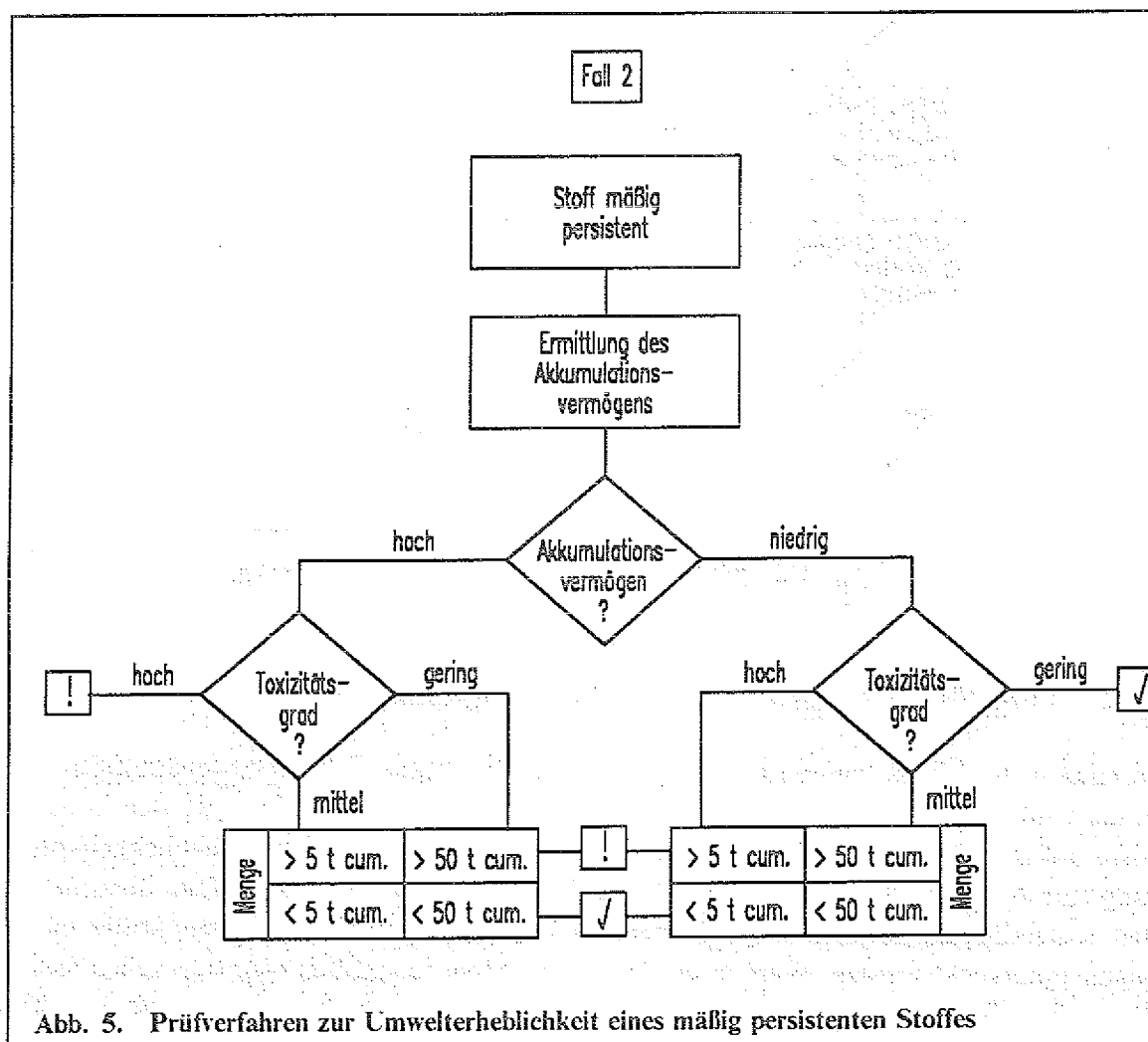
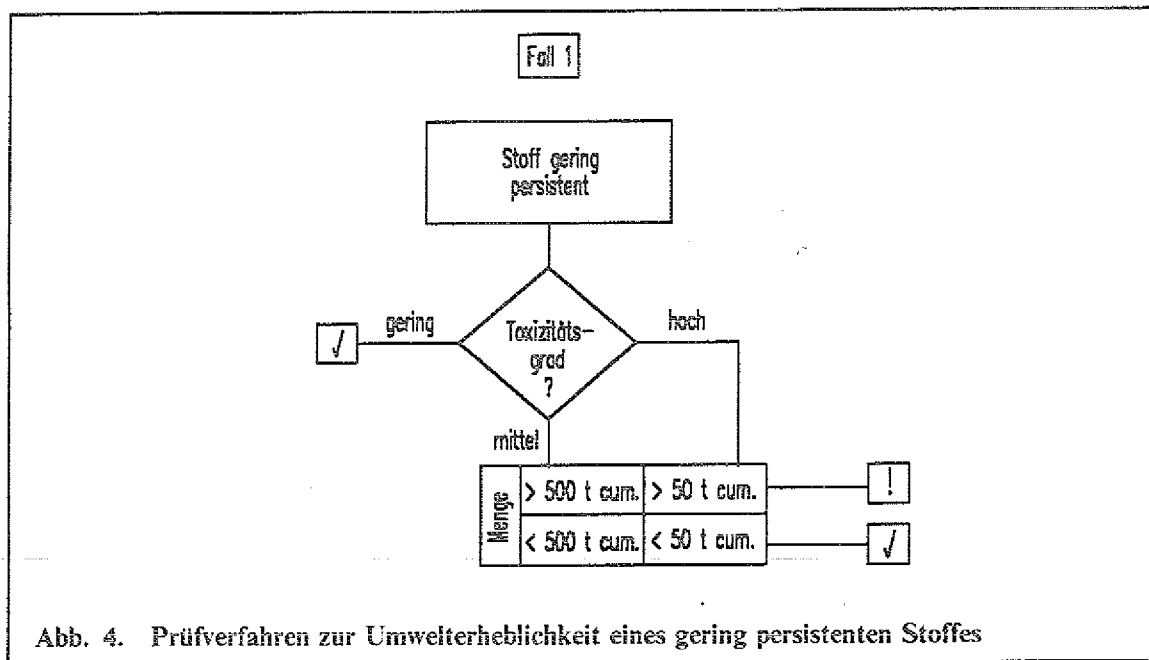
Damit in engem Zusammenhang steht das Akkumulationsvermögen eines Stoffes. Ein hoch persistenter Stoff wird akkumulieren, bei mäßig persistenten Stoffen ist eine Akkumulation nicht auszuschließen. Dadurch können Stoffe in der Umwelt Konzentrationen erreichen, die bis zu ihrem individuellen Schwellenwert reichen. Dabei können Umweltmedien betroffen sein, die den Stoff nicht akkumulieren, wie dies z.B. bei Freisetzung aus den Sedimenten der Fall ist. In biologischen Systemen ist es möglich, daß Stoffe im speichernden Glied der Nahrungskette indifferent sind, aber höhere Glieder der Nahrungskette schädigen.

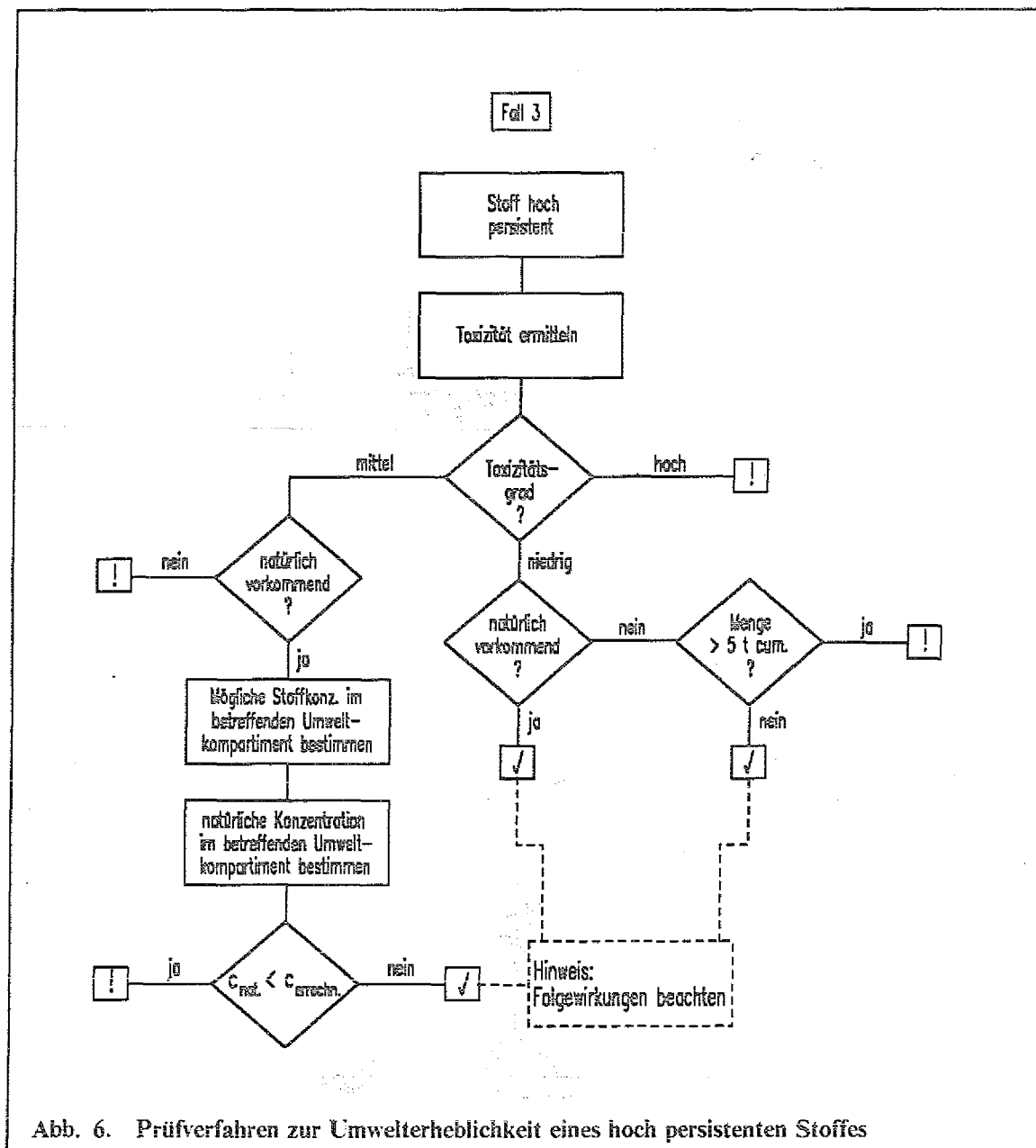
⁷ Beständigkeit gegenüber chemischem und biologischem Abbau

Die Toxizität und darauf basierende Grenzwerte spielen hier zunächst eine nachrangige Rolle. Wie das Beispiel der Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) zeigt, hätte als einzige Eigenschaft die gut bekannte Stabilität dieser Verbindungen und die Tatsache, daß diese Stoffe natürlicherweise in der Umwelt nicht vorkommen, aber keinesfalls deren Toxizitäten als Warnung dienen können.

Die Vorgehensweise und der Ablauf der Umwelterheblichkeitsprüfung sind in Abb. 3 bis Abb. 6 auf Seite 60 dargestellt. Eine detaillierte Beschreibung findet sich in Band 2 /Hirtz 92/.







3.6.2 Vorgehensweise zur Umwelterheblichkeitsprüfung

In einer ersten Phase werden aus Literaturdaten und ersten eigenen Abschätzungen die in die Umwelt gelangenden Stoffe **identifiziert**. Die identifizierten Stoffe werden in einer Liste dokumentiert. Danach erfolgt in der zweiten Phase der Umwelterheblichkeitsprüfung eine Abschätzung, welche dieser Stoffe **nicht umwelterheblich** sind. Dies dient dazu, den Untersuchungsrahmen einzugrenzen, da die nicht umwelterheblichen Stoffe nicht weiter untersucht werden. Werden im Prüfablauf Mengenangaben benötigt, sollen diese, sofern nicht exakt bestimmbar, Maximalabschätzungen darstellen. Bei nicht bekannter Menge wird die im Entscheidungsablauf anzuwendende größere Menge eingesetzt.

Gleichzeitig wird somit eine Anzahl von Stoffen als umwelterheblich eingestuft, obwohl diese im Verlaufe der weiteren Untersuchung entlastet werden können. Denn eine Vielzahl der Negativeinstufungen beruhen nur auf einer zu geringen Datenbasis. Damit erhält man eine zweite Liste, die die **potentiell umwelterheblichen** Stoffe enthält.

Danach erfolgt die Untersuchung der in dieser Liste enthaltenen Stoffe in der Durchführungsphase. Im Verlauf der Prozeßkettenanalyse werden die genauen Mengen der in die Umwelt gelangenden Stoffe durch detaillierte Stoffstromanalysen ermittelt. Dabei wird das gewählte Szenario zugrunde gelegt. Exakte Werte sind für die meisten Stoffe bekannt, mit denen dann eine erneute Umwelterheblichkeitsprüfung durchgeführt wird. Werden neue Stoffe identifiziert, werden diese ebenfalls dem allgemeinen Prüfungsablauf unterzogen. Somit wird die zweite Liste modifiziert und man erhält die der Beurteilung zugrunde zu legenden Stoffe und ihrer in die Umwelt gebrachten Mengen. Diese Liste enthält dann nur noch die umwelterheblichen Stoffe sowie jene, für die die Datengrundlage zu einer Beurteilung zu gering ist.

In der für diese Untersuchung erstellten Prozeßkettenanalyse wurden weit mehr Daten zusammengetragen, da die Untersuchung zeitgleich mit der Entwicklung der Umweltvorsorgeprüfung stattfand. Der Bearbeitungsaufwand für die Prozeßkettenanalyse wäre deutlich geringer gewesen. Die in /Hagedorn 92/ dargestellten Listen dokumentieren nicht den Endzustand nach Ablauf der Prüfung, sondern den Verlauf der parallelen Untersuchung. In Band 7 sind Listen, wie sie für diese Prüfung verwandt worden sind, zur Verdeutlichung des Prüfschemas aufgeführt.

Die getroffenen Einstufungen gelten jeweils nur für eine bestimmte Technik und das dazu gehörige Szenario. Ändern sich diese, kann es zu anderen Einstufungen kommen. So kann sich durch Veränderung der Schichtdicke und einer Reduktion der Einsatzmaterialien beispielsweise die Zahl der umwelterheblichen Stoffe vermindern. Zu Veränderungen von umwelterheblichen Stoffen kommt es insbesondere beim Austausch von Techniken, z.B. beim Übergang von Modulen mit einem Rahmen aus Stahl oder Aluminium zu rahmenlosen Modulen.

3.6.3 Ergebnisse zur Umwelterheblichkeitsprüfung

Die vorläufige Einschätzung der Stoffe in umwelterheblich (UE) und nicht umwelterheblich (NUE) nach ihrer Prüfung in der Orientierungsphase bzw. welche dieser Stoffe ohne Kenntnis der Mengen nicht einschätzbar sind, zeigen die nachfolgenden Tabellen.

Nicht aufgenommen in die Tabellen wurden Nebenprodukte sowie wiederverwertete Stoffe. Die Einschätzungen erfolgten jeweils ohne Mengenangaben.

Stoffname	UE	NUE	nicht eingestuft
Quarzsand		X	
Aschebestandteile			X
Methan		X	
Ethan		X	
Wasserstoff		X	
Sauerstoff		X	

Stoffname	UE	NUE	nicht eingestuft
Polyethylen		X	
Kohlendioxid (CO ₂)		X	
Kohlenmonoxid		X	
Schwefeldioxid (SO ₂)			X
Stickstoffoxide (NO _x)			X
Fluor	X		
Fluorwasserstoff (HF)	X		
Quarz - Feinstaub (SiO ₂)			X
Schwefelwasserstoff (H ₂ S)			X
Argon (Ar)		X	
Aceton (CH ₃ COCH ₃)			X
PTFE-IT			X
Calciumphosphat		X	
Freon			X
Pastenreste			X
Vakuum-Pumpenöl	X		
Quarztiegel		X	
Kaliumsiloxan			X
Kaliumhydroxid (KOH) in wässriger Lsg.			X
defekte PV - Module			X
Silizium - Reste			X
Essigsäure (CH ₃ COOH)			X
Kaliumsilikat (K ₂ SiO ₃)		X	
Ethylenglykol (C ₂ H ₆ O ₂)			X
Zitronensäure		X	
Kieselsäure (H ₂ SiO ₃)		X	
Metallchloride			X
Graphit			X
EVA-Folienreste			X
defekte Wafer			X
Ethanol			X
Trennfolie (HD-PE)			X
Profilgummireste			X
Rückseitenfolienreste			X
Natriumhydroxid			X
Calciumnitrat		X	
Ethylacetat			X
Natriumfluorid	X		
Natriumnitrat		X	
Calciumhydroxid			X
Calciumfluorid			X
Baumwolle		X	
AC-Waschmittel			X
Reinigungsmittel			X
Terpentinöl			X
Ethylenglycolmono-ethylether			X
Chlorwasserstoff (HCl)			X
Natriumacetat			X
SiO ₂ (Quarz)			X
Silizium			X

Stoffname	UE	NUE	nicht eingestuft
Stahl			X
Beton			X
Kupfer			X
Gummi			X
Isolierstoff (z.B. Papier)			X
Kunststoff			X
Elektronik			X
Polypropylen		X	
elektronische Geräte			X
Natriumchlorid		X	
Calciumchlorid		X	
Calciumsulfat		X	
Feststoffe im Wasser			X
Ammoniak			X
Kohlenwasserstoffe			X
Stickstoff		X	
Staub			X
Schadstoffe der Klasse 1, TA Luft			X
Schadstoffe der Klasse 2, TA Luft			X
Schadstoffe der Klasse 3, TA Luft			X
Rückstände aus der Al-Herstellung			X
Rotschlamm (v.a. Fe(OH) ₃)			X
Chlor			X
Blei			X
Säuren			X
Metallionen			X
Eisen			X
Cyanide			X
Öle Fette			X
Sulfide			X
Phenole			X
Aldehyde			X
Schlacke			X
Abraum			X
Rückstände aus der Stahlherstellung			X
Kesselasche			X
Flugasche			X
REA-Gips			X
Granulat			X
Grobasche			X

Tab. 27. UEP in der Orientierungsphase zur Herstellung monokristalliner Solarmodule (incl. Kraftwerks - Komponenten)

Stoffname	UE	NUE	nicht eingestuft
Aschebestandteile			X
Methan		X	

Stoffname	UE	NUE	nicht eingestuft
Ethan		X	
Wasserstoff		X	
Sauerstoff		X	
Polyethylen		X	
Kohlendioxid (CO ₂)		X	
Kohlenmonoxid		X	
Schwefeldioxid (SO ₂)			X
Stickstoffoxide (NO _x)			X
Fluor	X		
Fluorwasserstoff (HF)	X		
Quarz - Feinstaub (SiO ₂)			X
Schwefelwasserstoff (H ₂ S)			X
Argon (Ar)		X	
PTFE/IT			X
p-Toluidin			X
Cyanacrylsäuremethylester			X
SiO ₂ (Quarz)			X
Silizium			X
Methylenchlorid			X
Isopropyl-Alkohol			X
Dibutylphthalat			X
Terpentinöl			X
Kaliumchlorid		X	
Natriumhypochlorid		X	
Natriumdihydrogenphosphat			X
Silizium - Reste			X
Kaliumsilikat (K ₂ SiO ₃)		X	
Ethylenglykol (C ₂ H ₆ O ₂)			X
Kieselsäure (H ₂ SiO ₃)		X	
Metallchloride			X
Graphit			X
EVA-Folienreste			X
defekte Wafer			X
Trennfolie (HD-PE)			X
Natriumhydroxid			X
Natriumfluorid			X
Natriumnitrat		X	
Calciumhydroxid			X
Calciumfluorid			X
Baumwolle		X	
Waschmittel, Tenside, Ameisensäure			X
Chlorwasserstoff (HCl)			X
defekte PV - Module			X
Titanoxid (neue Verfahren)			X
Siliziumcarbid (SiC)			X
Mineral-/Siliconöl			X
Papier			X
PU/PVC PV			X
Polysulfidelastomer mit Methylenchloridresten			X

Stoffname	UE	NUE	nicht eingestuft
Ölbinder			X
Polyethylen			X
fluorierte Altöle	X		
Glas			X
Siliconkleber			X
Dichtmassenreste			X
Siliziummonoxid (SiO)		X	
Stahl			X
Beton			X
Kupfer			X
Gummi			X
Isolierstoff (z.B. Papier)			X
Kunststoff			X
Elektronik			X
Polypropylen		X	
elektronische Geräte			X
Natriumchlorid		X	
Calciumchlorid		X	
Calciumsulfat		X	
Feststoffe im Wasser			X
Ammoniak			X
Kohlenwasserstoffe			X
Stickstoff		X	
Staub			X
Schadstoffe der Klasse 1, TA Luft			X
Schadstoffe der Klasse 2, TA Luft			X
Schadstoffe der Klasse 3, TA Luft			X
Rückstände aus der Al-Herstellung			X
Rotschlamm			X
Chlor			X
Blei			X
Säuren			X
Metallionen			X
Eisen			X
Cyanide			X
Öle Fette			X
Sulfide			X
Phenole			X
Aldehyde			X
Schlacke			X
Abraum			X
Rückstände aus der Stahlherstellung			X
Kesselasche			X
Flugasche			X
REA-Gips			X
Granulat			X
Grobasche			X

Tab. 28. UEP in der Orientierungsphase zur Herstellung multikristalliner Solarmodule (incl. Kraftwerks - Komponenten)

Stoffname	UE	NUE	nicht eingestuft
Aceton			X
Isopropanol			X
Stickstoff		X	
Silan	X		
Diboran	X		
Phosphin	X		
Methan		X	
Lithiumwasserstoff			X
Salzsäure			X
Flußsäure	X		
Salpetersäure			X
Phosphorsäure			X
Fluorwasserstoff	X		
Kaliumhydroxid			X
Natriumhydroxid			X
Tetramethylzinn			X
EVA (Ethylenvinylacetat)			X
Polyvinylbutyral			X
Silikon			X
Kohlendioxid (CO ₂)		X	
Zinnoxid			X
Vernetzungsprodukte			X
Stickstoffoxide (NO _x)			X
Pumpenöl			X
P ₄ O ₁₀			X
Quarz - Feinstaub (SiO ₂)			X
P ₂ O ₅			X
Argon (Ar)	Argon (Ar)	X	
B ₂ O ₃			X
SiO ₂ (Quarz)			X
Terpentinöl			X
Waschmittel			X
defekte PV - Module			X
Trennfolie (HDPE)			X
Titanoxid			X
Schwefeldioxid			X
Stahl			X
Beton			X
Kupfer			X
Gummi			X
Isolierstoff (z.B. Papier)			X
Kunststoff			X
Elektronik			X
Polypropylen		X	
elektronische Geräte			X
Natriumchlorid		X	
Calciumchlorid		X	
Calciumsulfat		X	
Feststoffe im Wasser			X

Stoffname	UE	NUE	nicht eingestuft
Ammoniak			X
Kohlenwasserstoffe			X
Stickstoff		X	
Staub			X
Schadstoffe der Klasse 1, TA Luft			X
Schadstoffe der Klasse 2, TA Luft			X
Schadstoffe der Klasse 3, TA Luft			X
Rückstände aus der Al-Herstellung			X
Rotschlamm			X
Chlor			X
Blei			X
Säuren			X
Metallionen			X
Eisen			X
Cyanide			X
Öle/Fette			X
Sulfide			X
Phenole			X
Aldehyde			X
Schlacke			X
Abraum			X
Rückstände aus der Stahlherstellung			X
Kesselasche			X
Flugasche			X
REA-Gips			X
Granulat			X
Grobasche			X

Tab. 29. UEP in der Orientierungsphase zur Herstellung amorpher Solarmodule (incl. Kraftwerks - Komponenten)

Stoffname	UE	NUE	nicht eingestuft
Fluorwasserstoff	X		
Nickel			X
Stickstoff		X	
Chlorwasserstoff			
Wasser		X	
Natriumsiloxan			X
Natriumhydroxid			X
Natriumchlorid		X	
Aluminiumchlorid			X
Staub			X
Siliziumtetrafluorid			x
Metallchloride			X
Kohlendioxid		X	
Argon		X	
Phenol			X

Stoffname	UE	NUE	nicht eingestuft
Formaldehyd			X
Kalziumchlorid		X	
Aluminiumoxid			X
Aktivkohlefilter			X
Si-Reste			X
Dimethylphtalat			X
Acryl-Gießharzreste in Dimethylphtalat			X
Buthyl-Kautschuk			X
defekte Module			X
defekte Solarzellen			X
Quarz - Feinstaub (SiO ₂)			X
Wasserstoff		X	
Chlorwasserstoff			X
Methylenchlorid			X
Kohlendioxid		X	
Sauerstoff		X	
Cäsiumchlorid			X
Kaliumchlorid		X	
Aluminium			X
Schwefeldioxid			X
Stahl			X
Beton			X
Kupfer			X
Gummi			X
Isolierstoff (z.B. Papier)			X
Kunststoff			X
Elektronik			X
Polypropylen		X	
elektronische Geräte			X
Natriumchlorid		X	
Calciumchlorid		X	
Calciumsulfat		X	
Feststoffe im Wasser			X
Ammoniak			X
Kohlenwasserstoffe			X
Stickstoff			X
Staub			X
Schadstoffe der Klasse 1, TA Luft			X
Schadstoffe der Klasse 2, TA Luft			X
Schadstoffe der Klasse 3, TA Luft			X
Rückstände aus der Al-Herstellung			X
Rotschlamm			X
Chlor			X
Blei			X
Säuren			X
Metallionen			X
Eisen			X
Cyanide			X
Öle Fette			X
Sulfide			X
Phenole			X

Stoffname	UE	NUE	nicht eingestuft
Aldehyde			X
Schlacke			X
Abraum			X
Rückstände aus der Stahlherstellung			X
Kesselasche			X
Flugasche			X
REA-Gips			X
Granulat			X
Grobasche			X

Tab. 30. UEP in der Orientierungsphase zur Herstellung von MIS-I-Solarmodule (incl. Kraftwerks - Komponenten)

4.0 Durchführungsphase (Umweltvorsorgeuntersuchung)

4.1 Prozeßkettenanalysemodell (PROKAM)

Die Einträge der verschiedenen Stoffe in die Umwelt erfolgen direkt bei der Produktnutzung beim Endverbraucher, andererseits indirekt auch auf vorgelagerten Stufen, wie Bereitstellung der Rohstoffe, Umwandlung, Transport und auf nachgelagerten Stufen, wie Wiederverwendung und Entsorgung. Hierzu addiert sich, daß der Bau dieser Systeme über den Materialaufwand ebenfalls zu Emissionen führt. Als Hilfsmittel zur Erfassung der Umweltbeeinträchtigung auf allen diesen Stufen steht die Prozeßkettenanalyse zur Verfügung.

Die Vorgehensweise bei der Prozeßkettenanalyse wird schon durch den Namen charakterisiert. Ein komplexer Vorgang wird in eine Vielzahl kleiner, überschaubarer Einzelaktivitäten aufgegliedert, für die dann alle relevanten In- und Outputs erfaßt und energetisch bzw. ökologisch bewertet werden können. Am Ende einer solchen Kette steht dann das Endprodukt, in dem alle vorausgegangenen Aufwendungen bzw. Emissionen kumuliert sind.

Entsprechend den verschiedenen Stufen einer Prozeßkette

- Bereitstellung von Rohstoffen und Primärenergieträgern
- Veredelungs- und Umwandlungsprozesse
- Endnachfrage nach Produkten

werden in PROKAM entsprechende Knoten (Ressource-, Technik-, und Endnachfrageknoten) und als Hilfsknoten zum Sammeln und Verteilen von Stoff- und/oder Energieströmen ein Bilanzknoten zur Verfügung gestellt.

Ein besonderes Merkmal des hier beschriebenen Modells ist die dem Benutzer angebotene Möglichkeit des interaktiven Aufbaus der Prozeßkette oder des Prozeßkettennetzes. Die Hilfestellung besteht u.a. darin, daß über ein Menü nur die prinzipiell möglichen Knoten zur Auswahl angeboten werden. Während dieses Bearbeitungsschrittes wird dem Benutzer die Möglichkeit geboten, an definierten Stellen zu unterbrechen und zu einem späteren Zeitpunkt die Bearbeitung wieder aufzunehmen.

Hierzu wird das zu erstellende Prozeßkettennetz in Ebenen dargestellt und abgearbeitet. In der Ebene 0 befinden sich alle Endnachfrageknoten; in der Ebene 1 alle Knoten, die Stoff- und Energieströme in die Endnachfrageknoten liefern; in der Ebene $i+1$ alle Knoten, die in die Knoten der Ebene i liefern, usw. bis zur letzten Ebene n , in welcher sich die Ressourceknoten befinden. Nach jeder vollständigen Bearbeitung einer dieser Ebenen ist eine Unterbrechnung der Bearbeitung möglich, ohne daß Informationen verloren gehen.

Bei der Bilanzierung der Umweltbelastungen und des Primärenergieaufwandes (PEA) werden 3 Arten der Belastungen unterschieden und bilanziert:

- **Direkte Belastungen**
Unter direkten Belastungen versteht man alle ungenutzten Abprodukte, alle Emissionen und den Primärenergieaufwand (PEA), die beim Einsatz einer Technik entstehen.
- **Indirekte Belastungen**
Indirekte Belastungen sind alle ungenutzten Abprodukte, Emissionen und der PEA, die durch die Produktion der Materialien zum Bau einer Technik entstanden sind.
- **Gesamtbelastungen**
Unter Gesamtbelastungen versteht man die Vereinigungsmenge aller direkten und indirekten Belastungen.

Bei der Berechnung wird weiter unterschieden in:

- **Technikbezogene Belastung**
Die technikbezogenen Belastungen setzen sich aus allen Emissionen, ungenutzten Abprodukten und dem PEA zusammen, die durch den Einsatz einer Technik im Prozeßnetz entstehen. Es werden zu allen im Netz eingebundenen Techniken diese Belastungen berechnet. Die Mengen der Belastungen ergeben sich durch die aktuelle Menge des Hauptoutputs nach der Bilanzierung der Stoff- und Energieströme. Die Menge der Abprodukte richtet sich nach der ungenutzten Menge des Abproduktes im Netzwerk.
- **Kumulierte Belastungen für einzelne Knoten bzw. für das gesamte Prozeßnetz**
Für alle im Netz vorkommenden Knoten (Technik-, Bilanz- und Endnachfrageknoten) und damit auch für das gesamte Netz kann ermittelt werden, wie hoch und wie vielfältig die Umweltbelastungen genau bis zu diesem Knoten im Netzwerk sind.

Die Ausgabe der Eingangsdaten und der berechneten Werte erfolgt weitgehend automatisiert in Tabellenform sowie in graphischer Form.

Das entwickelte Konzept des Prozeßkettenanalysemodells wird ausführlich beschrieben im Band 3 dieser Reihe /vgl. Goebbel 92/.

4.2 Emissionsanalyse der Energiebereitstellung

Eine entscheidende Rolle bei der nachfolgenden Emissionsanalyse der Bau- und Werkstoffe kommt dem zugrunde gelegten Energiemix sowie der Ausgestaltung der einzelnen Energietechnik zu. Die detaillierte Beschreibung des unterstellten Brennstoffmixes und der damit zusammenhängenden Emissionen für die einzelnen Materialien erfolgt in den einzelnen Kapiteln im Band 4 dieser Reihe.

Der für die Solartankstelle verwendete Strommix, nachfolgend "Industriestrom" genannt, basiert auf den von der Enquete-Kommission genannten Zahlen /Enquete 90/. Primärenergieaufwand und die Gesamtemissionen sind der nachfolgenden Tabelle zu entnehmen.

Name	Emissionen Luft			Einheit
	Direkt	Indirekt	Summe	
STICKOXIDE	128.8	0	128.8	KG
SCHWFELOXIDE	137.6	0	137.6	KG
STAUB	15.03	0	15.03	KG
KOHLLENMONOXID	35.13	0	35.13	KG
KOHLLENDIOXID	$1.646 \cdot 10^5$	0	$1.646 \cdot 10^5$	KG
METHAN	410.2	0	410.2	KG
NMVOC	5.449	0	5.449	KG

Tab. 31. Luftbelastung fuer das gesamte Netz STROM bzgl. der Endnachfragen

Name	Abprodukte			Einheit
	Direkt	Indirekt	Summe	
GRANULAT	$1.59 \cdot 10^3$	0	$1.59 \cdot 10^3$	KG
GROBASCHE	224.1	0	224.1	KG
FLUGASCHE	$5.393 \cdot 10^3$	0	$5.393 \cdot 10^3$	KG
REA-GIPS	$1.907 \cdot 10^3$	0	$1.907 \cdot 10^3$	KG
KESSELASCHE	894.6	0	894.6	KG

Tab. 32. Abprodukte fuer das gesamte Netz STROM bzgl. der Endnachfragen

Name	PEA			Einheit
	Direkt	Indirekt	Summe	
PEA	3.0349	0	3.0349	TJ

Tab. 33. Primaerenergieaufwand fuer das gesamte Netz STROM bzgl. der Endnachfragen

4.3 Emissionsanalyse konventioneller Bau- und Werkstoffe

Die Analyse der verschiedenen Prozeßketten erfolgte insbesondere hinsichtlich des Primaerenergieaufwandes und der potentiellen Stoffeinträge in die Umwelt. Die Betrachtungen konnten aus Kapazitätsgründen nur für Glas, Beton, Aluminium, und Stahl ausgeführt werden.

Die Analysen basieren weitestgehend auf in der Literatur genannten Werten. Eine Validierung der dort genannten Daten war wegen des knappen zur Verfügung stehenden Zeitraums nur in Einzelfällen möglich.

Die Gesamtheit der Daten, welche im Prozeßkettenanalysemodell verwendet werden, sind im Band 4 dieser Reihe im Detail dargestellt.

4.3.1 Flachglas

Derzeit befinden sich vier verschiedene Verfahren zur Flachglasherstellung im Einsatz (Fourcault-, Pittsburgh-, Libbey-Owens-, Float-Verfahren).

Als leistungsfähigstes Verfahren zur Herstellung hochwertiger Gläser hat sich das Float-Verfahren seit Ende der sechziger Jahre durchgesetzt.

Der überwiegende Teil der Flachglasproduktion der Bundesrepublik Deutschland wird nach dem Floatverfahren hergestellt.

Bei der durchgeführten Prozeßkettenanalyse wird darum nur dieses Verfahren betrachtet. Die Beschreibung der Technologie zur Glasherstellung erfolgt nur soweit, wie sie zur Darstellung der Bilanzen notwendig ist. Die technologischen Abläufe, die Stoff- und Energiebilanzen der für die Herstellung von Flachglas benötigten Roh- und Hilfsstoffen werden nach gleichem Muster dargestellt.

Bei der Prozeßkettenanalyse der Floatglasherstellung wurden verschiedene Möglichkeiten der Bereitstellung der Endenergie betrachtet; mit dem in der Glasindustrie vorliegendem Verhältnis von mit Öl/Gas beheizten Schmelzwannen sowie von mit Öl/Gas und elektrischer Zusatzheizung beheizten Schmelzwannen.

Dargestellt wird die Herstellung von Floatglas in mit Öl/Gas-beheizten Glasschmelzwannen mit elektrischer Zusatzheizung. Der Aufwand an Primärenergie zur Floatglasherstellung gemäß der betrachteten Prozeßkette beträgt 16.2 GJ/t Floatglas (vgl. nachfolgende Tabellen).

Name	Emissionen Wasser			Einheit
	Direkt	Indirekt	Summe	
FESTSTOFF	0.0247	0	0.0247	T
MAGNESIUMHYDROXID	$1.9 \cdot 10^{-4}$	0	$1.9 \cdot 10^{-4}$	T
NATRIUMCHLORID	0.0874	0	0.0874	T
CALZIUMCARBONAT	0.0019	0	0.0019	T
CALZIUMCHLORID	0.237	0	0.237	T
ABWASSER	2.28	0	2.28	T

Name	Emissionen Luft			Einheit
	Direkt	Indirekt	Summe	
AMMONIAK	$5.32 \cdot 10^{-4}$	0	$5.32 \cdot 10^{-4}$	T
FLUORWASSERSTOFF	$4.5 \cdot 10^{-6}$	0	$4.5 \cdot 10^{-6}$	T
CHLORWASSERSTOFF	$2.7 \cdot 10^{-5}$	0	$2.7 \cdot 10^{-5}$	T
KOHLENWASSERSTOFFE	$6.959 \cdot 10^{-5}$	0	$6.959 \cdot 10^{-5}$	T
NMVOC	$2.298 \cdot 10^{-4}$	0	$2.298 \cdot 10^{-4}$	T
METHAN	0.00129	0	0.00129	T
KOHLENDIOXID	1.251	0	1.251	T
KOHLENMONOXID	$5.477 \cdot 10^{-4}$	0	$5.477 \cdot 10^{-4}$	T

Name	Emissionen Luft			Einheit
	Direkt	Indirekt	Summe	
STAUB	0.00379	0	0.00379	T
SCHWEFELDIOXID	0.00428	0	0.00428	T
STICKOXIDE	0.0228	0	0.0228	T

Name	Abprodukte			Einheit
	Direkt	Indirekt	Summe	
KESSELASCHE	0.0013	0	0.0013	T
FLUGASCHE	0.00785	0	0.00785	T
REA-GIPS	0.00277	0	0.00277	T
GRANULAT	0.00231	0	0.00231	T
GROBASCHE	$3.261 \cdot 10^{-4}$	0	$3.261 \cdot 10^{-4}$	T
SODASCHLAMM	0.00152	0	0.00152	T
SODASTEIN	0.0038	0	0.0038	T
KALZINIERUNGSRUECKSTAENDE	0.034	0	0.034	T
SAND	0.066	0	0.066	T
OFENMATERIAL FLACH-GLAS	0.0133	0	0.0133	T
NUTZBARE ABWAERME	100	0	100	MJ
STEINSALZABRAUM	$9.718 \cdot 10^{-4}$	0	$9.718 \cdot 10^{-4}$	T
STEINSALZRUECKSTAND	0.0376	0	0.0376	T

Name	PEA			Einheit
	Direkt	Indirekt	Summe	
PEA	$1.619 \cdot 10^4$	0	$1.619 \cdot 10^4$	MJ

Tab. 34. Emissionen, Abprodukte und Primaerenergieaufwand der Flachglasherstellung:
 Öl/Gas beheizt mit elektrischer Zusatzheizung
 incl. Vorleistungen pro Tonne Flachglas

4.3.2 Zement und Beton

Zement wird durch Mahlen des Portlandzementklinkers mit Zumahlstoffen unterschiedlichster Art und Anteile hergestellt. Man unterscheidet Portlandzement (75 % der Gesamtproduktion) sowie Hochofenzement, Eisenportlandzement und Traßzement (Σ 25 % der Gesamtproduktion).

Zur Herstellung des Portlandzementklinkers werden im wesentlichen zwei Verfahren, das Trocken- und das Naßverfahren, eingesetzt.

In der Bundesrepublik Deutschland werden über 95 % des Portlandzementklinkers im Trockenverfahren hergestellt, so daß bei der durchgeführten Prozeßkettenanalyse nur auf dieses Verfahren eingegangen wird.

Aufgrund der Vielfältigkeit der Zementanlagen spiegelt die Prozeßkettenanalyse nur allgemeine Größenordnungen bezüglich der Stoff- und Energieströme bzw. der Emissionen wieder.

Die Herstellung des Portlandzementklinkers als Ausgangsstoff der Zementproduktion wird betrachtet. Zur Herstellung von 1 Tonne Portlandzementklinker beträgt der Primärenergieaufwand ca. 7,6 GJ.

In der Arbeit werden Möglichkeiten zur Minimierung des Stoff- und Energieaufwandes sowie zur Verringerung der Emissionen beim Brand des Portlandzementklinkers dargestellt.

Fortführend werden die Zementmahlung, die Herstellung von Zement mit Zumahlstoffen sowie die Bereitstellung der Zumahlstoffe betrachtet.

Die stofflichen und energetischen Aufwendungen zur Herstellung des Baustoffes Beton werden ebenfalls ermittelt.

Für die Herstellung (Mahlung) von Portlandzement beträgt der Bedarf an Endenergie 0,1 GJ/t Portlandzement. Der Aufwand an Primärenergie zur Portlandzementherstellung gemäß der betrachteten Prozeßkette beträgt 7,93 GJ/t Portlandzement.

Für die Herstellung von Beton B15 mit Portlandzement beträgt der Bedarf an Endenergie 0,21 GJ/t Beton. Der Aufwand an Primärenergie zur Herstellung von Beton B15 mit Portlandzement gemäß der betrachteten Prozeßkette beträgt ca. 1,4 GJ/t Beton. Die Herstellung von Hochofenzement ist energetisch gesehen wesentlich günstiger. Der Primärenergieaufwand für Beton B15 beträgt in diesem Fall ca. 0,57 GJ/t Beton.

Die Beschreibung der betrachteten Prozeßkette, die Datenerfassung sowie die detaillierten Ergebnisse der Prozeßkettenanalysen für Zement mit Zumahlstoffen und Beton aus diesen Zementsorten sind im Band 4 dieses Berichtes enthalten. Bei den weiterführenden Prozeßkettenanalysen wird jeweils die Verwendung von Hochofenzement unterstellt.

Name	PEA			Einheit
	Direkt	Indirekt	Summe	
PEA	0.573	$1.443 \cdot 10^{-4}$	0.574	GJ

Name	Emissionen Wasser			Einheit
	Direkt	Indirekt	Summe	
GEKLÄRTES ABWASSER	2.091	0	2.091	t
FESTSTOFF	0.433	0	0.433	KG

Name	Emissionen Luft			Einheit
	Direkt	Indirekt	Summe	
KOHLENDIOXID	35.2	0.89	36.1	KG
STAUB	0.1	$4.329 \cdot 10^{-5}$	0.1	KG
SCHWEFELOXIDE	0.062	$6.637 \cdot 10^{-4}$	0.063	KG
STICKOXIDE	0.117	0.002	0.119	KG
KOHLENMONOXID	0.06	0	0.06	KG
Methan	0.025	0	0.025	KG
NMVOC	0.3	0	0.3	G
SCHADSTOFFE d. KLASSE 3, TA Luft (Sb, Pb, Cr, Fl, Cu u.a.).	1.4	0	1.4	G
SCHADSTOFFE d. KLASSE 2, TA Luft (As, Co, Ni, Se, Te)	0.28	0	0.28	G
SCHADSTOFFE d. KLASSE 1, TA Luft (Cd, Hg, Tl)	0.056	0	0.056	G

Name	Abprodukte			Einheit
	Direkt	Indirekt	Summe	
SAND	0.0747	0	0.0747	KG
Kesselasche	0.054	0	0.054	KG
Flugasche	0.324	0	0.324	KG
REA-Gips	0.114	0	0.114	KG
Granulat	0.095	0	0.095	KG
Grobasche	0.013	0	0.013	KG
ABWÄRME	0.0203	0	0.0203	GJ
ABGASVERLUSTE	0.0184	0	0.0184	GJ

Tab. 35. Emissionen, Abprodukte und PEA zur Herstellung von Beton B15 mit HOZ
(je Tonne)

4.3.3 Aluminium

Bei der Prozeßkettenanalyse der Aluminiumherstellung wurden im wesentlichen der Aufschluß des Bauxites nach dem BAYER-Verfahren, die Gewinnung des Primäraluminiums mittels Schmelzflußelektrolyse sowie die Herstellung von Sekundäraluminium betrachtet. Die technologische Abläufe bei der Aluminiumherstellung werden in Grundzügen beschrieben im Band 4 dieses Endberichtes.

Die Bilanzierung der Stoff- und Energieströme wurde im Wesentlichen in Auswertung der Arbeiten von /FECKER 89/ und /KRONE u.a. 90/ vorgenommen.

Bei der Bilanzierung des Primärenergieaufwandes und der Emissionen pro Tonne Aluminium wurde davon ausgegangen, daß in der Bundesrepublik 41.6 % des eingesetzten Aluminiums aus rezykliertem Material hergestellt wurde /Seebauer 89/.

Für die Herstellung von Primäraluminium beträgt der Primärenergieaufwand 216 GJ/t. Unter Berücksichtigung des rezyklierten Materials ergibt sich ein Primärenergieaufwand von 136 GJ/t.

Name	Emissionen Wasser			Einheit
	Direkt	Indirekt	Summe	
SAEUREN	0.0227	0	0.0227	KG
BLEI	$7.999 \cdot 10^{-4}$	0	$7.999 \cdot 10^{-4}$	KG
CSB	$6.666 \cdot 10^{-4}$	0	$6.666 \cdot 10^{-4}$	KG
BSB5	$2.666 \cdot 10^{-4}$	0	$2.666 \cdot 10^{-4}$	KG
ANORGANISCHE STOFFE	0.0933	0	0.0933	KG
FLUORIDE	$6.278 \cdot 10^{-4}$	0	$6.278 \cdot 10^{-4}$	KG
TEER	$8.789 \cdot 10^{-4}$	0	$8.789 \cdot 10^{-4}$	KG

Name	Emissionen Luft			Einheit
	Direkt	Indirekt	Summe	
FLUORIDE	0.0272	0	0.0272	KG
INERTER STAUB	0.794	0	0.794	KG
FLUOR-GAS	0.146	0	0.146	KG
FLUOR-STAUB	0.116	0	0.116	KG
CHLOR	$2.478 \cdot 10^{-4}$	0	$2.478 \cdot 10^{-4}$	KG
KOHLENWASSERSTOFFE	0.952	0	0.952	KG
TEER	0.0703	0	0.0703	KG
CHLORIDE	0.2	0	0.2	KG
CHLORWASSERSTOFF	0.345	0	0.345	KG
NMVOC	1.231	0	1.231	KG
METHAN	16.51	0	16.51	KG
SCHWEFELDIOXID	29.72	0	29.72	KG
STICKOXIDE	14.74	0	14.74	KG
KOHLENMONOXID	10.29	0	10.29	KG
KOHLENDIOXID	$9.92 \cdot 10^3$	0	$9.92 \cdot 10^3$	KG

Name	Emissionen Luft			Einheit
	Direkt	Indirekt	Summe	
STAUB	3.435	0	3.435	KG

Name	Abprodukte			Einheit
	Direkt	Indirekt	Summe	
SCHMELZRUECKSTAND	19.65	0	19.65	KG
AUFBEREITUNGSRUECK- STAENDE (SCHROTT)	10.48	0	10.48	KG
FILTERSTAUB	5.491	0	5.491	KG
INERTER FESTSTOFF	74.8	0	74.8	KG
KATHODENAUSBRUCH	20.44	0	20.44	KG
WASSERSTOFF	3.333	0	3.333	KG
STEINSALZRUECKSTAND	12.47	0	12.47	KG
STEINSALZABRAUM	0.321	0	0.321	KG
KESSELASCHE	30.84	0	30.84	KG
FLUGASCHE	185.9	0	185.9	KG
REA-GIPS	65.73	0	65.73	KG
GRANULAT	54.81	0	54.81	KG
GROBASCHE	7.724	0	7.724	KG
KALZINIERUNGSRUECKSTAENDE	9.289	0	9.289	KG
ROTSCHLAMM	$1.664 \cdot 10^3$	0	$1.664 \cdot 10^3$	KG
BAUXIT-ABFALL	0.337	0	0.337	KG
BAUXIT-ABRAUM	$2.531 \cdot 10^3$	0	$2.531 \cdot 10^3$	KG

Name	PEA			Einheit
	Direkt	Indirekt	Summe	
PEA	0.136	0	0.136	TJ

Tab. 36. Emissionen, Abprodukte und PEA der Aluminiumproduktion: (pro Tonne)

4.3.4 Stahlblech

Die Prozeßkettenanalyse der Stahlblechherstellung berücksichtigt im wesentlichen die Roherzbereitstellung, den Hochofenprozeß zur Roheisenherstellung, die Rohstahlherstellung mittels Sauerstoffaufblasverfahren, sowie die Herstellung von Stahlblech.

Die hierbei verwendeten Daten sind in erster Linie den Arbeiten von /Thalmann 85/, sowie /Wagner 89/ entnommen. Soweit in der Fachliteratur weiterführende Informationen zur Stahlblechherstellung vorlagen, wurden diese mit eingearbeitet. Die detaillierte Beschreibung erfolgt in Band 4 dieses Berichtes. Tab. 37 auf Seite 80 - Tab. 37 auf Seite 80 enthalten die Ergebnisse der durchgeführten Prozeßkettenanalyse zu den Gesamtemissionen und zum Primärenergieaufwand der Stahlblechherstellung.

Name	Emissionen Luft			Einheit
	Direkt	Indirekt	Summe	
STICKOXIDE	5.827	0	5.827	KG
SCHWEFELDIOXID	2.753	0	2.753	KG
STAUB	3.986	0	3.986	KG
KOHLENMONOXID	30.88	0	30.88	KG
KOHLENDIOXID	2.313 · 10 ⁵	0	2.313 · 10 ⁵	KG
METHAN	1.882	0	1.882	KG
NMVOC	0.575	0	0.575	KG
KOHLENWASSERSTOFFE	0.332	0	0.332	KG

Name	Abprodukte			Einheit
	Direkt	Indirekt	Summe	
KESSELASCHE	2.305	0	2.305	KG
FLUGASCHE	13.9	0	13.9	KG
REA-GIPS	4.914	0	4.914	KG
GRANULAT	4.0978	0	4.0978	KG
GROBASCHE	0.577	0	0.577	KG
ABRAUM AUS EISENERZGEWINNUNG	15	0	15	KG
ABFAELLE AUS EISENERZ-AUFBEREITUNG	0.58	0	0.58	KG
HOCHOFENSCHLACKE	134.9	0	134.9	KG
ELEKTROFILTERSTAUB	239.7	0	239.7	KG
KONVERTERSCHLACKE	164.9	0	164.9	KG
RESTSTOFFE WALZWERK	123	0	123	KG
KALZINIERUNGSRUECKSTAENDE	9.633	0	9.633	KG
BAUXIT-ABRAUM	9.94	0	9.94	KG
BAUXIT-ABFALL	0.00132	0	0.00132	KG

Name	PEA			Einheit
	Direkt	Indirekt	Summe	
PEA	0.0295	0	0.0295	TJ

Tab. 37. Emissionen, Abprodukte und PEA zur Produktion von STAHLBLECH:
(pro Tonne)

4.4 Festlegung des Untersuchungsrahmens

Bisher vorliegende Untersuchungen /Hagedorn 89, Tietze 89/ zur Photovoltaik ergeben noch keine hinreichende Basis für eine abschließende Vorsorgeprüfung im hier beschriebenen Sinne.

Da im wesentlichen bisher nur Si- Zellen in den Markt eingeführt worden sind und nur für diese eine quasikommerzielle Produktion existiert, kann derzeit (1992) eine detaillierte Analyse nur für Si-Zellen durchgeführt werden und zwar an den Fällen

- konventioneller Herstellung von mono- und multikristalliner sowie amorpher Zellen und
- mono- und multikristalliner MIS-I-Zellen (Metal- Insulator-Semiconductor-Inversionsschicht-Solarzellen).

In Weiterführung der von der Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE) vorgenommenen Untersuchung sollen insbesondere die auf Silizium basierenden Solarzellen detaillierter betrachtet werden (vgl. Band 5 dieser Reihe).

Die Betrachtung der Verbindungshalbleiter wird mittels Auswertung der verfügbaren (vorwiegend amerikanischen) Literatur vorgenommen. Bei den Verbindungshalbleitern wurden bisher vorwiegend zum einen nur die Aspekte des Arbeitsschutzes angesprochen und zum anderen die Gefährdung von Personen bei Unfällen im Gebrauch von Solarzellen, insbesondere bei Bränden. Der größte Informationswert der amerikanischen Literatur liegt in der quantitativen Darstellung der potentiellen Gesundheitsgefährdung durch die in den Verbindungshalbleitern enthaltenen Schwermetallverbindungen.

Wie eingangs des Kapitels "Orientierungsphase" erläutert, eignen sich neben den verschiedenen Kristallisierungsformen des Siliziums auch die sog. Verbindungshalbleiter (VHL) für die Herstellung von PV-Zellen. VHL werden sie genannt, weil sie chemische Verbindungen von Elementen entweder der 2. und 6., der 3. und 5. oder der 1., 3. und 6. Hauptgruppe des Periodensystems ("II-VI", "III-V" oder "I-III -VI") sind.

Sie zeichnen sich insbesondere durch hohe Lichtabsorption aus /Bonnet 89/ und deshalb können aus ihnen - polykristalline - Dünnschichtzellen gemacht werden, in denen innerhalb weniger μm (10^{-6} m) das ganze auftreffende Licht absorbiert wird.

Herausragende Vertreter der III-V-Verbindungen sind GaAs und InP, bei den II-VI-Verbindungen sind es vor allem die PV- Materialien auf Cd-Basis, wie CdTe, CdS, CdSe und als I-III-VI-Verbindung die vielgenannte CIS-Zelle (CuInSe_2) mit CdS oder CdZnS in Heteroverbindung /Moskowitz 85/. Derzeitig erreichte Wirkungsgrade enthält Tab. 6 auf Seite 34

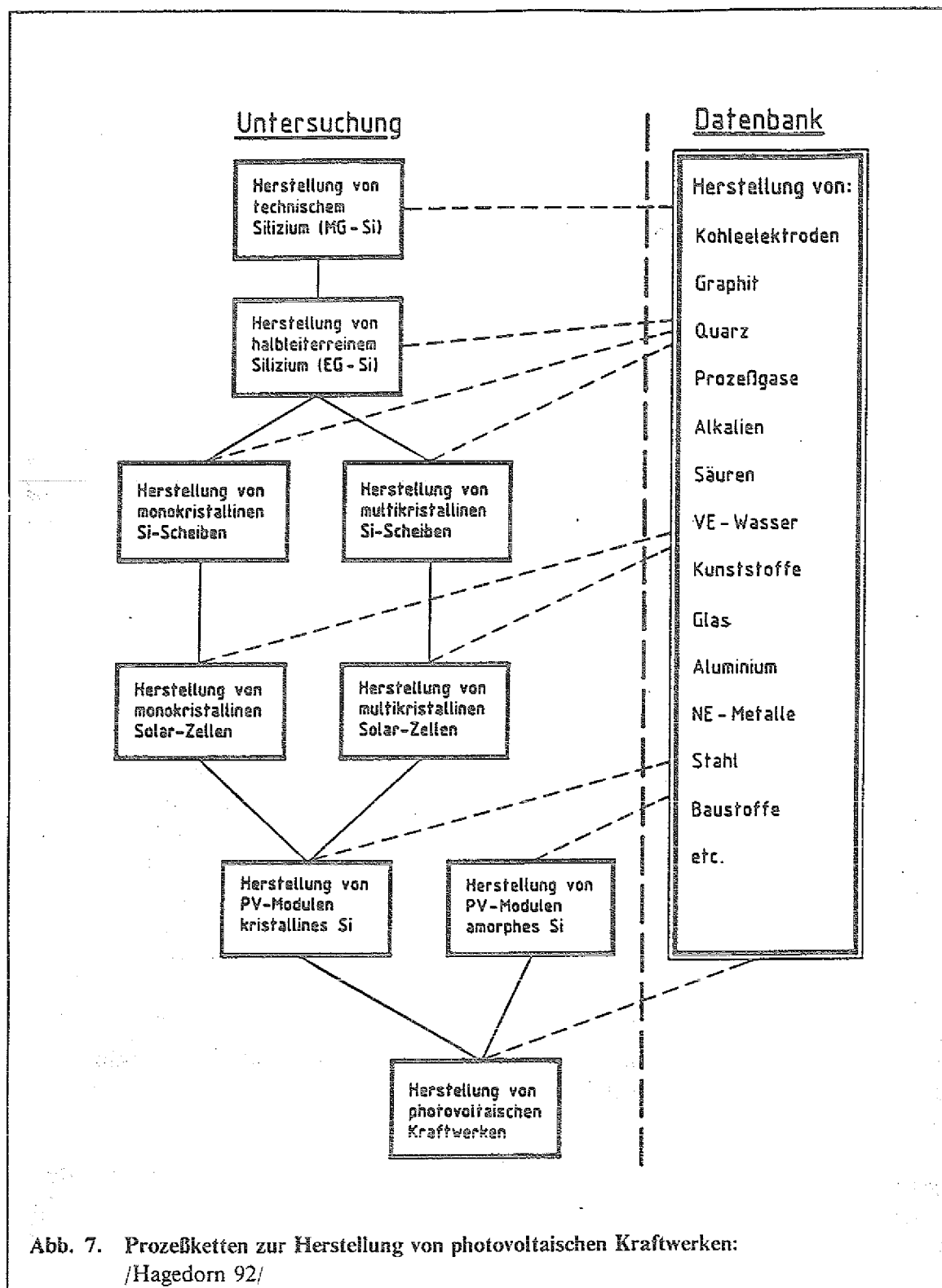
Da es hier um die beispielhafte Demonstration der UP geht, wurde dazu mit der II-VI-Verbindung CdTe ein VHL gewählt, der wegen seiner guten PV-Eigenschaften und relativen Kostengünstigkeit (rationelle Herstellbarkeit) Aussicht auf großtechnische Anwendung hat /Bonnet 89/, /Moskowitz 90a,b/.

Intensive Entwicklungsbemühungen haben offenbar in jüngster Zeit große Fortschritte in Richtung kommerziell nutzbarer Produktionsverfahren auf der Basis der sogenannten Close- Spaced-Sublimation, einem Abscheideverfahren für dünne Schichten gebracht /Bonnet 92a/, für das jetzt industrielle Partner gesucht werden.

Die III-V-Verbindung GaAs hat noch bessere Wirkungsgrade /Bonnet 89/, aber gegen einen großflächigen Einsatz sprechen die hohen Gesteungskosten /Rupprecht 89, Alsema 90/. Im Unterschied zu a-Si zeigen die VHL, weil polykristallin, keinen Degradationseffekt.

Für die Betrachtung und vergleichende Analyse der in Frage kommenden konventionellen Alternativen wird in Weiterführung früherer und laufender STE-Arbeiten /z.B. Wagner 78, Huber 82, Wagner 89a,b, Giesen 89/ und im Rückgriff auf Literaturwerte zu Schadstoffemissionen /z.B. Marme 80, Fritsche 89a,b,c, Jensch 88, Geiger 89, Hantzsch 91a,b/ die Prozeßkette zur Stromerzeugung bei derzeitigem Kraftwerksmix und derzeitigem Stand der Technik dargestellt.

Die Untersuchung der umweltrelevanten Masseneinträge bei der Herstellung verschiedener Solarzellentypen setzt bei der Analyse heute kommerziell in der Bundesrepublik hergestellter PV-Module an. Als Basismaterial wird ausschließlich Silicium verwendet, das entweder als mono- und multikristalline Struktur oder als amorphe Schicht zum Einsatz kommt. Eine Übersicht und Abgrenzung der Hauptbilanzräume der Prozeßketten ist in Abb. 7 auf Seite 83 dargestellt.



Detaillierte Emissionswerte konnten zu den (zumindest als Pilotverfahren) implementierten Produktionen von konventionellen Zellen und von den sogenannten MIS-I- (Metal-Insulator-Semiconductor-Inversion Layer) Solarzellen mit Großmodulen in Gießharztechnologie (jeweils für Mono- und Multizellen) erhoben werden. Damit wer-

den also 5 Modultypen - alle nur auf Si-Basis - zur Analyse herangezogen /Hagedorn 92/.

Die Auswahl von Szenarien für den Alternativenvergleich (Kap. 5) fiel von den vielen denkbaren Möglichkeiten (Kap. 3.4.2) auf solar teilversorgte Elektro-PKW's (für die tägliche Berufsfahrten im Personennahverkehr). Bei den E-PKW's werden keine Vorleistungen in Ansatz gebracht (also für Fahrzeugbau, Batterieausstattung), sondern nur 2 Größenklassen alternativ betrachtet, ausgedrückt in elektrischem Nachladebedarf aus der Steckdose für 100 Personen-km (Pkm): 15 und 35 kWh/100 Pkm. Für die PV-Panel-überdachten Firmenparkplätze werden alternativ 2 Arten von Aufständigung angenommen, eine massivere nach Art von PV-Kraftwerken im Gelände und eine leichtere nach Art einer Seilnetzverspannung der Module. Damit liegen hier alternativ $5 \times 2 = 10$ PV-Varianten vor, die aber nach Art einer Benchmark-Analyse (minimale und maximale Optionen) auf 4 Varianten eingegrenzt werden (vgl. Kap. 5).

Für die Restbedarfsversorgung der E-PKW's aus dem öffentlichen Stromnetz werden nur die Aufwendungen bzw. Emissionen des Brennstoffeinsatzes berücksichtigt (Brennstoffeinsatz im Kraftwerk und Brennstoffbereitstellung). Begründung ist, daß der Brennstoffdurchsatz und seine begleitenden Emissionen die Emissionen der Bauaufwendungen um etwa 2 Größenordnungen überwiegt /Wagner 78/. Da bei der PV andererseits nur die Vorleistungsemissionen einen Beitrag liefern, werden diese Emissionen vollständig inklusive des Emissionsbeitrags der Herstellung der Aufständigungsmaterialien berücksichtigt.

Diese teil-solare Welt wird den Emissionen gegenübergestellt, die konventionelle PKW's bei der Abwicklung des Personennahverkehrs verursachen. Die Datenbasis der nicht-solaren Komponenten (Kraftwerke, Autos) bezieht sich weitgehend auf die Daten aus dem Bd. 7 "Konzeptionelle Fortentwicklung des Verkehrsbereichs" des Berichts der Enquete-Kommission "Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre" des Deutschen Bundestags und deren Szenarioannahmen zu den konventionellen Verkehrstechniken des Jahres 2005 für Westdeutschland (alte Bundesländer). Es wurden beide Szenarien "Trend" und "Reduktion" betrachtet.

Als abrundende Vergleichsbasis für den E-PKW wird zusätzlich ein auf niedrigen Verbrauch hingetrimmter konventioneller PKW, der Öko-Polo von VW herangezogen /Scheurer 92/. Hintergrund ist dabei die Überlegung, daß ein Vergleich von Zukunftsoptionen auch PKW's gleicher motorischer Leistung einschließen sollte.

Das analysierte Verkehrsaufkommen bezieht sich auf das Jahr 1987 mit der Annahme, daß dieser Wert auch für 2005 repräsentativ ist. (Das heutige Aufkommen in den alten Bundesländern ist deutlich höher!) Auf einen wichtigen Aspekt sei hier noch hingewiesen:

Während bei den PKW's und Kraftwerken nur die Emissionen in die Atmosphäre (aufgrund der Datenverfügbarkeit) vorliegen, werden bei den PV-Panels inklusive ihrer Aufständigung die volle Palette der Emissionen (in Luft, Boden und Wasser) berücksichtigt (soweit eben Meßdaten bekannt sind /Hagedorn 92, Hantzschke 91a,b/). Diese vollständigen Emissionen bilden dann auch die Basis der ökotoxikologischen Beurteilung (Kap. 6).

4.5 Kristalline Silizium-Solarzellen

4.5.1 Technologie, Stand, Entwicklungsaussichten

Die nachfolgende Darstellung ist einigen Beiträgen aus dem Bericht /Forschungsverbund 92/ entnommen, weil diese die aktuellste Beschreibung des PV-Status zur Zeit der Berichtserstellung - Sommer 1992 - enthielten. Weitere Informationsquellen sind an den jeweiligen Textstellen angegeben.

Die photovoltaische Umwandlung der Sonnenenergie für terrestrische Leistungsanwendungen erfolgt in Modulen verschiedener Größe, die heute fast ausschließlich mit Silizium-Solarzellen bestückt sind. Derzeit (1992) stammen etwa 50 % der Silizium-Scheiben von Einkristallen, die nach der Czochralski-Methode hergestellt werden, der Rest von multikristallinen, gerichtet erstarrten Blöcken. Scheiben aus Float-Zone-Einkristallen spielen nur für Anwendungen in der Raumfahrt eine Rolle. Scheiben, die direkt in Form von Bändern oder Platten aus der Schmelze hergestellt werden, werden bisher nur wenig in kommerziellen Solar-Modulen eingesetzt. Sie haben aber wohl sehr gute Chancen für eine Massenproduktion kostengünstiger Solarzellen.

Bei einer Weltjahresproduktion (1992) von etwa 58 MW_p bilden amorphe Module einen Anteil von fast 26 %, die bevorzugt im Bereich der sogenannten Konsumerelektronik, z.B. für Taschenrechner oder Batterieladegeräte eingesetzt werden. Durch größere Pilotprojekte von amerikanischen EVU's (z.B. eine 480 kW-Anlage in Davis, Kalifornien) ist der 92er Anteil des "Nichtconsumerbereiches" auf gut 40 % des a-Si-Verkaufes gestiegen /PV News 93/.

Während kristalline Siliziummodule Wirkungsgrade bis zu 15 % aufweisen, kommen derzeit amorphe Module auf (stabile) Wirkungsgrade von nur 5 %. Die Stromerzeugung durch Solarzellen ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch recht teuer. Dies ist bedingt durch die sehr hohen Herstellungskosten photovoltaischer Systeme. Die Zusammensetzung der Kosten für ein typisches netzgekoppeltes System auf einem Wohnhaus kann wie folgt angesetzt werden:

- System
 - 60 % Module
 - 20 % leistungsabhängige Kosten (z.B. Wechselrichter)
 - 20 % flächenabhängige Kosten (z.B. Trägerstruktur)
- Modul
 - 35 % Siliziumscheibe
 - 30 % Solarzellentechnologie
 - 35 % Rahmen, Glas etc.
- Silizium-Scheibe
 - 30 % Material
 - 30 % Sägen
 - 5 % Reinigen
 - 35 % Herstellung Kristallstäbe, Kristallblöcke

Die prozentualen Anteile können je nach verwendeter Technik etwas schwanken. In den Systemkosten steckt ein leistungsabhängiger Anteil von ca. 20 %, der auf Wechselrichter

und elektrische Verschaltung entfällt. Alle weiteren Kostenanteile sind im Grunde flächenabhängig.

Dies gilt einmal für die Konstruktionselemente wie Aufständigung für Module, aber auch für Glas- und Rahmenbauteile der Module und schließlich für die Silizium-Scheiben für die Solarzellen. Bei vorgegebener Leistung eines Systems führen höhere Solarzellenwirkungsgrade zu geringerem Flächenbedarf und somit zur Erniedrigung der flächenabhängigen Kosten. Dieser Einspareffekt kann durch aufwendigere Solarzellentechnologien aber teilweise kompensiert werden.

Der Anteil der Silizium-Scheiben an den Systemkosten ist mit ca. 20 % sehr hoch. In diesem Anteil liegt andererseits das größte Potential für eine Kostenreduktion.

Heute entfällt ca. 1/3 der Kosten der Silizium-Scheibe auf das Silizium-Ausgangsmaterial. Dieser Anteil wird in Zukunft stark an Bedeutung gewinnen, wenn für die Erzeugung von solartauglichen Scheiben das "Abfallsilizium" der Elektronik-Industrie nicht mehr ausreicht. Alternative Verfahren zur Herstellung hochreinen Siliziums sind entwickelt worden, haben aber bisher nicht Eingang in die Fertigung gefunden, da kein Bedarf vorhanden war.

Weitere wichtige Kostenanteile sind der Kristallisationsprozeß und das Sägen des Materials zu Scheiben. Die Kristallisation von Silizium sowohl nach der Czochralski-Methode als auch nach dem Blockkristallisations-Verfahren ist technisch aufwendig. Gleiches gilt für den Sägeschnitt, bei dem außerdem auch mit modernen Fädensägen 50 % des teuren Silizium-Materials verlorengehen. Gesägte Scheiben müssen stets durch chemischen Materialabtrag zur Entfernung der metallischen Verunreinigungen und der zerstörten Oberflächenschicht gereinigt werden.

Bei diesen konventionellen Herstellungsprozessen liegt weiteres Kostenreduktionspotential noch in der Sägetechnik und in einer besseren Ausnutzung der Kristallstäbe bzw. der Blöcke durch dünnere Scheiben und dünnere Sägeschnitte.

Im kristallinen Bereich lassen sich neue Wege bei der Zellherstellung in zwei Hauptrichtungen aufteilen: Hohe bis nahezu theoretische Wirkungsgrade mit entsprechend aufwendiger Verfahrenstechnik oder möglichst einfache Verfahrenstechnik mit guten Wirkungsgraden /Hoffmann 91/.

Auf die ersterwähnten sogenannten Hochleistungs-Solarzellen, z.B. Local Back Surface Field-LBSF-Zelle von FhG-ISE oder Prof. Green von der University New South Wales, Australien die Passivated Emitter and Rear Local-PERL-Zelle und Laser Grooved Buried Grid-LGBG-Zelle) wird weiter unten kurz eingegangen.

Zur zweiten Strategie gehört die MIS-I-(Metal-Insulator- Semiconductor-Inversion layer Zelle):

Die Herstellungsschritte der von Prof. Hezel (Uni Erlangen) erfundenen MIS-Inversionsschicht-Solarzelle, die von NUKEM über eine Pilotfertigung von 1 MW/a angeboten wird, sind nachfolgend aufgelistet. Zum Vergleich sind in gleicher Schematisierung die Verfahrenssequenzen für die klassische etablierte Technik und für die LGBG-Technik von Green für Wirkungsgrade von 17 % (gefertigt von BP Solar und Deutsche Aerospace AG (DASA)) aufgelistet. Deutlich ist die vermehrte Anzahl von

Verfahrensschritten im Vergleich zur klassischen Technik und zur MIS-I-Zelle zu sehen:

Buried-Contactzellen (Green)	Klassische pn-Si-Zellen	MIS-I-Solarzellen
Scheiben 250 μm p-Si (0,5...1,5 Ohm cm)	Scheiben: 350 $\mu\text{p-Si}$ (0,5...1,5 Ohm cm)	Scheiben: 100-200 $\mu\text{p-Si}$ (0,5... 1,5 Ohm cm)
1. Textur und Reinigung	1. Textur und Reinigung	1. Textur und Reinigung
2. Dotierstoffaufbringung	2. Dotierstoffaufbringung (z.B. spin-on)	2. Al-Aufdampfung Rückkontakt
3. Eindiffusion für n+ -Schicht	3. Eindiffusion für n+ -Schicht (800 °C)	3. Rückkontakttempern (500 °C) und Tunneloxid
4. Kantenätzung	4. Kantenätzung	4. Al-Aufdampfung Frontkontakt (Maske)
5. Frontseitige Antireflexschicht	5. Frontseitige Antireflexschicht	5. CsCl-Belegung Frontseite
6. Al-Aufdampfung Rückkontakt	6. Siebdruck Rückseite (Al)	6. Frontseitige Antireflexschicht und
7. Laser-Gräben	7. Trocknung	7. Inversionsschicht
8. Grabenätzung (naßchemisch)	8. Siebdruck Frontseite (Ag)	8. Bonden für Stringfertigung
9. n+ + -Dotierung im Grabengebiet	9. Siebdruck Rückseite (Ag)	
10. Metallisierung 1	10. Einbrennen der Siebdruckpaste (600 °C)	
11. Trocknung	11. Bonden für Stringfertigung	
12. Metallisierung 2		
13. Trocknung		
14. Metallisierung 3		
15. Trocknung		
16. Bonden für Stringfertigung		

Tab. 38. Herstellungsschritte bei verschiedenen Solarzellen

Nach Textur und Reinigung der Si-Scheiben wird Aluminium als Rückkontakt aufgedampft. Ein kurzzeitiger Tempersschritt (ca. 10 min. bei 500 °C) formt einerseits auf der Rückseite einen Ohmschen Kontakt und gleichzeitig auf der Vorderseite ein dünnes Tunneloxid (ca. 1,5 nm). Hierauf wird durch eine Maske wieder Aluminium als Frontgrid aufgedampft. In einem naßchemischen Tauchschrift wird CsCl auf die Oberfläche gebracht. Mit einer Plasma CVD-Abscheidung⁸ wird mit Siliciumnitrid die frontseitige Antireflexschicht hergestellt. Mit nur 6 Herstellschritten ist der neue Solarzellentyp bereits fertiggestellt. Die bisher realisierten Wirkungsgrade liegen bei 13 % für multikristalline und 15 % für monokristalline 10x10 cm² große Siliciumscheiben. Da bei der Fertigung im Gegensatz zur pn- Fertigung keine Hochtemperaturschritte durchgeführt wurden, können insbesondere dünne Si-Scheiben (100-200 μm) prozessiert werden. In Verbindung mit einem Rückkontaktgitter lassen sich Bifacial-Solarzellen herstellen. Je nach Anwendungsfall kann die Rückseitenstrahlung - auch Albedo genannt - ausgenutzt werden, was in einer möglichen Wirkungsgraderhöhung um relativ 20 bis 80 % resultiert.

⁸ Chemical Vapor Deposition

Die Verringerung der Anzahl von Verfahrensschritten im Vergleich zu bisher behandelten Verfahren ist deutlich. Der Terminus "Herstellungsschritt" ist dabei so definiert, daß die Si-Scheiben pro Herstellungsschritt hantiert werden, wobei es jedesmal ein gewisses Bruchrisiko gibt. Diese Betrachtungsweise wird dann immer wichtiger, wenn bei zukünftigen großen Fertigungsanlagen das gesamte Verfahren mehr und mehr automatisiert werden soll. Dann wird nämlich die Gesamtanzahl der Herstellungsschritte bis zur Fertigstellung immer wichtiger, da sich die Gesamtausbeute aus dem Produkt der Einzelausbeuten ergibt.

Die Wirkungsweise des neuen Solarzellentyps läßt sich wie folgt beschreiben. Das zur Trennung der Elektron-Loch-Paare benötigte elektrische Feld wird durch ortsfeste, positive Flächenladung an der Tunneloxid-Nitrid-Grenzschicht induziert. Der CsCl-Tauchschritt erhöht dabei die durch die abschließende Antireflexbeschichtung mit Siliciumnitrid entstehende positive Flächenladung. Im Silicium wird in einer dünnen Grenzschicht (einige 10 nm) eine vergleichbare Ladung aus beweglichen Elektronen und einer Verarmungszone daran anschließend induziert. Dabei wird das p-leitende Basismaterial in dieser Grenzschicht elektronen- oder n-leitend, das bedeutet, daß der Leitungstyp invertiert wird - daher der Name Inversionsschicht. Die separierten Löcher diffundieren zur Rückseitenelektrode, während die Elektronen innerhalb der gut leitenden Inversionsschicht zu den Stegen des Frontkontaktes wandern, durch die Si-Oxidschicht tunneln und in den äußeren Stromkreis gelangen. Das Frontgitter dient nicht nur als Stromableiter, sondern bildet in Verbindung mit dem erwähnten Tunneloxid zusätzlich den MIS-Kontakt (Metall- Isolator-Semiconductor), der die Leerlaufspannung der Solarzelle wesentlich mitbestimmt.

Mit einer neuen Gießharztechnik ist es NUKEM gelungen, Großmodule mit Abmessung bis ca. $1,0 \times 2,5 \text{ m}^2$ herzustellen. Damit lassen sich einerseits die spezifischen Modulkosten wie auch die Montage- und Verkabelungskosten auf der Baustelle reduzieren. Andererseits eignen sich die rahmenlosen Module besonders für die gestalterische Integration in Dachflächen, Wintergärten, Fassaden und für jegliche Art von Glasarchitektur.

Die Herstellungskosten für herkömmliche pn-Silicium- Solarzellen sind für drei unterschiedliche Fertigungsanlagen (1; 5 und 20 MW) in Tab. 39 dargestellt.

Jahresproduktion	1 MW _p ¹⁾		5 MW _p ²⁾	20 MW _p ³⁾	
Zelltyp	pn	MIS-I	pn	pn	MIS-I
Halbleiter Si	4,00	3,50	2,30	2,00	1,60
Zellherstellung	5,00	3,40	3,00	2,00	1,60
Modulherstellung	4,00	3,60	2,70	2,00	1,80
Summe (DM/Wp)	13,00	10,50	8,00	6,00	5,00

Tab. 39. Herstellungskosten (DM / Wp) für herkömmliche pn-Si-Solarzellen im Vergleich zur MIS-Technologie:

¹⁾ Si Fremdbezug, manuell

²⁾ eigenes Si, teilautomatisiert

³⁾ eigenes Si, weitgehend automatisiert

Deutlich ist der Einfluß von selbsthergestellten Si-Scheiben sowie der Anlagengröße zu sehen. Ein wichtiger Gesichtspunkt bei solchen Darstellungen ist, daß die angegebenen Kosten nur für die idealistisch angenommenen Randbedingungen gelten. Dies soll an Beispielen erläutert werden. Eine wichtige Voraussetzung ist, daß die Produktion für die angegebene Größe "Strich" fährt. Jede Änderung vor allem für diesen Punkt erhöht die Herstellungskosten beträchtlich. Ein anderer wesentlicher Gesichtspunkt ist der für eine Produktion jeweils erreichte Standort in der sogenannten Lernkurve. Diese Lernkurve gilt mit nur unterschiedlichen Zeitkonstanten gleichermaßen für die Gesamtheit aller Produzenten für ein bestimmtes Endprodukt wie auch für jeden einzelnen Hersteller für die gleiche Technologie. Schlußendlich muß noch betont werden, daß Herstellungskosten keine Verkaufspreise darstellen, da erst in letzteren Forschungs- und Entwicklungsaufwendungen sowie die für eine erfolgreiche Marktführung notwendigen Marketingkosten enthalten sind. Die in Tab. 39 auf Seite 88 zum Vergleich genannten Herstellungskosten für MIS-I-Solarzellen sind Zielwerte, die in der Pilotanlage nachgewiesen werden sollen und folgende Überlegungen beeinhalten:

- Einsatz dünnerer Si-Scheiben und Verbesserung des Wirkungsgrades
- Wegfall energieintensiver Verfahrensschritte bei der Zellherstellung und insgesamt deutlich weniger Herstellungsschritte
- Einsatz neuer Modultechniken

Wo sich kostenmäßig die neuen Buried-Contact-Solarmodule und die Dünnschichtsysteme zukünftig einordnen werden, bleibt abzuwarten.

Herstellung von Siliziumschichten mit Bänder-, Platten- und Dünnschichtverfahren

Das größte Potential bezüglich Massenproduktion und Kostenerniedrigung im Bereich der Silizium-Scheibe liegt in der Anwendung von völlig anderen Herstellungsmethoden, bei denen Silizium-Bänder oder -Platten direkt aus der Silizium-Schmelze hergestellt werden, so daß ein Sägeschritt ganz entfallen kann.

An diese Scheiben müssen ähnlich hohe Anforderungen wie an die jetzigen gesägten Scheiben gestellt werden. Sie sollten die Produktion von Solarzellen mit Wirkungsgraden von mindestens 13-15 % zulassen. Diffusionslängen der Minoritätsladungsträger von ca. 100 μm sind dafür eine Voraussetzung. Neben hoher Reinheit werden Korngrößen vom etwa Zehnfachen dieses Wertes verlangt, um den Einfluß von Korngrenzen gering zu halten. Alle Korngrenzen sollten senkrecht zur Oberfläche stehen. Es wird also eine kolumnare Struktur mit Korndurchmessern von 500-1000 μm benötigt. Ein weiterer entscheidender Punkt ist eine geringe Defektdichte in Form von Versetzungen oder Verunreinigungen. Deren Zusammenspiel ist sehr komplex, so daß sich nicht ohne weiteres zulässige Grenzwerte angehen lassen.

Bezüglich der äußeren Form bestehen hohe Anforderungen, die man bei gesägten Scheiben als selbstverständlich betrachtet: exakte Berandung, ebene Oberfläche bis zu den Rändern, keine Verbiegung. Nur mit Scheiben definierter Geometrie lassen sich nämlich automatische Solarzellen-Fertigungsprozesse durchführen.

Bänder- und Plattenverfahren haben unmittelbar einleuchtende Vorteile:

- Es ist kein Sägeprozeß notwendig. Ein Besäumen der dünnen Platten oder ein Zerteilen eines Bandes kann leicht und schnell durch Laser oder auch mit einer Trennscheibe durchgeführt werden, da höchstens Schnittiefen von ca. 150- 250 μm notwendig sind. Es tritt dabei nur ein sehr geringer Materialverlust in der Größenordnung von 10 % auf.
- Im Gegensatz zum Kristallziehen oder Blockgießen ist ein kontinuierlicher Produktionsablauf möglich.
- Die Oberflächen der Bänder oder Platten sind "gewachsen" und damit sauber und für den Solarzellenprozeß ohne größere Vorbehandlung bereit.

Diesen Vorteilen stehen einige Nachteile gegenüber, die je nach Verfahren mehr oder weniger ausgeprägt sind:

- Bei allen bekannten Verfahren liegen großvolumige Silizium-Schmelzen (mindestens einige hundert cm^3) vor, die mit dem Behältermaterial reagieren und Verunreinigungen einsammeln.
- Aufgrund der hohen Oberflächenspannung von Silizium kann die Schmelze nicht großflächig als dünne Schicht ausgegossen und erstarrt werden. Es sind formgebende Elemente notwendig. Diese sind entweder ortsfest und damit über die gesamte Produktionszeit mit flüssigem Silizium in Kontakt, oder sie werden als Folien, Netze oder Platten dauerhaft an das Silizium gebunden, was zu großen Spannungsproblemen führen und auch kostenmäßig kritisch sein kann.
- Das Potential hoher Flächenerzeugungsraten ist sehr schwierig zu nutzen, da die hohe Erstarrungswärme des Siliziums schnell abgeführt werden muß. Die dazu notwendigen steilen Temperaturgradienten führen zu großen thermischen Spannungen und hohen Defektdichten und damit zu schlechten elektrischen Eigenschaften.
- Bänder und Platten müssen in ihrer Endform "wachsen", da ein großflächiges Nachbearbeiten wie z.B. Walzen nicht möglich ist und Schleifen zu teuer wäre. Lediglich ein schnelles Zerteilen eines Bandes oder ein Besäumen der Ränder ist denkbar.

In den vergangenen 20 Jahren wurde weltweit eine Vielzahl von Verfahren zur direkten Herstellung von Bändern oder Platten entwickelt, die zum größten Teil über ein Laborstadium nicht hinausgekommen sind.

Eine gängige Einteilung der Verfahren orientiert sich an den formgebenden Elementen (Tab. 40 auf Seite 91). Es wird unterschieden zwischen Verfahren mit dauergebundenen und temporären Formelementen und solchen ohne Formelemente.

Dauergebundene Formelemente (Folien, Netze, Platten) sind nach der Abkühlung noch an das Silizium gebunden, werden aber für die Solarzellenherstellung meist mechanisch oder chemisch entfernt. Sie gehen stark in die Kostenrechnung ein.

Temporäre Formelemente sind entweder ortsfest (z.B. Schlitze) oder werden an der Schmelze entlanggeführt und trennen sich nach der Erstarrung von selbst. Bei letzteren ist die Wiederverwendbarkeit ein entscheidender Kostenfaktor.

Bei beiden Arten der Formelemente sind diese stets aus einem Fremdmaterial gefertigt, das den hohen Temperaturen und der chemischen Reaktionsfreudigkeit des flüssigen Siliziums widerstehen muß.

Dauergebundene Formelemente	
ESP Edge	Supported Pulling, NREL/USA
D-Web	Dendritic Web, Westinghouse/USA
RAD	Ribbon Against Drop, CGE/France
SOC	Silicon on Ceramics, Honeywell/USA
S-Web	Supported Web, Siemens/FRG

Temporäre Formelemente	
EFG	Edge-Defined Film-Fed Growth, Mobil Solar/USA
RAFT	Ramp-Assisted Foil Technique, Wacker/FRG
RGS	Ribbon Growth on Substrate, Bayer/FRG
Spin Cast	Hoxan/Japan
Cast Ribbon	Hoxan/Japan
RQ	Roller Quenching, Vakuumschmelze/FRG

Ohne Formelement	
LASS	Low Angle Silicon Sheet, Energy Materials Corp./USA
RTR	Ribbon to Ribbon, Motorola/USA
EPR	Electron Powder Ribbon, INSA/France
SSP	Silicon Sheet from Powder, FhG-ISE/FRG

Tab. 40. Bänder- und Plattenverfahren, eingeteilt nach der Art der formgebenden Elemente

Verunreinigungen sind jedoch nie vollständig zu vermeiden. Die gängigsten Materialien sind SiC, Si₃N₄ und SiO₂ oder Graphit, der sich selbst mit SiC überzieht. Bei den Methoden ohne Formelemente werden meist Silizium- Bänder oder -Platten schlechterer Qualität vorgegeben, die durch einen Schmelzprozeß in ein hochwertiges Produkt übergeführt werden.

In Tab. 41 auf Seite 93 sind die Verfahren zusammengestellt, die in jüngster Zeit noch bearbeitet wurden. Als Vergleich sind Silizium-Scheiben von Czochralski Kristallen oder aus multikristallinen Blöcken aufgeführt. Es sind folgende allgemeine Bemerkungen zu machen:

- Es gibt Verfahren mit sehr hohem Durchsatz pro Anlage (output) bis zu 2 m²/min. Dieser Durchsatz liegt etwa zehnmal so hoch wie bei einer Block-Apparatur.
- Die sehr schnellen Verfahren zeigen jedoch durchweg eine schlechtere Qualität der Scheiben, da die großen Abkühlgeschwindigkeiten zu hohen Defektdichten führen.
- Die höchsten Solarzellenwirkungsgrade werden bei Verfahren mit sehr kleinem Durchsatz erzielt. Es werden dabei sehr große Körner oder sogar Einkristalle (D-Web) erreicht.
- Nur 2 Verfahren sind aus einem Laborstadium in eine Pilotproduktion übergeführt worden (EFG und Spin Cast). Dabei ist EFG das am weitesten entwickelte mit Durchsätzen von mehreren hundert kW pro Jahr (aus mehreren gleichen Anlagen).
- Auch in allerneuester Zeit wurden von diesen Verfahren noch einige aufgegeben, weil die Firmen zu viele Probleme und keine unmittelbaren Absatzmöglichkeiten der Produkte sahen.

In Deutschland war vor allem das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (FhG-ISE) an der Entwicklung von Bänder- und Plattenverfahren der deutschen Industrie mehrfach maßgeblich beteiligt. Für das S-Web Verfahren der Fa. Siemens lag die Charakterisierung des Materials weitgehend in den Händen des Instituts. Am wichtigsten dabei war die Herstellung und Vermessung von Testsolarzellen der Größe $20 \times 20 \text{ mm}^2$. Mit angepaßter Technologie einschließlich Getterung und Passivierung konnten gegen Ende des Projektes im Jahre 1990 Wirkungsgrade von über 12 % erreicht werden.

Bei dem von der Fa. Wacker entwickelten RAFT Verfahren arbeitete das ISE mit an dem Grundproblem der Wechselwirkung zwischen flüssigem Silizium und der für die Kristallisation verantwortlichen beweglichen und wiederverwendbaren Rampe (Substrat). Darüber hinaus wurde auch für dieses Verfahren ein Großteil der Charakterisierung sowie die Fertigung von Testsolarzellen am ISE durchgeführt. Dabei konnten Wirkungsgrade von nur etwa 10 % erreicht werden, da dieses Material eine sehr hohe Defektdichte aufwies.

Ein weiteres, bei der Fa. Siemens begonnenes Verfahren wurde im Jahr 1985 vollständig vom ISE übernommen und bis heute weiterentwickelt. Bei diesem, SSP (Silicon Sheets from Powder) genannten Verfahren, wird Silizium-Pulver als dünne Schicht in Form eines fortlaufenden Bandes auf Quarzplatten aufgestreut. In einem ersten Schmelzschrift wird nur die Oberfläche des Pulvers angeschmolzen, ohne daß flüssiges Silizium mit der Quarzplattenunterlage in Berührung kommt. Die Pulverpartikel werden dadurch zusammengeklebt, es entsteht ein freitragendes Silizium-Band mit sehr feinkristalliner Struktur. In einem zweiten Schritt wird dieses Band durch einen Zonenschmelzprozeß in ein grobkristallines Band umgewandelt. Es wurden Bandbreiten bis 110 mm und Korngrößen von vielen cm^2 erreicht.

Bei diesem Verfahren kommt kein Fremdmaterial mit flüssigem Silizium in Berührung, die gesamte Prozeßführung ist extrem sauber. Solarzellen aus diesem Material zeigten Werte bis über 13 %. SSP ist ein Verfahren mit sehr geringem Durchsatz, aber auch sehr einfacher Anlage und mit dem Potential, den Wirkungsgrad noch weiter zu steigern. Die Entwicklung wird am ISE noch weitergeführt.

Name	Company	Method	Product	Crystal Structure	Output ⁴	η (%)	Problems
Cast Rib.	Hoxan Japan	growth from melt shaping by flat C-cavity	ribbons 100 mm wide	columnar grains of some 1 mm ²	200	≤ 10	
D-Web	Westinghouse USA	growth from melt shaping by two Si-dendrites	ribbons 50 mm wide	monocrystalline (twin)	10	≤ 17	high skill needed
EFG	Mobil Solar USA	growth from melt shaping by C-die	octagonal tubes 800 mm circumference	large elongated grains of many cm ² , dislocations $10^4/\text{cm}^2$	160	≤ 15	carbon, SiC, stress
RAF	Wacker Germany	growth from melt on reusable ramps	square sheets 50x50 mm	columnar grains of appr. 1 mm ² , dislocations $10^7/\text{cm}^2$	10000	≤ 10	dislocation density, ramp reuse
RGS	Bayer Germany	growth from melt on reusable substrate	ribbons, 100 mm wide	columnar grains of appr. 1 mm ² , dislocations $10^4/\text{cm}^2$	6000	not rep.	grain size, defects
Spin Cast	Hoxan Japan	spinning melt into flat C-cavities	square sheets 100x100 mm	columnar grains of $\leq 1 \text{ cm}^2$	400	≤ 12	oxygen dendritic structure
SSP	FhG-ISE Germany	zone melting of powder layer by optical heating	ribbons, 100 mm wide	large elongated grains of some cm ² , dislocations $10^3 \text{ bis } 10^6$	20	≤ 13	bowing, width, growth rate
S-Web	Siemens Germany	growth from melt on a C-net	ribbons, 100 mm wide	columnar grains of some mm ² , dislocations $10^4 \text{ bis } 10^6$	1000	≤ 12	flatness, impurities
TSE	Academy Sci. CIS	growth from melt on a graphite foil through a feeder	ribbons				

For reference

CZ	different sources	growth from melt	rods up to 200 mm diameter	monocrystalline	200 ³	$\leq 18^1$, $\leq 15^2$	slicing
Block	different sources	directional solidification	blocks up to 400x400 x 300 mm	multicrystalline	1000	$\leq 17^1$, $\leq 14^2$	slicing

Tab. 41. Bänder- und Plattenverfahren, die in jüngster Zeit weltweit entwickelt wurden.:

¹ Labormaßstab;

² Produktion;

³ Scheiben von ca. 100x100 mm², größere werden für Solarzellen nicht verwendet.

⁴ (cm²/min)

Hochleistungs-Solarzellen auf kristalliner Silizium-Basis:

Die Herstellungskosten eines Solarkraftwerks setzen sich aus leistungsproportionalen Kosten (Inverter, Schaltanlagen etc.) und flächenproportionalen Kosten (Solarzellen, Verglasung, Verklebung, Gestelle, Landaufbereitung etc.) zusammen. Die letzteren reduzieren sich mit steigendem Wirkungsgrad der Zellen. Die Kosten für ein Array (d.h. also Solaranlage ohne Inverter, Schaltanlage und Speicherung) lassen sich grob in vier Kostenblöcke aufteilen:

- Siliziumscheiben 20 %
- Zellentechnologie 20 %
- Modulherstellung (Glas, Rahmen etc.) 25 %
- Arrayherstellung (Land, Fundamente, Gestelle, Verschaltung etc.) 35 %

Für Großanlagen (z.B. Pellworm) gilt in etwa die angegebene Kostenaufteilung, wenn auch die Prozentzahlen von Fall zu Fall etwas schwanken können. Steigt der Wirkungsgrad, so sind für ein Array gegebener Größe weniger Zellen etc. einzusetzen. Mit diesen Maßnahmen ergibt sich z.B., daß - bei einem Kostenanteil der Solarzelle von 40 % und bei unveränderten Herstellkosten für die Zelle - mit einer Steigerung des Wirkungsgrades von 12 auf 16 % eine Kosteneinsparung am Gesamtarray von 25 % zu erreichen wäre. Da jedoch die Herstellkosten für Zellen mit hohem Wirkungsgrad wegen perfekterem Ausgangsmaterial und höherem Technologieaufwand steigen werden, ist es sinnvoll, zu betrachten, wie hoch die erlaubten Modulkosten in ihrer Abhängigkeit vom erzielten Wirkungsgrad sind. Dies hängt natürlich auch vom erzielten oder angestrebten Strompreis ab. Wegen der hohen Kostenbeiträge durch die Systemkomponenten von PV-Anlagen, die wesentlich flächenabhängig sind und damit vom Wirkungsgrad der Module entscheidend beeinflusst werden, geht ein Entwicklungstrend in die Richtung sog. hocheffizienter Si-Solarzellen. In der Entwicklung von Solarzellen für höchste Wirkungsgrade aus kristallinem Silizium wurden in den letzten fünf Jahren große Fortschritte erzielt. Während früher Wirkungsgrade von 20 % (AM 1,5) als praktisch nicht erreichbar galten, steht heute der "Weltrekord" bei 23.3 % (AM 1,5).

Si-Solarzellen mit Wirkungsgraden über 20 % können zwar derzeit nur in wenigen Laboratorien hergestellt werden, dennoch ist die Beschäftigung mit diesen "high-efficiency"-Technologien wichtig für die Photovoltaikentwicklung insgesamt. Sie hat neben den rein physikalisch-technologischen Ergebnissen auch die große Bedeutung des Wirkungsgrades bei der Kostenreduzierung von Solarkraftwerken wieder in Bewußtsein gebracht. Neben dem photovoltaischen Effekt, also der Absorption von Licht, der Generation von Ladungsträgern, der Trennung von Ladungsträgern gibt es Prozesse, die zu Verlusten führen. In der Minimierung dieser Verluste besteht die Hauptaufgabe bei der Entwicklung von hocheffizienten Solarzellen.

Licht kann an der Halbleiteroberfläche verloren gehen durch Reflexion oder durch Abschattung an den Metallkontakten. Es kann aber auch sein, daß die Absorption unvollständig ist und ein Teil des Lichts entkommt.

Die erzeugten bewegten Ladungsträger haben nur eine sehr kurze Lebensdauer, sie können wieder rekombinieren und dadurch für die Stromerzeugung verloren gehen. Diese Rekombination kann im Volumen und auch an den Oberflächen der Solarzellen vonstatten gehen.

Ferner gibt es Ohmsche Verluste in den Leiterbahnen, in den Kontaktschichten und im Kristall.

Kurzgefaßt sind es also folgende Verluste:

- Optische Verluste
 - Abschattung durch die Gridstruktur
 - Reflexion des Lichtes an der Oberfläche
 - Fehlende Absorption des infraroten Lichts

- Elektrische Verluste
 - Ohmsche Verlust in Metallschicht, Basis und Emitter
 - Rekombinationsverluste im Volumen und an den Oberflächen

Geeignete Maßnahmen zur Reduzierung der Verluste sind:

- Abschattungsverluste werden durch Verwendung sehr feiner Frontgitterstrukturen (Grids), die mittels Fotolithografie hergestellt werden, verkleinert. Alternative Techniken sind "vergrabene" Kontakte ("buried contacts"), Punktkontaktzellen, die Emitter und Basiskontakte auf der Rückseite haben (siehe unten), sowie die Verwendung von prismatischen Deckfolien ("prismatic cover"), die das einfallende Licht von den Kontaktstreifen wegbeugen.
- Reflexionsverluste an der Oberfläche werden durch Antireflexschichten und/oder strukturierte Oberflächen vermindert.
- Transmissionsverluste durch zu geringe Absorption können für Wellenlängen nahe der Bandkante auftreten. Um sie zu verringern, werden hochspiegelnde Basiskontakte oder "Lichtfallen"-(light trapping) Anordnungen verwendet, die bewirken, daß das Licht einen längeren Weg in der Zelle zurücklegt.
- Ohmsche Verluste in den Metall- und Halbleiterschichten müssen durch sorgfältige Auslegung der Abmessungen und der Dotierungen begrenzt werden. Hier sind immer Kompromisse notwendig, da eine zu niederohmige Wahl von Basismaterial und Kontaktstruktur zu höheren Verlusten bei den anderen Mechanismen (Rekombination, Abschattung) führt.
- Während man die oben genannten Verluste relativ einfach minimieren kann, ist die Reduktion der Rekombinationsverluste wesentlich schwieriger und in der Tat die eigentliche Aufgabe der "high-efficiency" Technologie.

Man kann als grobe Faustregel nehmen, daß für hohen Strom die Diffusionslänge mindestens die doppelte Zellendicke und für hohe Spannungen mindestens die 3-5 fache Zellendicke betragen sollte. Das gilt aber nur bei sehr guter Rückseitenpassivierung.

Die Rekombination an der Rückseite hat einen wesentlichen Einfluß auf Leerlaufspannung und Kurzschlußstrom. Unterdrückung der Oberflächenrekombination kann bei der Leerlaufspannung einen Gewinn von 60 mV oder mehr und beim Kurzschlußstrom bis zu 3-4 mA/cm² bedeuten. Für eine Stromsättigung genügen etwa Werte von 1000 cm/s, während für die Spannung etwa Werte um 100 cm/s erreicht werden sollten. Hohe Spannung ist also schwerer zu erzielen als hoher Strom. Wie so kleine Werte von S erreicht werden können, wird weiter unten beschrieben.

Natürlich hat auch die Reduktion der Oberflächenrekombination an der Emitteroberfläche S_{front} einen Einfluß auf I_{SC} und V_{OC} und damit auf den Wirkungsgrad. Die Bedingungen, die an S_{front} gestellt werden müssen, sind allerdings nicht so stark wie die an S_{back} .

Wenn man höhere Wirkungsgrade erreichen will, muß die Rekombination an der Vorderseite < 1000 cm/s und an der Rückseite sogar < 100 cm/s sein.

Die Realisierung der oben erläuterten Prinzipien für die höchst effiziente Si-Solarzelle sei am Beispiel der im ISE entwickelten LBSF-Zelle⁹ diskutiert.

⁹ Local Back Surface Field

Da Si ein indirekter Halbleiter ist und Sonnenlicht nur relativ schwach absorbiert, schließt der aktive Teil der Zelle Vorder- und Rückseite mit ein. Ein auffallendes Merkmal ist die strukturierte Oberfläche zur Reflexionsminderung. Das sind kleine Strukturen von etwa 10 μm Größe, die wie umgekehrte Pyramiden aussehen und durch einen anisotropen Ätzprozeß hergestellt werden. Lichtquanten, die beim ersten Auftreffen auf das Si nicht eindringen können, bekommen eine zweite Chance. Mit solchen Strukturen lassen sich die Reflexionsverluste auf Werte von 3-4 % drücken. Oberflächen dieser Art erscheinen dem Betrachter fast schwarz. Das Metallgitter zur Stromentnahme ist in Fingerzahl und Breite der Finger ein sehr sorgfältiger Kompromiß zwischen Abschattungsverlusten und Ohmschen Verlusten. Gängige Fingerbreiten liegen etwa im Bereich von 10 μm , hergestellt werden solche Gitter durch Fotoresistprozesse und Aufdampfen von Titan, Palladium und Silber.

Der wichtigste Schritt aber ist eine fast vollständige Bedeckung der Oberfläche mit einem hochwertigen, thermisch aufgewachsenen Oxid zur Passivierung der Oberfläche, um die Ladungsträgerrekombination so klein wie möglich zu halten. Die Emitteroberfläche ist die Stelle mit der höchsten Konzentration von Ladungsträgern, da hier die Lichtdichte am größten ist. Dieses Oxid ist in seiner Dicke so gewählt, daß es auch noch gleichzeitig als einlagige Antireflexschicht dient.

Zur Untersuchung der Ladungsträgerrekombination gehört auch, daß die Berührungspunkte zwischen Halbleiter und Metallkontakt so klein wie möglich sind, und der Halbleiter an diesen Stellen besonders hoch dotiert ist. Man spricht in diesem Fall von einem zweistufigen Emitter.

Von größter Wichtigkeit ist bei hocheffizienten Zellen, wie oben diskutiert, das Verhalten der Rückseite. Der größte Teil des Stromes wird in der Basis generiert, und ohne besondere Maßnahmen würde bei hohen Diffusionslängen ein großer Teil der Ladungsträger an der Rückseite rekombinieren und damit verlustig gehen.

Nur an den Kontaktpunkten wird ein BSF (= back surface field) eindiffundiert, die übrige Rückseite ist passiviert mit einem Oxid, da zusätzlich mit ca. 2 μm Aluminium bedampft ist. Wir erreichen damit Rekombinationsgeschwindigkeiten an der gesamten Rückseite von etwa 100 cm/s. Dieses LBSF-Prinzip wird inzwischen auch in der "high-efficiency" Technologie anderer Labors verwendet.

Es kann kein Zweifel daran bestehen, daß eine hocheffiziente Si-Solarzelle ein "high-Tech-Produkt" ist. Es gibt kein Halbleiterbauelement, das bezüglich Verunreinigungen ähnlich hohe Ansprüche stellt ($<10^{10}\text{cm}^{-3}$). Das bedeutet für die Technologie Reinraumbedingungen, mehrstufige Reinigungsprozesse der Wafer, sowie eine sehr saubere und diffizile Hochtemperaturführung, sehr häufig unter TCA-Zugabe ¹⁰ zur Reinigung der Diffusionsrohre.

Der Herstellprozeß besteht aus vier Hauptschritten mit je 8 Teilschritten, insgesamt also 32 (!) Prozeßschritten:

1. Pyramidenherstellung
2. Emitterherstellung

¹⁰ Trichloressigsäure

3. Passivierungsoxidation
4. Metallisierung der Vorder- und Rückseite.

Das Silizium ist FZ-Si (float zone gezogen), Waferdurchmesser 3", Dicke 250 μm , (100)-Kristallrichtung, Ohmigkeit im Bereich 0,4-1,5 Ohm cm, beidseitig poliert.

1. Das Si wird in einem Hochtemperaturprozeß mit einer etwa 80 nm dicken Oxidschicht versehen. Mittels Fotolithografieschritten werden die Pyramidenstrukturen geöffnet und in heißer alkalischer Lösung die invertierten Pyramidenstrukturen geätzt. Nach dem Entfernen des stehengebliebenen Oxids werden die Kanten der Pyramiden nachgeätzt. Damit ist die Strukturierung abgeschlossen. Justiersymbole für die weiteren Lithografieschritte werden gleichzeitig mit eingeätzt.
2. Nach einer weiteren Schutzoxidation von 200 nm werden die Fenster für die n^{++} -Emitterstreifen unter den späteren Metallfingern geätzt, es folgt die n^{++} -Vorbelegung. Nach anschließendem vollständigem Oxidätzen folgt eine weitere Schutzoxidation von 200 nm. Dabei wird gleichzeitig die n^{++} -Konzentration tiefer eingetrieben, was durchaus erwünscht ist. Nach einer großflächigeren Fensteröffnung erfolgt die n^{+} -Vorbelegung mit anschließender Oxidentfernung. Damit ist die Emitterstruktur vorgegeben, wenn auch noch nicht die endgültige Tiefe erreicht ist.
3. Mittels eines "Lift-off"-Prozesses werden auf der Rückseite die Aluminiumpunkte für das lokale BSF aufgebracht. Dieses Al wird unter Sauerstoffatmosphäre eindiffundiert. Gleichzeitig wird auf die Vorder- und Rückseite je 105 nm SiO_2 aufoxidiert. Wie bekannt, dienen diese Oxide zur Passivierung von Vorder- und Rückseite, auf der Vorderseite gleichzeitig noch als AR-Schicht ¹¹.
4. Aufdampfen von 2 μm Al auf die Rückseite, Oxidöffnen der Gridstruktur auf der Vorderseite. Mittels "Lift-off" wird das überschüssige Vorderseitenmetall entfernt. Es folgt eine galvanische Verstärkung des Silbers auf etwa 8 μm Stärke. Nachdem anschließenden Sintern bei etwa 400 °C für wenige (25) Minuten ist die Zelle fertig.

Mit dieser Technologie wurden im ISE im Sommer 1991 erstmalig Wirkungsgrade > 20 % erreicht, die höchsten in Europa erzielten Werte. Die beste Zelle zeigte die folgenden Parameter:

- $V_{OC} = 673 \text{ mV}$, $I_{SC} = 39,82 \text{ mA/cm}^2$,
- $FF = 0,781$, Wirkungsgrad = 20,9 %.

Green hatten mit einer solchen Struktur ("PERL"-Zelle = passivated emitter and rear local cell) den Weltrekord in Si- Solarzellen bei einer Sonne ¹² überhaupt erhalten, nämlich 23,3 % (AM 1,5).

Andere "high efficiency" Si-Solarzellen Konzepte

Wie eingangs erwähnt gibt es noch andere Zellkonzepte für höchste Wirkungsgrade. Die beiden wichtigsten sollen im folgenden vorgestellt werden:

¹¹ Anti-Reflex-Schicht

¹² d.h. ohne Konzentration

1. Die LGBG-(=laser grooved buried grid) Solarzelle von Prof. Green (zuvor schon einmal angesprochen):

Das besondere Kennzeichen dieser Zelle sind Frontkontakte, die in Gräben liegen, welche durch Laser eingeschnitten wurden. Man erspart sich dadurch einen Fotolithografieschritt und erreicht außerdem einen großen Gridfingerquerschnitt (kleiner Widerstand) bei geringer Abschattung. Diese Zelle ist leicht großflächig herzustellen ($10 \times 10 \text{ cm}^2$) und auch als Konzentratorzelle geeignet. Einen weiteren Lithografieschritt erspart man durch die Strukturierung der Oberfläche mit sogenannten "Random pyramids". Mit dieser Zelle wurden Wirkungsgrade von 19-20 % (AM 1,5) erreicht.

2. Die sogenannte Swanson-Punktkontaktzelle

Ein Typ für konzentriertes Licht, der aber auch bei einer Sonne sehr gute Ergebnisse zeigt. Auffallend ist, daß der pn- Übergang nicht mehr ganzflächig auf der dem Licht zugewandten Seite ist, sondern nur noch aus Punkten besteht und auf der lichtabgewandten Seite liegt. Dort sind auch beide Kontaktstrukturen realisiert, die wie zwei Kämme ineinandergreifen. Damit existiert keine Abschattung auf der Vorderseite. Voraussetzung für hohen Wirkungsgrad ist eine extrem hohe Diffusionslänge der Ladungsträger und sehr gute Passivierung der Oberfläche wegen der sehr hohen Ladungsträgerkonzentration und der großen Entfernung zum pn- Übergang.

Die Entwicklung von kristallinen Si-Solarzellen mit Wirkungsgraden über 20 % (AM 1,5) hat erst vor wenigen Jahren eingesetzt. Die Wirkungsgrade konnten bisher stetig weiter verbessert werden. Es stellt sich daher die Frage, wo die Obergrenze dieser Technologie liegt. Dies ist derzeit schwer zu sagen. Beim gegenwärtigen Stand von Materialentwicklung und Technologie sind vielleicht 25 % (AM 1,5) die Grenze. Weiter kommt man eventuell mit neuen Konzepten wie der kristallinen Dünnschichtzelle und auf jeden Fall mit Konzentratorzellen.¹³

4.5.2 Beschreibung der betrachteten Prozeßketten

Die Detailanalyse der Herstellungsprozesse erfolgte im Projekt (vgl. Band 5 dieser Reihe) "Umweltrelevante Masseneinträge bei der Herstellung verschiedener Solarzellentypen; eine vergleichende Analyse konventioneller und ausgewählter neuer Verfahren unter Berücksichtigung der Einsatzstoffe und Prozeßkette sowie der Entsorgungs- und Recyclingmöglichkeiten"

der Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FFE), München.

¹³ Es wird darauf hingewiesen, daß Teil II des Bandes 5 auch Verfahrensbeschreibungen, Stoffbilanzen und verfahrenstechnische Diskussionen ausgewählter alternativer Herstellverfahren enthält (neben den MIS-I-Zellen auch Hochleistungs-Solarzellen, Bänder-, Platten- und Dünnschichtverfahren, die Herstellung von Solarsilizium und die aluminothermische Reduktion von Siliziumtetrachlorid).

Hier werden in den nachfolgenden Unterkapiteln zur Kurzinformation des Lesers nur jene Darstellungen aus dem Band 5 gebracht, die für das Hauptziel dieses Bandes, nämlich den Alternativenvergleich und seine Beurteilung gebraucht werden. Es sind dies zum einen die spezifischen Stoffeinträge (pro kW_{peak}) für die Herstellung der nachfolgend genannten Solarzellentypen und zum anderen die spezifischen pro kW_p an die Umwelt abgegebenen Stoffmengen. Die Details der den jeweiligen Zahlen zugrundeliegenden Herstellungsschritte können im Band 5 nachgelesen werden. Die genannte FfE Untersuchung wurde in enger Zusammenarbeit mit in der Bundesrepublik Deutschland produzierenden Herstellern durchgeführt, ohne deren Mitwirkung und Unterstützung die gestellte Aufgabe nicht hätte erfüllt werden können. Aus Gründen des Schutzes von Betriebsgeheimnissen der Hersteller wurde in dem vorliegenden Bericht teilweise von der Veröffentlichung verfahrenstechnischer Details abgesehen. Die geschützten Informationen wurde jedoch bei der Umweltvorsorgeprüfung in diesem Band 6 mitberücksichtigt.

Trotz des durch den Massenerhaltungssatz innerhalb festzulegender Bilanzgrenzen bestimmten scheinbar trivialen wissenschaftlichen Hintergrundes, wurde bei der Ermittlung der Stoffbilanzen bei der Herstellung von Photovoltaik-Modulen Neuland betreten, soweit die Detaillierung der Stoffklassifizierungen und ihre Quantifizierung unter den Gesichtspunkten der Umwelterheblichkeit zu ermitteln war. Die Untersuchung stützte sich daher auf das, unter energetischen Gesichtspunkten ermittelte, vorhandene Mengengerüst der Einsatzstoffe, das in einem früheren Projekt (1988/89) Grundlage der Berechnung des kumulierten Energieverbrauchs (KEV) für die Herstellung von Photovoltaik-Modulen war. Die bewährte Gliederung der Hauptprozeßstufen dieser Untersuchung konnte ebenfalls übernommen werden /Hagedorn 89/.

Ebenso bilden die Ergebnisse des KEV die Basis für die Zuweisung der mit dem Energieverbrauch zur Herstellung verbundenen nichtprozeßbedingten Emissionen. Der KEV für die Herstellung von amorphen PV-Modulen konnte im Rahmen dieser Untersuchung durch meßtechnische Analysen neu bestimmt werden.

Die Prozeßkettenanalyse bildet somit auch bei der Ermittlung der Stoffbilanzen die Grundlage der methodischen Vorgehensweise. In Zusammenarbeit mit den Herstellern wurde das grobe Mengengerüst unter den Gesichtspunkten der Umweltrelevanz weiter detailliert und der Stofffluß sämtlicher Einsatzstoffe bis zu ihrem Verbleib in den Umweltkompartimenten (Atmosphäre, Hydrosphäre und Pedosphäre) analysiert.

Ausgehend von den Mengenangaben über Fertigungs-, Hilfs- und Betriebsstoffe, die sich aus Betriebsaufzeichnungen der Verbrauchsmengen relativ zuverlässig ermitteln lassen, wurden Abschätzungen der Stoffumwandlungen vorgenommen, die auf physikalischen und chemischen Gesetzmäßigkeiten beruhen, um für die nach den Hauptreaktionen bei den Prozessen entstehenden Stoffen Art und Mengen angeben zu können. Soweit aufgrund behördlicher Auflagen Meßwerte über Schadstoffemissionen vorlagen, wurden diese Informationen übernommen. Auch muß festgehalten werden, daß nicht für sämtliche Einsatzstoffe eine vollständige und präzise Analyse ihrer Zusammensetzung bekannt ist. Nicht nur aus Gründen der Sicherung von Betriebsgeheimnissen der Hersteller sind die Rezepturen von Stoffen nur unvollständig bekannt, sondern auch weil Analysen in erster Linie zur Optimierung von Verfahrensparametern und der Produktqualität vorgenommen werden. Somit muß ausdrücklich klargestellt werden, daß die im folgenden angegebenen Mengengerüste keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben können.

nen. Daß Stoffe nicht genannt und quantifiziert werden, ist nicht mit einer wissenschaftlich belegbaren Aussage gleichzusetzen, sondern mit dem nicht vorhandenen Kenntnisstand.

Trotzdem erscheint das erarbeitete Mengengerüst ausreichend detaillierte und belastbare Anhaltswerte für den Stoffumsatz bei der Herstellung von Photovoltaik-Modulen zu liefern, nicht zuletzt, wenn man die Informationen denen aus sogenannten Ökobilanzen von Produkten gegenüberstellt. Für eine Prüfung und Bewertung der Umwelterheblichkeit der Herstellung von Photovoltaik-Modulen bilden sie eine erste Grundlage, da quantifizierte Angaben über den Stoffumsatz bislang überhaupt nicht vorliegen.

Die Untersuchung der umweltrelevanten Masseneinträge bei der Herstellung verschiedener Solarzellentypen setzt bei der Analyse heute kommerziell in der Bundesrepublik hergestellter PV-Module an. Als Basismaterial wird ausschließlich Silicium verwendet, das entweder als mono- und multikristalline Struktur oder als amorphe Schicht zum Einsatz kommt.

Die Systematik der Vorgehensweise der Datenerhebung in Band 5 läßt sich für die Zwecke der Auswertung anhand einer gekürzten Auflistung der Untersuchungsschritte verdeutlichen:

- Aufstellen der charakteristischen Prozeßschritte innerhalb eines Hauptbilanzraumes;
- Anfertigung einer Verfahrensbeschreibung für jeden Prozeßschritt;
- Aufstellen sämtlicher Einsatzstoffe in den Hauptbilanzraum mit:
 - Gliederung der Stoffe nach:
 - Vorprodukten (eigener Hauptbilanzraum),
 - Fertigungsstoffen (Produktfertigung),
 - Hilfs- und Betriebsstoffen und
 - Zuordnung der Stoffe zu den Prozeßschritten.
- Aufstellen sämtlicher den Hauptbilanzraum verlassender Stoffmengen mit Angabe ihres Verbleibs, gegliedert nach den Umweltkompartimenten:
 - Atmosphäre,
 - Hydrosphäre und
 - Pedosphäre (Lithosphäre).

Angaben zum Stoffumsatz bei der Herstellung von Photovoltaik-Modulen erfolgen nach Herstellerangaben aus Betriebsaufzeichnungen bezogen auf den Produktionsstand der Technik 1991 für eine Produktionskapazität bis ca. 2 MWp/a je Modultechnologie.

Generell gilt, daß die Tiefe der Detaillierung je nach Technologie, Hauptbilanzraum und Prozeßschritt geringfügige Unterschiede aufweisen kann, die auf den unterschiedlichen Kenntnisstand und unterschiedliche Erhebungsmöglichkeiten zurückzuführen sind. Im einzelnen werden hier folgende Zellentypen vorgestellt, jeweils über alle Verfahrensschritte vom Silizium-Rohmaterial über die Scheiben- und Zellen - bis zur Modulherstellung:

- Kommerzielle "klassische" mono- und multikristalline Dickschichtmodule
- Kommerzielle mono- und multikristalline MIS-I-Module in Acryl-Gießharztechnologie

Die der eigentlichen PV-Zellen-Herstellung vorgeschalteten Schritte sind die Herstellung von

- technischem (MG = metallurgical grade) Si aus Si-Oxid (SiO_2)
- Electronic Grade (EG-) Silizium aus MG-Si

4.5.2.1 Herstellung von technischem (MG-) Silizium

Für die Herstellung von technischem Silicium (MG-Si) verwendet man weltweit Siliciumdioxid (SiO_2) als Ausgangsstoff. Siliciumdioxid kommt in der Natur sehr häufig vor, seine bekannten Erscheinungsformen sind Sand, Quarz, Quarzkies oder in sehr reinem Zustand Bergkristall. In der industriellen Produktion wird Kohlenstoff als Reduktionsmittel verwendet, der in Form von Holzkohle, Woodchips, Torfkoks, Petrolkoks und Kohle eingesetzt wird. Technisches Silicium mit einer Reinheit von $> 98\%$ wird jährlich weltweit mit einer Kapazität von über 800.000 t produziert (Stand 1990). Der größte Anteil, etwa die Hälfte der Produktion, wird in der Aluminiumindustrie für Legierungen eingesetzt, fast 40 % in der Chemischen Industrie für die Herstellung von Silikonen. Nur etwa 20.000 t jährlich finden in der Halbleiterindustrie Verwendung und wiederum nur ein Bruchteil davon, etwa 10 %, werden derzeit zu Solarzellen weiterverarbeitet.

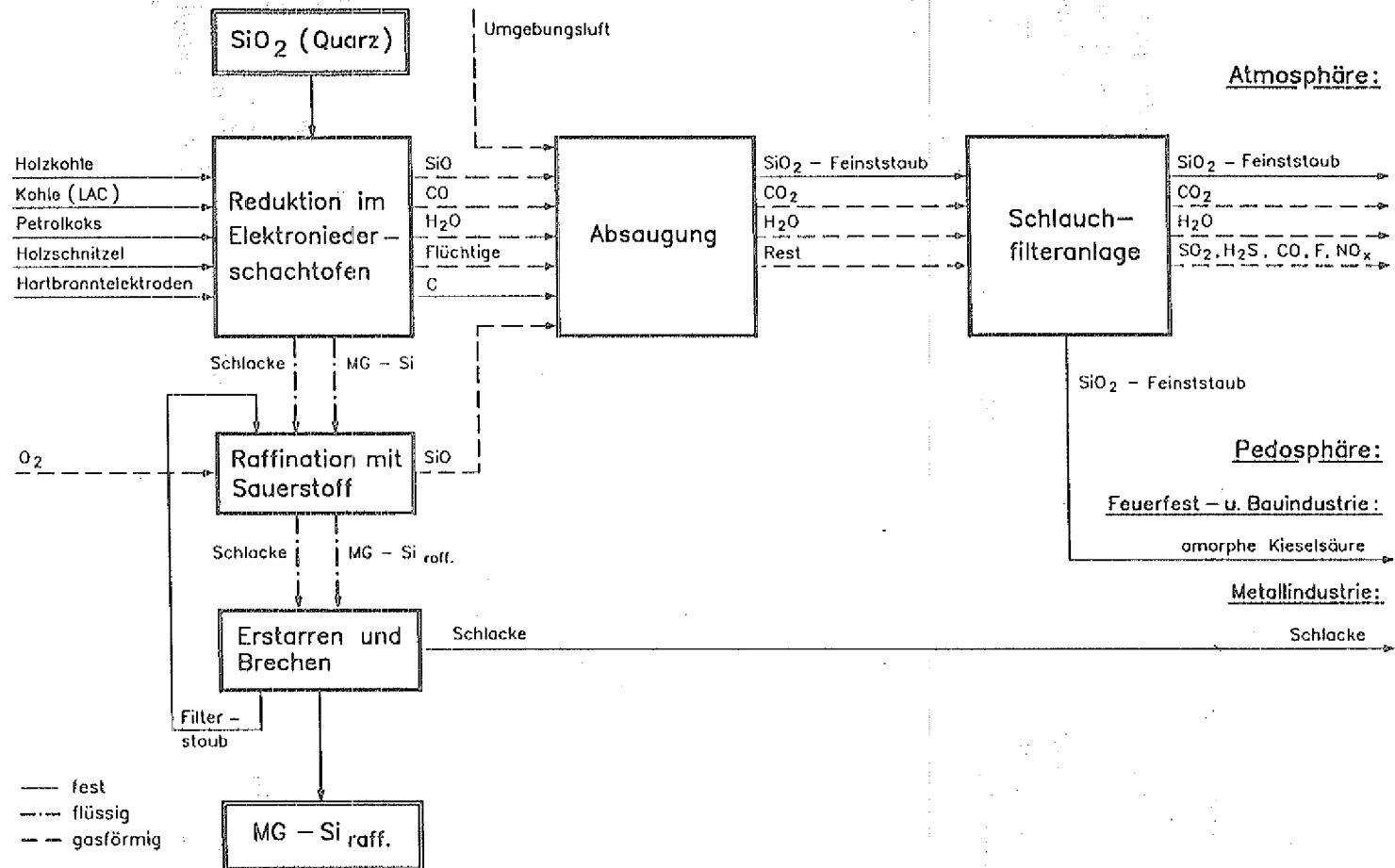
Die Prozeßkette der Herstellung von raffiniertem gereinigtem MG-Silicium umfaßt folgende Schritte.

- Quarz
- Reduktion mit Kohlenstoff
- Sauerstoff-Frischen (Reinigen von Al- und Ca-Verbindungen)
- raffiniertes MG-Silicium

Die später in der Analyse verwendeten Zahlen - sie werden hier nicht zitiert, da nur die Summe aus allen Verfahrensschritten relevant ist - beruhen auf folgenden Randbedingungen:

Reduktion von Quarz im Elektro-Niederschachtofen in einer Fabrik mit drei Öfen und einer Gesamtleistung von 35 MVA, das entspricht einer Produktion von rund 15.000 t/a im kontinuierlichen Betrieb. Einen qualitativen Überblick über die Stoffflüsse gibt Abb. 8 auf Seite 102.

Abb. 8. Stoffflüsse bei der Siliciumreduktion mit Kohlenstoff und dem Raffinieren mit Sauerstoff.
/Hagedorn 92/



4.5.2.2 Herstellung von Elektronik-(EG-)Silizium

Das betrachtete Verfahren besteht aus den zwei Hauptschritten

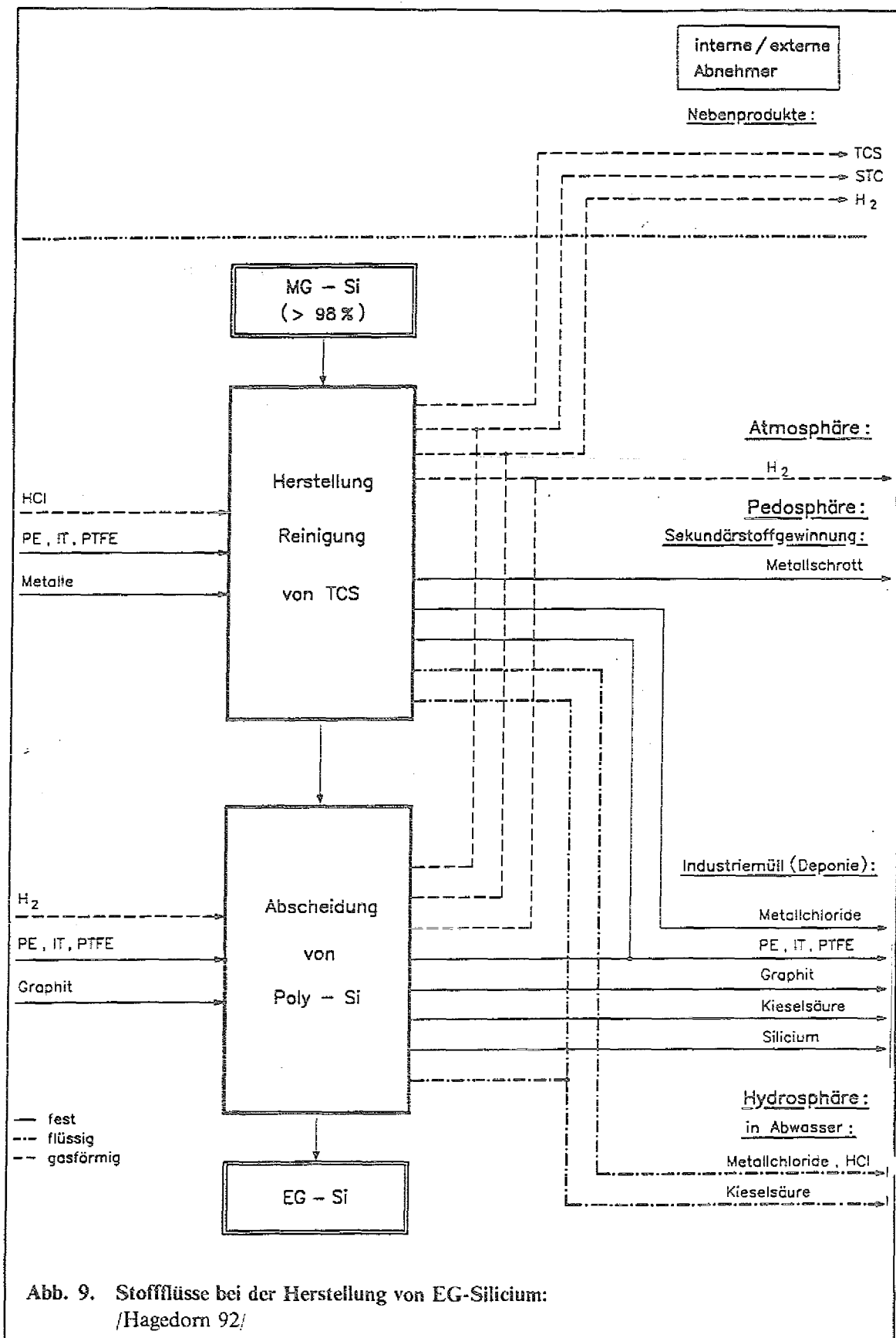
- Herstellung und Reinigung von Trichlorsilan (TCS)
- Abscheidung und Aufbereitung von Polysilicium, beides jeweils im Großchemieverbund (1000 kg Chargengröße)

Die Jahresproduktion beträgt rund 3000 t Poly-Si/a bei kontinuierlichem Betrieb.

Die Prozeßkette der Herstellung von halbleiterreinem (EG-)Silizium umfaßt die nachfolgenden Einzelschritte, wobei das Resultat ein feinkristallines (Poly-) Si ist:

- Technisches (MG-) Si
- Herstellung gasförmiger Chlor-Silan-Verbindungen
- Entfernen der Stäube durch Staubfilter
- Abtrennen des H_2 mittels Wäscher
- Reinigung des TCS durch fraktionierte Destillation
- Poly-Si-Abscheidung im Abscheide-Reaktor
- Halbleiterreines (EG-) Poly-Silizium

Die qualitativen Stoffflüsse sind in Abb. 9 auf Seite 104 graphisch wiedergegeben:



4.5.2.3 Herstellung von Silicium-Scheiben

Für die Herstellung von Siliciumscheiben wird heutzutage halbleiterreines EG-Silicium eingesetzt aus dem mit unterschiedlichen Verfahren sowohl multikristalline als auch monokristalline Siliciumscheiben für Solaranwendungen hergestellt werden, nämlich

- Blockgießen (multi)
- Czochralski-Ziehen (mono)

Herstellung multikristalliner Siliciumscheiben

Die untersuchten Scheiben weisen die nachfolgend aufgelisteten Kenngrößen auf:

- Technische Daten:
 - Scheibenfläche: $10 \times 10 \text{ cm}^2 = 100 \text{ cm}^2$
 - Scheibendicke: $350 \text{ }\mu\text{m}$
- Betrachtete Verfahren:
 - Silicium-Blockgießen und Außenbearbeitung zu Säulen
 - Sägen zu Scheiben mit Multi-Wire-Slurry-Sägen, Reinigen und Verpacken
- Anlagengröße:
 - Blockgießanlage (Chargengröße = Blockgröße 120 kg)
 - Bandsäge
 - Multi-Wire-Slurry-(MWS)-Sägen

Die entsprechende Jahresproduktion beträgt rund 90 t Silicium- Blöcke/a = ca. 6 Mio Scheiben/a im 4-Schicht-Betrieb für Blockgießen und 3-Schicht-Betrieb für MWS-Sägen

Multikristalline Silicium-Scheiben werden heutzutage überwiegend aus Polysilicium in Halbleiterqualität hergestellt. Das hochreine Silicium wird dazu aufgeschmolzen und zur Kristallisation in Blöcken in Kokillen gegossen. Aus den Blöcken werden dann mit Sägeverfahren Siliciumscheiben gesägt, die zu Solarzellen weiterverarbeitet werden.

Nachfolgend ist die gesamte Prozeßkette, die in der Herstellung von multikristallinen Silicium-Scheiben durchlaufen wird, dargestellt und in die charakteristischen Einzelschritte aufgegliedert:

- EG-Silicium
- Blockgießen
- Sägen zu Scheiben
- Reinigen
- multikristalline Si-Scheibe

Blockgießen:

Polysilicium ist für die direkte Verarbeitung zu Solarzellen ungeeignet und wird daher für das Ziehen von Monokristallen eingesetzt. Aus diesem Material lassen sich Solarzellen mit hohem Wirkungsgrad herstellen. Als wirtschaftliche Alternative zu diesem kostenintensiven Verfahren bietet sich die Herstellung von multikristallinem Silicium in Blockform an. Die erreichten Zellenwirkungsgrade liegen im Vergleich zu Einkristallmaterial nicht so hoch, andererseits erlauben unterschiedliche Blockformate eine große Flexibilität in der Scheibengröße.

Das Ausgangsmaterial wird unter Schutzgasatmosphäre aufgeschmolzen und nach dem Abgießen in Kokillen durch Einstellen eines vertikalen Temperaturgradienten gerichtet kristallisiert. Der gewünschte Zielwiderstand wird während des Schmelzvorganges durch Dotierung eingestellt. Wesentliches Konstruktionsmaterial der Kokillen ist Graphit. Die Temperaturverteilung in den Kokillen ist so gewählt, daß eine gerichtete Erstarrung zu einer kolumnaren Kristallstruktur erfolgt.

Die Kokillen werden nach der Entnahme der $40 \times 40 \times 30 \text{ cm}^2$ großen Blöcke mehrmals wiederverwendet. Ausbeute und Wirtschaftlichkeit des Verfahrens werden wesentlich durch die Kristallisationsgeschwindigkeit und die Blockgröße bestimmt.

Die Stoffflüsse bei der Herstellung von multikristallinen Scheiben aus EG-Si werden in Abb. 10 auf Seite 108 graphisch dargestellt.

Herstellung von monokristallinen Silicium-Scheiben

Analog zur Herstellung von multikristallinen Silicium- Scheiben setzt die Untersuchung am heutigen Produktionsstand und an den derzeit praktizierten Verfahren an.

Es wurde nur die heute übliche "quasiquadratische" Scheibe untersucht; die früher gefertigten runden Scheiben werden in zunehmenden Maße von den Herstellern nicht mehr eingesetzt. Nachfolgend wird der Einsatz von innenlochgesägten monokristallinen Silicium-Scheiben mit einer Stärke von $450 \mu\text{m}$ angenommen. In der laufenden Produktion werden auch bereits drahtgesägte Wafer mit einer Scheibenstärke von $350 \mu\text{m}$ verwendet, wie sie bei den multikristallinen Silicium- Photovoltaik-Modulen untersucht werden konnten. Die dadurch bedingten Unterschiede im Siliciumumsatz führen auf der einen Seite zu einer eingeschränkten direkten Vergleichbarkeit beider Technologien. Auf der anderen Seite können das Innenloch-Sägeverfahren und das Drahtsägeverfahren, die alternativ auf mono- und multikristallines Einsatzmaterial angewandt werden können, in diesem relevanten Prozeßschritt gegenübergestellt werden. Die Herstellung drahtgesägter monokristalliner Si-Wafer konnte im Rahmen dieser Untersuchung nicht quantifiziert werden. Die untersuchten Scheiben weisen die nachfolgend aufgelisteten Kenngrößen aus:

- Scheibenfläche: 98 cm^2
- Scheibendicke: $450 \mu\text{m}$

Der Herstellungsprozeß monokristalliner Siliciumscheiben wird in vier eigenständige Prozeßschritte untergliedert, die vom Einsatz des Poly-Siliciums bis zur monokristallinen Siliciumscheibe durchlaufen werden. Letztere wird als Einsatzprodukt in der Solarzellenfertigung weiterverarbeitet:

- Herstellungsprozeß
 - Poly-Silicium
 - Reinigungsätzung des Poly-Si
 - Czochralski-Ziehen monokristalliner Stäbe
 - Sägen zu Scheiben
 - Außentrennsägen $\rightarrow$ Stäbe
 - ID-Sägen $\rightarrow$ Scheiben

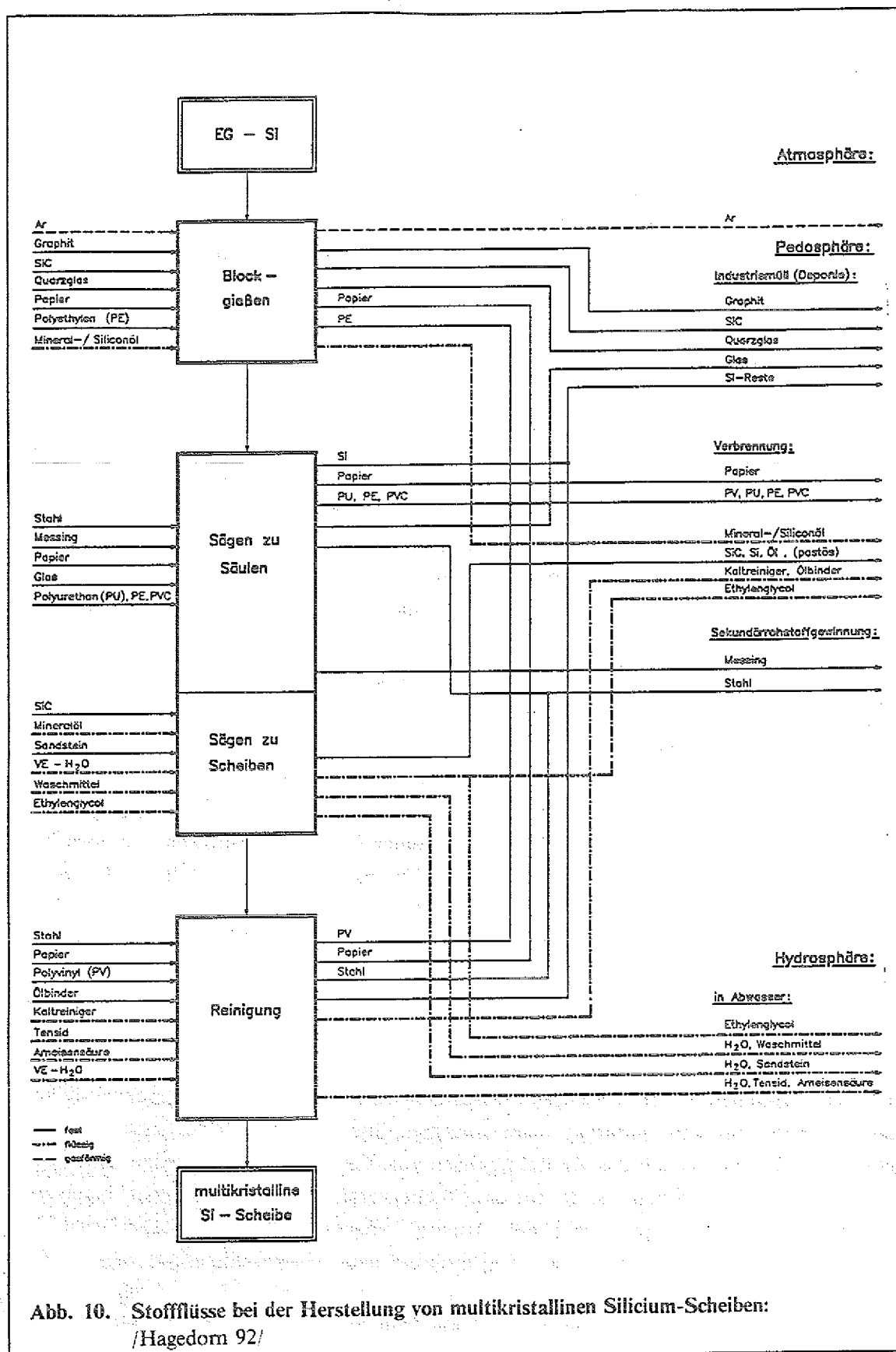
- Reinigung der Siliciumscheiben
- monokristalline Siliciumscheibe
- Anlagengröße:
 - 5 Tiegelziehanlagen (Chargengröße 60 kg);
 - 15 Innenloch-Sägen (ID-Sägen);
 - 1 Reinigungsstraße.

Dies führt zu einer Jahresproduktion von rund 45 t Si-Stäbe pro Jahr (= ca. 2,3 Mio Si-Scheiben pro Jahr) mit kontinuierlichem Betrieb bis Polyabscheidung, 4-Schicht-Betrieb für Tiegelziehen und 3-Schicht-Betrieb für ID-Sägen und Reinigen.

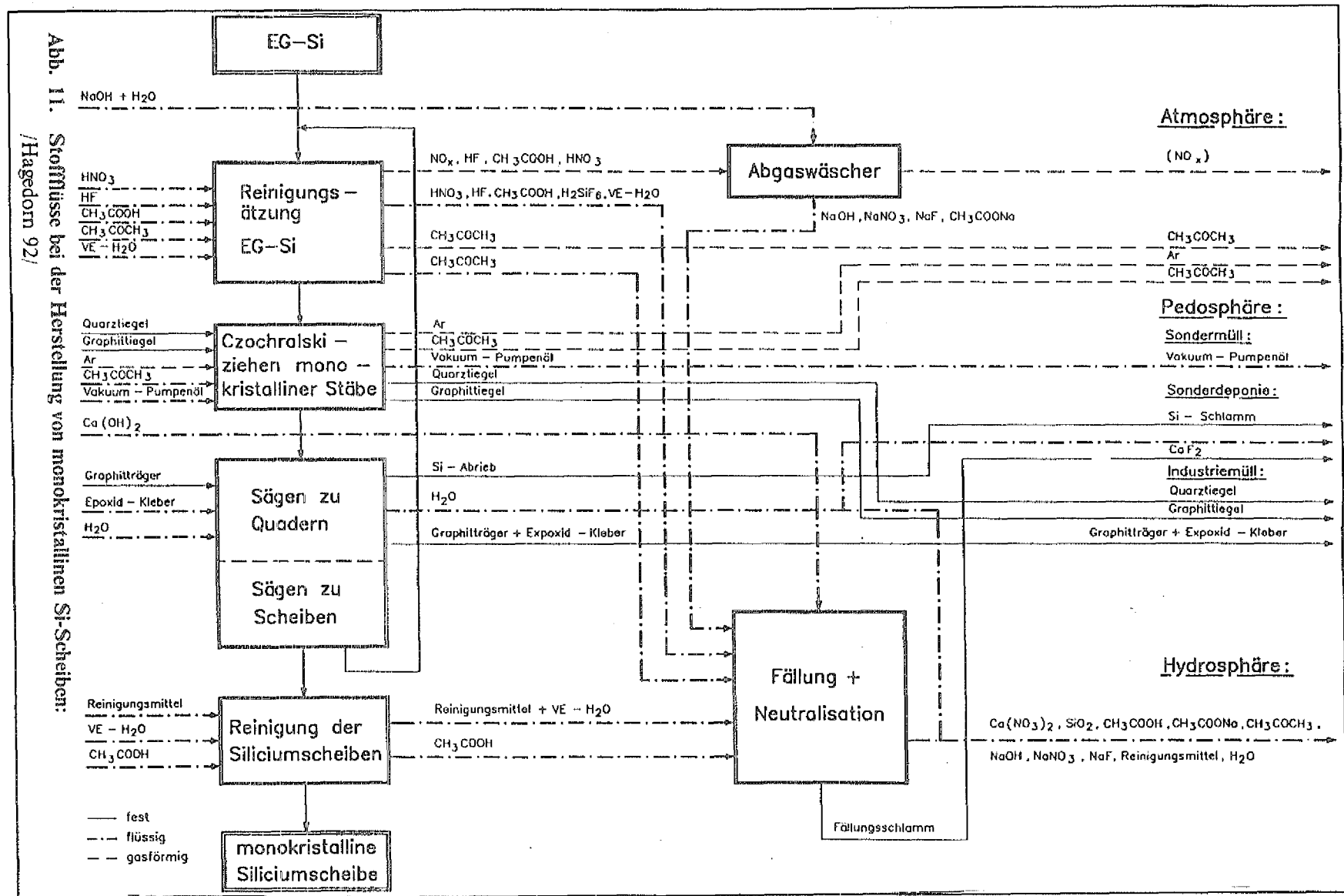
Tiegelziehen (Czochralski-Ziehen monokristalliner Stäbe):

Das Polysilicium wird in einer Schutzgasatmosphäre (Argon) unter reduziertem Druck (10 bis 20 mbar) aufgeschmolzen und aus der Schmelze werden nach dem Tiegelziehverfahren (Czochralski-Ziehverfahren) monokristalline Stäbe mit einem Durchmesser bis 130 mm und einer Länge bis ca. 1,5 m gezogen. Ein Tiegel aus Quarz wird mit Polysilicium einer Korngröße von 0,1 bis 7,5 cm gefüllt. Es wird ein Quarztiegel verwendet, da alle anderen Behältnisse bei Prozeßtemperaturen von ca. 1.450 °C und Ziehauern von mehreren Tagen des Silicium zu stark verschmutzen würden. Da Quarz bei Temperaturen oberhalb von 900 °C weich wird, stützt ein Behälter aus Graphit den Quarztiegel. Der Tiegel wird zum Aufschmelzen des Siliciums und zum Flüssighalten der Schmelze von einer elektrischen Graphitwiderstandsheizung erhitzt. Sobald das Silicium geschmolzen ist, wird ein Keimling an die Schmelzenoberfläche gebracht. Der Tiegel und der Keimling drehen sich entgegengesetzt. Zunächst wird der Keimling mit dem anwachsenden Siliciumkristall schnell gehoben. Bei einer Ziehgeschwindigkeit von etwa 240 mm/h wächst der Keim (Hals) schneller als die Versetzungen im Kristall, so daß nach üblicherweise 100 mm ein versetzungsfreier Kristall vorhanden ist. Der Hals hat hier einen Durchmesser von nur 4 bis 5 mm. Anschließend wird die Ziehgeschwindigkeit bei Stäben für die Photovoltaik-Anwendung auf 30 mm/h herabgesetzt, worauf der Stabdurchmesser bis auf 130 mm anwächst (Schulterbereich) und mit ca. 60 mm/h fertiggezogen.

Nach dem Erreichen der gewünschten Stablänge wird wiederum die Ziehgeschwindigkeit solange erhöht, bis kein Kontakt mehr zwischen Stab und Schmelze besteht. Dieses Ziehen eines Endkonus soll das Zurückwachsen von Versetzungen vermeiden. Im Tiegel verbleibt der Rest des Siliciums, der für eine Weiterverarbeitung verlorenggeht. Nach Beendigung des Ziehvorganges muß der Apparat abgekühlt werden. Dabei wird der Quarztiegel zerstört. Bei einem neuen Zug muß ein neuer Tiegel eingesetzt werden. Ein kontinuierliches Ziehen der Stäbe wird bislang nicht in der Produktion eingesetzt. Die qualitativen Stoffflüsse sind in Abb. 11 auf Seite 109 graphisch dargestellt.



/Hagedorn 92/



4.5.2.4 Herstellung von Solarzellen

Der Verfahrensschritt der Herstellung von Solarzellen kann als abgeschlossener Fertigungsprozeß charakterisiert werden, in dem aus den eingesetzten kristallinen Silicium-Rohscheiben opto-elektrisch funktionierende Solarzellen hergestellt werden, die als Grundbausteine in der anschließenden Modulfertigung Verwendung finden.

Auf die Silicium-Rohscheibe werden eine Reihe von chemischen und verfahrenstechnischen Prozessen angewandt. So zum Beispiel das Erzeugen eines elektrischen Feldes für die Ladungstrennung, das Anbringen von elektrisch leitenden Kontaktflächen an Vorder- und Rückseite für das Sammeln und Fortleiten des elektrischen Stromes oder die Verbesserung der optischen und elektrischen Eigenschaften des Silicium- Grundmaterials.

Herstellung von multikristallinen Solarzellen

Technische Daten

- Nennleistung: $P_N = 1,2 W_{peak}$ (bei $1000 W/m^2$, $25 ^\circ C$, AM 1,5)
- Zellenfläche: $100 cm^2$
- Scheibendicke: $350 \mu m$ (Einsatzwafer)

Anlagengrößen und Technologie können als typisch für eine Fertigung mit einer Jahresproduktion bis ca. $5 MW_{peak}$ angesehen werden.

Die Jahresproduktion der untersuchten Anlage beträgt rund 1 Mio Zellen pro Jahr (= ca. $1,2 MW_{peak}$) bei Ein-Schicht- Betrieb mit voller Kapazitätsausnutzung.

Nachfolgend ist die gesamte Prozeßkette, die in der Solarzellenfertigung multikristalliner Solarzellen durchlaufen wird, dargestellt und in die nachfolgend beschriebenen charakteristischen Einzelschritte aufgegliedert:

- multikristalline Si-Scheiben
- Reinigungsätzung
- Diffusion
- Oxidätzung
- Kantenätzung
- Siebdruck
- H_2 -Passivierung
- AR-Beschichtung
- Qualitätsprüfung
- multikristalline Si-Zellen

Die Stoffflüsse sind qualitativ in Abb. 12 auf Seite 112 graphisch dargestellt.

Herstellung von monokristallinen Solarzellen

Technische Daten

- Nennleistung: $P_N = 1,42 \text{ W}_{\text{peak}}$ (bei 1000 W/m^2 , 25°C , AM 1,5)
- Zellenfläche: 98 cm^2
- Scheibendicke: $450 \mu\text{m}$ (Einsatzwafer)

Anlagengrößen und Technologie können als typisch für eine Fertigung mit einer Jahresproduktion bis ca. $2 \text{ MW}_{\text{peak}}$ angesehen werden.

Die Jahresproduktion der analysierten Anlage beträgt rund 0,4 Mio Zellen pro Jahr (= ca. $0,6 \text{ MW}_{\text{peak}}$) bei Einschicht-Betrieb mit voller Auslastung.

Nachstehend ist die gesamte Prozeßkette, die in der Solarzellenfertigung monokristalliner Solarzellen durchlaufen wird, dargestellt und in die charakteristischen Einzelschritte aufgegliedert:

- Monokristalline Scheiben
- Damage-Ätzung
- Textur-Ätzung
- Rückseitenabdeckung
- Diffusion
- Phosphorglas-Ätzung
- Siebdruck
- Qualitätsprüfung
- Monokristalline Si-Zellen

Die Stoffmüsse sind in Abb. 13 auf Seite 113 graphisch dargestellt.

Abb. 12. Stoffflüsse bei der Herstellung multikristalliner Solarzellen:
/Hagedorn 92/

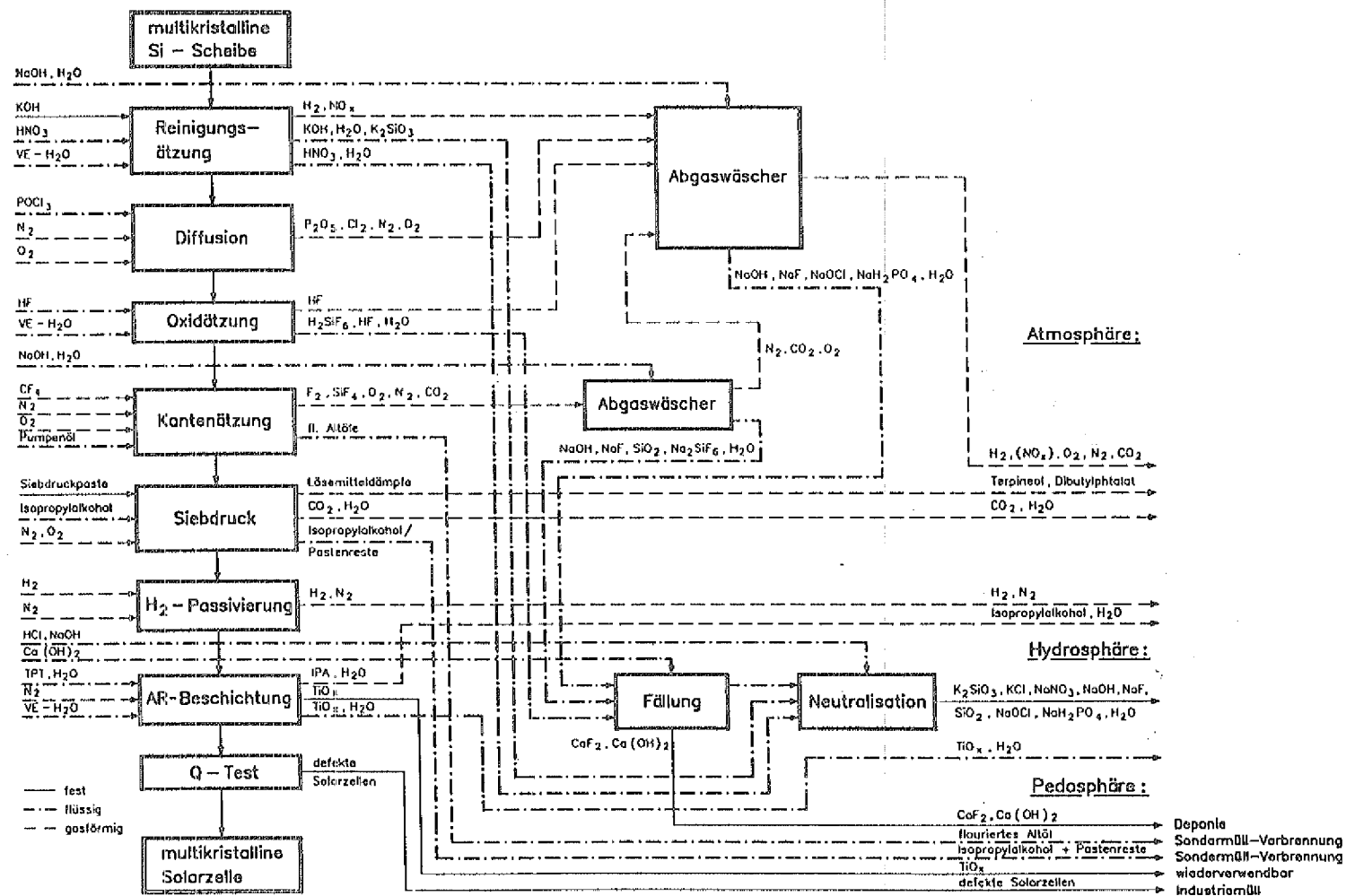
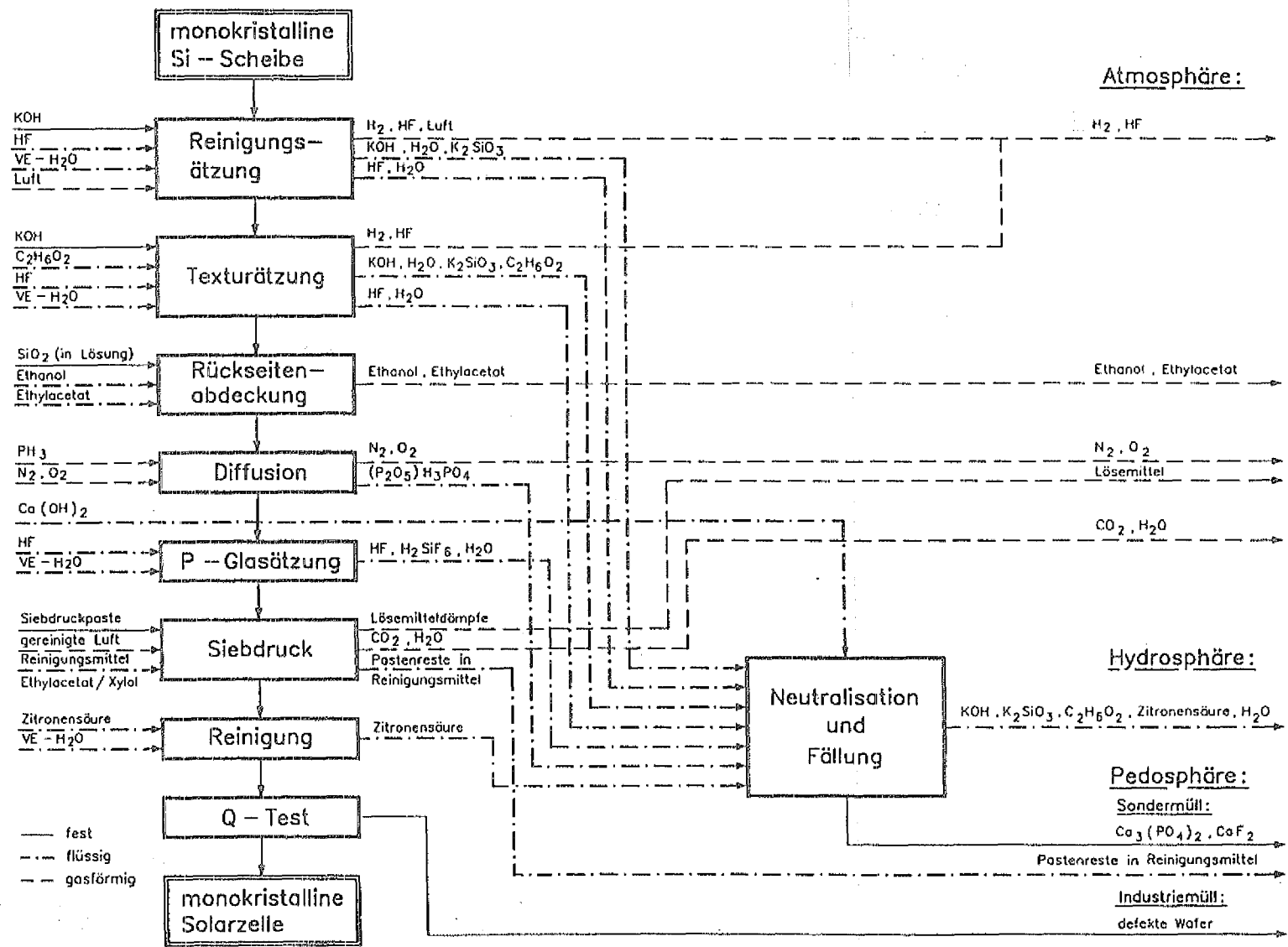


Abb. 13. Stoffflüsse bei der Herstellung monokristalliner Solarzellen:
/Hagedorn 92/



4.5.2.5 Herstellung von Photovoltaikmodulen

In der Bundesrepublik Deutschland erstrecken sich die Herstellungsaktivitäten (überwiegend im Pilotmaßstab) auf die Produktion von Photovoltaik-Modulen mit multi- und monokristallinem sowie amorphem Silicium als Basismaterial.

4.5.2.6 Herstellung von PV-Modulen mit multikristallinen Siliciumsolarzellen

Bei der Modulherstellung werden die opto-elektrisch funktionsfähigen Solarzellen in Modulen zu einem Verbund größerer Leistung zusammengeschlossen und gegen Umwelteinflüsse geschützt.

Ausgewählte Solarzellen werden zu einer Matrix zusammengestellt und durch Schweißen mit Verbinderstreifen elektrisch leitend verbunden. Die Zellenmatrix wird in EVA- Folie (Ethylen-Vinyl-Acetat-Folie) eingebettet und zusammen mit Vorder- und Rückseitenabdeckung unter Druck und Erwärmung zu einem Laminat gepreßt. Eine elektrische Anschlußverbindung wird angebracht. Die Montage eines Metallrahmens, der heute Standard für die meisten Anwendungsfälle ist, kann ggf. entfallen, wenn rahmenlose Module für den Einsatz in Kraftwerken spezifiziert werden.

Die untersuchten Module weisen die nachfolgend aufgelisteten Kenngrößen auf:

- Vorderseite und Rückseite aus Glasscheiben, Rahmen aus Edelstahl, multikristalline Silicium-Zellen in EVA-Folie eingebettet
- Nennwirkungsgrad
 $\eta_N = 12 \%$ (bei 1000 W/m^2 , 25°C , AM 1,5) Der Nennwirkungsgrad ist auf die Zellenfläche von $0,4 \text{ m}^2$ bezogen.
- Nennleistung
 $P_N = 48 \text{ W}_{\text{peak}}$ (bei 1000 W/m^2 , 25°C , AM 1,5)
- Modulfläche
 $1076 \times 462 \text{ mm}^2 = 0,5 \text{ m}^2$, $\eta (\text{Modul}) = 9,6 \%$
- Anlagengrößen und Technologie können als typisch für eine Fertigung mit einer Jahresproduktion bis ca. $5 \text{ MW}_{\text{peak}}$ angesehen werden.
Die untersuchte Jahresproduktion beträgt rund 25.000 Module pro Jahr (= ca. $1,2 \text{ MW}_{\text{peak}}$ pro Jahr) bei Ein-Schicht-Betrieb mit voller Kapazitätsauslastung

Für die Modulfertigung sind derzeit folgende Verfahrensschritte erforderlich:

- multikristalline Si-Solarzellen
- Herstellen der Zellenmatrix
- Folienschneiden
- Glaswaschen
- Fügeprozeß
- Modulwaschen
- Anschlußverbindung
- Rahmung
- Randbearbeitung
- Modultest

Die ein- und austretenden Stoffflüsse sind in Abb. 14 auf Seite 116 dargestellt:

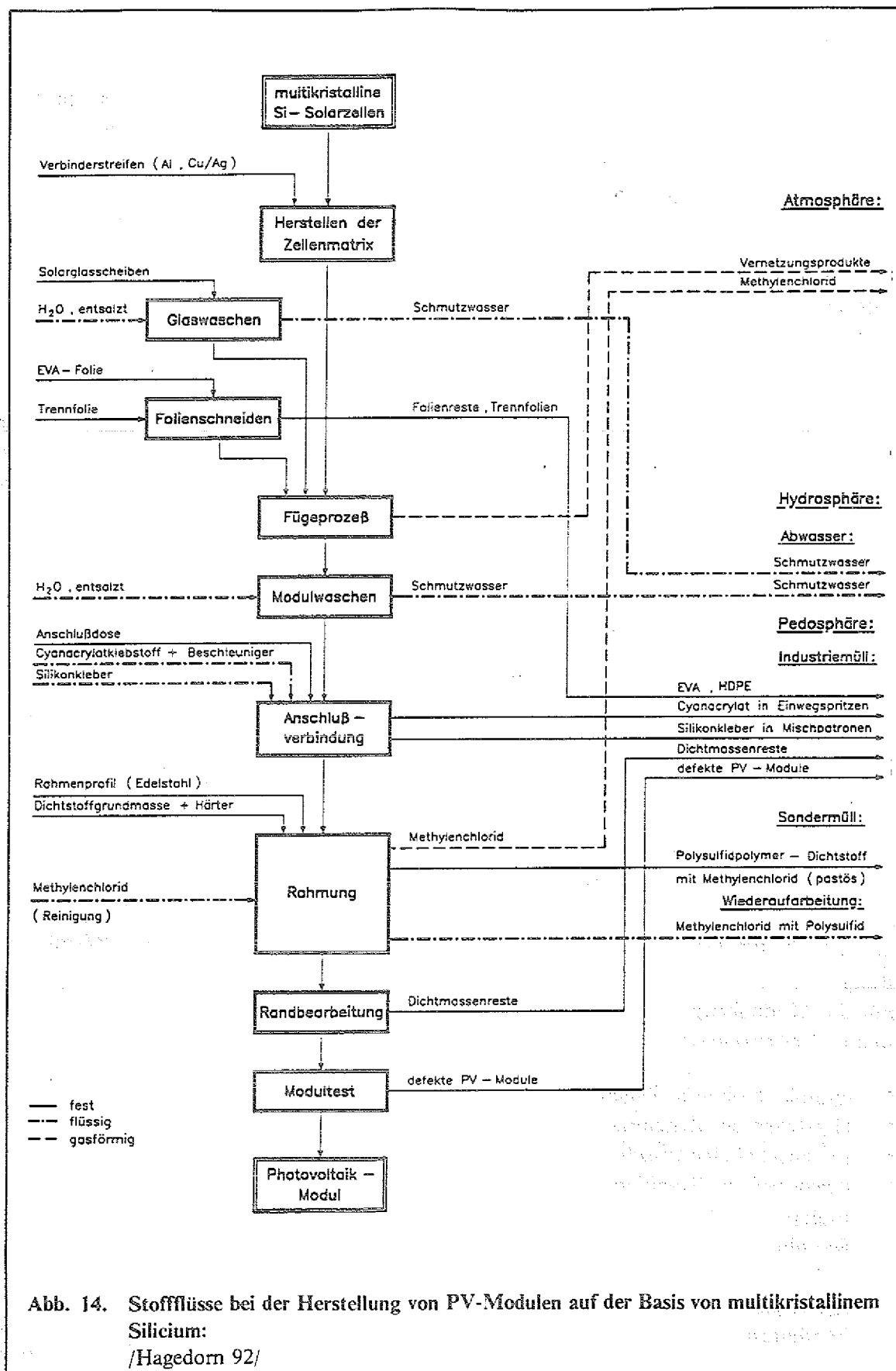


Abb. 14. Stoffflüsse bei der Herstellung von PV-Modulen auf der Basis von multikristallinem Silicium:
/Hagedorn 92/

Herstellung von PV-Modulen mit monokristallinen Silicium-Solarzellen

Für die Verwendung von monokristallinen Solarzellen in der Modulfertigung sprechen technologische Gründe, da aus ihnen PV-Module mit den höchsten Wirkungsgraden gefertigt werden können. Dagegen steht der aufwendige Vorprozeß der Kristallisation, dem nur wenig technologische und wirtschaftliche Entwicklungsmöglichkeiten eingeräumt werden.

Ob die Vorteile höherer Wirkungsgrade sich auf Dauer gegen die Nachteile höherer Produktionskosten im gesamtwirtschaftlichen Optimum für photovoltaische Kraftwerke durchsetzen werden, kann zur Zeit jedoch nicht beantwortet werden.

Die Herstellung von PV-Modulen mit monokristallinen Solarzellen ist im wesentlichen mit der Herstellung von Modulen mit multikristallinem Basismaterial vergleichbar. Die untersuchten Module weisen die nachfolgend aufgelisteten Kenngrößen auf:

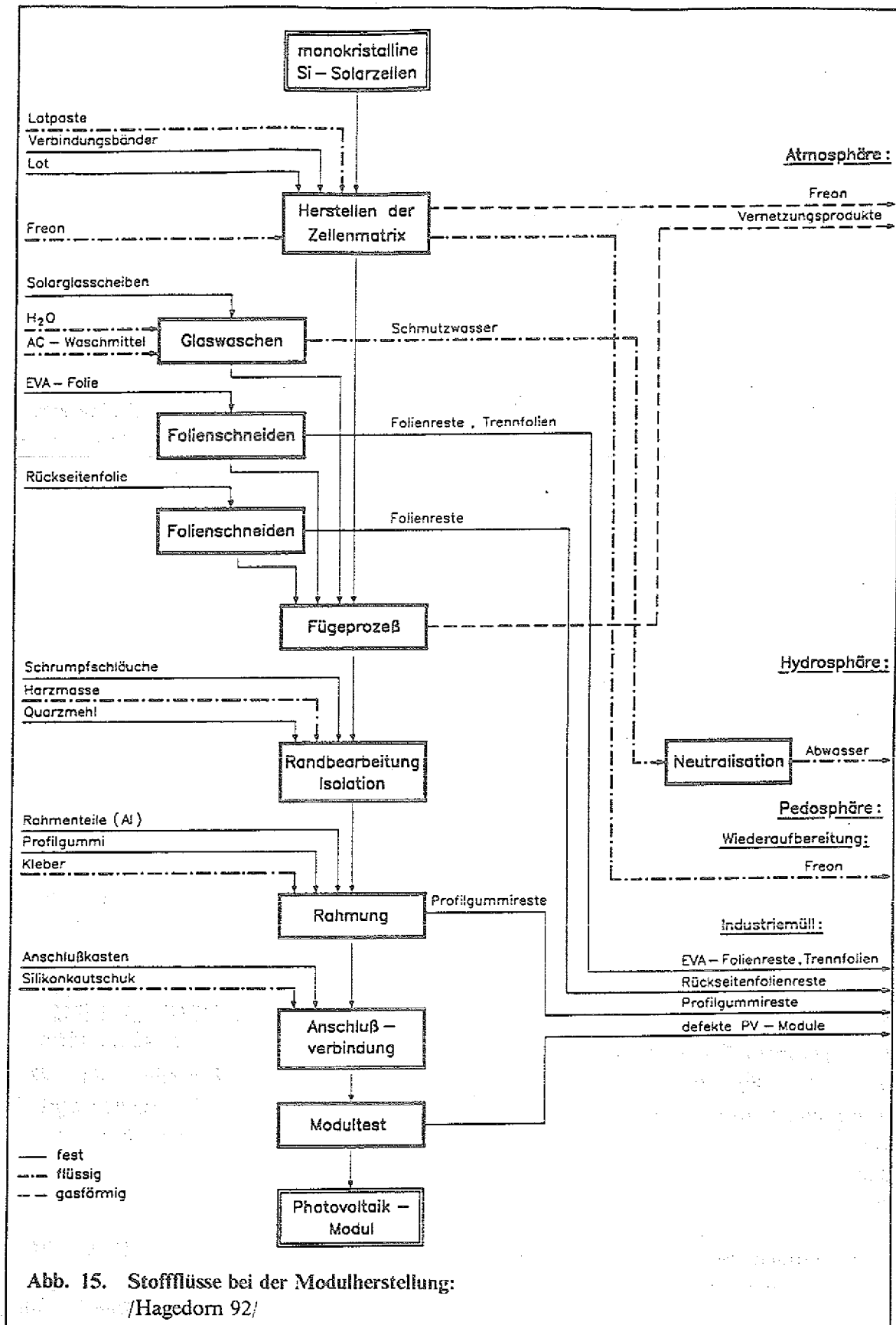
- Modulaufbau
Vorderseite aus Glasscheibe, Rückseite aus Folie, Rahmen aus Aluminium, monokristalline Silicium-Zellen in EVA-Folie eingebettet.
- Nennwirkungsgrad:
 $\eta_N = 14,2 \%$ (bei 1000 W/m^2 , 25°C , AM 1,5)
Der Nennwirkungsgrad ist auf die Zellenfläche von $0,35 \text{ m}^2$ bezogen
- Nennleistung:
 $P_N = 50 \text{ W}_{\text{peak}}$ (bei 1000 W/m^2 , 25°C , AM 1,5)
- Modulfläche:
 $964 \times 445 \text{ mm}^2 = 0,43 \text{ m}^2$
 $\eta (\text{Modul}) = 11,7 \%$

Anlagengrößen und Technologien können als typisch für eine Fertigung mit einer Jahresproduktion bis ca. $2 \text{ MW}_{\text{peak}}$ angesehen werden.

Die untersuchte Fabrikation hat eine Jahresproduktion von rund 12.000 Module pro Jahr (= ca. $0,6 \text{ MW}_{\text{peak}}$ pro Jahr) bei Ein-Schicht-Betrieb mit voller Kapazitätsauslastung

Für die Modulfertigung sind derzeit die im nachfolgenden Verfahrensablaufplan dargestellten Verfahrensschritte erforderlich (vgl. Abb. 15 auf Seite 118):

- monokristalline Si-Zellen
- Herstellen der Zellenmatrix (Löten)
- Folienschneiden (mechanisch)
- Glaswaschen (Reinigungsanlage)
- Fügeprozeß (Laminierofen)
- Randbearbeitung, Isolation
- Rahmung
- Anschlußverbindung
- Modultest
- monokristalliner PV-Modul



4.5.3 Auswahl alternativer Herstellungsverfahren für Silicium-Solarzellen

Neben der Untersuchung des Status quo der Herstellung von auf dem Markt angebotenen und in der Bundesrepublik Deutschland hergestellten Photovoltaik-Modulen sollten auch dazu alternative Herstellungsverfahren mitbetrachtet werden. Begleitend zum Aufbau dieser industriellen Produktion sind in den vergangenen Jahren sowohl national als auch international alternative Herstellungsverfahren erforscht und entwickelt worden.

Photovoltaik-Module müssen nicht unbedingt auf die Art und Weise hergestellt werden, die sich zwischenzeitlich in der industriellen Produktion etabliert hat, und deren Darstellung im Kap. 4.5.2 enthalten ist. In der Verfahrens- und Produktionstechnik sind auch eine Reihe alternativer Prozesse bekannt, die im Prinzip für jeden Hauptbilanzraum der oben beschriebenen Prozeßketten und auch darin enthaltene Verfahrensschritte eine andere Möglichkeit der Herstellung bieten. Neben den Möglichkeiten, die traditionellen Herstellverfahren zu modifizieren und zu verbessern, die in den verfahrenstechnischen Diskussionen aufgezeigt wurden, können durch die alternativen Herstellverfahren auch grundlegendere Veränderungen in den zur Anwendung kommenden Stoffen und auch in deren Quantität herbeigeführt werden.

Bei der Auswahl geeigneter Verfahren, die im Rahmen dieses Projekts untersucht werden sollten, waren drei Randbedingungen zu beachten. Die alternativen Verfahren sollten:

- einen ausreichenden Entwicklungsstand besitzen, der die Überführung in eine industrielle Produktion ermöglicht,
- in Konkurrenz zu den konventionellen Herstellverfahren eine Verbesserung, bzw. Verdrängung der Verfahren in Aussicht stellen und
- eine für die Zwecke der Untersuchung ausreichende Informationsbasis aufweisen, um in die Untersuchungen mitaufgenommen zu werden.

Von den alternativen Basismaterialien besitzt bei dem derzeitigen Kenntnis- und Entwicklungsstand in der Bundesrepublik Deutschland allein Kupfer-Indium-Diselenid ($\text{CuInSe}_2 = \text{CIS}$) das Potential, die ersten beiden Kriterien zu erfüllen.

Der umweltrelevante Stofffluß bei der Herstellung von CIS- Modulen ist Untersuchungsgegenstand einer umfangreichen Studie, die während der Laufzeit dieses Vorhabens zur Bearbeitung in Zusammenarbeit mit dem Hersteller an das Fraunhofer-Institut für Festkörpertechnologie in München vom BMFT vergeben wurde. Aus diesen Gründen wurde CIS als Basismaterial bei den alternativen Verfahren ausgeklammert, nicht zuletzt auch weil eine Erhebung derzeit noch etwas verfrüht gekommen wäre.

Somit standen auch bei den alternativen Technologien allein Verfahren zur Diskussion, die wiederum Silicium als Halbleitermaterial verwenden.

Trotz der Vielzahl der in Kap. 4.5.1 vorgestellten Bänder- und Plattenverfahren, die die Kristallisation mit einschließen und die entwickelt wurden, bleibt abzuwarten, ob diese Verfahren sich überhaupt gegen das neuentwickelte Drahtsägeverfahren durchsetzen werden können.

In der Herstellung von kristallinen Si-Solarzellen und großflächigen Modulen sind im Untersuchungszeitraum Pilotproduktionen angelaufen, die belastbare Informationen zu alternativen Konzepten in diesen Herstellbereichen liefern konnten. MIS-Inversionsschicht-Solarzellen und Module in Gießharztechnologie werden seit 1991 auf dem Markt angeboten und konnten ebenfalls einer Massenflußanalyse unterzogen werden. Alternative Verfahren zu Herstellung von Solarzellen werden vorwiegend zum Erreichen zweier Ziele entwickelt:

- Verringerung der Herstellkosten und
- Erhöhung der Wirkungsgrade.

In Relation zur Kostensituation während der Anfänge einer kommerziellen Herstellung von terrestrischen Photovoltaik- Bauelementen, waren die ersten Bestrebungen bei der Entwicklung alternativer Verfahren darauf konzentriert die Herstellkosten drastisch zu senken.

Bei der Suche nach kostengünstigeren Verfahren zeigte sich aber, daß mit diesen Verfahren Einbußen in den erzielbaren Wirkungsgraden der Solarzellen häufig nicht zu vermeiden sind. Bei Betrachtung der Wirtschaftlichkeit eines photovoltaischen Gesamtsystems unter Einschluß der flächenproportionalen Systemkosten geht dann der scheinbare Kostenvorteil wieder verloren. Aus dieser Erfahrung sind auch in jüngster Zeit verstärkt Versuche unternommen worden, die Herstellung von Solarzellen mit höchsten Wirkungsgraden in eine industrielle Produktion zu überführen. Die höheren Herstellkosten können vertreten werden, wenn sich bei Betrachtung des Gesamtsystems insgesamt Kostenvorteile ergeben. Die Herstellung von MIS-Inversionsschicht- Solarzellen stellt eine Erhöhung der Wirkungsgrade bei gleichzeitiger Verringerung der Herstellkosten in Aussicht.

4.5.4 Module mit MIS-Inversionsschicht-Solarzellen

4.5.4.1 Herstellung der Solarzellen

MIS-Inversionsschicht-Solarzellen besitzen bei Verwendung des gleichen Basismaterials in Form von multi- oder monokristallinen Si-Scheiben gegenüber herkömmlichen pn-Solarzellen ein modifiziertes Funktionsprinzip. Während herkömmliche Solarzellen auf kristalliner Silicium-Basis mit einem metallurgischen pn-Übergang arbeiten, wird der pn-Übergang bei der MIS-Inversionsschicht-Solarzelle induziert. Durch eine positive Flächenladung an der Grenzschicht zwischen Siliciumnitrid- und Siliciumoxidschicht an der Frontseite der Solarzelle wird an deren Oberfläche das p-leitende Basismaterial invertiert und somit die für die Trennung der Elektronen-Loch-Paare erforderliche Raumladungszone quasi "von außen" induziert. Die Strukturmerkmale einer MIS-Inversionsschicht-Solarzelle sind demnach:

- das p-dotierte Silicium-Basismaterial
- ein rückseitiger Elektrodenkontakt aus Aluminium
- die Inversionsschicht (induziert)
- die Siliciumoxidschicht

- das frontseitige Elektrodengrid aus Aluminium (gleichzeitig MIS-Kontakt)
- die Siliciumnitrid-Schicht (gleichzeitig Antireflexschicht)

Die MIS-I-Solarzellen gelten als aussichtsreiche Konkurrenz zu den herkömmlichen Solarzellen, weil mit wenigen Verfahrensschritten in einem kostengünstigen Zellenherstellungsprozeß Solarzellen mit vergleichsweise hohen Wirkungsgraden hergestellt werden können. Können die unter Laborbedingungen erreichten Wirkungsgrade von 14 bis 15 % mit monokristallinem und 12 bis 13 % mit multikristallinem Basismaterial in einen industriellen Fertigungsmaßstab übertragen werden, wäre die Möglichkeit für einen vorteilhaften Kompromiß zwischen Reduzierung der Herstellkosten und Erhöhung der Wirkungsgrade gegeben.

Technische Daten:

- Nennleistung:
 $P_N = 1,5 \text{ W}_{\text{peak}}$ (mono Si)
 $P_N = 1,3 \text{ W}_{\text{peak}}$ (multi Si)
 (bei 1000 W/m^2 , 25°C , AM 1,5)
- Zellenfläche:
 100 cm^2 (multi Si), 97 cm^2 (mono Si)
- Scheibendicke:
 $250 \mu\text{m}$, drahtgesägt

Anlagengröße und Technologie können als typisch für eine Fertigung mit einer Jahresproduktion bis ca. $5 \text{ MW}_{\text{peak}}$ angesehen werden.

Die Jahresproduktion der untersuchten Pilotfertigung beträgt rund 0,9 Mio Zellen pro Jahr (= ca. $1,1 \text{ MW}_{\text{peak}}$) (auf Basis multi-Si) bei zwei-Schicht-Betrieb mit voller Kapazitätsausnutzung.

Der Verfahrensschritt der Herstellung von MIS- Inversionsschicht-Solarzellen kann als abgeschlossener Fertigungsprozeß charakterisiert werden in dem aus den eingesetzten kristallinen Silicium-Rohscheiben opto- elektrisch funktionierende Solarzellen hergestellt werden, die als Grundbausteine in der anschließenden Modulfertigung Verwendung finden.

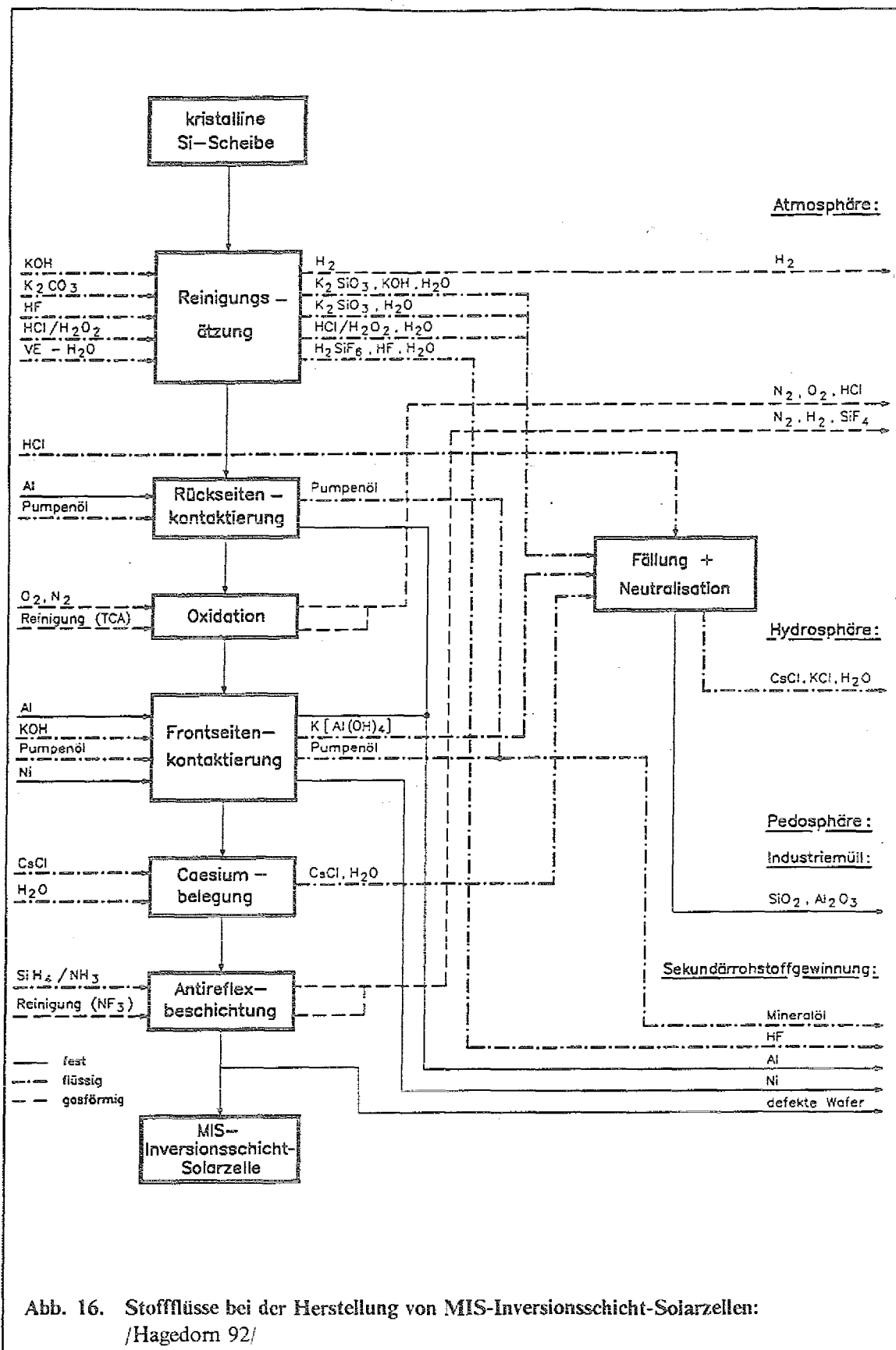
Auf die Silicium-Rohscheibe werden eine Reihe von chemischen und verfahrenstechnischen Prozessen angewandt. So zum Beispiel das Erzeugen eines elektrischen Feldes für die Ladungstrennung, das Anbringen von elektrisch leitenden Kontaktflächen an Vorder- und Rückseite für das Sammeln und Fortleiten des elektrischen Stromes oder die Verbesserung der optischen und elektrischen Eigenschaften des Silicium- Grundmaterials.

Nachfolgend ist die gesamte Prozeßkette, die in der Fertigung von MIS-Inversionsschicht-Solarzellen durchlaufen wird, dargestellt und in die charakteristischen Einzelschritte aufgliedert, die nachfolgend beschrieben werden.

- multikristalline Si-Wafer
- H_2 -Passivierung
- Reinigungsätzung
- Rückkontaktierung

- Erzeugen einer Siliciumoxidschicht
- Frontkontaktierung
- Cäsium-Belegung
- Antireflexbeschichtung
- MIS-I-Solarzelle

Die Stoffflüsse sind qualitativ in Abb. 16 auf Seite 123 graphisch wiedergegeben.



4.5.4.2 Herstellung der Module in Gießharztechnologie

Hersteller von PV-Modulen, die kristalline Silicium- Solarzellen einsetzen, verwenden üblicherweise Kunststofffolien auf EVA (Ethylenvinylacetat)-Basis zum Einbetten der Zellenmatrix. Die Zellenmatrix wird mit zwei Lagen EVA-Folie umschlossen und zusammen mit der Vorder- und Rückseitenabdeckung einem Laminierungsprozeß ausgesetzt.

Als alternatives Verfahren zu dieser üblicherweise angewendeten Laminierungstechnik wurde eine Gießharztechnik entwickelt, die anstelle der Kunststofffolien ein spezielles Gießharz (Acryl) als neuartiges Verkapselungsmaterial verwendet. Besonders beim Einsatz von MIS- Inversionsschichtsolarzellen erweist sich das Verfahren als vorteilhaft, da diese Solarzellenart gegen UV-Strahlung geschützt werden muß und geeignete UV-absorbierende Zusätze in einfacher Weise dem Gießharz beigemischt und verarbeitet werden können. Von dem neuartigen Verfahren werden Kostenvorteile erwartet. Gleichzeitig ergibt sich die Möglichkeit, reproduzierbar großflächige rahmenlose Module (bis zu 3 m²) für den Kraftwerkseinsatz herzustellen.

Die untersuchten Module weisen die nachfolgend aufgelisteten Kenngrößen auf:

- Modulaufbau
Vorderseite aus eisenarmen gehärteten Glasscheiben, MIS-Inversionsschicht-Solarzellen in Acryl-Gießharz eingebettet, Rückseite aus eisenhaltigen gehärteten Grünglasscheiben (Fensterglas)- alternativ: Rückseite aus Polyester/Tedlar- bzw. Al/Polyester/Tedlar-Folie, Randabdichtung mit hochschmelzendem Butyl-Kautschuk.
- Technische Daten:
 - Nennwirkungsgrad:
 $\eta_N = 15 \%$ für mono Si
 $\eta_N = 13 \%$ für multi Si
(bei 1000 W/m², 25 °C, AM 1,5)
Der Nennwirkungsgrad ist auf die Zellenfläche bezogen.
 - Nennleistung:
 $P_N = 230 \text{ W}_{\text{peak}}$ für mono Si
 $P_N = 200 \text{ W}_{\text{peak}}$ für multi Si
(bei 1000 W/m², 25°C, AM 1,5)
 - Modulfläche:
1,84 m²,
 η (mono) = 12,5 %, η (multi) = 10,9 %

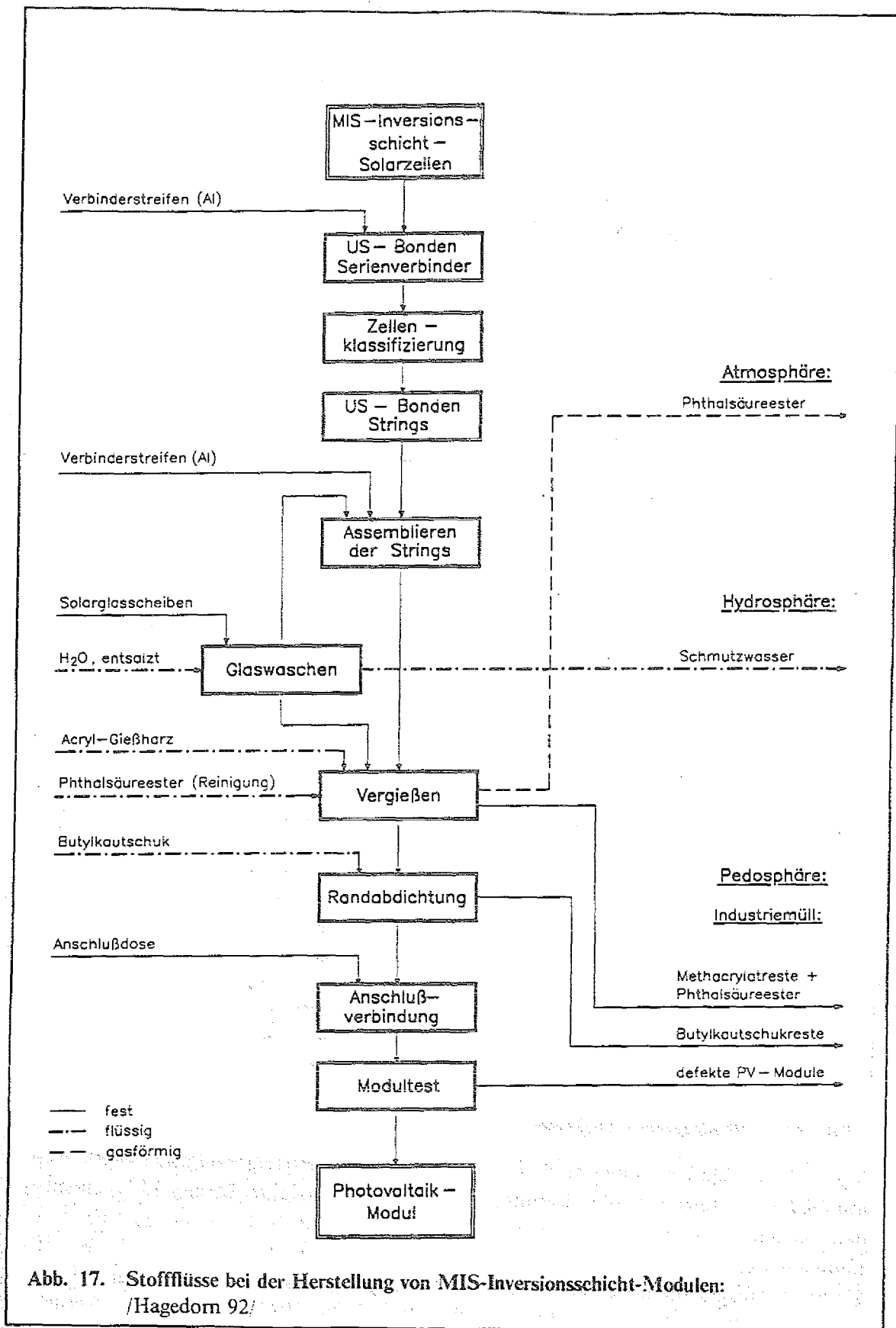
Anlagengrößen und Technologien können als typisch für eine Fertigung mit einer Jahresproduktion bis ca. 5 MW_{peak} angesehen werden.

Die Jahresproduktion der analysierten Pilotfabrikation beträgt rund 9000 m² Module pro Jahr (= 1 MW_{peak} pro Jahr) bei Zwei-Schicht-Betrieb mit voller Kapazitätsauslastung.

Für die Modulfertigung sind derzeit die nachfolgend dargestellten Verfahrensschritte erforderlich:

- MIS-I-Solarzellen
- Ultraschall (US)-Bonden von Serienverbindern (US = Ultraschall)
- Klassierung
- Herstellen von Strings (US-Bonden)
- Glaswaschen (Reinigungsanlage)
- Assemblieren der Strings
- Vergießen mit Acryl-Gießharz
- Randabdichtung
- Anschlußverbindung
- Modultest
- PV-Modul

Die gesamten Stoffflüsse dieses Prozesses sind qualitativ in Abb. 17 auf Seite 126 graphisch wiedergegeben.



4.6 Amorphe Silizium-Solarzellen

Die Beschreibung des Technologiestandes (Kap. 4.6.1) ist i.W. dem ersten Beitrag in /Forschungsverbund 92/ entnommen.

Die Detailanalyse der Herstellungsprozesse (Kap. 4.6.2) erfolgte im Projekt (vgl. Band 5 dieser Reihe):

„Umweltrelevante Masseneinträge bei der Herstellung verschiedener Solarzellentypen; eine vergleichende Analyse konventioneller und ausgewählter neuer Verfahren unter Berücksichtigung der Einsatzstoffe und Prozeßkette sowie der Entsorgungs- und Recyclingmöglichkeiten“

der Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE), München.

4.6.1 Technologie, Stand, Entwicklungsaussichten

Wie eingangs erwähnt, kommen derzeit kommerzielle amorphe Module nur auf Langzeitwirkungsgrade von etwa 5 %.

Neuere Entwicklungen sowohl bei kristallinen wie amorphen Siliziumsolarzellen haben im Labormaßstab bereits zu wesentlich höheren Wirkungsgraden geführt. Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über die wichtigsten in der Entwicklung befindlichen Si-Solarzellentechnologien.

Zellentyp	Wirkungsgrad Labor	Stabilität	Herstellungskosten	Wirkungsgrad käufl. Module
Monokristall. Silizium	sehr hoch 24.2 %	sehr gut	sehr hoch	15 %
Multikristall. Silizium	hoch 20 %	sehr gut	mittel	13 %
Amorphes Si Einzelzelle	mittel 12 %	niedrig	niedrig	5 %
Amorphes Si Stapelzelle	mittel 13 %	mittel	niedrig?	-

Tab. 42. Si-Solarzellen-Technologien

Man erkennt, daß bei einkristallinen Silizium-Höchstleistungszellen der Wirkungsgrad auf 24,2 % gesteigert werden konnte und bei amorphen Zellen bereits 13 % erzielt wurden. Neben den erzielten Wirkungsgraden spielen für die Nutzung der jeweiligen Technologien weitere Kriterien eine entscheidende Rolle: Produktionskosten, Stabilität und Umweltverträglichkeit. Für die in der Tabelle aufgeführten Optionen ergeben sich hierbei sehr unterschiedliche Gesichtspunkte. Während hohe Wirkungsgrade bei kristallinen Silizium mit hohen Produktionskosten erkaufte werden müssen, sind die zu erwartenden Kosten bei den Dünnschichttechnologien vergleichsweise niedrig. Das Kriterium Stabilität spricht insbesondere die bei heutigen amorphen Modulen auftretende Alterung an,

die bis zu 40 % betragen kann. Bei in der Entwicklung befindlichen amorphen Stapelzellen wird dieser Degradationsprozeß jedoch bereits auf 10 % reduziert.

Großflächige Dünnschicht-Module für terrestrische Anwendungen werden aufgrund ihrer relativ einfachen Herstellungstechnologie sowie ihres geringen Materialverbrauchs wesentlich kostengünstiger produziert werden können als die anderen erwähnten Solarzellenoptionen. Dünnschichttechnologien gestatten bei hohem Automatisierungsgrad und dem damit gegebenen inhärenten Kostenvorteil großflächige Beschichtungsverfahren. Hierbei werden durch geeignete Strukturierungsschritte einzelne Solarzellenstreifen untereinander verschaltet und zu Modulen integriert, so daß die für gewünschte Anwendungen vorgesehenen Ausgangsspannungen direkt bereitgestellt werden können. Zur Zeit werden bereits Module aus amorphem Silizium mit einer Fläche von $1,4 \text{ m}^2$ hergestellt. Zur besseren Ausnutzung des solaren Spektrums und damit zur Erzielung höherer Wirkungsgrade wird an der Entwicklung von Stapelzellen gearbeitet, die aus einer Serienschaltung von Einzelzellen mit unterschiedlicher Halbleiterbandlücke bestehen. Dünnschichtverfahren eignen sich besonders gut, durch sequentielle Abscheidung der Halbleiterschichten - wiederum in integrierter Weise - das Stapelkonzept zu realisieren.

Für die Realisierung von Stapelzellen werden Halbleiterschichten mit unterschiedlicher Bandlücke benötigt. Legierungen von amorphem Silizium mit Germanium besitzen kleinere, solche mit Kohlenstoff oder Stickstoff größere Bandlücken. In die amorphe Struktur können Legierungskomponenten günstiger eingebaut werden als dies bei dem starren Gitteraufbau einer kristallinen Struktur möglich ist. Im Vergleich zu den kristallinen Dünnschichtzellen aus II-VI Verbindungshalbleitern z.B. Heteroübergänge zwischen Cadmiumsulfid (CdS) und Cadmiumtellurid (CdTe) oder Kupferindiumdiselenid (CuInSe_2) kommen bei den Dünnschichtzellen auf der Basis von Silizium ökologisch unbedenkliche Halbleitermaterialien zum Einsatz. Amorphes Silizium und seine Legierungen finden im Bereich der großflächigen Elektronik (Faxgeräte, flache Bildschirme) immer stärkeren Einsatz. Der auf diesem Sektor stattfindende Forschungs- und Entwicklungsaufwand wird sich auch vorteilhaft auf die Weiterentwicklung und die Verbesserung der amorphen Solarzellen auswirken. Der hohe Entwicklungsstand der kristallinen Siliziumsolarzellen basiert zweifellos auf der Siliziumtechnologie der Elektronikindustrie.

Neben den beschriebenen positiven Gesichtspunkten sind für Dünnschichtzellen aus amorphen Schichten auch bislang nachteilige Materialeigenschaften zu nennen. Angesichts der Tatsache, daß amorphes Silizium mit seinen Legierungen eine neue Klasse von Halbleitermaterialien darstellt und damit nicht annähernd so gut erforscht ist wie das kristalline Silizium, sind die zur Zeit bestehenden Probleme mit Fragestellungen der Grundlagenforschung ebenso verbunden wie mit dem Entwicklungsstand verfügbarer Technologien. Damit stellen die amorphen Dünnschichtzellen eine echte wissenschaftliche wie technologische Herausforderung dar.

Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht insbesondere bei drei im folgenden beschriebenen Themenstellungen. Zum einen handelt es sich um das Verständnis und die Vermeidung der lichtinduzierten Degradation von amorphen Siliziumschichten und Einzelzellen. Bei den mit den bisherigen Depositionsmethoden, d.h. insbesondere durch plasmaunterstütztes CVD-Verfahren (Chemical Vapor Deposition) hergestellten

Schichten und Zellen tritt dieser Effekt auf, wenn auch offenbar in quantitativ unterschiedlicher Weise. Weiterhin ist eine Verbesserung der optoelektronischen Eigenschaften von Legierungen auf der Basis des amorphen Siliziums notwendig. Dies ist vor allem im Hinblick auf Stapelzellen ein wichtiges Anliegen. Schließlich gewinnt auch das Verständnis und die Verbesserung von Grenzflächen zunehmend an Bedeutung.

Eine zentrale Fragestellung für amorphe Siliziumsolarzellen stellt die lichtinduzierte Degradation dar, die auf einem von Staebler und Wronski beobachteten Effekt beruht. Hierbei nimmt die Photo- und Dunkelleitfähigkeit amorpher Siliziumschichten unter Beleuchtung ab. Grund hierfür ist die unter Beleuchtung auftretende Zunahme von Defektzuständen in der Bandlücke, durch die die Lebensdauer der photogenerierten Ladungsträger sowie die Dotierungseffizienz abnimmt. Diese Effekte machen sich ebenso nachteilig bei der Solarzelle bemerkbar und senken den Wirkungsgrad unter Beleuchtung. Die beobachtete Degradation kann durch moderate Temperaturerhöhung auf ca. 150 °C wieder rückgängig gemacht werden, so daß es sich also um einen reversiblen Vorgang handelt.

Obwohl der Staebler-Wronski Effekt in Schichten und Zellen in den letzten Jahren intensiv untersucht wurde und verschiedene Modellvorstellungen zu seiner Beschreibung vorliegen, ist es bislang noch nicht gelungen, seine Ursachen schlüssig nachzuweisen. Umfangreiche Ergebnisse liegen nur hinsichtlich der Wirkung vor, wie Art und energetische Lage der Defektzustände, Kinetik der Generations- und Ausheilprozesse etc. Im wesentlichen werden zur Zeit vier mögliche Ursachen diskutiert und ihre Auswirkungen untersucht. Einiges spricht dafür, daß es sich um einen intrinsischen Effekt des amorphen Netzwerks aus Silizium und Wasserstoff selbst handelt. In diesem Netzwerk ist die Bindungsstärke zwischen den Atomen nicht einheitlich, d.h. es treten schwächere Si-Si Bindungen auf, die sich z.B. in den Bandausläufern der elektronischen Zustandsdichte manifestieren. Bei der Rekombination lichtgenerierter Ladungsträger können solche Bindungen aufgebrochen und durch eine lokale Relaxation des Netzwerks oder durch Wasserstoff stabilisiert werden. Auch SiH- Bindungen können aufgebrochen werden. Weiterhin wird diskutiert, ob nicht schwache Si-Si Bindungen, die durch den Einbau von Verunreinigungsatomen oder strukturellen Inhomogenitäten hervorgerufen werden oder Bindungen von Si zu Verunreinigungsatomen aufbrechen. In diesem Fall würde es sich um einen extrinsischen Effekt handeln, der durch präparative Maßnahmen verhindert oder vermieden werden könnte. Ein weiterer neuerdings diskutierter Grund bezieht sich auf den Ladungszustand von vorhandenen sowie durch Beleuchtung generierter Defektzustände, der sich nachteilig auf den elektronischen Transport auswirken könnte.

Da die eigentliche Ursache des Degradationsprozesses noch nicht eindeutig bekannt ist, sind Forschungsstrategien und präparative Maßnahmen zur Zeit a priori noch nicht gegeben. Es wird jedoch beobachtet, daß sich bei der Degradation von Schichten und Zellen quantitative Unterschiede ergeben, die von den Prozeßparametern der Depositionsmethode abhängen oder auf unterschiedliche Wachstumsprozesse von amorphem Silizium bei verschiedenen Depositionsverfahren beruhen. Daher ist es von großer Bedeutung, neben dem zur Zeit üblichen plasmaunterstützten CVD-Prozeß alternative Depositionsverfahren zu entwickeln, die Wachstumsprozesse zu studieren und diese mit den Schicht- und Zelleneigenschaften zu korrelieren. Innerhalb des Projekts

"Photovoltaik" des Instituts für Schicht und Ionentechnik (ISI) der KFA Jülich werden diesbezüglich die "Hot Filament" Methode, das "Remote Plasma" Verfahren, das "Chemical Annealing" Verfahren sowie Plasma- CVD bei hohen Frequenzen untersucht. Weiterhin ist ein genaues Studium des Wasserstoffeinbaus und der Dynamik von Wasserstoff im amorphen Netzwerk notwendig, denn bei fast allen bisher diskutierten Degradationsmodellen nimmt Wasserstoff eine zentrale Rolle ein. Durch Legieren von amorphem Si mit Germanium, Kohlenstoff und Stickstoff kann die optische Bandlücke über einen weiten Bereich von ca. 1 eV bis etwa 4 eV variiert werden. Allerdings ergeben sich bisher für Legierungen wesentlich schlechtere optoelektronische Eigenschaften als für reines a-Si oder a-Ge. Diese verschlechterten opto-elektronischen Eigenschaften äußern sich z.B. in einem Absinken der Photoleitfähigkeit, in einer Verringerung der Dotiereffizienz eingebauter Donatoren und Akzeptoren und in einer generell erhöhten Dichte lokalisierter Zustände in der Bandlücke. Die Ursachen dieser Degradation sind noch nicht vollständig geklärt. Generell sind bei einer Plasmadeposition von amorphen Legierungen aus Gasgemischen von Hydriden wie Silan, German, Methan oder Ammoniak Probleme zu erwarten, weil die Hydride aufgrund unterschiedlicher Bindungsstärken unterschiedlich zersetzt werden. Dadurch können schichtbildende Radikale mit sehr unterschiedlichem Wasserstoffgehalt vorliegen.

Auch beim eigentlichen Schichtwachstum, einer Polymerisation unter Abgabe von molekularem Wasserstoff, werden die unterschiedlichen Wasserstoff-Bindungsenergien zu einem (auch lokal) unterschiedlichen Polymerisationsgrad führen. Schließlich werden sich bei einer Diffusion von Wasserstoff nach Schichtherstellung Wasserstoffatome vorzugsweise an Atome mit stärkerer Bindungsstärke anlagern. Alle drei Effekte führen dazu, daß bei Depositionsbedingungen typisch für a-Si:H der Wasserstoffgehalt der Schichten mit wachsendem N oder C Gehalt stark ansteigt während er mit wachsendem Ge Gehalt absinkt. Strukturdefekte, die durch eine zu hohe oder inhomogene Wasserstoffkonzentration verursacht werden, könnten die verschlechterten elektronischen Eigenschaften hervorrufen. Andere mögliche Ursachen liegen in der statistischen Natur der amorphen Legierungen, in denen neben Bindungen A-B auch Bindungen A-A und B-B auftreten mit der Folge (u.a.) von Potentialfluktuationen.

Ziel der geplanten Arbeiten muß deshalb sein, die Rolle des Wasserstoffs in den Legierungen besser zu verstehen und durch geänderte Depositionsverfahren bzw. mit neuen Prozeßgasen homogenere Schichten mit definiertem Wasserstoffgehalt herzustellen. Methoden wie "Hot Filament"-Deposition, "Remote Plasma"-Deposition, Vielschicht-Deposition, "Chemical Annealing" sollen diesem Ziel dienen.

Grenzflächen

Insbesondere bei schichtweise deponierten Solarzellen spielen Grenzschichten zwischen unterschiedlichen Materialien bzw. zwischen Materialien unterschiedlicher Dotierung eine wichtige Rolle. Bereits bei einfachsten Solarzellen auf der Basis von a-Si: (TCO/a-SiC:H(B)/a-Si:H/a-Si:H(P)/Metall)¹⁴ liegen vier solcher Grenzschichten vor,

¹⁴ TCO = Transparent conducting oxide;
B, P = Bor bzw. Phosphordotierung

die die elektrische Potentialverteilung und den generierten Stromfluß wesentlich beeinflussen können. Bei Stapelzellen kann sich die Zahl der Grenzflächen vervielfachen. Abgesehen davon, daß an den Grenzflächen sich die Materialzusammensetzung mehr oder weniger abrupt ändert, was zu Grenzflächenzuständen und zu unerwünschten Raumladungseffekten und Bandverbiegungen führen kann, können an den Grenzflächen chemische oder Interdiffusions-Prozesse auftreten. So könnte sich zwischen dem leitfähigen Oxid (TCO) und der a-SiC:H (B)(B) Schicht ein dünnes Siliziumoxid bilden, während am Metall-a-Si:H(P) Interface mit einer Metallsilizidbildung zu rechnen ist. Die physikalische und chemische Charakterisierung der Grenzflächen wird dadurch noch erschwert, daß aufgrund des Herstellungsprozesses mit der Anreicherung von Wasserstoff, Sauerstoff und anderen Substanzen an den Grenzschichten zu rechnen ist, und auch die Struktur der Schichten kann dort anders als im Volumen sein. Wärmebehandlung und Langzeitbelichtung können die Grenzschichten (chemisch und physikalisch) verändern.

Neben den grundsätzlichen Entwicklungsmöglichkeiten, die sich aus den beschriebenen Aspekten der Materialforschung ergeben, bestehen gute Aussichten, bereits mit den heute verfügbaren Technologien amorphe Siliziummodule mit stabilen Wirkungsgraden über 10 % zu produzieren. Bei dünneren Zellen ist das eingebaute elektrische Feld größer, die photogenerierten Ladungsträger werden schneller den Kontakten zugeführt, und die lichtinduzierte Degradation hat einen wesentlich geringeren Einfluß auf den Zelleneffizienzgrad. Werden zwei oder mehr Zellen mit unterschiedlicher Bandlücke aufeinander abgeschieden, so wird auch das Sonnenlicht vollständiger absorbiert, d.h. mehr Photonen des solaren Spektrums werden genutzt. Unter diesem Aspekt sind weltweit Stapelzellen in der Entwicklung. In Japan wurden bereits Doppelzellen aus amorphem Silizium hergestellt, die einen stabilen Wirkungsgrad von 10 % aufweisen. Im Falle eines Moduls einer amerikanischen Firma, bestehend aus Tripelzellen, wird bei einer Fläche von ca. 1000 cm² bereits ein stabiler Wirkungsgrad von über 9 % erreicht.

4.6.2 Beschreibung der betrachteten Prozeßketten

Solarzellen aus amorphem Silicium (a-Si) werden heute überwiegend im Kleinleistungsbereich (Uhren, Taschenrechner etc.) eingesetzt, aber es sind auch Photovoltaik-Module auf der Basis von amorphem Silicium mit Leistungen von 5 bis über 50 W auf dem Markt (vgl. Kapitel „Kristalline Silizium-Solarzellen“ auf Seite 85). Obwohl günstige Perspektiven für den Einsatz von amorphen Modulen sich eher in Spezialanwendungsbereichen ergeben, wie z.B. Fassadenmodule und Automobilschiebedächer, in denen die gegebene Substitutionsmöglichkeit des Substrats in Verbindung mit der Teiltransparenz der Module Vorteile bietet, ergeben, wurden für den Zweck der Studie sogenannte Leistungsmodule zur Stromerzeugung betrachtet. Diese konkurrieren mit Zellen und Modulen bei denen Silicium in kristalliner Form eingesetzt wird. Als einer der wesentlichen Vorteile der amorphen Technologie kann der geringe Materialeinsatz - die Siliciumschichten sind weniger als 1 µm stark - genannt werden. Nachteilig sind die im Verhältnis zur kristallinen Technologie geringeren Wirkungsgrade.

Der Herstellungsprozeß von amorphen PV-Modulen wurde im Rahmen dieser Studie als singulär abgeschlossener Prozeß ohne Vorstufen behandelt. Gegenüber der kristallinen Modultechnologie, bei der die Herstellung der Solarzellen und deren Ausgangsmaterial

von Bedeutung ist und untersucht wurde, ist bei der amorphen Technologie die Solarzellenherstellung integraler Bestandteil der Modulfertigung.

In der Bundesrepublik ist 1991 eine der wenigen industriellen Fertigungen für amorphe Silicium-Module angelaufen. Die Stoffbilanzen wurden aus Betriebsaufzeichnungen des Herstellers in Verbindung mit Planungsunterlagen ermittelt. Die untersuchten Module weisen die nachfolgend aufgelisteten Kenngrößen auf:

Vorderseite Glas, transparente Elektrode, amorphes Silicium, metallische Rückseiten-elektrode, EVA-Folie, Rückseitenglasscheibe

Technische Daten:

- Nennwirkungsgrad:
 $\eta_N = 6\%$ (bei 1000 W/m^2 , 25°C , AM 1,5)
Der Nennwirkungsgrad (nach Degradation) ist auf die Modulfläche von $0,55 \text{ m}^2$ bezogen
- Nennleistung:
 $P_N = 33 \text{ W}_{\text{peak}}$ (bei 1000 W/m^2 , 25°C , AM 1,5)
- Modulfläche:
 $570 \times 970 \text{ mm}^2 = 0,55 \text{ m}^2$

Anlagengrößen und Technologien entsprechen der analysierten Jahresproduktion von rund 28000 Modulen pro Jahr (= ca. $1,0 \text{ MW}_{\text{peak}}$ pro Jahr)

In der untersuchten Produktionsstätte soll zunächst eine Jahresproduktion von ca. $1 \text{ MW}_{\text{peak}}$ an amorphen Silicium- Modulen realisiert werden. Diese Produktionsrate gilt für einen projektierten Einschichtbetrieb mit 2000 h/a Betriebszeit.

Der Herstellungsprozeß wurde in geeignete Prozeßgruppen aufgegliedert. Diese Prozeßgruppen sind eine Zusammenfassung von einzelnen Prozeßschritten, die auf dem Weg zur Herstellung der Module durchlaufen werden:

- Glasscheibe (TLO-beschichtet)
- Qualitätskontrolle
- TLO-Strukturierung (TLO = transparente leitende Oxidschicht)
- Reinigung der Glassubstrate
- a-Si-Abscheidung im Glimmentladungsreaktor
- a-Si-Strukturierung
- Rückseitenkontaktierung durch Sputtern
- Metallstrukturierung
- Schneiden, Brechen, Schleifen und Reinigen der Substrate
- Kontaktieren und Herstellen der elektrischen Anschlüsse
- Verkapseln der Module mit Rückseitenglasscheibe
- Endkontrolle
- Amorphes PV-Modul

Die amorphe p/i/n-Schicht ¹⁵ wird auf ein Glassubstrat abgeschieden, wozu Glasscheiben verwendet werden, die bereits mit einer TLO-(transparente leitende Oxid- oder auch TCO- genannt) Schicht aus SnO_2 beschichtet sind. Die TLO- Beschichtung dient als transparente Frontelektrode. Sie ist rund 70 nm dick und besteht aus einer transparenten, leitfähigen Schicht aus Zinnoxid.

Durch eine geeignete Strukturierung zwischen den einzelnen Abscheideprozessen werden in der großflächigen Beschichtung Einzelzellen im Fertigungsprozeß integral verschaltet, um anwendungstechnisch geeignete Ausgangsdaten der Spannung am Modul zu erhalten. Es werden rahmenlose Module hergestellt, d.h. das beschichtete Glassubstrat wird zusammen mit einer Kunststoffolie und einer Glasscheibe zur Rückseitenabdeckung verbunden. Das vertriebsfertige Modul besitzt maximal eine Abmessung von 600 mm x 1000 mm.

Die in die Einzelprozesse ein- und austretenden Stoffflüsse sind qualitativ in Abb. 18 auf Seite 134 graphisch dargestellt.

¹⁵ i = intrinsisch, d.h. undotiert

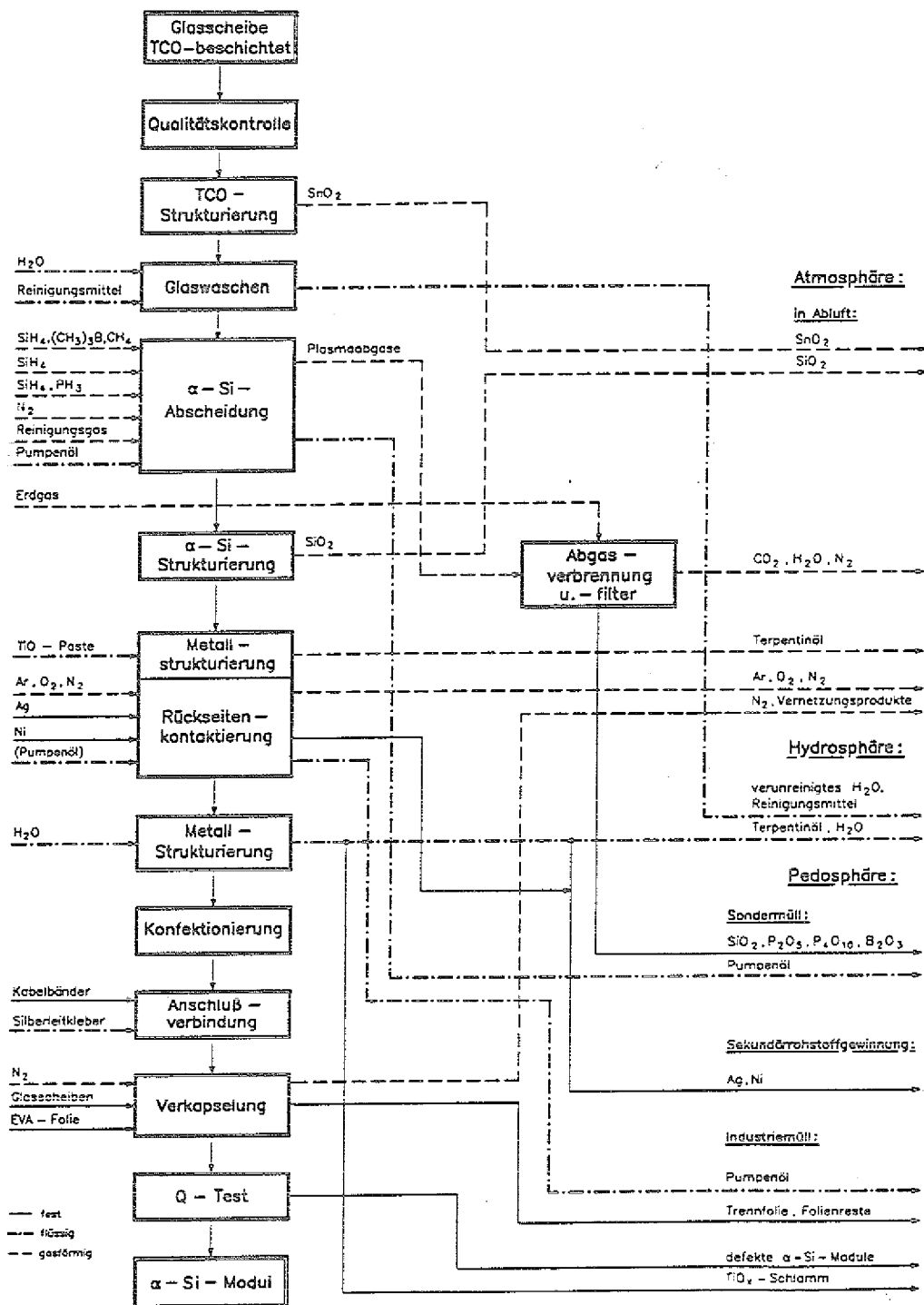


Abb. 18. Stoffflüsse bei der Herstellung amorpher Module:
/Hagedorn 92/

4.7 Darstellung der Gesamtprozeßketten der Silizium-Zellen

Wie die vorigen Kapitel zeigten, besteht die Herstellung der einzelnen Modultypen aus mehr oder weniger vielen Einzelschritten, jeder mit seiner Input- und Outputbilanz für die Scheiben-, Zellen- und Modulherstellung (im amorphen Fall nur Modulherstellung) ausgehend vom EG-Silizium, das neben seinen Emissionen auch noch die Umweltbelastung des MG-Siliziums "mitbringt".

Im Band 5 wurden daher auch die spezifischen Daten der Stoffinputs und -outputs sowie der Energiebeträge von PV-Anlagen auf der Basis der oben beschriebenen "klassischen" kristallinen und amorphen sowie der MIS-I-Solarzellen kompiliert zu Gesamtdaten für den PV-Teil von photovoltaischen Anlagen.

4.7.1 Bilanz der Stoffmengen

Die Gesamtvektoren an Input für die PV-Produktion und an Mengen für die an die einzelnen Umweltkompartimente abgegebenen bzw. zu entsorgenden Stoffe (in kg pro kW_{peak}) zeigen nachfolgende Tabellen Tab. 43 auf Seite 135 bis Tab. 52 auf Seite 145.

Die Annahmen bzw. technischen Daten zu den einzelnen Modultypen sind in den Kapiteln (bzw. Unterkapiteln) 4.5.2, 4.5.4 und 4.6.2 wiedergegeben.

Stoffe	Menge (kg / kW_{peak})
Fertigungsstoffe	
<i>Fest</i>	
Quarzkies (SiO_2)	361,3
Holzschnitzel	186,9
Glasscheiben	101,4
Kohle (LAC)	74,70
Holzkohle	49,80
Petrolkoks	49,80
Hartbranntelektroden	11,20
EVA-Folie	9,800
Anschlußdose aus Polyester	9,200
Edelstahlrahmen	8,900
KOH	7,000
Verbinderstreifen aus Al, Cu Ag	1,200
Siebdruckpaste A	0,400
Siebdruckpaste B	0,100
<i>Flüssig</i>	
HCl (100 %ig)	485,0
Dichtmasse (Polysulfidelastomer)	8,400
HF	0,900
Siliconkleber	0,800
HNO_3 (65 %ig)	0,300
Tetraisopropylitanat	0,200
POCl_3	0,050
Sekundenkleber (Cyanacrylat)	0,006
Beschleuniger	0,003
<i>Gasförmig</i>	
H_2	16,70
CF_4	0,060
Hilfs- und Betriebsstoffe	

Stoffe	Menge (kg / kW _{peak})
<i>Fest</i>	
SiC	11,30
Stahl	3,500
Papier	1,900
Kunststoffe ¹	1,900
Glas	1,700
Trennfolie aus Polyethylen	0,400
Graphit	0,300
Ölbinder	0,070
Schärfstein	0,040
Baumwolle	0,006
Messing	0,002
Diamant	0,0003
<i>Flüssig</i>	
Kühl- und Waschwasser	306,6
VE-H ₂ O ²	8,460
Mineral-/Siliconöl	8,800
Waschmittel, Kaltreiniger, Tenside, Ameisensäure	3,000
Methylenchlorid	2,100
Isopropylalkohol	0,400
Ethylenglykol	0,300
Pumpenöl	0,010
Glas-Reinigungsmittel	-
<i>Gasförmig</i>	
N ₂	930,1
O ₂	38,70
Argon	16,20
Hilfs- und Betriebsstoffe für Entsorgungsmaßnahmen in der Produktion	
<i>Flüssig</i>	
H ₂ O	43,80
Ca(OH) ₂	3,500
HCl	3,000
NaOH	1,500

Tab. 43. Gesamtbilanz der eintretenden Stoffmengen zur Herstellung multikristalliner Module:

/Band 5/

¹ Polyethylen, Polyurethan, Polyvinylchlorid u.a.

² Voll-Entsalzt

Stoffe	Menge (kg / kW _{peak})
Fertigungsstoffe	
<i>Fest</i>	
Quarzkies (SiO ₂)	266,9
Holzschnitzel	138,0
Glasscheiben	82,80
Kohle (LAC)	55,20
Aluminiumrahmen	38,00
Holzkohle	36,80
Petrokoks	36,80
Hartbrandelektroden	8,300
EVA-Folie	8,100
KOH	7,800
Profilgummi	7,200
Anschlußdose (Aluminium)	5,100
Rückseitenfolie	2,500
Verbindungsbändchen	0,600
Verbinderstreifen	0,500
Kunststoffwinkel	0,400
Lot	0,200
Quarzmehl	0,100
Schrumpfschläuche	0,020

Stoffe	Menge (kg / kW _{peak})
<i>Flüssig</i>	
HCl	363,3
C ₂ H ₆ O ₂	4,100
HF	1,300
Siebdruckpaste (Ag, Al)	0,300
Siebdruckpaste (Al)	0,100
Epoxid-Harzmasse	0,100
Kleber	0,100
Silikonkautschuk	0,100
Lotpaste	0,040
<i>Gasförmig</i>	
H ₂	12,40
O ₂	1,800
PH ₃	0,0004
Hilfs- und Betriebsstoffe	
<i>Fest</i>	
Quarztiegel	6,900
Graphit,-träger, -tiegel und Heizelemente	0,700
Trennfolie	0,400
Kunststoffe	0,060
Baumwolle	0,004
<i>Flüssig</i>	
Kühl- und Waschwasser	220,03
VE-H ₂ O	7,986
CH ₃ -COCH ₃	5,200
HNO ₃	1,600
Freon	1,300
CH ₃ COOH	0,800
HF	0,800
Zitronensäure	0,700
AC-Waschmittel (Tenside, Komplexbildner)	0,500
Reinigungsmittel	0,200
SiO ₂ -Emulsion	0,200
Epoxid-Kleber	0,080
Vakuum-Pumpenöl	0,00002
Ethylacetat, Xylol	-
Ethanol	-
Isopropanol	-
<i>Gasförmig</i>	
Argon	40,60
gereinigte Luft	17,50
N ₂	9,100
Hilfs- und Betriebsstoffe für Entsorgungsmaßnahmen in der Produktion	
<i>Fest</i>	
H ₂ O	23,00
Ca(OH) ₂	2,600
NaOH	0,700

Tab. 44. Gesamtbilanz der eintretenden Stoffmengen zur Herstellung monokristalliner Module:
/Band 5/

Stoffe	Menge (kg / kW _{peak})
Fertigungsstoffe	
<i>Fest</i>	
Glasscheiben (SnO ₂ -beschichtet)	143,9
Glasscheiben	143,9
EVA-Folie	8,200
Kupferbändchen	0,090
Rückkontakt (Ag)	0,060
Rückkontakt (Ni)	0,020
<i>Gasförmig</i>	
Silan (SiH ₄)	0,200
Methan (CH ₄)	0,003
H ₂	0,0001
Phosphin (PH ₃)	0,0001
Trimethylbor (TMB) ((CH ₃) ₃ B)	0,00005
Hilfs- und Betriebsstoffe	
<i>Fest</i>	
Trennfolie (HD-Polyethylen)	0,500
<i>Flüssig</i>	
VE-H ₂ O	848,5
Paste (TiO)	0,100
Waschmittel	0,090
Pumpenöl	0,080
Silberleitleber (Ag)	0,030
<i>Gasförmig</i>	
N ₂	90,90
Ar	0,200
O ₂	0,008
Hilfs- und Betriebsstoffe für Entsorgungsmaßnahmen in der Produktion	
<i>Gasförmig</i>	
Luft	1.515
Druckluft	2,700
CH ₄	0,900

Tab. 45. Gesamtbilanz der eintretenden Stoffmengen zur Herstellung amorpher Module:
/Band 5/

Stoffe	Menge (kg / kW _{peak})
Fertigungsstoffe	
<i>Fest</i>	
Glasscheiben (3 mm)	138.000
Acrylgießharz	13.8000
Verbinderstreifen	0.09200
Dichtmasse (Butylkautschuk)	1.85000
Anschlußdose Aluminium	2.00000
Cäsiumchlorid Quarzkies	1.62000
Holzkohle	0.00650
Kohle (Low ash coal)	346.800
Petrolkoks	47.8000
Holzschnitzel	71.7500
Hartbranntelektrode	478.000
	179.400
	10.7600
<i>Flüssig</i>	
Kaliumhydroxid	4.0500
Kaliumcarbonat	8.1000
Fluorwasserstoff	0.8100
Chlorwasserstoff	1.2150
Wasserstoffperoxid	2.4300
<i>Gasförmig</i>	
Wasserstoff	16.155
Silan	0.0162
Ammoniak	0.0810
Chlorwasserstoff	465.70
Hilfs- und Betriebsstoffe	
<i>Fest</i>	
Nickelmasken	0.0729
Graphit	0.3402
Kunststoffe	1.8710
Baumwolle	0.0051
Glas	1.6160
Siliziumcarbid	10.890
Papier	1.7860
Messing	0.0017
Diamant	0.0003
Stahl	3.4020
Ölbinder	0.0595
Schärfsteine	0.0340
<i>Flüssig</i>	
Wasser (entsalzt)	12168.
Phthalsäureester	0.3000
Kaliumhydroxid	2.4300
Kühl-/Waschwasser	294328.
Mineral- Siliconöl	8.4200
Ethylenglykol	0.2550
Waschmittel, Kaltreiniger, Tensid, Ameisensäure	2.8920
Ölbinder	0.0595
<i>Gasförmig</i>	
Stickstoff	56.700
Sauerstoff	16.200
Ätzgas (TCA)	0.0004
Ätzgas (NF3)	0.0243
Argon	15.564

Tab. 46. Gesamtbilanz der eintretenden Stoffmengen zur Herstellung
MIS-I-Multi-Module:
/Band 5/

Stoffe	Menge (kg / kW _{peak})
Fertigungsstoffe	
<i>Fest</i>	
Glasscheiben (3 mm)	120.000
Acrylgießharz	12.0000
Verbinderstreifen	0.08000
Dichtmasse (Butylkautschuk)	1.60870
Anschlußdose Aluminium	1.73900
Cäsiumchlorid Quarzkies	1.40900
Holzkohle	0.00563
Kohle (Low ash coal)	259.080
Petrolkoks	35.7360
Holzschnitzel	53.6040
Hartbrannteilektrode	35.7360
	134.010
	8.04000
<i>Flüssig</i>	
Kaliumhydroxid	3.5220
Kaliumcarbonat	7.0435
Fluorwasserstoff	0.7043
Chlorwasserstoff	1.0565
Wasserstoffperoxid	2.1130
<i>Gasförmig</i>	
Wasserstoff	12.051
Silan	0.0141
Ammoniak	0.0704
Chlorwasserstoff	350.90
Hilfs- und Betriebsstoffe	
<i>Fest</i>	
Nickelmasken	0.0634
Quarzziegel	6.6560
Graphittiegel	0.1479
Graphitheizelement	0.0074
Graphitträger	0.3698
Graphit	0.0592
Kunststoffe	0.1161
Baumwolle	0.0037
<i>Flüssig</i>	
Wasser (entsalzt)	11270.
Phthalsäureester	0.2610
Kaliumhydroxid	2.1130
Kühl-/Waschwasser	212085.
Salpetersäure	1.5530
Fluorwasserstoff	0.8135
Essigsäure	5.0290
Methylacetat	0.7690
Vakuumpumpenöl	0.00002
Epoxid-Kleber	0.0739
Reinigungsmittel	0.2220
<i>Gasförmig</i>	
Stickstoff	49.300
Sauerstoff	14.087
Ätzgas (TCA)	0.0004
Ätzgas (NF3)	0.0211
Argon	39.197

Tab. 47. Gesamtbilanz der eintretenden Stoffmengen zur Herstellung
MIS-I-Mono-Module:
/Band 5/

Stoffe	Menge	Einheit
Abprodukte		
SILIZIUMTETRACHLORID	3.0319	t
SILIZIUMOXID-STAUß	0.6332	t
TRICHLORSILAN	0.3885	t
WASSERSTOFF	0.1132	t
SI-HALTIGE SCHLACKE	0.0278	t
Abgabe der Reststoffe an		
Atmosphäre		
STICKSTOFF	6.30510	t
KOHLENDIOXID	5.06780	t
WASSER	1.43590	t
SAUERSTOFF	0.26240	t
ARGON	0.10980	t
WASSERSTOFF	0.06980	t
SCHWEFELDIOXID	0.02370	t
STICKOXIDE	0.01695	t
SILIZIUMOXID-STAUß	0.00678	t
METHYLENCHLORID	0.00203	t
KOHLLENMONOXID	0.00136	t
ISOPROPYLALKOHOL	0.67790	kg
TERPINOEL/DIBUTYLPHTALAT	0.67790	kg
SCHWEFELWASSERSTOFF*	0.67790	kg
FLUOR*	0.61010	kg
VERBRENNUNGSPRODUKTE	0.20340	kg
Hydrosphäre		
<i>direkt abgegeben:</i>		
WASSER	2114.50	t
CHLORWASSERSTOFF	0.24540	t
KALIUMCHLORID	0.04140	t
KALIUMSILOXAN	0.02170	t
NATRIUMHYDROXID	0.00746	t
NATRIUMNITRAT	0.00271	t
NATRIUMFLUORIT	0.00136	t
NATRIUMOXICHLORIT	0.33900	kg
NATRIUMDIHYDROPHOSPHAT	0.27120	kg
SILIZIUMOXID-STAUß	0.02712	kg
TITANOXIDE	0.02034	kg
<i>In Abwasserreinigung abgegeben:</i>		
ABWASSER	22.264	t
KIESELSÄURE	58.300	kg
METALLCHLORIDE	32.500	kg
WASCHMITTEL, TENSIDE, AMEISENSÄURE	20.300	kg
SANDSTEIN	0.2700	kg
Pedosphäre		
<i>In Sondermüll:</i>		
SILIZIUMCARBID	0.07660	t
MINERAL-SILIKONOEL	0.05970	t
PAPIER	0.01290	t
CALZIUMHYDROXID	0.01220	t
CALZIUMFLUORID	0.01150	t
POLYURETHAN, POLYVINYLCHLORID	0.00680	t
ISOPROPYLALKOHOL - PASTENRESTE	0.00270	t
POLYSULFIDELASTOMER	0.00270	t
ETHYLENGLYCOL	0.00210	t
OELBINDER	0.40680	kg
POLYETHYLEN	0.33898	kg
KUNSTSTOFFE	0.20340	kg
FLUORIERTE ALTOELE	0.06780	kg

Stoffe	Menge	Einheit
<i>in Industriemüll:</i>		
SI/SIC	0.10510	t
GLAS	0.01150	t
DEFEKTE PV MODULE	0.01020	t
DICHTMASSENRESTE	0.00476	t
EVA-FOLIENRESTE	0.00339	t
DEFEKTE WAFER	0.00271	t
TRENNFOLIE (HD-PE)	0.00271	t
GRAPHIT	0.54240	kg
TITANOXIDE	0.27120	kg
SILICONKLEBER	0.13560	kg
BAUMWOLLE	0.03390	kg
SILIZIUMOXIDE	0.02720	kg
CYANAKRYLATKLEBSTOFF	0.01360	kg
<i>zur Wiederaufarbeitung:</i>		
METHYLENCHLORID MIT POLYSULFIDELASTOMEREN	0.0136	kg
<i>in Sekundärrohstoffgewinn:</i>		
STAHLSCROTT	0.00814	t
MESSING	0.01356	kg

Tab. 48. Gesamtbilanz der austretenden Stoffmengen bei der Herstellung multikristalliner Module:

Mengen bezogen auf die Fertigung von 1 t Modul

147.5 kg/kw_p

/Band 5, S. 211,212/

Stoffe	Menge	Einheit
Abprodukte		
SILIZIUMTETRACHLORID	2.1932	t
SILIZIUMOXID-STAU	0.4582	t
TRICHLORSILAN	0.2809	t
WASSERSTOFF	0.0896	t
SI-HALTIGE SCHLACKE	0.0206	t
Abgabe der Reststoffe an		
<i>Atmosphäre</i>		
KOHLENDIOXID	3.66600	t
WASSER	1.03850	t
ARGON	0.26960	t
WASSERSTOFF	0.09090	t
STICKSTOFF	0.06040	t
SCHWEFELDIOXID	0.01726	t
STICKOXIDE	0.01195	t
SILIZIUMOXID-STAU	0.00465	t
KOHLENMONOXID	0.00133	t
FREON	0.00133	t
LOESEMITTELDAEMPFE (ETHANOL/ETHYLACETAT)	0.66400	kg
SCHWEFELWASSERSTOFF	0.59760	kg
FLUOR	0.59760	kg
ACETON	0.53120	kg
FLUORWASSERSTOFF	0.46480	kg
LOESEMITTELDAEMPFE (TERPINOL)	0.26560	kg
VERBRENNUNGSPRODUKTE	0.26560	kg
SAUERSTOFF	0.19920	kg
<i>Hydrosphäre</i>		

Stoffe	Menge	Einheit
<i>direkt abgegeben:</i>		
WASSER	1514.263	t
CHLORWASSERSTOFF	0.176630	t
ESSIGSÄURE	0.033860	t
KALIUMHYDROXID	0.032540	t
C ₂ H ₆ O ₂	0.027220	t
KALIUMSILOXAN	0.027220	t
KALZIUMNITRAT	0.013280	t
ACETON	0.004650	t
ZITRONENSÄURE	0.004650	t
NATRONLAUGE	0.003320	t
AC-WASCHMITTEL	0.003320	t
REINIGUNGSMITTEL	0.001330	t
NATRIUMNITRAT	0.664000	kg
NATRIUMFLUORID	0.664000	kg
NATRIUMACETAT	0.664000	kg
SILIZIUMOXID	0.199200	kg
<i>in Abwasserreinigung abgegeben:</i>		
ABWASSER	16.10	t
KIESELSÄURE	42.50	kg
METALLCHLORIDE	25.23	kg
<i>Pedosphäre</i>		
<i>in Sondermüll:</i>		
SILIZIUMABRIEB (SCHLAMM)	0.05450	t
KALZIUMFLUORID	0.02660	t
EPOXIT-KLEBER	0.66400	kg
PE	0.26560	kg
PTFE-IT	0.13280	kg
PASTENRESTE	0.02660	kg
KALZIUMSULFAT	0.01328	kg
VAKUUM-PUMPENÖL	0.13280	g
<i>in Industriemüll:</i>		
QUARZTIEGEL	0.045800	t
DEFEKTE PV-MODULE	0.009960	t
SI-RESTE	0.005312	t
GRAPHIT	0.003984	t
EVA-FOLIENRESTE	0.003320	t
DEFEKTE WÄVER	0.002656	t
TRENNFOLIE	0.002656	t
PROFILGUMMIRESTE	0.001992	t
RÜCKSEITENFOLIENRESTE	0.664000	kg
BAUMWOLLE	0.066400	kg
<i>zur Wiederaufarbeitung:</i>		
FREON	7.304	kg

Tab. 49. Gesamtbilanz der austretenden Stoffmengen bei der Herstellung monokristalliner Si-Module:

Mengen bezogen auf die Fertigung von 1 t Modul

150.6 kg/kW_p

/Band 5 S.213, 214/

Stoffe	Menge	Einheit
Abgabe der Reststoffe an		
<i>Atmosphäre</i>		
STICKSTOFF	0.32670	t
KOHLENDIOXID	0.00899	t
WASSER	0.00827	t
ARGON	0.71890	kg
LOESEMittel (TERPENTINOEL)	0.14378	kg
SAUERSTOFF	0.02876	kg
<i>Hydrosphäre</i>		

Stoffe	Menge	Einheit
<i>direkt abgegeben:</i>		
WASSER	3.0499	t
WASCHMITTEL	0.3235	kg
PASTE (TERPENTINOEL)	0.0216	kg
<i>Pedosphäre</i>		
<i>in Sondermüll:</i>		
SILIZIUMOXID	0.001438	t
PUMPENOEL	0.287600	kg
PHOSPHORPENTOXID (II/V)	0.251600	g
DIBORTRIOXID	0.107800	g
PHOSPHORPENTOXID (IV/X)	0.071890	g
<i>in Industriemüll:</i>		
DEFEKTE PV-MODULE	0.060000	t
TRENNFOLIE (HDPE)	0.001797	t
TITANOXID-SCHLAMM	0.215670	kg
<i>in Sekundärrohstoffgewinn:</i>		
SILBER	0.07189	kg
NICKEL	0.03595	kg

Tab. 50. Gesamtbilanz der austretenden Stoffmengen bei der Herstellung amorpher Si-Module: :
Mengen bezogen auf die Fertigung von 1 t Modul
278.2 kg/kW_p
/Band 5 S. 215/

Stoffe	Menge	Einheit
Abprodukte		
Siliziumdioxid	0.56280	t
Siliziumhaltige Schlacke	0.02480	t
Abgabe der Reststoffe an		
<i>Atmosphäre</i>		
SILIZIUMOXID-FEINSTAUB	6.0100	kg
KOHLENDIOXID	4.5030	t
WASSER	1.2759	t
SCHWEFELDIOXID	21.010	kg
SCHWEFELWASSERSTOFF	0.7505	kg
KOHLENMONOXID	1.5010	kg
FLUOR	0.7505	kg
STICKOXIDE	15.010	kg
WASSERSTOFF	63.925	kg
ARGON	97.680	kg
HCL/MECL/WASSER/KOHLENDIOXID	0.0025	kg
STICKSTOFF/SILIZIUMTETRAFLUORID	0.1330	kg
STICKSTOFF-SAUERSTOFF	457.50	kg
DIMETHYLPHTHALAT	0.0019	kg
<i>Hydrosphäre</i>		
<i>direkt abgegeben:</i>		
KUEHLWASSER	1827.44	t
CHLORWASSESTOFF	217.780	kg
CAESIUMCHLORID	0.00510	kg
KALIUMCHLORID	101.700	kg
WASSER	76.3730	t
<i>in Abwasserreinigung abgegeben:</i>		
KIESELSÄURE	51.7757	kg
METALLSCHLORIDE	28.8236	kg
ABWASSER	19.7789	t
WASCHMITTEL, TENSIDE, AMEISENSÄURE	18.1482	kg
SANDSTEIN	0.21351	kg
<i>Pedosphäre</i>		

Stoffe	Menge	Einheit
<i>in Sondermüll:</i>		
PAPIER	11.2100	kg
PE	0.26690	kg
PTFE/IT	0.21350	kg
PV/PVC/PU	5.87200	kg
SILIZIUMCARBID	161.700	kg
MINERALÖL/SILICONÖL	52.8400	kg
ETHYLENGLYCOL	1.60100	kg
ÖLBINDER	0.37400	kg
SILIZIUMDIOXID	30.5000	kg
ALUMINIUMOXID	25.4200	kg
<i>in Industriemüll:</i>		
GRAPHIT	0.48040	kg
GLAS	10.1400	kg
BAUMWOLLE	0.03203	kg
DEFEKTE WAFER	1.52500	kg
ACRYL-GIESSHARZ-RESTE	5.80500	kg
BUTYL-KAUTSCHUK-RESTE	1.16100	kg
DEFEKTE MODULE	1.06400	kg
<i>in Sekundärrohstoffgewinn:</i>		
STAHLSCROTT	7.47300	kg
MESSING	0.01070	kg
NICKEL	0.45800	kg
FLUORWASSERSTOFF	5.08400	kg

Tab. 51. Gesamtbilanz der austretenden Stoffmengen bei der Herstellung von MIS-I-Multi-Module:

Mengen bezogen auf die Fertigung von 1 t Modul

160 kg/kW_p

/Band 5/

Stoffe	Menge	Einheit
Abprodukte		
Siliziumdioxid	0.48280	t
Siliziumhaltige Schlacke	0.02124	t
Abgabe der Reststoffe an		
<i>Atmosphäre</i>		
SILIZIUMDIOXID-FEINSTAUB	5.1490	kg
KOHLENDIOXID	3.8620	t
WASSER	1.0940	t
SCHWEFELDIOXID	18.000	kg
SCHWEFELWASSERSTOFF	0.6440	kg
KOHLENMONOXID	1.2880	kg
FLUOR	0.6440	kg
STICKOXIDE	12.880	kg
ARGON	282.89	kg
ACETON	0.4804	kg
WASSERSTOFF	96.490	kg
STICKSTOFF/SAUERSTOFF	0.4575	t
HCL/MECL/WASSER/KOHLENDIOXID	0.0025	kg
STICKSTOFF/SILIZIUMTERAFLUORID	0.1327	kg
DIMETHYLPHTHALAT	1.8800	g
<i>Hydrosphäre</i>		

Stoffe	Menge	Einheit
<i>direkt abgegeben:</i>		
KALZIUMNITRAT	13.880	kg
ESSIGSÄURE	35.760	kg
ACETON	5.3380	kg
REINIGUNGSMITTEL	1.6010	kg
NATRIUMHYDROXID	3.2030	kg
NATRIUMNITRAT	1.0680	kg
SILIZIUMDIOXID	0.2140	kg
NATRIUMFLUORID	0.5340	kg
NATRIUMACETAT	0.5340	kg
WASSER	188.27	t
CHLORWASSERSTOFF	185.80	kg
ABWASSER	16.910	t
KÜHLWASSER	1407.0	t
CAESIUMCHLORID	0.0051	kg
KALIUMCHLORID	101.68	kg
<i>in Abwasserreinigung abgegeben:</i>		
Kieselsäure	44.3029	kg
Metallchloride	26.1547	kg
<i>Pedosphäre</i>		
<i>in Sondermüll:</i>		
CALZIUMFLUORID	10.1400	kg
SILIZIUM-ABRIEB	57.1000	kg
EPOXITKLEBER	0.53380	kg
VAKUUMPUMPENÖL	0.00011	kg
PE	0.26690	kg
PTFE TT	0.16010	kg
ALUMINIUMOXID	25.4200	kg
SILIZIUMDIOXID	30.5100	kg
<i>in Industriemüll:</i>		
SILIZIUM-Reste	5.8715	kg
QUARZTIEGEL	48.040	kg
GRAPHITTIEGEL + HEIZELEMENTE	1.0675	kg
GRAPHITTRÄGER	2.6690	kg
GRAPHIT	0.4270	kg
BAUMWOLLE	0.1067	kg
DEFEKTE WAFER	1.5250	kg
ACRYL-GIESSHARZ-RESTE	5.8050	kg
BUTYL-KAUTSCHUK-RESTE	1.1610	kg
DEFEKTE MODULE	1.0042	kg
<i>in Sekundärrohstoffgewinn:</i>		
NICKELMASKEN	0.4575	kg
FLUORWASSERSTOFF	5.0840	kg

Tab. 52. Gesamtbilanz der austretenden Stoffmengen bei der Herstellung von MIS-I-Mono-Module:

Mengen bezogen auf die Fertigung von 1 t Modul

139.2 kg/kW_p

/Band 5/

Zur letzten Spalte der Emissionstabellen sei noch folgendes gesagt:

Zum Alternativenvergleich müssen bei den PV-Anlagen die (nur während der Herstellung auftretenden) Emissionen auf die erzeugte kWh umgelegt werden, da bei den konventionellen Alternativen (z.B. PKW, Kraftwerke etc.) die Emissionen im Anlagenbetrieb pro kWh abgegebener Energie auftreten.

Setzt man eine für unsere Breiten typische jährliche solare Vollaststundenzahl von 1000 h/a an und geht man von 20 Jahren Nutzungsdauer der PV-Module aus, dann hat ein PV-kWp über seine Lebensdauer 20000 kWh erzeugt, worauf die Vorleistungsemissionen zu beziehen sind.

4.7.2 Primärenergieaufwand

Ein wichtiger Aspekt bei der Erstellung von Energiewandleranlagen ist der Energieaufwand bei der Erstellung solcher Anlagen, weil man diesen Aufwand zur energetischen Bewertung mit der Nettoenergieerzeugung vergleicht. Kenngrößen dieses Zusammenhangs sind Erntefaktoren und energetische Amortisationszeiten /Hagedorn 89/. Solche Analysen wurden für die Photovoltaik detailliert in diesem zitierten Bericht vorgestellt, wobei auf die "klassischen" PV-Module (mono- und multikristallin sowie amorph) Bezug genommen wurde. Dort wurden insbesondere die Detailschritte (Rohmaterial-, Scheiben-, Zellen- und Modulherstellung) analysiert. In /Band 5/ wurden diese Tabellen noch durch Daten über die MIS-I-Zellen ergänzt.

Der Energieverbrauch wird hier für die PV-Endprodukte, die Module, angegeben. Die wesentliche Kenngröße ist der sogenannte kumulierte Energieverbrauch, der die Vorleistungen berücksichtigt, aber in Endenenergieeinheiten Strom, Brennstoff und nichtenergetischer Verbrauch ausgedrückt ist. Schließlich wird daraus der kumulierte Primärenergieverbrauch als aggregierte Kenngröße, die über alle Vorleistungsstufen aufaddiert ist.

Zur Berechnung des kumulierten Primärenergieverbrauchs werden Nutzungsgrade der Endenergiebereitstellung in Ansatz gebracht. Um eine vergleichende Betrachtungsweise sicherzustellen, wurden Durchschnittswerte für die Versorgungsstruktur der Bundesrepublik als Basis verwendet.

Für die Bereitstellung von elektrischer Energie in der Industrie wurde ein Nutzungsgrad von 0,4 angesetzt, für gasförmige und flüssige Brennstoffe ein Nutzungsgrad von 0,85 - bei anderen Brennstoffarten im Einzelfall davon abweichend - und für den Nichtenergetischen Verbrauch (NEV) ein Nutzungsgrad von 0,8. Die verwendeten Werte für die Nutzungsgrade der Endenergiebereitstellung liegen an der Untergrenze der aktuell erreichten Werte. Die mit ihnen errechneten Primärenergien liegen daher auf der sicheren Seite:

Energieverbrauch	Multi-	Mono-	Amorph-	MIS-I-Multi
Elektrische Energie	4200	6188	2176	2988
Brennstoffenergie	1594	1476	2309	2061
Nichtenergetischer Verbrauch	631	278	188	542
Primärenergieverbrauch	13167	17540	9167	10570

Tab. 53. Kumulierter Energieverbrauch zur Herstellung eines PV-Moduls:
(kWh/kWp)
/Band 5/

Die Spreizung der Werte ist offenbar sehr groß, aber für eine Bewertung ist es hier noch zu früh, da für Gesamtanlagen auch die Aufwendungen für die Peripherie (Aufständerrung, Verkabelung, Netzanschluß) berücksichtigt werden müssen. Einige der Werte sind eher auch Wirkungsgrad-abhängig und damit proportional zur spezifischen Modulfläche (kW/m^2). Darauf wird dann im „Alternativenvergleich“ auf Seite 161 eingegangen. Allerdings liegen die Anteile von PV-Anlagenkomponenten generell deutlich niedriger als die der jeweiligen Module /Hagedorn 89/.

4.8 Cadmiumtellurid-Solarzellen

4.8.1 Technologie, Stand, Entwicklungsaussichten

Neben GaAs gilt CdTe als ein ideales Material für PV-Zellen (Energiespanne 1,45 eV), auch wegen seiner hohen Lichtabsorption (90 % in einer Schichtdicke von 1 μm) /Bonnet 92a/.

Üblicherweise werden aus CdTe Heterodioden (Halbleiter- Halbleiter-Kontakte) hergestellt, insbesondere mit CdS /Doty 88/. Als p-Leiter wird neuerdings Cu-stabilisiertes ZnTe galvanisch aufgetragen. Die Herstellung guter Ohmscher Kontakte an den p-Leiter ist das derzeitige Hauptproblem. Nach /Doty 88/ versucht man dies mit Nickel.

Für CdTe eignen sich fast alle Herstellungs- bzw. Abscheideverfahren. Die nachfolgende Tabelle aus /Bonnet 89/ demonstriert die diesbezügliche Überlegenheit für CdTe gegenüber anderen VHL.

Technik	CdS	CuInSe ₂	CdTe	CdSe	GaAs
Hochvakuumverdampfung	X	X		X	
Chemische Gasphasenabscheidung			X		X
Spalt-Sublimation			X		
Galvanische Abscheidung		X	X		
Siebdruck			X		
Chemisches Sprühverfahren	X		X		
Physikalische Gasphasenabscheidung			X		
Radio frequency sputtering ¹	X		X		
Atomic layer deposition ¹	X		X		

Tab. 54. Abscheidetechniken für die verschiedenen Zellen:

¹ Angaben nur für CdS, CdTe nach /Bonnet 92b/

4.8.2 Herstellung von Cadmiumtellurid-Solarzellen

Die bei der Zellenfabrikation jährlich durchgesetzten Mengen - hier aus /Moskowitz 85/ auf 10 MWp/a bezogen - hängen i.w. ab von der Materialdicke, der Schichtdicke und dem Wirkungsgrad der Absetzung des PV-Materials auf dem Zellenträger (der vom Verfahren bestimmt wird). Typische effektive elektrische Zellwirkungsgrade liegen bei 10 %. Die Umrechnung auf Materialmengen ist leicht, weil 1 m² einer 1 μm -Schicht das Volumen 1 cm³ hat. Daher ist also 1 g/cm³ auch gleich 1 g/m² $\times$ 1 μm . Die Dichtewerte sind 2,75 für Cd und 5,90 für CdTe.

Nach Moskowitz kann bei der Galvanischen Abscheidung mit Schichtdicken von nur 2 μm gerechnet werden. Die verwendete Cd-Menge liegt dann - je nach Wirkungsgrad der Auftragung - zwischen 1,6 und 8 g/m^2 Zellfläche /Moskowitz 90a,b/.

Bonnet geht von einer Dicke der CdTe-Schicht von 4 μm aus /Bonnet 92b/. Wird ferner die Aktivierung durch CdCl_2 berücksichtigt, erhöht sich das Cd-Inventar der Zelle beträchtlich ($\sim 36.2 \text{ g Cd}/\text{m}^2$, 0,28 % des Moduls). Untersuchungen des Katalyse-Institutes ergaben sogar einen Cd-Gehalt des Moduls (Sunceram-II-Zelle) von 1,4 % /Karus 92/.

Von den Depositionsverfahren für CdTe sind das Sprüh- und das Siebdruckverfahren kommerziell verfügbar, die galvanische Abscheidung nahe der Einführung, die anderen noch in der Entwicklung.

Bei CdS/CdTe/ZnTe-Zellen (CdS, ZnTe als n- bzw. p-Leiter) braucht man (bei $\eta_{\text{el}} = 10 \%$) etwa 11,4 $\text{g Cd}/\text{m}^2$. Bei einer Jahresproduktion von 10, 100, 1000 MWp führt dies zu einem Bedarf von 1,1 bzw. 11 bzw. 114 t Cd/a.

Dieser Wert ist allerdings nur dann richtig, wenn das CdCl_2 vernachlässigt wird. Nach Angaben des Katalyse-Institutes schwankt dieser Wert zwischen 12 und 120 $\text{g Cd}/\text{m}^2$ (Sunceram-II-Zellen) /Karus 92/.

Für die beiden Herstellungsverfahren "Galvanische Abscheidung" und "Spaltsublimation" für MIS (= "Metal- Insulator-Semiconductor")-Strukturen bei CdTe-Zellen werden /Moskowitz 85/ die jährlichen Massenströme für 10 MWp/a, 10 % Zellenwirkungsgrad und 3 μm Schichtdicke angegeben wie folgt angegeben:

- Galvanische Abscheidung
 - 90 % Prozeßwirkungsgrad /Moskowitz 85/
 - o Zufuhr von 1156 kg CdSO_4 und 880 kg TeO_2
 - o kein Schwermetallabfall
 - bei Normalstruktur und 2 μm Schichtdicke /Moskowitz 90a/
 - o Zufuhr 590 kg CdSO_4 und 450 kg TeO_2
 - o rezyklierfähiger Rückstand (11 kg Cd, 12 kg Te)
- Spaltsublimation, 70 % Prozeßwirkungsgrad /Moskowitz 85/
 - Zufuhr von 1528 kg CdTe
 - Rückstand 420 kg CdTe an den Reaktorwänden (Sonderabfall!).
- Spaltsublimation, 80-90 % Prozeßwirkungsgrad /Bonnet 92b/
 - Es ist geplant eine Pilotanlage mit ca. 1 $\text{MW}_{\text{peak}}/\text{h}$ bei einem Prozeßwirkungsgrad von ca. 95 % zu betreiben.

Die anderen Verfahren haben bisher wesentlich geringere Prozeßwirkungsgrade und sind wahrscheinlich deshalb auch längerfristig weniger interessant.

CdTe und CdS sind thermisch und chemisch stabil. Deshalb sollte insbesondere die Möglichkeit zur Rezyklierung untersucht werden, schon wegen der hohen Reinheit des PV-Materials. Als Dünnschichtmaterialien gehören CdTe und CdS (neben CIS) mit "zum besten", weshalb man mit relativ geringen, überschaubaren Mengen auskommt.

Stoffeinträge in die Umwelt

Unter anderem handelt es sich bei CdTe (und CdS)-Zellen um folgende Verbindungen bei der Produktion /Moskowitz 85/:

- H_2 : ungiftig, aber explosiv brennbar (Battelle will stattdessen N_2 einsetzen /Bonnet 92a/)
- CdTe: Stäube, Dampf, feste Ablagerungen; sehr giftig
- H_2S : Sehr giftig
- $CdSO_4$: Feste Ablagerungen; sehr giftig
- Te, TeO_2 : Relativ geringe Giftigkeit
- Organische Lösungsmittel (aufarbeitbar) /Doty 88/: Aethanol, Methanol, Detergentien, 1,1,1-Trichlorethan, Methylenchlorid

Die Öffentlichkeit kann i.w. auf zweierlei Weise gefährdet sein /Moskowitz 90a,b/ :

- Chronische Belastungen durch Produktionsabfälle oder durch unkontrolliert deponierte Module. Hierzu gehören aber auch die Folgen von Fabrikationsunfällen, die zum Austritt von Cd führen.
- Akute Belastungen durch Cd-haltige Verbrennungsprodukte bei Modulbränden.

Es ist zu erwarten, daß nicht mehr verwendbare CdTe-Module als Sonderabfall eingestuft werden. Generell sollte daher schon aus Kostengründen eine Entsorgungsstrategie mitbedacht werden, die eine rückholbare Ablagerung bzw. eine Aufarbeitung der Module vorsieht.

Zur Abschätzung der Brandauswirkungen von CdTe/CdS-Modulen wurde die Risikoanalyse auf 3 Modulfeldgrößen bezogen /Moskowitz 90a,b/ :

5 kWp auf einem Wohnhausdach, 100 kWp auf einem Geschäftsgebäude und ein 500 kWp-Feld. Für die beiden ersten Fälle sind Gebäudebrände durchaus häufig, während der Brand eines PV-Feldes höchst unwahrscheinlich ist. Zusätzlich wurden noch die 2 Szenarien angenommen, daß entweder das gesamte Cd freigesetzt wird oder nur 10 % davon (wahrscheinlicher wegen des hohen CdTe-Schmelzpunktes von 1041 °C). Bei der Bewertung durch Moskowitz wurde berücksichtigt, daß Cd-haltiger Dampf oder Rauch nur für ein paar Minuten andauern kann. Außerdem sind die Cd-Mengen sehr gering, nämlich 0,6 bzw. 12 bzw. 60 kg. Die numerischen Abschätzungen zeigen, daß beim Wohnhausbrand (5 kW) praktisch keine Cd-bedingte Gefährdung eintritt. Bei den größeren Anlagen kann die Gefährdungszone bis zu einigen 100 m windabwärts betragen.

Im Gegensatz hierzu zeigten aber Untersuchungen des Katalyse-Institutes, daß bei einfach verglasten Sunceram-II-Zellen die Cd-Freisetzung bereits bei 800 °C beginnt /Karus 92/.

In /Moskowitz 90a,b/ sind die wesentlichen Kontrolloptionen als Mix aus Maßnahmen im Verwaltungs-, Technik- und persönlichen Verhaltensbereich aufgelistet, um Arbeitskräfte und Öffentlichkeit vor Cd-bedingten Schäden zu bewahren. Die beiden ersteren beziehen sich i.w. auf die PV-Fabrikation und dürften auch in Deutschland durch die entsprechenden Vorschriften des deutschen Arbeitsschutz- und Umweltrechts (Chemikaliengesetz, Gefahrstoffverordnung mit Technischen Regelwerken,

Bundesimmissionsschutzgesetz, Abwasserabgabengesetz, Wasserhaushaltsgesetz, Abfallgesetz etc.) /Tietze 89/ gewährleistet sein. Im persönlichen Bereich ist strikte Hygiene außerordentlich wichtig, insbesondere tägliches Duschen und Kleider wechseln, Waschen von Händen und Gesicht vor dem Essen, Trinken und/oder Rauchen. Ebenso sollten Arbeitskleidung und bei Bedarf Hand- und Mundschutz getragen werden.

4.8.3 Ökonomische und ökologische Aspekte zur Verwendung von Cadmium

Natürliche Vorkommen und Ressourcen von Cadmium

Cadmium ist ein seltenes, giftiges Schwermetall das nicht in eigenen abbauwürdigen Lagerstätten vorkommt. An der Zusammensetzung der Erdkruste ist es mit durchschnittlich 0,1 g/t beteiligt. Das Metall ist in der Natur mit Zinkmineralien wie Zinkblende (ZnS)-Cadmiumgehalte 0,1 bis 0,5 %- und Galmei (ZnCO_3)-Cadmiumgehalte bis max. 5 % - vergesellschaftet.

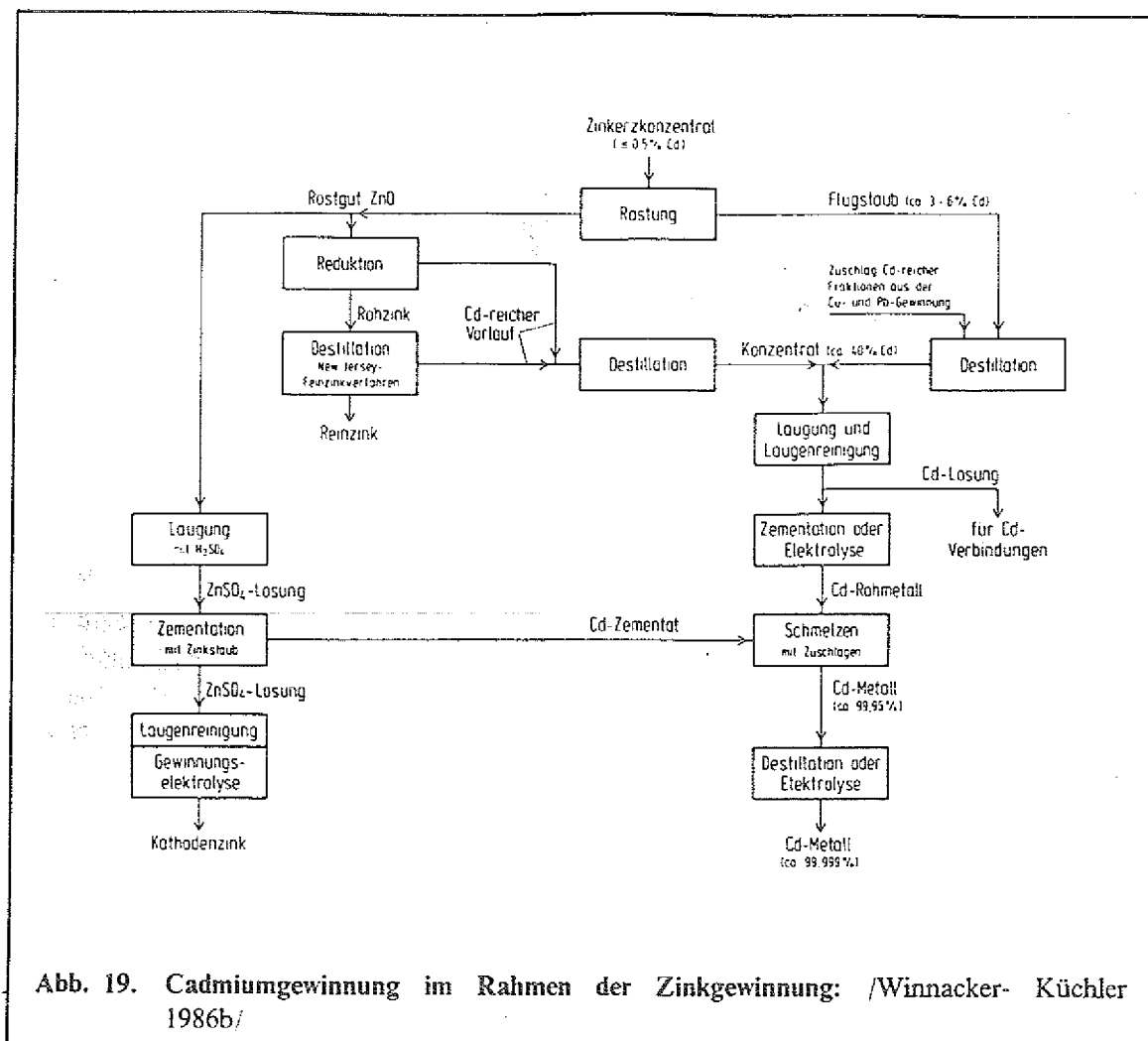
Die Cadmiumressourcen sind mit den Zinkressourcen verknüpft und werden auf etwa 9 Millionen t (1982) veranschlagt. Cadmiumgehalte in fossilen organischen Materialien schwanken stark. Für Stein- und Braunkohle werden mittlere Gehalte von 1 bis 2 mg/kg Cadmium angegeben. Erdöl hat einen sehr viel geringeren Cadmiumgehalt /Stoeppler 1984/.

Gewinnung von Cadmium

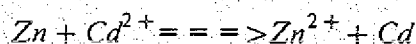
Cadmium fällt als Nebenprodukt (Abfallprodukt) bei der Zinkgewinnung mit etwa 3 kg Cadmium pro Tonne Zink an.

Aufgrund der Rohstoffvielfalt existieren zahlreiche, komplexe Cadmiumgewinnungs- und Raffinationsverfahren. Charakteristisch für die unterschiedlichen Gewinnungsverfahren sind die Verflüchtigung, Laugung und Laugenreinigung, Zementation, Elektrolyse und Destillation vgl. Abb. 19 auf Seite 152.

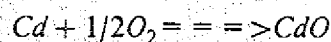
Bei der trockenen Zinkgewinnung wird Cadmium als edleres ($P_{\text{Cd}} = -0,403$ Volt; $P_{\text{Zn}} = -0,763$ Volt) und niedriger siedendes ($\text{Sdp.}_{\text{Cd}} = 767,3^\circ\text{C}$; $\text{Sdp.}_{\text{Zn}} = 908,5^\circ\text{C}$) Metall in Form des bei der Röstung von Zinkblende mitentstehenden Cadmiumoxids (CdO) leichter reduziert und nach der Reduktion zum Metall leichter verdampft. Es destilliert bei der Reduktion der Zinkerze bevorzugt ab und verbrennt in den Vorlagen mit brauner Flamme zu Cadmiumoxid. Der cadmiumoxidhaltige Zinkstaub (3-4 % Cd) wird mit Koks vermischt und destilliert. Hierbei geht zuerst das Cadmium über und kondensiert sich in der Vorlage teils als Metall, teils als Staub. Der an Cadmium angereicherte Staub wird nochmals mit Koks bei etwas höherer Temperatur destilliert und liefert weiteres Metall mit 99,5 % Cadmium, das in Form dünner Stangen in den Handel kommt.



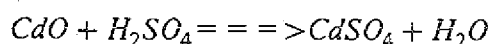
Im Rahmen der nassen Zinkgewinnung wird aus den Zinksulfatlaugen das enthaltene Cadmium durch Zinkstaub gefällt,



der so gewonnene Cadmiumschwamm oxydiert



und in Schwefelsäure aufgelöst.



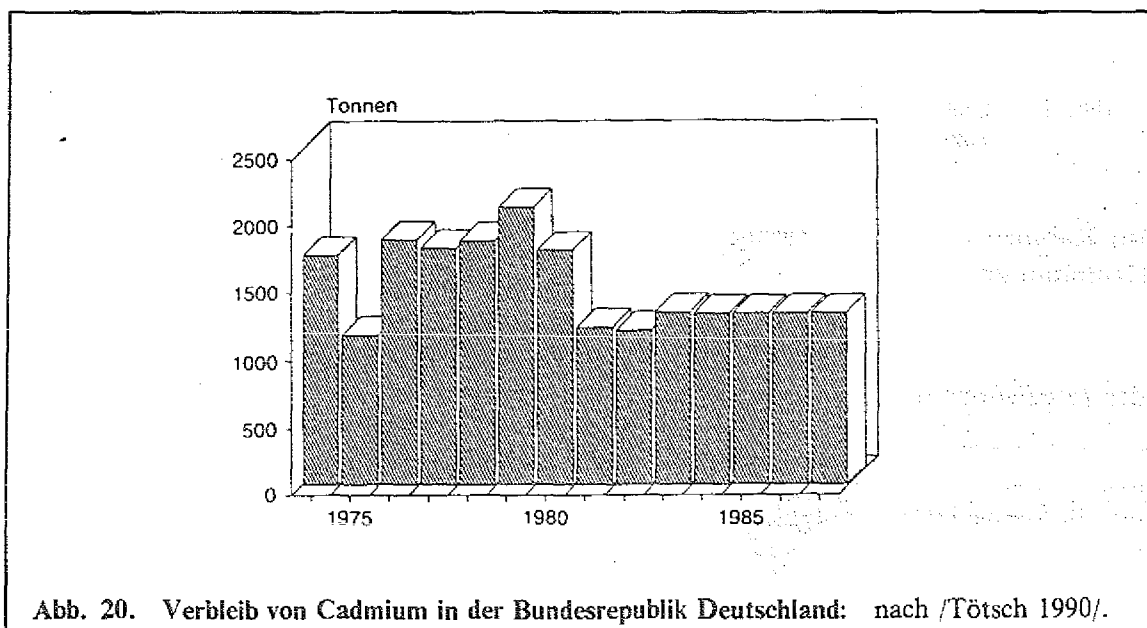
Bei der Elektrolyse der Cadmiumsulfatlösung scheidet sich das Cadmium als sehr reines Elektrolytcadmium (bis 99.999 %) ab /Holleman-Wiberg 1971/. Hochreine Cadmiumqualitäten werden für optische und elektronische Anforderungen benötigt (Einzelverunreinigungen von 10^{-4} – 10^{-7}). Dazu muß Cadmium erneut elektrolysiert, destilliert und zonengeschmolzen werden /Winnacker-Küchler 1986b/. Cd kommt in die Umwelt aber auch über Phosphordünger und Emissionen von Metallschmelzen. Die Weltproduktion des Cadmiums ist seit der Jahrhundertwende (14 t) auf heute knapp 20000 t angestiegen (vgl. nachfolgende Tab.).

Land	Jahresproduktion 1986 /t/
UDSSR	2700
Japan	2400
USA	2350
Kanada	1550
Belgien - Luxemburg	1380
BRD	1220
Australien	910
Mexiko	720
Polen	600
Niederlande	560

Tab. 55. Wichtigste Hüttenproduzenten von Cadmium: /Stoeppler 1991/.

Verwendung

Der Höhepunkt des Cadmiumeinsatzes in der Bundesrepublik lag 1979 bei einem Verbrauch von 2070 t. In den Jahren 1980 und 1981 erfolgte - aufgrund der Toxizität des Metalls - eine Reduzierung des Cadmiumverbrauches um 43 %. Erfolge bei der Cadmiumsubstitution in einzelnen Gebieten werden durch den zunehmenden Einsatz von Ni/Cd-Akkus aufgewogen. In der Bundesrepublik werden heute etwa 1300 t dieses Schwermetalls verbraucht, vgl. Abb. 20 auf Seite 153 /Tötsch 1990/.



Cadmium findet als Metall und in Form seiner Verbindungen vielseitige Anwendungen z.B. bei der Batterienherstellung, der Oberflächenbehandlung von Metallen, zur Stabilisierung von Kunststoffen und als Pigmentfarbstoff (vgl. Tab. 56 auf Seite 154). Cadmiumchalkogenide besitzen Halbleitereigenschaften und werden für Photozellen eingesetzt.

Verwendung	Einsatz /t/	Tendenz	Konzentration /g/kg/	Einsatzdauer /Jahr/	Verwendungsbeispiele
Akkumulatoren					
Offene Zellen	50	sinkend	150 - 220	15 - 20	Unterbrechungsfreie Stromversorgung, Starterbatterien für Flugzeuge, fahrerlose Transportsysteme
Geschlossene Zellen	300 - 350	steigend	150 - 200	2 - 3	Schnurlose Elektrogeräte, Modellbau, Ersatz von Primärelementen, Meßgeräte
Pigmente					
Kunststoff-Färbung	250	konstant	1 - 3	5 - 15	Flaschenkästen und andere langlebige bunte Kunststoffprodukte
Lacke	6	sinkend	1 - 20 ¹⁾	5 - 10	Sonderlackierungen
Keramikindustrie	24	konstant	5 - 20 ¹⁾	5 - 10	Emaillierte Töpfe, dekorierte Keramiken
Glasindustrie	11	konstant	20 - 30	5 - 20	Signalgläser, Kirchenfenster
Stabilisatoren					
Fensterprofile	210	konstant	1 - 2	30 - 50	Kunststofffenster
andere Außenprofile	47	konstant	1 - 2	10 - 20	Sidings, Werbetafeln
Dach- und Schwimmbadfolien	18	sinkend	1 - 2	5 - 20	Baubereich
Weichextrusion	4	sinkend	1 - 2	5 - 10	Gartenschläuche
Galvanische Beschichtungen	200	konstant	40 - 100	5 - 15	Verbindungselemente, Ventile, Präzisionsteile
Andere Verwendungen					
Lote	40	konstant	150 - 210	5 - 20	Hartlote
Kontaktmaterial	6	sinkend	25 - 150	5 - 20	Elektrische Schalter
Andere	80				Legierungen, Neutronenadsorber, Chemikalien, Halbleiter
Summe	1250 - 1300 t schwach steigend				

Tab. 56. Cadmiumanwendungen in der Bundesrepublik: nach /Tötsch 1990/

¹⁾ g/m²

Zum Vergleich seien die Zahlen des Cd-Verbrauch in den USA von 1986 genannt /Moskowitz 90a,b/ :

- 4385 t
davon
 - 1403 t Korrosionsschutz
 - 1272 t Ni-Cd-Batterien
 - 702 t rote und gelbe Farbpigmente
 - 658 t Kunststoffstabilisatoren,
 - 350 t Sonstiges

Recycling von Cadmium

Ein Recycling von Cadmium findet in der Bundesrepublik derzeit nicht statt. 1983 stellt die einzige deutsche Anlage, die Duisburger Kupferhütte, ihren Betrieb ein. Diese Anlage verursachte allein etwa 75 % der Cadmiumemissionen in Gewässer /Jacobi 1985/.

Recyclingbetriebe in Europa gibt es in Schweden (90 t/a) und Frankreich (500 t/a). Demgegenüber steht ein Cadmiumverbrauch in Westeuropa von 7120 t im Jahr 1987 /Metallgesellschaft 1987/.

Zwei Recyclingverfahren sind Stand der Technik. Beim thermischen Verfahren werden Cadmiumverbindungen zum Metall reduziert und anschließend abdestilliert. Bei der naßchemischen Variante wird Cadmium elektrolytisch als Cadmium-Metall-Schwamm zurückgewonnen /Niklas 1987/.

Cadmiumrecycling wird derzeit nur für Abfälle mit einem Schwermetallgehalt von etwa 20 % (Ni/Cd-Batterieschrott) praktiziert.

Umweltverhalten und Stoffeigenschaften von Cadmium

Cadmium gehört mit Zink und Quecksilber zur zweiten Hauptgruppe des Periodensystems und tritt in seinen Verbindungen zweiwertig auf. Mit einem Normalpotential von - 0.402 Volt, gemessen gegenüber der Normalwasserstoffelektrode, ist Cadmium etwas edler als Zink. Metallisches Cadmium ist ein silberweißes, glänzendes, ziemlich weiches plastisch verformbares Metall, das man mit dem Messer anschneiden kann. Das Schwermetall hat eine Dichte von 8.65 g cm^{-3} , schmilzt bei 320.9°C und siedet bei 767°C . Es hat die Ordnungszahl 48 im Periodensystem, ein Atomgewicht von 112,4 und 8 stabile Isotope. An der Luft überzieht es sich rasch mit einer dünnen Oxidschicht.

In Salpetersäure löst sich Cadmium rasch, in Salz- und Schwefelsäure langsam auf. Völlig reines Metall wird von Säuren kaum angegriffen. Die Cadmiumsalze der starken Säuren sind in Wasser leicht löslich, schwer löslich sind das Cadmiumsulfid, Cadmiumcarbonat, Cadmiumfluorid und Cadmiumhydroxid. Mit Halogenid-Ionen bildet Cadmium Komplexe, die stabiler als die entsprechenden Zinkkomplexe sind. Im Organismus von Menschen und Säugetieren wird Cadmium an Metallothionein gebunden und transportiert /Stoeppler 1984, Römpp 1989/.

Toxizität von Cadmium

Cadmium ist ein nichtessentielles toxisches Schwermetall /Stoeppler 1984/. Aufgrund der Gesundheitsrisiken durch Cadmium - Cadmium und seine Verbindungen werden als im Tierversuch eindeutig krebserzeugend eingestuft (Kategorie III A2) - wurde der Wert für die Maximale Arbeitsplatzkonzentration (MAK-Wert) für Cadmiumverbindungen in der Bundesrepublik ausgesetzt. Über den Wert für die Technische Richtkonzentration (TRK-Wert) wird noch diskutiert /Tötsch 1990/.

Die toxikologischen Wirkungen des Cadmiums sind in der Literatur ausführlich beschrieben /Löffler 1985/. Als kritisches Zielorgan im Körper ist die Niere besonders gefährdet. Der Gehalt in der Nebennierenrinde ist Maßstab chronischer Vergiftungen. Werden Konzentrationen von 200 ppm überschritten, steht nicht mehr genügend Metallothionein zur Bindung von Cadmium zur Verfügung. Das überschüssige Cadmium tritt in Konkurrenz zum Zink, dadurch werden zinkabhängige Enzyme gehemmt und die Nieren geschädigt.

In der Leber werden Enzymsysteme, die Sulfhydrylgruppen enthalten, durch Cadmium blockiert. Schwere Schäden sind im Vergleich zu den beobachteten Effekten in der Niere wenig ausgeprägt.

In Tierexperimenten wurde allerdings toxische Hepatitis bis hin zur Leberzirrhose nachgewiesen. Chronische Cadmium- Exposition durch Inhalation führt in der Lunge zu einem Lungenemphysem. Art und Stärke der Symptome sind dabei von der individuellen Disposition sowie der Stärke und Dauer der Belastung abhängig.

Die Cadmiumeinwirkung auf das Skelettsystem ist seit 1955 durch das Auftreten der Itai-Itai-Krankheit in Japan /Moskowitz 90a/, einer chronischen oralen Cadmiumvergiftung, bekannt.

In Tierexperimenten konnte nach Einzelinjektionen (3 mg Cadmium pro kg Körpergewicht und mehr) bei den Nachkommen von Goldhamstern und Ratten die Ausbildung von Lippen-Gaumen- Spalten und Defekten der Gliedmaßen festgestellt werden. Beim Menschen sind derartige teratogene Effekte bisher nicht erkannt.

Die Nachkommen cadmiumexponierter Arbeiterinnen zeigen keine sichtbaren Mißbildungen, allerdings lag das Geburtsgewicht der Neugeborenen niedriger als bei der nicht cadmiumbelasteten Kontrollgruppe.

Während niedrige Cadmium-Konzentrationen von der Placenta zurückgehalten werden, wird die Barrierefunktion durch hohe Cadmium-Konzentrationen zerstört, so daß das Cadmium ungehindert in den Blutkreislauf des Föten gelangen kann.

Ob Cadmium mutagene Wirkungen zeigt, ist umstritten. Bei Itai- Itai-Patienten wurden Chromosomen-Anomalitäten in Leukozyten festgestellt, bei cadmium-belasteten Arbeitern war dies nicht der Fall. Bei Versuchen an Fruchtfliegen (*Drosophila*) und Mäusen wurden keine Chromosomen-Aberrationen nachgewiesen. Allerdings scheinen Zusammenhänge zwischen Prostata- bzw. Lungenkarzinomen und Cadmiumexpositionen zu bestehen. Bei Cadmiumaerosolen exponierten Ratten wurden dosisabhängige Lungenkarzinome nachgewiesen; an kleinen Personengruppen mit beruflicher Cadmium-Exposition konnten keine Zusammenhänge zwischen

Prostatakarzinom und langjähriger Cadmiumexposition nachgewiesen werden /Korte 1987/.

Aufgrund der toxischen und Akkumulationseigenschaften des Cadmiums wurde eine Vielzahl von laufend korrigierten Belastungsgrenzen erarbeitet.

Die amerikanische Behörde für Arbeitsplatzsicherheit OSHA möchte den Threshold Limit Value für Cadmium auf $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ senken. Eine so niedrige Arbeitsplatzkonzentration würde aufwendige technische Maßnahmen voraussetzen, die so kostspielig wären, daß viele Anwender auf einen Cadmiumeinsatz verzichten würden /Tötsch 1990/.

Die inhärenten Gefahren einer Cd-Einwirkung sind im Anhang C angedeutet. Wesentlich dabei ist, daß die Absorption von Cd im Körper etwa 10-mal größer durch Einatmung als durch Aufnahme über den Magen-Darm-Trakt ist. Die hauptbelasteten Organe sind die Nieren, die Lunge und die Knochen.

In den Cd-verarbeitenden Anlagen müssen daher die Beschäftigten sorgfältig vor Stäuben und Dämpfen mit Cd- Verbindungen geschützt werden. Generell liegt die Hauptgefährdung am Arbeitsplatz bei chronischen Belastungen durch kleine Cd-Mengen. Bei Cd-Rückständen an Gefäßwänden oder in Abgasen müssen bei Reinigungsprozessen entsprechende Sicherheitsvorkehrungen vorgesehen werden.

Zusammenfassend und schlußfolgernd wird von /Moskowitz 1990/ ausgeführt :

Cd-Belastung stellt zwar ein grundsätzliches Risiko dar, kann aber durch entsprechende Sicherheitsmaßnahmen und Notfallvorkehrungen kontrolliert werden. Die größten Gefährdungen gehen von chronischen niedrigen Belastungen durch Cd-haltige Abfälle aus, können aber relativ leicht überwacht und gegebenenfalls behoben werden. Insgesamt wird das relative Risiko gemessen am Betrieb konventioneller fossiler Techniken als gering beurteilt, insbesondere weil PV-Module auslegungsgemäß mit Glasscheiben abgedeckt und gut abgedichtet sind, was die Mobilisierung von Cd praktisch verhindert.

4.8.4 Ökonomische und ökologische Aspekte zur Verwendung von Tellur

Natürliche Vorkommen und Ressourcen

Tellur wurde 1782 von Müller von Reichenstein aus goldhaltigen, siebenbürgischen Erzen isoliert. Tellur gehört zu den seltensten Elementen, der Anteil an der obersten, 16 km dicken Erdrinde wird auf 1×10^{-7} geschätzt (an 74. Stelle in der Häufigkeit, an der Erdkruste nur zu 0,002 g/t beteiligt /Lexikon 72/). Man findet es bisweilen gediegen zusammen mit Gold, Silber und Schwefel. In manchen Eigenschaften und im Vorkommen ähnelt es dem Selen. Die gemeinsame Rohstoffbasis sind Kupferkiese, deren Tellurgehalt im Mittel 30 - 50 g/t beträgt /Greenwood 88, Römpf 88, Winnacker-Küchler 86a/.

Gewinnung und Produktion von Tellur

Tellur wird hauptsächlich aus dem Anodenschlamm gewonnen, der bei der elektrolytischen Kupferraffinierung anfällt. Die direkte Gewinnung aus Mineralen ist wegen deren geringem Vorkommen wirtschaftlich nicht tragbar /Greenwood 1988/.

Bei der Extraktion der Anodenschlämme mit Wasser oder Säuren bleibt das Tellur aufgrund der geringen Löslichkeit von Tellurdioxid (TeO_2) und Natriumtellurit (Na_2TeO_3) vorwiegend im Rückstand. Tellur wird vorwiegend aus einer Lösung, bestehend aus TeO_2 und Natronlauge, als Pulver elektrolytisch abgeschieden.

Das so gewonnene Element (Reinheit ca. 97,5-99,7 %), kann nach erneuter Elektrolyse, Sublimation oder Zonenschmelzen mit einem Reinheitsgrad bis zu 99,99999 gewonnen werden. Die wichtigsten Produzenten (ohne Ostblock-Staaten) sind die in Tab. 57 auf Seite 158 angegebenen Länder.

Land	1975	1984	1987	1988
USA	60	k.A.	k.A.	k.A.
Kanada	36	15,1	13	10
Peru	32	14,1	7,5	7,5
Japan	21	62,7	53,3	55,2

Tab. 57. Jahresproduktion von Tellur in Tonnen nach Ländern:
nach /Greenwood 1988, Römpf 1988, Metallstatistik/.

Für 1975 ergibt sich eine Weltproduktion von 150 t. Für 1984 wurden 350 t geschätzt /Greenwood 1988, Römpf 1988/. Ca. 75 % des Tellurs werden in der Eisen- und Nichteisenmetallurgie zur Verbesserung der Bearbeitbarkeit und Temperaturbeständigkeit, der Härte und Korrosionsfestigkeit eingesetzt /Hoyne 92/.

Verwendung von Tellur

In hochreiner Form findet Tellur Verwendung in Peltierelementen, Thermogeneratoren, Detektoren und in der Halbleitertechnik /Römpf 1988/.

Stoffeigenschaften, Umweltverhalten von Tellur

Tellur gehört zu den Halbmetallen aus der 6. Hauptgruppe (Ordnungszahl 52, Atomgewicht 127,6). Tellur ist ein Mischelement mit den natürlichen Isotopen 120 (0,096 %), 122 (2,60 %), 123 (0,908 %), 124 (4,816 %), 125 (7,14 %), 126 (18,95 %), 128 (31,89 %), 130 (33,80 %); die Isotope 123, 128 und 130 sind radioaktiv (Halbwertszeit: 10^{13} , 10^{24} , 10^{21} Jahre). Tellur tritt in den Verbindungen in den Wertigkeiten -2, +2, +4 und +6 auf. Elementares, kristallines Tellur ist silberweiß, metallisch glänzend, spröde und leicht pulverisierbar. Die Dichte beträgt $6,25 \text{ g/cm}^3$. Das Element schmilzt bei 449°C und siedet bei 990°C .

Mit einem spezifischen Widerstand von 1 Ohm/cm zählt Tellur zu den Halbleitern. Tellur-Einkristalle besitzen gute photoelektrische Eigenschaften und hohe Piezowiderstands- und -elektrizitätswerte /Römpf 1988/.

An der Luft verbrennt Tellur zu Tellurdioxid TeO_2 (Schmelzpunkt: 733°C), das gewöhnlich durch Oxidation von Tellur mit konzentrierter Salpetersäure dargestellt wird.

Tellurdioxid besitzt amphoteren ¹⁶ Charakter und ist dementsprechend in starken Laugen und Säuren löslich. Durch starke Oxidationsmittel wird Tellur zur Tellursäure (H_6TeO_6) oxidiert. Durch Umsetzung mit atomarem Wasserstoff entsteht als stark endotherme Verbindung Tellurwasserstoff (TeH_2).

Von Salzsäure wird Tellur nicht angegriffen, mit Chlor bildet es Tellurchloride /Römpf 1988, Hollemann-Wiberg 1971/.

Beim Erhitzen eines Gemisches von 53 % Tellur und 47 % Cadmium entsteht Cadmiumtellurid (CdTe). Die bräunlich-schwarzen, kubischen Kristalle schmelzen bei 1041°C und sind nur in Salpetersäure unter Zersetzung löslich /Römpf 1989, Gmelin 1959/.

Toxizität von Tellur

Tellur und seine Verbindungen sind weniger toxisch als Selen, da es als unlösliches Element die Darmwand nicht passieren kann und die Tellurverbindungen im Körper leicht zu Tellur reduziert werden. Lösliche Verbindungen werden durch die Haut resorbiert. Es gilt ein MAK-Wert von $0,1 \text{ mg/m}^3$ (errechnet als Tellur). Besonders gefährlich sind Tellurwasserstoff (TeH_2) und Tellurhexafluorid (TeF_6), deren Handhabung besondere Schutzmaßnahmen erfordern.

Versehentlich inkorporiertes Tellurdioxid verleiht der Atemluft einen knoblauchartigen Geruch (Bildung von Dimethyltellur). Größere Mengen eingenommener Tellurverbindungen rufen Magen-Darm-Störungen hervor. Über chronische Vergiftungswirkungen ist nichts bekannt /Römpf 1988, Winnacker-Küchler 1986a/.

Nach /Moskowitz 85/ ist die Giftigkeit von elementarem Te "relativ niedrig". Danach liegen keine Berichte über ernstliche Erkrankungen oder Todesfälle in der Te-verarbeitenden Industrie vor. CdTe ist allerdings sehr giftig.

4.8.5 Vorläufige Einschätzung

Auf Basis der vorgenommenen Literatursichtung ist die Verwendung von Cadmium und von Tellur zur Herstellung von Solarzellen als umwelterheblich einzustufen. Beide Stoffe sowie ihre Verbindungen sind stark toxisch, persistent und liegen wenn sie in die Umwelt gelangen z.T. in pflanzenverfügbarer Form vor.

Das Inventar an Cadmium einer Photovoltaik-Anlage auf der Basis von CdTe -Solarzellen beträgt ca. $12 - 120 \text{ g/m}^2$ Modulfläche bzw. $0,12 - 1,2 \text{ t/MW}_{\text{peak}}$.

Das Inventar an Tellur entspricht etwa $1/3$ der Cadmiummenge /Bonnet 92a/.

Die Freisetzungsrate von Cadmium beträgt im Falle eines Brandes ca. 10 %, nach einer anderen Literaturquelle jedoch mehr als 50 % /Moskowitz 90, Karus 92/. Über die Freisetzung von Tellur und anderen Stoffen lagen keine Hinweise vor.

¹⁶ sich teils als Säure, teils als Base verhaltend

Die Wirtschaftlichkeit der CdTe-Solarzelle wird als sehr günstig beurteilt. Der Nutzungsgrad der CdTe-Solarzelle soll in etwa dem Nutzungsgrad einer kristallinen Si-Zelle entsprechen. Der Primärenergieaufwand jedoch nur etwa 50 % einer amorphen Si-Solarzelle betragen. Gleichzeitig wird von vergleichsweise geringen Fertigungskosten ausgegangen /Bonnet92a/.

Defizite

Es werden folgende Wissensdefizite gesehen:

- Die mit der Produktion der Ausgangsmaterialien Cadmium und insbesondere Tellur verbundenen Energieaufwendungen und Stoffeinträge in die Umwelt sind noch weitgehend unbekannt. Wegen der Umweltrelevanz dieser Stoffe sollten die Prozeßkette von der Gewinnung bis zur Entsorgung kritisch geprüft werden.
- Die Herstellung von CdTe wird in Deutschland bisher nur im Labormaßstab durchgeführt. Die starke exotherme Reaktion des Herstellungsprozesses ist bei der großtechnischen Umsetzung als Risikoaspekt gesondert zu behandeln.
- Die Freisetzung von Tellur aus der Solarzelle bei der Verwendung (im Brandfall) und der Entsorgung ist nicht bekannt.
- Zur ökotoxikologischen Beurteilung von Tellur und seinen Verbindungen ist die Datenlage bei weitem nicht ausreichend.
- Konzepte zur Rezyklierung der Solarzellen fehlen.
- Die Erarbeitung ökonomischer Instrumente zur Sicherung eines möglichst vollständigen Stoffkreislaufes steht noch aus.

1. The first part of the report

2. The second part of the report

3. The third part of the report

5.0 Alternativenvergleich

Ziel des Projektes ist, wie schon mehrfach erwähnt, die Bewertung eines Alternativenvergleichs (heutiges System gegen neue - PV-gestützte - Systeme). Dazu gilt es also, PV-Anlagen für bestimmte Versorgungszwecke zu analysieren. Der Vergleich heutiger und - potentieller- zukünftiger Systeme soll dann die Stoffeinträge in die Umwelt (Boden, Wasser, Atmosphäre) von der Herstellung der PV-Anlagekomponenten den Einträgen von den zu substituierenden heutigen Versorgungstechniken (z.B. konventionelle PKW's oder Kraftwerke) gegenüberstellen und (öko)toxikologisch bewerten.

Unter den vielen in Tab. 10 auf Seite 42 vorgestellten Einsatzmöglichkeiten von PV wurde ein Fall herausgegriffen, der

1. sich auf eine für Deutschland denkbare Anwendung bezieht,
2. einen größeren Anwendungsumfang von energiewirtschaftlicher Bedeutung vorstellen läßt
3. einen Bereich betrifft, der derzeit in intensiver öffentlicher "ökologischer" Diskussion steht, also ein weitgehend als problematisch angesehener Ausschnitt des Energiesektors ist.

Im Kontext der globalen Klimagefährdung durch Spurengasemissionen aus der Energienutzung wird derzeit der Verkehrssektor besonders intensiv und kontrovers diskutiert /Steger 92, Burkner 92, Mann 92a, VEBA 92, EPRI 92, Zängl 92, Scheurer 92, Mann 92b, Blümel 91/.

Ohne hier auf die Gesamtproblematik der modernen Mobilitätsansprüche eingehen zu können, sei aber angemerkt, daß als eine der Optionen, die zumindest die Ballungszonen, insbesondere die Innenstädte, entlasten könnte, Elektrofahrzeuge genannt werden und die deutsche Auto- und Batterie-Industrie sind auch schon in die Entwicklung solcher Fahrzeuge eingestiegen /Weidmann 92, Burkner 92, Scheurer 92, EPRI 92, VARTA 91, ABB 92, Blandow 91/.

5.1 Annahmen

Als Vergleichsgröße wird das PKW-Verkehrsaufkommen durch "tägliche Berufsfahrten im Personennahverkehr (PNV)" herausgegriffen. Modellmäßig wird angenommen, daß der Berufsnahverkehr durch Elektroautos abgewickelt wird, deren Batterien auf den Firmenparkplätzen aufgeladen werden sollen. Diese Ladestationen mit Netzanschluß sollen durch PV-Panels versorgt werden. Überschußerzeugung zu Nichtarbeitszeiten (Wochenenden, Urlaubszeiten) soll ans Netz abgegeben, der Mehrbedarf über konventionelle Stromerzeugung aus dem Netz entnommen werden.

Im Band 7 "Konzeptionelle Fortentwicklung des Verkehrsbereichs" der Studie "Energie und Klima" im Auftrag der Enquete-Kommission "Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre" des Deutschen Bundestages werden detaillierte Analysen des Verkehrssektors der alten Bundesrepublik für das Jahr 1987 mit einigen Entwicklungsszenarien für das Jahr 2005 (und auch bis 2050) vorgestellt. Insbesondere wurden dort für 1987 die gefahrenen PKW-Personenkilometer nach Bedarfsarten (wie z.B. Berufsverkehr) angegeben und für 2 Hauptszenarien ("Trend" und "Reduktion") unter anderem die

Weiterentwicklung des Verkehrsaufkommens und die Weiterentwicklung der konventionellen PKW-Technik ausgedrückt in Emissionszahlen an Schadstoffen pro Personenkilometer abgeschätzt:

„Das Trend-Szenario beinhaltet einen weitgehend eingriffslosen Selbstlauf des Systems; absehbare Entwicklungen wurden jedoch als gegeben angesetzt. Dies bedeutet, daß auch im Trendfall Entwicklungen enthalten sind, die erheblichen Einfluß auf den Energieverbrauch und die Emission klimarelevanter Schadgase haben; ausdrücklich ausgeschlossen sind jedoch solche Maßnahmen, denen derzeit ohne Berücksichtigung des Klimaproblems wenig Realisierungschancen einzuräumen sind.

Das Reduktions-Szenario dagegen soll in erheblichem Umfang die Möglichkeiten ausloten, durch gezielte Maßnahmen eine Reduktion der klimarelevanten Emissionen herbeizuführen. Hierfür konnten durchaus weitreichende Maßnahmenansätze formuliert werden, gleichwohl durften sie aus heutiger Sicht nicht unplausibel erscheinen; insbesondere wurde zwar eine verstärkte Änderung der Einstellungen und Verhaltensweisen in Richtung auf eine ökologisch angepaßte Lebensweise zugrunde gelegt, wobei jedoch gleichzeitig die derzeitigen Grundstrukturen des Wirtschaftens und des Konsums als weiterhin bestehend angesetzt wurden“ /Enquete 90, Brosthaus 90/.

In beiden Szenarien sind beispielsweise alle Benzin-PKW's mit geregelten 3-Wege-Kat ausgestattet, aber die Emissionszahlen im Trendszenario sind höher, da von größeren PKW-Leistungen als im Reduktions-Szenario auszugehen ist.

Hier wird folgender Analyseweg verfolgt:

Es wird der PKW-PNV durch Berufsfahrten („Pendler“) des Jahres 1987 genommen, aber der technische Stand der PKW's im Jahr 2005 (jeweils nach dem Reduktions- und nach dem Trend- Szenario) angesetzt, ausgedrückt durch die Emissionen pro Personenkilometer an CO_2 , CO, NO_x , SO_2 , CH, Partikel. Als abrundende Vergleichsbasis für den E-PKW wird zusätzlich ein auf niedrigen Verbrauch hingetrimmter konventioneller PKW, der Öko-Polo von VW herangezogen /Scheurer 92/. Hintergrund ist dabei die Überlegung, daß ein Vergleich von Zukunftsoptionen auch PKW's gleicher motorischer Leistung einschließen sollte. Für das genannte Verkehrsaufkommen wird abgeschätzt, welche Emissionsreduktionen der Einsatz von Elektroautos mit solarer (Teil-)Versorgung bringen kann. Die Emissionen schließen neben dem direkten Einsatz der Treib- und Brennstoffe auch deren Bereitstellung ab Primärenergieressourcen ein. Andere Vorleistungen (wie Anlagenbau) sind auf der „konventionellen“ Seite (Kraftwerke, PKW's, Raffinerien etc.) wegen Unerheblichkeit gegenüber dem Brennstoffdurchsatz beim Betrieb nicht berücksichtigt.

Für die Analyse wurden aber, da auf dem Markt recht unterschiedliche Elektro-PKW („E-PKW“)-Größen angeboten werden /Weidmann 92, Scheurer 92, Mobil E 92, Blandow 91/, im Sinne von „Benchmarks“ zwei alternative Leistungsklassen betrachtet, die durch den mittleren Nachladebedarf (ab Steckdose) pro 100 Personenkilometer (Pkm) definiert sind:

1. 35 kWh(el)/100 Pkm „groß“ (Bsp. VW-City STROMER)

2. 15 kWh(el)/100 Pkm "klein" (Bsp. Mini-el-City)

Hier handelt es sich um jahresdurchschnittliche Effektivzahlen unter Einschluß von Jahreszeiten und Heizbedarf für den beruflichen PNV. Im Band 5 wurden fünf derzeit schon am Markt erhältlichen PV- Modultypen auf Si-Basis näher beschrieben:

- "klassisch" multi- und monokristallin, amorph
- MIS-I multi- und monokristallin

Im Sinne einer "Benchmark"-Analyse werden auch hier der Übersichtlichkeit halber 3 Extremfälle betrachtet:

- amorphes Si, weil es ein Sonderfall ist
- der niedrigste und der höchste kristalline Wirkungsgrad,

also

- "klassisch" multi (Modul- η = 9,6 %)
- MIS-I mono (Modul- η = 12,5 %)

5.1.1 Solartankstellen

Die Vorstellung der Applizierung der Module geht davon aus, daß die Panels - mehr oder weniger - eben parallel zu den Parkplätzen diese überdecken. Leider war es nicht möglich, für eine "Normalaufständerung", d.h. auf im Boden mit Beton fundierten Metallsäulen mit Stahlrahmen fixierte PV-Module als Parkflächenüberdachung die Dimensionierung (spezifische Massenvektoren - kg Stahl, Beton etc./m²) zu bekommen. Deshalb wurden zwei Aufständerungsvarianten gewählt, für die Daten vorliegen:

1. Optimierte 2-Bein-Aufständerung einer PV-Anlage in Analogie zu Kobern-Gondorf (Typ "D" im Band 5)
2. "Leichtes Flächentragwerk aus Seilnetzen" /Wecker 92/

Diese Vorleistungen bzw. die Emissionen bei deren Herstellung werden ebenfalls berücksichtigt. Die Erhebung von Fabrikationsemissionen bei Komponentenmaterialien (Flachglas, Aluminium, Stahl, Zement) war ebenfalls Bestandteil dieses Projekts (Band 4). Es verbleibt noch die Verknüpfung von Modultypen, Aufständerung und E-PKW-Größe im Sinne der Benchmark (Mini-max-)Analyse, die schließlich zu 4 Szenarien für den Alternativenvergleich führt:

1. Typ 1
K-multi, 2-Bein, 35 kWh/100 Pkm
2. Typ 2
Amorph, 2-Bein, 35 kWh/100 Pkm
3. Typ 3
Amorph, Seilnetz, 15 kWh/100 Pkm
4. Typ 4
MIS-I-mono, Seilnetz, 15 kWh/100 Pkm

Sichtlich wurden hier entweder alle "positiven" (emissionsarmen) oder alle "negativen" Eigenschaften kombiniert. Bezüglich der weiteren Größen, die den solaren Stromertrag der Solartankstelle bestimmen, sei hier noch folgendes angeführt:

- Parkplatzfläche pro E-PKW: 10 m^2 . Dieser Wert liegt eher auf der kleineren Seite gegenüber üblichen Parkplatzflächen.
PV-Panelfläche = Parkplatzfläche.
- Jährliche solare Jahreseinstrahlung/ m^2 : 1000 kWh(th) .
Diese sollen auch pro m^2 Panelfläche mit dem jeweiligen Modulwirkungsgrad "geerntet" werden, also zwischen $60 \text{ kWh(el)}/\text{m}^2 \cdot \text{a}(\text{amorph})$ über $96 \text{ kWh(el)}/\text{m}^2 \cdot \text{a}(\text{K-multi})$ und $125 \text{ kWh(el)}/\text{m}^2 \cdot \text{a}(\text{MIS-I-mono})$. Dies ist sicher eine optimistische Annahme über beschattungsfreie und dichte Aufständierungen der PV-Panels. Die Abhängigkeit des effektiven flächenbezogenen PV-Wirkungsgrad von Aufständierungsvarianten ist z.B. in /Brosthaus 90/ behandelt.
- Die durchschnittliche Tagesfahrstrecke der "Berufspendler" liegt inzwischen bei etwa 25 Pkm /Enquete 89/. Die ca. 220 Jahresarbeitstage führen damit zu einer Jahresstrecke als Berufspendler von etwa 5500 Pkm . Dies führt für die 2 E-PKW-Größen zu folgenden, jährlichen Nachladungen (aus der Steckdose) pro PKW (bzw. 10 m^2 Parkplatzfläche):

$$35 \text{ kWh}/100 \text{ Pkm} = = = = > 1925 \text{ kWh(el)}/\text{a}$$

$$15 \text{ kWh}/100 \text{ Pkm} = = = = > 825 \text{ kWh(el)}/\text{a}$$

Die Aufsplittung zwischen solarer und konventioneller Versorgung der E-PKWs wird in „Eingangsdaten der alternativen Szenarien“ auf Seite 168 zusammen mit den anderen Eingangsdaten der Szenariorechnungen abgeleitet und angegeben.

5.1.2 Errichtung von PV-Anlagen

Die Stoffflüsse der PV-Komponenten sind als Ergebnis der Datenerhebung im Band 5 nochmals im Kapitel „Darstellung der Gesamtprozeßketten der Silizium-Zellen“ auf Seite 135 kompiliert worden. Hier werden daher nur die spezifischen Massenvektoren der Zusatzeinrichtungen (Aufständierung, Verkabelung, Netzanschluß) vorgestellt.

Photovoltaikanlagen bestehen aus PV-Modulen, den eigentlichen Energiewandlern und weiteren Komponenten, die, wie beispielsweise die Aufständierung, der Infrastruktur oder, wie die Verkabelung, die Wechselrichter und der Netzanschluß, der elektrischen Energieaufbereitung und -einspeisung zugeordnet werden können. Aus einer früheren Untersuchung zum kumulierten Energieverbrauch für die Herstellung von Solarzellen und photovoltaischen Kraftwerken /Hagedorn 89/ werden Angaben über Fertiggewichte und Materialzusammensetzungen von Modellkraftwerken entnommen. Je nach Art der verwendeten Modultechnologie sind unterschiedliche Mengengerüste zu veranschlagen, da die Unterschiede im Wirkungsgrad amorpher, mono- und multikristalliner PV-Module verschiedenartige Aufwendungen für die Aufständierung und Verkabelung eines photovoltaischen Kraftwerkes gleicher Nennleistung zur Folge haben. Die im folgenden genannten Mengenangaben beziehen sich auf die Modellkraftwerke mit einer Nennleistung von 300 kWp Gleichstrom:

- Variante A:
6250 multikristalline Module, mit je $48 \text{ W}_{\text{peak}}$, Zellenfläche: 2500 m^2 ,
Modulfläche: 3107 m^2
- Variante B:
9090 amorphe Module, mit je $36 \text{ W}_{\text{peak}}$, Zellenfläche = Modulfläche = 5000 m^2
- Variante C:
1304 MIS-I-mono-Module, mit je $230 \text{ W}_{\text{peak}}$, Modulfläche 2400 m^2

Die Aufwendungen können in sechs typische, für ein PV- Kraftwerk erforderliche Komponenten, unterteilt werden:

- PV-Module
- Aufständering
- Verkabelung
- Gleichspannungsverteilung
- Wechselrichter
- Netzanschluß.

Bezüglich der Aufständering wurden, wie früher erwähnt, zwei Varianten betrachtet:

1. Eine 2-Bein-Art einer Normauslegung nach DIN, Windkanal-optimiert: 34 m^2
Modulfläche je Konstruktionseinheit /vgl. Band 5/.

Seine spezifischen Aufwendungen pro m^2 Modulfläche sind

- $24,6 \text{ kg}$ Stahl und
 - $115,2 \text{ kg}$ Beton
2. von MWB (Meßwandlerbau AG), Bamberg, wurden "leichte Flächentragwerke" als Tragestrukturen für PV-Module und Zellen entwickelt /Wecker 92/.

Unter "leichten Flächentragwerken" versteht man überdachende Bauwerke, die aus zugfesten textilen Flächenelementen und biege-, druck- oder zugfesten Tragkonstruktionen zusammengesetzt sind. Bei den zugfesten, flächenhaften Bauteilen handelt es sich um Membranen oder Seilnetze sowie um Konstruktionen aus diesen, die kostengünstig zu weitspannenden Tragwerken aufgebaut werden können.

Als Alternative zur Standardaufständering wird hier die Seilnetzverspannung von Standardmodulen betrachtet mit folgenden Daten /Wecker 92/ pro kW_p bei multikristallinen Modulen ($\eta = 9,6 \%$):

- $55,6 \text{ kg}$ Stahl (Mast)
- $15,9 \text{ kg}$ Stahl (Seilnetz)
- $19,1 \text{ kg}$ Al

Damit erhält man die in den nachfolgenden Tabellen vorgestellten spezifischen Stoffbilanzen (in $\text{kg/kW}_{\text{peak}}$) der in die 300 kW_p -Anlagen eintretenden Stoffmengen an Kraftwerkskomponenten:

Name	Wert	Einheit
MULTI-MODUL	$1.475 \cdot 10^5$	T
BETON B15 MIT HOZ	$1.193 \cdot 10^6$	T
STAHLBLECH	$2.705 \cdot 10^5$	T
KUPFER	$3.86 \cdot 10^4$	T
GUMMI	$7.8 \cdot 10^3$	T
EINFACHE ELEKTR. BAUTEILE	$2.8 \cdot 10^3$	T
ISOLIERSTOFF	$2.3 \cdot 10^3$	T
ELEKTRONIK	$2.2 \cdot 10^3$	T
POLYPROPYLEN	$1.6 \cdot 10^3$	T
KUNSTSTOFF	700	T

Tab. 58. Materialaufwand SOLARTANKSTELLE Variante S1: Bezogen auf 1 TWh STROM

Name	Wert	Einheit
AMORPHES MODUL	$2.782 \cdot 10^5$	T
BETON B15 MIT HOZ	$1.93 \cdot 10^6$	T
STAHLBLECH	$4.279 \cdot 10^5$	T
KUPFER	$6.05 \cdot 10^4$	T
GUMMI	$8.9 \cdot 10^3$	T
ELEKTRONIK	$2.8 \cdot 10^3$	T
EINFACHE ELEKTR. BAUTEILE	$2.2 \cdot 10^3$	T
POLYPROPYLEN	$1.7 \cdot 10^3$	T
ISOLIERSTOFF	$1.1 \cdot 10^3$	T
KUNSTSTOFF	700	T

Tab. 59. Materialaufwand SOLARTANKSTELLE Variante S2: Bezogen auf 1 TWh STROM

Name	Wert	Einheit
AMORPHES MODUL	$2.782 \cdot 10^5$	T
BETON B15 MIT HOZ	$3.809 \cdot 10^5$	T
STAHLBLECH	$1.142 \cdot 10^5$	T
KUPFER	$6 \cdot 10^4$	T
ALUMINIUM	$3.04 \cdot 10^4$	T
GUMMI	$1 \cdot 10^4$	T
ELEKTRONIK	$2 \cdot 10^3$	T
EINFACHE ELEKTR. BAUTEILE	$2 \cdot 10^3$	T
POLYPROPYLEN	$1.8 \cdot 10^3$	T
ISOLIERSTOFF	$1.2 \cdot 10^3$	T
KUNSTSTOFF	800	T

Tab. 60. Materialaufwand SOLARTANKSTELLE Variante S3: Bezogen auf 1 TWh STROM

Name	Wert	Einheit
MIS-MONO-MODUL	$1.595 \cdot 10^5$	T
BETON B15 MIT HOZ	$1.828 \cdot 10^5$	T
STAHLBLECH	$5.483 \cdot 10^4$	T
KUPFER	$2.984 \cdot 10^4$	T
ALUMINIUM	$1.459 \cdot 10^4$	T
GUMMI	$6.048 \cdot 10^3$	T
ELEKTRONIK	$1.865 \cdot 10^3$	T
EINFACHE ELEKTR. BAUTEILE	$1.865 \cdot 10^3$	T
POLYPROPYLEN	$1.865 \cdot 10^3$	T
PVC	$1.781 \cdot 10^3$	T
KUNSTSTOFF	746.2	T

Tab. 61. Materialaufwand SOLARTANKSTELLE Variante S4: Bezogen auf 1 TWh STROM

Die Stoffeinträge in die Umwelt bei der Herstellung der Nicht- PV-Komponenten (Glas, Stahl, NE-Metalle, Kunststoffe, Beton etc.) werden eigenen /Hantzsche 92a,b Band 4/ und externen Untersuchungen /Fritsche 89c, 'Enquete 90/' entnommen: Die projektinternen Erhebungen sind im Kapitel „Emissionsanalyse konventioneller Bau- und Werkstoffe“ auf Seite 73 wiedergegeben. Die Emissionen der restlichen Materialien zeigt die nachfolgende Tabelle /GEMIS/:

Material	SO ₂	NO _x	Staub	CO ₂
Kupfer	4	5	1	8800.
Kunststoff	5	5	1	6000.

Tab. 62. Materialbezogene Emissionsdaten:
Angaben in kg/t nach /Fritsche 89/.

5.1.3 Daten der konventionellen Alternativen

Bei den konventionellen Alternativen handelt es sich um zwei Technologiegruppen:

5.1.3.1 "Mittlere Fahrzeugflotte"

Die "mittlere" Fahrzeugflotte, wie sie zum gewählten Betrachtungszeitraum 2000-2005 voraussichtlich sein wird, ist hier festgelegt nach den beiden Szenarien 'Trend' und 'Reduktion' nach /Enquete 90/. Als abrundende Vergleichsbasis für den E-PKW wird zusätzlich ein auf niedrigen Verbrauch hingetrimmter konventioneller PKW, der ÖKO-Polo von VW /Scheurer 92/ herangezogen. Hintergrund ist dabei die Überlegung, daß ein Vergleich von Zukunftsoptionen auch PKWs gleicher motorischer Leistung einschließen sollte. E-PKWs liegen typischerweise zwischen 12- 35 kW, PKWs auf Treibstoffbasis im allgemeinen aber über 40 kW und sind in Reichweite, Beschleunigung und Höchstgeschwindigkeit den E-PKWs weit überlegen /Blümel 92, E-Wi 10/92/. Die spezifischen Emissionsdaten der Fahrzeugflotte und des ÖKO-Polo (Diesel) /Enquete 90, Scheurer 92, Brosthaus 90/ sind wie folgt, wobei die Emissionen der Treibstoffbereitstellung schon mitberücksichtigt sind:

Schadstoff	'87	"Trend"	"Reduktion"	"Öko-Polo" ¹
CO ₂	182	166	132	121.5
HC	2,3	0.75	0.49	0.29
NO _x	2,1	0.49	0.38	0.66
SO ₂	0,14	0.057	0.046	0.21
CO	11	2.50	2.00	0.82
Partikel	0.13	0.048	0.012	0.002

Tab. 63. Emissionsfaktoren der zugrunde gelegten Fahrzeugflotten:
in g/Pkm nach /Enquete 90/, /Scheurer 92/

¹Beim ÖKO-Polo wurde der Vorleistungsbeitrag auf der Basis eines Verbrauchs von 4 l/100 Pkm berechnet.

Die von der Enquete-Kommission eingestellten Werte für die Fälle "Trend" und "Reduktion" entsprechen realistischen Abschätzungen. So werden in einem Richtlinienentwurf der EG vom Januar 1993 folgende Grenzwerte vorgeschlagen (vgl. Tab. 64).

Fahrzeugmotor	CO	HC + NO _x	Partikel
Benzinmotor	2.2	0.5	-
Dieselmotor indirekte Einspritzung	1.0	0.7	0.08
Dieselmotor Direkteinspritzung	1.0	0.9	0.10

Tab. 64. Grenzwerte für PKW nach einem Richtlinienentwurf der EG:
in g/km /BR 100/93 /

Für das Jahr 2000 wird ein umfassenderes Konzept für weitere Emissionssenkungen gefordert. Allerdings unterblieb eine Konkretisierung.

5.1.3.2 Elektromobile

Da als Anwendungsbeispiel für die Photovoltaik ein Ausschnitt aus dem Verkehrssektor genommen wird, dessen Kennzahlen (Verkehrsaufkommen, PKW-Emissionen etc.) nur für die alten Bundesländer abgeschätzt wurden (und derzeit auch nur für diese geschätzt werden können), bezieht sich auch der Mix des öffentlichen Kraftwerkparcs nur auf die alten Bundesländer ("West"-BRD). Der unterstellte Kraftwerksmix und dazugehörige Emissionsfaktoren sind im Kapitel „Emissionsanalyse der Energiebereitstellung“ auf Seite 72 dargestellt.

5.1.4 Eingangsdaten der alternativen Szenarien

Eine wichtige gemeinsame Bezugsgröße der Szenarien ist noch zu benennen, nämlich die insgesamt angesetzten Personenkilometer (Pkm) in beruflichen Personennahverkehr (B-PNP):

Im Jahr 1987 wurden in den alten Bundesländern etwa 90,4 Mrd Pkm zu obigem Zwecke zurückgelegt /Enquete 90/. Diese Zahl ist eine wesentliche Definitionsgröße und soll hier auch für den Betrachtungshorizont 2005 zugrunde gelegt werden. Das Trend- und

Reduktions-Szenario aus /Enquete 90/ haben zwar andere Pkm-Aufkommen abgeschätzt (103,7 bzw. 77,9 Mrd Pkm), aber um zum einen die Szenariovarianten beschränkt zu halten und zum anderen Einschränkungsmaßnahmen im privaten Autoverkehr zu antizipieren, wurden die 90,4 Mrd Pkm für diese Analyse festgeschrieben. Der gesamte elektrische Nachladebedarf (ab Steckdose) des Berufs-PNV bei Abdeckung durch E-PKW's beträgt damit bei:

E-PKW "groß" (35 kWh/100 Pkm) →	31,64 TWh/a
E-PKW "klein" (15 kWh/100 Pkm) →	13,56 TWh/a

Der jährliche Strombedarf (ab Steckdose) pro E-PKW wurde schon oben auf 1925 ("groß") bzw. 825 ("klein") kWh/a abgeschätzt. Der aus dem Netz zu deckende Restbedarf an Strom pro E-PKW und Jahr berechnet sich aus der Differenz aus Strombedarf/E-PKW*a und solar bereitstellbarem Strom. Dieser ergibt sich aus dem Produkt von $10 \text{ m}^2 \text{ Panelfläche/PkW} * \eta \text{ (PV)} * 1000 \text{ kWh/m}^2\text{*a}$

Daraus berechnet sich dann auch die Aufspaltung der obigen 31,64 bzw. 13,56 TWh/a in Deckung durch PV und konventionell aus dem Netz.

Sollte nach dieser Berechnung die "Solartankstelle" Überschußstrom erzeugen, so wird die Dimensionierung der PV- überdachten Parkplätze auf die tatsächliche Nachfrage begrenzt, also kein Überschuß erzeugt. Dieser Fall tritt auf bei Panels mit hohem Wirkungsgrad und den "kleinen" E-PKW's.

Bei der Versorgung aus dem Netz müssen auch die Netzverluste berücksichtigt werden (ca. 5 %). Um diesen Faktor (ca. 1,05) erhöht sich die tatsächliche Erzeugung im Kraftwerk.

Schließlich sei noch angemerkt, daß die vorliegende Methode durchaus noch verfeinert werden kann, z.B. durch die Berücksichtigung des Lastgangs der öffentlichen Stromerzeugung /Sporckmann 92/, da hier aber ohnehin etliche Parameter nur relativ grobe Schätzungen sind und damit eine Grundunschärfe in jedem Fall gegeben ist, wird hier auf solche Detaillierungen verzichtet. Im Ergebnisteil wird - wieder als Benchmark - die vermutlich nicht so günstige Möglichkeit, nämlich die Deckung des Strombedarfs nur über den Kraftwerkmix mitbetrachtet.

Um die Zahl der zu analysierenden Szenarien überschaubar zu halten, wurde deren Zahl auf 4 begrenzt und mit den genannten Parametern folgende Aufspaltung der E-PKW-Versorgung für den B-PNV in Abhängigkeit von den PV-Modul-Typen festgelegt:

Variante	PKW-Größe (kWh/100 km)	Modultyp	Aufstände- rung	Strombedarf (TWh/a)	Solare Deckungs- rate (%)
S 1	35	Multikristallin	2-Bein	31.64	49.94
S 2	35	Amorph	2-Bein	31.64	31.29
S 3	15	Amorph	Seilnetz	13.56	73.01
S 4	15	MIS-I-Mono	Seilnetz	13.56	100.0

Tab. 65. Annahmen zu den gerechneten Varianten der Solartankstellen

Die Auswahl der 4 Szenarien bzw. "Solartankstellen" Varianten S1-S4 wurde nach dem Kriterium von Extremfällen getroffen:

1. Große E-PKWs - aufwendige Aufständering - ein hoher und ein niedriger Wirkungsgrad
2. Kleine E-PKWs - einfache Aufständering - ein niedriger und ein hoher Wirkungsgrad, letzterer nach fortgeschrittener Modulart

Es ist offensichtlich einfach, bei anderen Wirkungsgraden, Bedarfszahlen oder Einstrahlungswerten die elektrischen Deckungsbedarfsbeiträge umzurechnen. Es ist wohl auch klar, daß hier zeitweise die konventionelle Stromversorgung "einspringen" muß, nämlich zu sonnenschwachen Arbeitszeiten, aber dafür liefert die PV-Anlage ihrerseits zu sonnenstarken, aber bedarfsschwachen Zeiten (Wochenenden, Urlaub) ins Netz.

Bei der Variante S4 würde bei vollständiger Parkflächenüberdeckung durch PV-Panels sogar eine Überversorgung von 1250 zu 825 entsprechend einer solaren Deckungsrate von 1.52 vorliegen. Da nur die Bedarfsdeckung angestrebt wird, wird die Panelfläche entsprechend beschränkt.

Eine Erweiterung der PV-Deckungsbeiträge ist durchaus denkbar durch Ausweitung der PV-Flächen: So wäre auch eine zusätzliche Ausnutzung von Dachflächen auf Firmengebäuden möglich, so daß sich dieses Konzept sogar generell in Richtung einer solaren Vollversorgung der "Pendlerflotte mit Batterieautos" bewegen könnte. Eine derartige Strategie wurde aber im Rahmen dieser Analyse nicht betrachtet.

Ein weiterer wichtiger Aspekt sei erwähnt: Die hier zugrunde gelegten Annahmen für die Anwendung der PV sind für diese als ausgesprochen günstig anzusehen:

1. Der effektive Wirkungsgrad (Nutzungsgrad, d.h. die tatsächlich erzeugte elektrische Energie bezogen auf die Einstrahlung) der hier waagrecht aufgeständerten PV-Module wird gleich dem Nennwirkungsgrad gesetzt.
2. Während die Batterien der E-PKWs mit Gleichstrom aufgeladen werden, was einer 100 %-Nutzung des PV-Stroms entspricht, ist eine Netzeinspeisung des PV-Stroms über die Transformation in Wechselstrom mit Verlusten verbunden. Im Netz kommt also weniger an als die PV-Module erzeugen.
3. Der Strom aus dem Netz zur Batterieaufladung muß auf Gleichspannung transformiert werden, was ebenfalls verlustbehaftet ist.

Alle diese Verlustfaktoren führen zu höheren tatsächlichen Emissionen als im nachfolgenden ausgewiesen wird. Über den relativen Einfluß der einzelnen Faktoren sei auf Meßberichte aus PV-Feldern (Koborn-Gondorf, Neurather See, Neunburg vorm Wald etc.) verwiesen.

5.2 Ergebnisse der Prozeßkettenanalysen zu den Solartankstellen

Hier geht es darum, aus den vorhin zusammengestellten Daten mit den szenarioabhängigen Dimensionierungen (Beiträge der PV und des Strommix zur E-PKW-Versorgung im B-PNV) die Emissionen in die Umwelt anzugeben. Diesen Abgaben an die einzelnen Umweltkompartimente (Atmo-, Hydro- und Pedosphäre) werden

dann die Emissionen gegenübergestellt zum einen bei alleiniger Versorgung der E-PKW's aus dem Netz durch den Kraftwerkmix und zum anderen bei Deckung des B-PNV mit den im Kapitel „Ergebnisse der Prozesskettenanalysen zu den konventionellen PKW's“ auf Seite 187 angegebenen Typen konventioneller - fortgeschrittener - Fahrzeuge des Zeitraumes um 2005.

Diese sind definiert durch ihre Emissionsvektoren ("Trend" und "Reduktion" aus /Enquete 90/ und "Öko-Polo" mit Dieselantrieb als motorische Sparalternative).

Nachfolgend werden für die oben festgelegten 4 Alternativen von Solartankstellen (Varianten S1 - S4) folgende Tabellen angegeben:

- Annahmen
- Emissionen durch die Bereitstellung des Stromes über den Kraftwerkmix
- Die kumulierten Emissionen für die gesamte Prozeßkette
- Der Primärenergieaufwand für die gesamte Prozeßkette
- Materialaufwand zum Bau der Solartankstelle

Die Abgaben an die drei Kompartimente resultieren aus der Bereitstellung der Bau- und Werkstoffe zur Erstellung der "Solartankstellen" inklusive Aufständigung, Netzanschluß etc. (Spalte "PV" in den Tabellen) und aus der Deckung des Restbedarfs aus dem Netz durch den Mix der öffentlichen Kraftwerke. Beim Letzteren sind nur Emissionen in die Luft und sogenannte Abprodukte (feste Rückstände, teilweise verwertbar wie etwa REA-Gips) identifiziert (unter Berücksichtigung der Brennstoffbereitstellung).

Zur Wasserbelastung tragen nur die Solartankstellen bei.

Zum Vergleich der Emissionsmengen - traditionell im Energiesektor überwiegend auf Luftschadstoffe bezogen - werden nur die Werte für CO_2 , CO, NO_x , SO_x , CH_4 , NMVOC (Non- Methane-Volatile Organic Compounds) und Stäube ("Partikel") herangezogen. Problematisch ist durch die unterschiedliche Definitionen die Gegenüberstellung von Stoffklassen wie Organische Gase und Dämpfe (OGD), Kohlenwasserstoffe (KW), Methan, flüchtige organische Verbindungen (VOC) und Nichtmethan flüchtige organische Verbindungen (NMVOC).

Der gesamte Primärenergieaufwand (PEA) (Erstellung der Solartankstelle, Brennstoffdurchsatz durch den Kraftwerkmix) wird getrennt nach diesen Anteilen ("indirekt" und "direkt") ausgewiesen.

Die Prozessketten wurden jeweils für eine Endnachfrage von 90.4 Milliarden Personen-kilometer durchgerechnet. Entsprechend den betrachteten PKW-Typen und der betrachteten Solarzelle ergaben sich unter den angenommenen Randbedingungen die nachgefragte Strommenge sowie die über das Jahr gemittelte solare Deckungsrate.

5.2.1 Solartankstelle Variante S1

5.2.1.1 Annahmen

Die hier verfolgte Strategie ist durch folgende Komponenten gekennzeichnet:

Solarzellentyp:	Multikristallin
Modulwirkungsgrad:	$\eta = 9.6 \%$
Aufständigung:	Konventionell
PKW-Typ:	Untere Mittelklasse, 4-Sitzer
	Strombedarf: 35 kWh / 100 Pkm

Stromnachfrage:	31.64 TWh
Solarstrom :	15.79 TWh
Konv. Strommix:	15.85 TWh

5.2.1.2 Emissionen der gesamten Prozeßkette

Name	Emissionen Luft			Einheit
	Direkt	Indirekt	Summe	
KOHLLENWASSERSTOFFE	0	68.76	68.76	T
STICKSTOFF	0	$7.341 \cdot 10^5$	$7.341 \cdot 10^5$	T
WASSER	0	$1.671 \cdot 10^5$	$1.671 \cdot 10^5$	T
SAUERSTOFF	0	$3.055 \cdot 10^4$	$3.055 \cdot 10^4$	T
ARGON	0	$1.278 \cdot 10^4$	$1.278 \cdot 10^4$	T
WASSERSTOFF	0	$8.127 \cdot 10^3$	$8.127 \cdot 10^3$	T
SILIZIUMOXID-STAUß	0	789.5	789.5	T
METHYLENCHLORID	0	236.4	236.4	T
ISOPROPYLALKOHOL	0	78.93	78.93	T
TERPINOEL DIBUTYLPHTALAT	0	78.93	78.93	T
SCHWEFELWASSERSTOFF*	0	78.93	78.93	T
FLUOR*	0	71.04	71.04	T
VERBRENNUNGSPRODUKTE	0	23.68	23.68	T
KL.3 SB; PB...CR; F; CU; USW.	0	1.309	1.309	T
KL.2 AS; CO...NI; SE; TE	0	0.258	0.258	T
KL.1 CD; HG; TL	0	0.0527	0.0527	T
SCHWEFELOXIDE	0	54.62	54.62	T
STICKOXIDE	$7.35 \cdot 10^3$	$3.527 \cdot 10^3$	$1.087 \cdot 10^4$	T
SCHWEFELDIOXID	$7.852 \cdot 10^3$	$3.518 \cdot 10^3$	$1.137 \cdot 10^4$	T
KOHLLENMONOXID	$2.004 \cdot 10^3$	$6.807 \cdot 10^3$	$8.812 \cdot 10^3$	T
KOHLLENDIOXID	$9.393 \cdot 10^6$	$1.439 \cdot 10^6$	$1.083 \cdot 10^7$	T
STAUß	857.7	984.7	$1.842 \cdot 10^3$	T
METHAN	$2.34 \cdot 10^4$	401.9	$2.381 \cdot 10^4$	T
NMVOC	313.9	122.8	436.6	T

Tab. 66. Luftbelastung fuer das gesamte Netz Variante S1

Name	Emissionen Wasser			Einheit
	Direkt	Indirekt	Summe	
WASSER	0	$2.462 \cdot 10^8$	$2.462 \cdot 10^8$	T
CHLORWASSERSTOFF	0	$2.857 \cdot 10^4$	$2.857 \cdot 10^4$	T
KALIUMCHLORID	0	$4.82 \cdot 10^3$	$4.82 \cdot 10^3$	T
KALIUMSILOXAN	0	$2.526 \cdot 10^3$	$2.526 \cdot 10^3$	T
NATRIUMHYDROXID	0	868.6	868.6	T
NATRIUMNITRAT	0	315.6	315.6	T
NATRIUMFLUORIT	0	158.4	158.4	T
NATRIUMCHLORAT	0	39.47	39.47	T
NATRIUMDIHYDROPHOSPHAT	0	31.58	31.58	T
SILIZIUMOXID-STAU	0	3.157	3.157	T
TITANOXIDE	0	2.368	2.368	T
FESTSTOFF	0	407.8	407.8	T

Tab. 67. Wasserbelastung fuer das gesamte Netz Variante S1

Name	Abprodukte			Einheit
	Direkt	Indirekt	Summe	
ABRAUM AUS EISENERZGEWINNUNG	0	$3.203 \cdot 10^3$	$3.203 \cdot 10^3$	T
ABFAELLE AUS EISENERZAUFBE-REITUNG	0	123.9	123.9	T
HOCHOFENSCHLACKE	0	$2.88 \cdot 10^4$	$2.88 \cdot 10^4$	T
ELEKTROFILTERSTAUB	0	$5.118 \cdot 10^4$	$5.118 \cdot 10^4$	T
KONVERTERSCHLACKE	0	$3.521 \cdot 10^4$	$3.521 \cdot 10^4$	T
RESTSTOFFE WALZWERK	0	$2.626 \cdot 10^4$	$2.626 \cdot 10^4$	T
RUECKSTAENDE AUS KALZINIERUNG	0	$2.057 \cdot 10^3$	$2.057 \cdot 10^3$	T
BAUXITABRAUM	0	$2.122 \cdot 10^3$	$2.122 \cdot 10^3$	T
BAUXITABFALL	0	0.281	0.281	T
SILIZIUMTETRACHLORID	0	$3.53 \cdot 10^5$	$3.53 \cdot 10^5$	T
SILIZIUMOXID-STAU	0	$7.372 \cdot 10^4$	$7.372 \cdot 10^4$	T
TRICHLORSILAN	0	$4.523 \cdot 10^4$	$4.523 \cdot 10^4$	T
WASSERSTOFF	0	$1.318 \cdot 10^4$	$1.318 \cdot 10^4$	T
SI-HALTIGE SCHLACKE	0	$3.237 \cdot 10^3$	$3.237 \cdot 10^3$	T
SILIZIUMCARBID	0	$8.919 \cdot 10^3$	$8.919 \cdot 10^3$	T
MINERAL- SILIKONOEL	0	$6.951 \cdot 10^3$	$6.951 \cdot 10^3$	T
PAPIER	0	$1.502 \cdot 10^3$	$1.502 \cdot 10^3$	T
CALZIUMHYDROXID	0	$1.42 \cdot 10^3$	$1.42 \cdot 10^3$	T
CALZIUMFLUORID	0	$1.339 \cdot 10^3$	$1.339 \cdot 10^3$	T
PU PVC PV	0	791.8	791.8	T
ISOPROPYLALKOHOL - PASTENRESTE	0	314.4	314.4	T
POLYSULFIDELASTOMER	0	314.4	314.4	T
ETHYLENGLYCOL	0	244.5	244.5	T
OELBINDER	0	47.37	47.37	T
PE	0	39.47	39.47	T
PTFE-IT	0	23.68	23.68	T
FLUORIERTE ALTOELE	0	7.894	7.894	T
SI SIC	0	$1.223 \cdot 10^4$	$1.223 \cdot 10^4$	T
GLAS	0	$1.339 \cdot 10^3$	$1.339 \cdot 10^3$	T
DEFEKTE PV MODULE	0	$1.187 \cdot 10^3$	$1.187 \cdot 10^3$	T
DICHTMASSENRESTE	0	554.3	554.3	T

Name	Abprodukte			Einheit
	Direkt	Indirekt	Summe	
EVA-FOLIENRESTE	0	394.7	394.7	T
DEFEKTE WAFER	0	315.6	315.6	T
TRENNFOLIE (HD-PE)	0	315.6	315.6	T
GRAPHIT	0	63.16	63.16	T
TITANOXIDE	0	31.58	31.58	T
SILICONKLEBER	0	15.79	15.79	T
BAUMWOLLE	0	3.947	3.947	T
SILIZIUMOXIDE	0	3.167	3.167	T
CYANAKRYLATKLEBSTOFF	0	1.583	1.583	T
METHYLENCHLORID MIT POLYSULFIDELASTOMEREN	0	$1.583 \cdot 10^3$	$1.583 \cdot 10^3$	T
STAHLSCROTT	0	947.8	947.8	T
MESSING	0	1.578	1.578	T
SAND	0	70.35	70.35	T
GEKLAERTES ABWASSER	0	$1.969 \cdot 10^6$	$1.969 \cdot 10^6$	T
ABWAERME	0	0.00531	0.00531	TWH
ABGASVERLUSTE	0	0.00481	0.00481	TWH
KESSELASCHE	$5.105 \cdot 10^4$	492.2	$5.154 \cdot 10^4$	T
FLUGASCHE	$3.077 \cdot 10^5$	$2.968 \cdot 10^3$	$3.107 \cdot 10^5$	T
REA-GIPS	$1.088 \cdot 10^5$	$1.049 \cdot 10^3$	$1.098 \cdot 10^5$	T
GRANULAT	$9.073 \cdot 10^4$	875	$9.16 \cdot 10^4$	T
GROBASCHE	$1.278 \cdot 10^4$	123.2	$1.291 \cdot 10^4$	T

Tab. 68. Abprodukte fuer das gesamte Netz Variante S1

Name	PEA			Einheit
	Direkt	Indirekt	Summe	
PEA	48.11	13.73	61.84	TWH

Tab. 69. Primaerenergieaufwand fuer das gesamte Netz Variante S1

5.2.1.3 Materialaufwand zum Bau der Solartankstelle

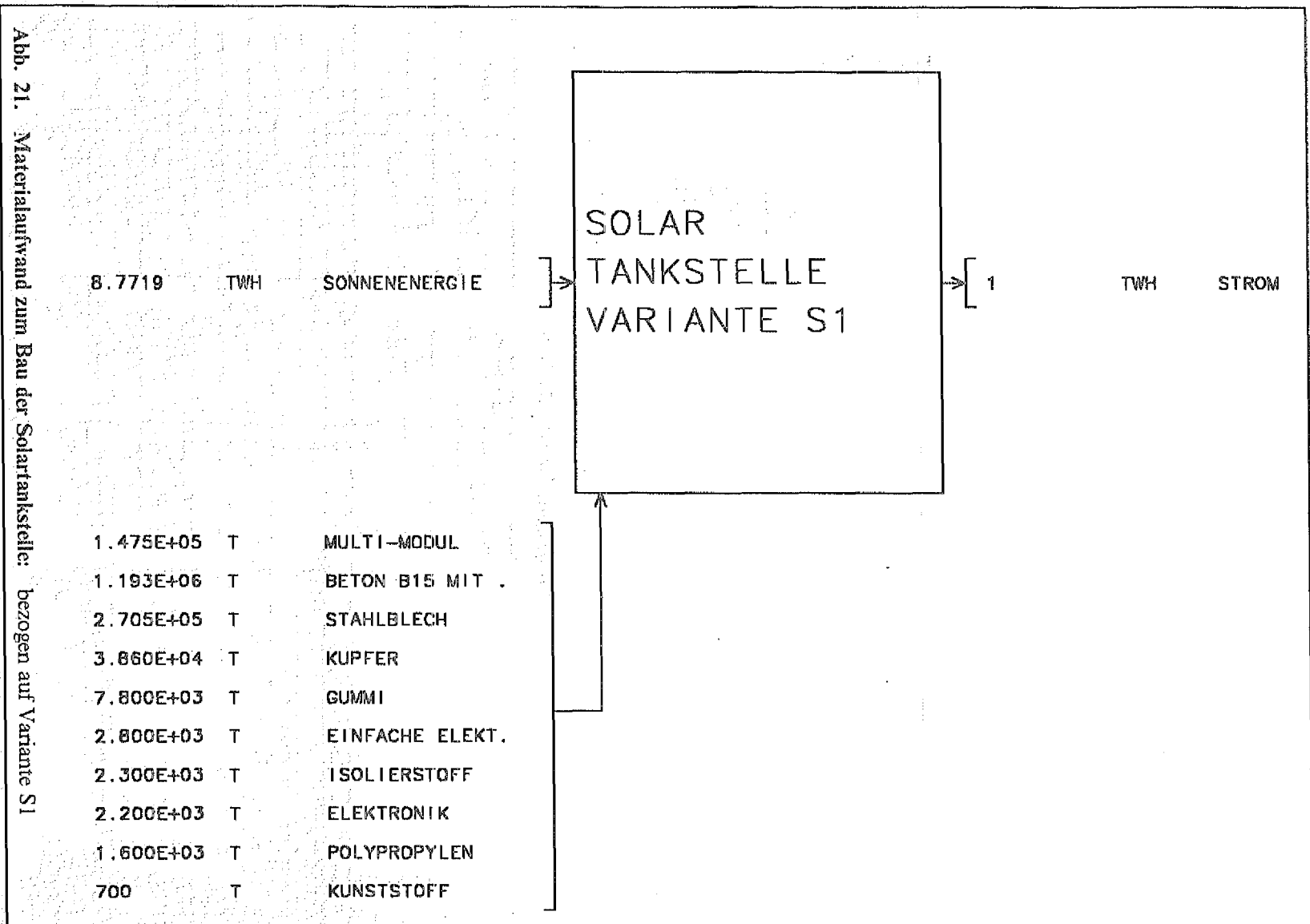


Abb. 21. Materialaufwand zum Bau der Solartankstelle: bezogen auf Variante S1

5.2.2 Solartankstelle Variante S2

5.2.2.1 Annahmen

Die hier verfolgte Strategie ist durch folgende Komponenten gekennzeichnet:

Solarzellentyp:	Amorph
Modulwirkungsgrad:	$\eta = 6.0 \%$
Aufständigung:	Konventionell
PKW-Typ:	Untere Mittelklasse, 4-Sitzer
	Strombedarf: 35 kWh / 100 Pkm

Stromnachfrage:	31.64 TWh
Solarstrom :	9.9 TWh
Konv. Strommix:	21.74 TWh

5.2.2.2 Emissionen der gesamten Prozeßkette

Name	Emissionen Wasser			Einheit
	Direkt	Indirekt	Summe	
WASSER	0	$4.2 \cdot 10^5$	$4.2 \cdot 10^5$	T
WASCHMITTEL	0	44.55	44.55	T
PASTE (TERPENTINOEL)	0	2.974	2.974	T
FESTSTOFF	0	413.7	413.7	T

Tab. 70. Wasserbelastung fuer das gesamte Netz Variante S2

Name	Emissionen Luft			Einheit
	Direkt	Indirekt	Summe	
KOHLLENWASSERSTOFFE	0	68.2	68.2	T
STICKSTOFF	0	$4.499 \cdot 10^4$	$4.499 \cdot 10^4$	T
WASSER	0	$1.138 \cdot 10^3$	$1.138 \cdot 10^3$	T
ARGON	0	99	99	T
LOESEMITEEL (TERPENTINOEL)	0	19.8	19.8	T
SAUERSTOFF	0	3.96	3.96	T
KL3 SB; PB...CR; F; CU; USW.	0	1.327	1.327	T
KL2 AS; CO...NI; SE; TE	0	0.261	0.261	T
KL1 CD; HG; TL	0	0.0535	0.0535	T
SCHWEELOXIDE	0	55.41	55.41	T
STICKOXIDE	$1.008 \cdot 10^4$	$1.524 \cdot 10^3$	$1.16 \cdot 10^4$	T
SCHWEEFDIOXID	$1.076 \cdot 10^4$	733.6	$1.15 \cdot 10^4$	T
KOHLLENMONOXID	$2.749 \cdot 10^3$	$6.597 \cdot 10^3$	$9.346 \cdot 10^3$	T
KOHLLENDIOXID	$1.288 \cdot 10^7$	$8.206 \cdot 10^5$	$1.37 \cdot 10^7$	T
STAUB	$1.176 \cdot 10^3$	975	$2.151 \cdot 10^3$	T
METHAN	$3.21 \cdot 10^4$	398.6	$3.25 \cdot 10^4$	T
NMVOG	430.4	121.8	552.2	T

Tab. 71. Luftbelastung fuer das gesamte Netz Variante S2

Name	Abprodukte			Einheit
	Direkt	Indirekt	Summe	
ABRAUM AUS EISENERZGEWINNUNG	0	$3.177 \cdot 10^3$	$3.177 \cdot 10^3$	T
ABFAELLE AUS EISENERZAUFBE-REITUNG	0	122.9	122.9	T
HOCHOFENSCHLACKE	0	$2.857 \cdot 10^4$	$2.857 \cdot 10^4$	T
ELEKTROFILTERSTAUB	0	$5.077 \cdot 10^4$	$5.077 \cdot 10^4$	T
KONVERTERSCHLACKE	0	$3.492 \cdot 10^4$	$3.492 \cdot 10^4$	T
RESTSTOFFE WALZWERK	0	$2.605 \cdot 10^4$	$2.605 \cdot 10^4$	T
RUECKSTAENDE AUS KALZINIERUNG	0	$2.04 \cdot 10^3$	$2.04 \cdot 10^3$	T
BAUXITABRAUM	0	$2.105 \cdot 10^3$	$2.105 \cdot 10^3$	T
BAUXITABFALL	0	0.279	0.279	T
SILIZIUMOXID	0	198	198	T
PUMPENOEEL	0	39.61	39.61	T
PHOSPHORPENTOXID (II/V)	0	0.0346	0.0346	T
DIBORTRIOXID	0	0.0148	0.0148	T
PHOSPHORPENTOXID (IV/X)	0	0.0099	0.0099	T
DEFEKTE PV-MODULE	0	$8.262 \cdot 10^3$	$8.262 \cdot 10^3$	T
TRENNFOLIE (HDPE)	0	247.5	247.5	T
TITANOXID-SCHLAMM	0	29.7	29.7	T
SILBER	0	9.9	9.9	T
NICKEL	0	4.95	4.95	T
SAND	0	71.37	71.37	T
GEKLAERTES ABWASSER	0	$1.997 \cdot 10^6$	$1.997 \cdot 10^6$	T
ABWAERME	0	0.00538	0.00538	TWH
ABGASVERLUSTE	0	0.00488	0.00488	TWH
KESSELASCHE	$7.001 \cdot 10^4$	488.2	$7.05 \cdot 10^4$	T
FLUGASCHE	$4.22 \cdot 10^5$	$2.944 \cdot 10^3$	$4.25 \cdot 10^5$	T
REA-GIPS	$1.492 \cdot 10^5$	$1.04 \cdot 10^3$	$1.502 \cdot 10^5$	T
GRANULAT	$1.244 \cdot 10^5$	868	$1.253 \cdot 10^5$	T
GROBASCHE	$1.753 \cdot 10^4$	122.2	$1.766 \cdot 10^4$	T

Tab. 72. Abprodukte fuer das gesamte Netz Variante S2

Name	PEA			Einheit
	Direkt	Indirekt	Summe	
PEA	65.98	7.765	73.74	TWH

Tab. 73. Primaerenergieaufwand fuer das gesamte Netz Variante S2

5.2.3 Solartankstelle Variante S3

5.2.3.1 Annahmen

Die hier verfolgte Strategie ist durch folgende Komponenten gekennzeichnet:

Solarzellentyp: Amorph
 Modulwirkungsgrad: $\eta = 6.0 \%$
 Aufständigung: Seilnetz
 PKW-Typ: Kleinwagen, 2-Sitzer
 Strombedarf: 15 kWh / 100 Pkm

Stromnachfrage: 13.56 TWh
 Solarstrom : 9.9 TWh
 Konv. Strommix: 3.66 TWh

5.2.3.2 Emissionen der gesamten Prozeßkette

Name	Emissionen Wasser			Einheit
	Direkt	Indirekt	Summe	
FESTSTOFF	0	$8.165 \cdot 10^4$	$8.165 \cdot 10^4$	KG
PASTE (TERPENTINOEL)	0	$2.974 \cdot 10^3$	$2.974 \cdot 10^3$	KG
WASCHMITTEL	0	$4.454 \cdot 10^4$	$4.454 \cdot 10^4$	KG
WASSER	0	$4.2 \cdot 10^8$	$4.2 \cdot 10^8$	KG
TEER	0	13.23	13.23	KG
FLUORIDE	0	9.447	9.447	KG
ANORGANISCHE STOFFE	0	$2.648 \cdot 10^3$	$2.648 \cdot 10^3$	KG
BLEI	0	22.72	22.72	KG
CSB	0	18.81	18.81	KG
BSB5	0	7.575	7.575	KG
SAEUREN	0	341.6	341.6	KG

Tab. 74. Wasserbelastung fuer das gesamte Netz Variante S3

Name	Emissionen Luft			Einheit
	Direkt	Indirekt	Summe	
SCHWEFELOXIDE	0	$1.093 \cdot 10^4$	$1.093 \cdot 10^4$	KG
KL1 CD; HG; TL	0	10.56	10.56	KG
KL2 AS; CO...NI; SE; TE	0	51.67	51.67	KG
KL3 SB; PB...CR; F; CU; USW.	0	262.1	262.1	KG
SAUERSTOFF	0	$3.96 \cdot 10^3$	$3.96 \cdot 10^3$	KG
LOESEMittel (TERPENTINOEL)	0	$1.98 \cdot 10^4$	$1.98 \cdot 10^4$	KG
ARGON	0	$9.9 \cdot 10^4$	$9.9 \cdot 10^4$	KG
WASSER	0	$1.138 \cdot 10^6$	$1.138 \cdot 10^6$	KG
STICKSTOFF	0	$4.499 \cdot 10^7$	$4.499 \cdot 10^7$	KG
KOHLLENWASSERSTOFFE	0	$1.82 \cdot 10^4$	$1.82 \cdot 10^4$	KG
TEER	0	$1.057 \cdot 10^3$	$1.057 \cdot 10^3$	KG
FLUORIDE	0	409.3	409.3	KG
CHLORWASSERSTOFF	0	$5.191 \cdot 10^3$	$5.191 \cdot 10^3$	KG
CHLORIDE	0	$3.009 \cdot 10^3$	$3.009 \cdot 10^3$	KG
CHLOR	0	7.041	7.041	KG

Name	Emissionen Luft			Einheit
	Direkt	Indirekt	Summe	
FLUOR-STAU	0	$1.745 \cdot 10^3$	$1.745 \cdot 10^3$	KG
FLUOR-GAS	0	$2.197 \cdot 10^3$	$2.197 \cdot 10^3$	KG
KOHLN-WASSERSTOFFE	0	$1.444 \cdot 10^4$	$1.444 \cdot 10^4$	KG
INERTER STAU	0	$1.194 \cdot 10^4$	$1.194 \cdot 10^4$	KG
STICKOXIDE	$1.696 \cdot 10^6$	$7.582 \cdot 10^5$	$2.455 \cdot 10^6$	KG
SCHWEFELDIOXID	$1.812 \cdot 10^6$	$7.593 \cdot 10^5$	$2.572 \cdot 10^6$	KG
KOHLNMONOXID	$4.628 \cdot 10^5$	$1.912 \cdot 10^6$	$2.375 \cdot 10^6$	KG
KOHLENDIOXID	$2.168 \cdot 10^9$	$5.915 \cdot 10^8$	$2.76 \cdot 10^9$	KG
STAU	$1.98 \cdot 10^5$	$3.328 \cdot 10^5$	$5.308 \cdot 10^5$	KG
METHAN	$5.404 \cdot 10^6$	$3.59 \cdot 10^5$	$5.763 \cdot 10^6$	KG
NM-VOC	$7.246 \cdot 10^4$	$5.111 \cdot 10^4$	$1.235 \cdot 10^5$	KG

Tab. 75. Luftbelastung fuer das gesamte Netz Variante S3

Name	Abprodukte			Einheit
	Direkt	Indirekt	Summe	
ABGASVERLUSTE	0	$9.638 \cdot 10^{-4}$	$9.638 \cdot 10^{-4}$	TWH
ABWAERME	0	0.00106	0.00106	TWH
GEKLAERTES ABWASSER	0	$3.943 \cdot 10^8$	$3.943 \cdot 10^8$	KG
SAND	0	$1.408 \cdot 10^4$	$1.408 \cdot 10^4$	KG
NICKEL	0	$4.95 \cdot 10^3$	$4.95 \cdot 10^3$	KG
SILBER	0	$9.9 \cdot 10^3$	$9.9 \cdot 10^3$	KG
TITANOXID-SCHLAMM	0	$2.97 \cdot 10^4$	$2.97 \cdot 10^4$	KG
TRENNFOLIE (HDPE)	0	$2.474 \cdot 10^5$	$2.474 \cdot 10^5$	KG
DEFEKTE PV-MODULE	0	$8.262 \cdot 10^6$	$8.262 \cdot 10^6$	KG
PHOSPHORPENTOXID (IV-X)	0	9.9	9.9	KG
DIBORTRIOXID	0	14.85	14.85	KG
PHOSPHORPENTOXID (II-V)	0	34.65	34.65	KG
PUMPENÖL	0	$3.96 \cdot 10^4$	$3.96 \cdot 10^4$	KG
SILIZIUMOXID	0	$1.98 \cdot 10^5$	$1.98 \cdot 10^5$	KG
BAUXITABFALL	0	$5.145 \cdot 10^3$	$5.145 \cdot 10^3$	KG
BAUXITABRAUM	0	$3.864 \cdot 10^7$	$3.864 \cdot 10^7$	KG
RUECKSTAEENDE AUS KALZINIERUNG	0	$6.845 \cdot 10^5$	$6.845 \cdot 10^5$	KG
RESTSTOFFE WALZWERK	0	$6.955 \cdot 10^6$	$6.955 \cdot 10^6$	KG
KONVERTERSCHLACKE	0	$9.325 \cdot 10^6$	$9.325 \cdot 10^6$	KG
ELEKTROFILTERSTAU	0	$1.355 \cdot 10^7$	$1.355 \cdot 10^7$	KG
HOCHOFENSCHLACKE	0	$7.628 \cdot 10^6$	$7.628 \cdot 10^6$	KG
ABFALLE AUS EISENERZAUFBEREITUNG	0	$3.279 \cdot 10^4$	$3.279 \cdot 10^4$	KG
ABRAUM AUS EISENERZGEWINNUNG	0	$8.482 \cdot 10^5$	$8.482 \cdot 10^5$	KG
ROTSCHLAMM	0	$2.504 \cdot 10^7$	$2.504 \cdot 10^7$	KG
STEINSALZRUECKSTAND	0	$3.542 \cdot 10^5$	$3.542 \cdot 10^5$	KG
STEINSALZABRAUM	0	$9.119 \cdot 10^3$	$9.119 \cdot 10^3$	KG
WASSERSTOFF	0	$9.469 \cdot 10^4$	$9.469 \cdot 10^4$	KG
INERTER FESTSTOFF	0	$1.125 \cdot 10^6$	$1.125 \cdot 10^6$	KG
FILTERSTAU	0	$8.262 \cdot 10^4$	$8.262 \cdot 10^4$	KG
RUECKSTAEENDE AUS DER SCHROTSTAUFBEREITUNG	0	$1.577 \cdot 10^5$	$1.577 \cdot 10^5$	KG
RUECKSTAEENDE AUS ALUMINIUM-SCHMELZE	0	$2.956 \cdot 10^5$	$2.956 \cdot 10^5$	KG
KATHODENAUSBRUCH	0	$3.075 \cdot 10^5$	$3.075 \cdot 10^5$	KG

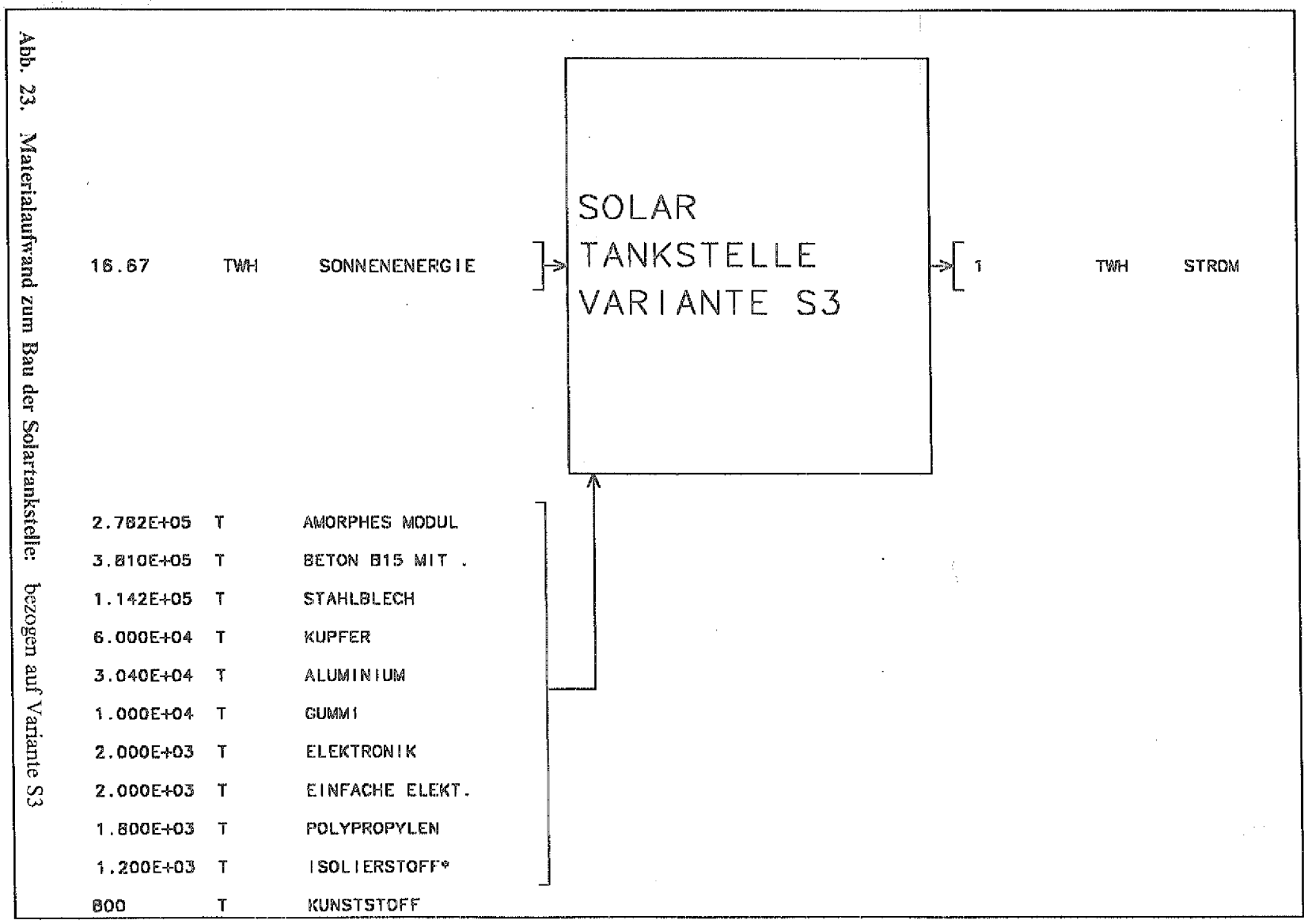
Name	Abprodukte			Einheit
	Direkt	Indirekt	Summe	
KESSELASCHE	$1.178 \cdot 10^7$	$6.034 \cdot 10^5$	$1.239 \cdot 10^7$	KG
FLUGASCHE	$7.105 \cdot 10^7$	$3.637 \cdot 10^6$	$7.469 \cdot 10^7$	KG
REA-GIPS	$2.512 \cdot 10^7$	$1.286 \cdot 10^6$	$2.641 \cdot 10^7$	KG
GRANULAT	$2.094 \cdot 10^7$	$1.072 \cdot 10^6$	$2.202 \cdot 10^7$	KG
GROBASCHE	$2.952 \cdot 10^6$	$1.511 \cdot 10^5$	$3.103 \cdot 10^6$	KG

Tab. 76. Abprodukte fuer das gesamte Netz Variante S3

Name	PEA			Einheit
	Direkt	Indirekt	Summe	
PEA	11.11	6.622	17.73	TWH

Tab. 77. Primaerenergieaufwand fuer das gesamte Netz Variante S3

5.2.3.3 Materialaufwand zum Bau der Solartankstelle



5.2.4 Solartankstelle Variante S4

5.2.4.1 Annahmen

Die hier verfolgte Strategie ist durch folgende Komponenten gekennzeichnet:

Solarzellentyp:	MIS-I-Monokristallin
Modulwirkungsgrad:	$\eta = 12.5 \%$
Aufständerung:	Seilnetz
PKW-Typ:	Kleinwagen, 2-Sitzer
	Strombedarf: 15 kWh / 100 Pkm

Stromnachfrage:	13.56 TWh
Solarstrom :	13.56 TWh
Konv. Strommix:	- TWh

In diesem Fall wurde die Dimensionierung der PV-überdachten Parkplätze auf die tatsächliche Nachfrage von 13,56 TWh/a begrenzt, also kein solarer Überschuß erzeugt. (Eine solare Überdachung der Firmenparkplätze würde hier 20,55 TWh/a bringen, also eine Überdeckung von 52 %).

5.2.4.2 Emissionen der gesamten Prozeßkette

Stoffe	Menge / T /
SAEUREN	0.224
BSB5	0.00498
CSB	0.0123
BLEI	0.0149
ANORGANISCHE STOFFE	1.741
FLUORIDE	0.00621
TEER	0.00869
KALZIUMNITRAT	$1.501 \cdot 10^3$
ESSIGSAEURE	$3.868 \cdot 10^3$
ACETON	577.5
REINIGUNGSMITTEL	173.2
NATRIUMHYDROXID	346.5
NATRIUMNITRAT	115.5
SILIZIUMDIOXID	23.15
NATRIUMFLUORID	57.77
NATRIUMACETAT	57.77
WASSER	$2.036 \cdot 10^7$
CHLORWASSERSTOFF	$2.01 \cdot 10^4$
ABWASSER	$1.829 \cdot 10^6$
KUEHLWASSER	$1.522 \cdot 10^8$
CAESIUMCHLORID	0.551
KALIUMCHLORID	$1.1 \cdot 10^4$
FESTSTOFF	53.68

Tab. 78. Wasserbelastung fuer das gesamte Netz Variante S4

Stoff	Menge / T /
INERTER STAUB	7.855
KOHLENWASSERSTOFFE	9.497
FLUOR-GAS	1.444
FLUOR-STAUB	1.147
CHLOR	0.00462
CHLORIDE	1.978
CHLORWASSERSTOFF	3.413
FLUORIDE	0.269
TEER	0.695
KOHLENWASSERSTOFFE	11.97
METHAN	236.1
NMVOC	33.61
SILIZIUMDIOXID-FEINSTAUB	557.1
KOHLENDIOXID	$8.204 \cdot 10^5$
WASSER	$1.183 \cdot 10^5$
SCHWEFELDIOXID	$2.456 \cdot 10^3$
SCHWEFELWASSERSTOFF	69.68
KOHLENMONOXID	$1.396 \cdot 10^3$
FLUOR	69.68
STICKOXIDE	$1.902 \cdot 10^3$
ARGON	$3.06 \cdot 10^4$
ACETON	51.98
WASSERSTOFF	$1.043 \cdot 10^4$
STICKSTOFF SAUERSTOFF	$4.949 \cdot 10^4$
HCL/MECL/WASSER/KOHLENDIOXID	0.27
STICKSTOFF/SILIZIUMTERAFLUORID	14.36
DIMETHYLPHTHALAT	0.203
KL.3 SB; PB...CR; F; CU; USW.	0.172
KL.2 AS; CO...NI; SE; TE	0.0339
KL.1 CD; HG; TL	0.00694
STAUB	220.9
SCHWEFELOXIDE	7.19

Tab. 79. Luftbelastung fuer das gesamte Netz Variante S4

Stoff	Menge / T /
KATHODENAUSBRUCH	202.2
RUECKSTAENDE AUS ALUMINIUM-SCHMELZE	194.4
RUECKSTAENDE AUS DER SCHROTTAUFBEREITUNG	103.7
FILTERSTAUB	54.32
INERTER FESTSTOFF	740
WASSERSTOFF	62.26
STEINSALZABRAUM	5.995
STEINSALZRUECKSTAND	232.9
ROTSCHLAMM	$1.646 \cdot 10^4$
KESSELASCHE	396.7
FLUGASCHE	$2.391 \cdot 10^3$
REA-GIPS	845.6
GRANULAT	705.1
GROBASCHE	99.35

Stoff	Menge / T /
ABRAUM AUS EISENERZGEWINNUNG	557.7
ABFAELLE AUS EISENERZAUFBE-REITUNG	21.56
HOCHOFENSCHLACKE	$5.015 \cdot 10^3$
ELEKTROFILTERSTAUB	$8.911 \cdot 10^3$
KONVERTERSCHLACKE	$6.13 \cdot 10^3$
RESTSTOFFE WALZWERK	$4.572 \cdot 10^3$
RUECKSTAENDE AUS KALZINIERUNG	450
BAUXITABRAUM	$2.54 \cdot 10^4$
BAUXITABFALL	3.383
CALZIUMFLUORID	$1.097 \cdot 10^3$
SILIZIUM-ABRIEB	$6.177 \cdot 10^3$
EPOXITKLEBER	57.75
VAKUUMPUMPENÖL	0.0119
PE	28.88
PTFE-IT	17.32
SILIZIUM	635.2
QUARZTIEGEL	$5.197 \cdot 10^3$
GRAPHITTIEGEL + HEIZELEMENTE	115.5
GRAPHITTRAEGER	288.8
GRAPHIT	46.2
BAUMWOLLE	11.54
NICKELMASKEN	49.5
FLUORWASSERSTOFF	550
ALUMINIUMOXID	$2.75 \cdot 10^3$
SILIZIUMDIOXID	$3.3 \cdot 10^3$
DEFEKTE WAFER	165
ACRYL-GIESSHARZ-RESTE IN DIMETHYL-PHTHALAT	628.1
BUTYL-KAUTSCHUK-RESTE	125.6
DEFEKTE MODULE	108.6
SAND	9.261
GEKLAERTES ABWASSER	$2.592 \cdot 10^5$
ABWAERME ¹	$6.991 \cdot 10^{-4}$
ABGASVERLUSTE ¹	$6.336 \cdot 10^{-4}$

Tab. 80. Abprodukte fuer das gesamte Netz Variante S4:
¹: in TWh

Name	Menge / TWh /
PEA	7.675

Tab. 81. Primaerenergieaufwand fuer das gesamte Netz Variante S4

5.2.4.3 Materialaufwand zum Bau der Solartankstelle

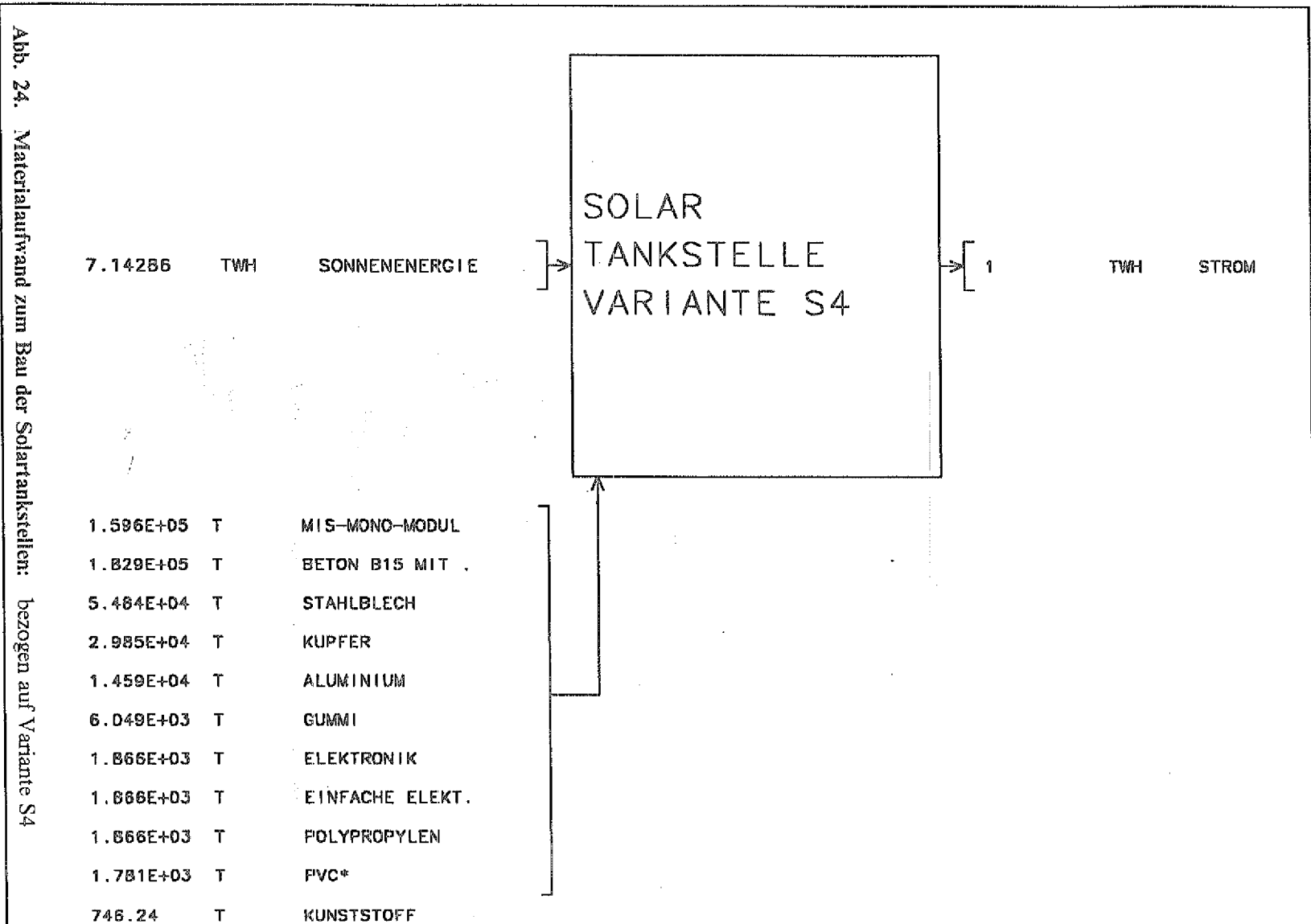


Abb. 24. Materialaufwand zum Bau der Solartankstellen: bezogen auf Variante S4

5.3 Ergebnisse der Prozesskettenanalysen zu den konventionellen PKW's

Wie schon eingangs erwähnt, werden weiter konventionelle Alternativen zur Deckung des B-PNV zu Vergleichszwecken betrachtet:

1. Versorgung der E-PKW's (Mittelklasse und Kleinwagen) durch die Kraftwerke der öffentlichen Versorgung.
2. Durch konventionelle motorische PKW's.
Die spezifischen Erwartungs-Mittelwerte der Emissionen des PKW-Bestands in den alten Bundesländern für den Betrachtungszeitraum 2005 sind in /Enquete 90/ durch zwei Szenarien, das Trend- und das Reduktionsszenario festgelegt.
3. Dieseltreibendes Sparmobil
Wegen des hohen fossilen Beitrags zur Stromversorgung in Deutschland sind Diesel-betriebene Sparmodelle kleiner Leistung mit Abgasreinigung eine ernstzunehmende Alternative zu E-PKW's. Ein Beispiel dafür ist der Öko-Polo von VW.

5.3.1 Benzin- und dieseltreibende PKW

Stoff	PKW 'Heute'	Trend - Szenario	Reduktions - Szenario	Öko - Polo
Nichtmethan- Kohlenwasserstoffe	181000	50000	26000	13000
Schwefeldioxid	12000	5200	4200	19000
Stickoxide	190000	44300	34400	60000
Staub	11000	4300	1100	200

Tab. 82. Emissionen der betrachteten konventionellen Varianten in Tonnen/a

Für den Öko-Polo wurden 4 l/100 Pkm Dieseltreibstoff angesetzt (unterer Heizwert 35,65 MJ/l /Weidmann 92/), Wirkungsgrad der Bereitstellung 91,5 % /Blandow 91/.

5.3.2 Elektromobile

Die Emissionen des Kraftwerk-Mix werden für die zwei Alternativ-Fälle "großer" und "kleiner" E-PKW (35 bzw. 15 kWh/100 Pkm) berechnet. Die 90,4 Mrd Pkm führen dann zu Netznachfragen von 31,64 bzw. 13,56 TWh/a.

Damit ergaben sich folgende jährlichen Emissionen durch den Kraftwerk-Mix:

Stoff	Variante E1	Variante E2
NMVOC	268.5	626.5
METHAN	$2.002 \cdot 10^4$	$4.672 \cdot 10^4$
STAUB	733.7	$1.711 \cdot 10^3$
KOHLENDIOXID	$8.035 \cdot 10^6$	$1.874 \cdot 10^7$
KOHLNMONOXID	$1.714 \cdot 10^3$	$4.001 \cdot 10^3$
SCHWEFELDIOXID	$6.717 \cdot 10^3$	$1.567 \cdot 10^4$
STICKOXIDE	$6.287 \cdot 10^3$	$1.467 \cdot 10^4$

Tab. 83. Luftbelastungen der Varianten E1 und E2 in Tonnen.

Stoff	Variante E1	Variante E2
GROBASCHE	$1.093 \cdot 10^4$	$2.552 \cdot 10^4$
GRANULAT	$7.761 \cdot 10^4$	$1.811 \cdot 10^5$
REA-GIPS	$9.309 \cdot 10^4$	$2.172 \cdot 10^5$
FLUGASCHE	$2.632 \cdot 10^5$	$6.142 \cdot 10^5$
KESSELASCHE	$4.367 \cdot 10^4$	$1.018 \cdot 10^5$

Tab. 84. Abprodukte der Varianten E1 und E2 in Tonnen.

Stoff	Variante E1	Variante E2
PEA	41.15	96.02

Tab. 85. Primärenergieaufwand Varianten E1 und E2 in TWh.

5.4 Abschließende Ermittlung der umwelterheblichen Stoffe

Die Vorgehensweise zur Ermittlung der umwelterheblichen Stoffe wurde in „Vorgehensweise zur Umwelterheblichkeitsprüfung“ auf Seite 60 dargestellt.

Nach Vorliegen der Mengenabschätzungen aus der Prozeßkettenrechnung können wesentlich mehr Stoffe als in der Orientierungsphase bzgl. ihrer Umwelterheblichkeit eingeschätzt werden.

Die nachfolgenden Tabellen Tab. 86 bis Tab. 89 auf Seite 193 enthalten alle als umwelterheblich eingeschätzten Stoffe sowie alle Stoffe, für die die Datengrundlage zu einer Beurteilung nicht ausreicht.

Nicht aufgenommen in die Tabelle wurden Nebenprodukte sowie wiederverwertete Stoffe sowie Stoffe, die (im Normalbetrieb) nicht an die Umwelt abgegeben werden.

Stoffname	UE	NUE	nicht eingestuft
Verbrennungsprodukte (CO ₂ , H ₂ O, Ethan, Asche)		X	
Methan		X	
NMVOC	X		
Wasserstoff		X	
Sauerstoff		X	
Polyethylen		X	
Kohlendioxid (CO ₂)		X	
Kohlenmonoxid		X	
Schwefeldioxid (SO ₂)	X		
Stickstoffoxide (NO _x)	X		
Fluor	X		
Fluorwasserstoff (HF)	X		
Quarz - Feinstaub (SiO ₂)	X		
Schwefelwasserstoff (H ₂ S)		X	
Argon (Ar)		X	
PTFE-IT	X		
p-Toluidin	X		
Cyanacrylsäure-methylester	X		
SiO ₂ (Quarz)		X	
Methylenchlorid	X		
Isopropyl-Alkohol	X		
Isopropyl-Alkohol mit Pastenresten	X		
Terpentinöl Dibutylphthalat			X
Kaliumchlorid		X	
Si-SiC			X
Siliciumhaltige Schlacke			X
Natriumhypochlorid		X	
Natriumdihydrogenphosphat		X	
Kaliumsilikat (K ₂ SiO ₃)		X	
Ethylenglykol (C ₂ H ₆ O ₂)		X	
Graphit		X	
EVA-Folienreste	X		
defekte Wafer			X
Trennfolie (HD-PE)			X
Natriumhydroxid	X		
Natriumfluorid	X		
Natriumnitrat		X	

Stoffname	UE	NUE	nicht eingestuft
Calciumhydroxid		X	
Calciumfluorid	X		
Baumwolle		X	
Chlorwasserstoff (HCl)	X		
defekte PV - Module			X
Titanoxid (neue Verfahren)		X	
Siliziumcarbid (SiC)			X
Mineral-/Siliconöl	X		
Papier		X	
PU/PVC/PV	X		
Polyethylen		X	
Polysulfidelastomer mit Methylenchloridresten			X
Ölbinder			X
fluorierte Altöle	X		
Glas			X
Siliconkleber			X
Dichtmassenreste			X
Siliziumoxid (SiO)			X
Feststoffe im Wasser			X
Kohlenwasserstoffe	X		
Stickstoff		X	
Staub			X
Schadstoffe der Klasse 1, TA Luft			X
Schadstoffe der Klasse 2, TA Luft			X
Schadstoffe der Klasse 3, TA Luft			X
Abraum aus Eisenerzgewinnung			X
Abfälle aus Eisenerzaufbereitung			X
Hochofenschlacke			X
Elektrofilterstaub			X
Konverterschlacke			X
Reststoffe Walzwerk			X
Rückstände aus Kalzinierung			X
Bauxitabraum			X
Bauxitabfall		X	
Kesselasche		X	
Flugasche			X
REA-Gips			X
Granulat			X
Grobasche			X

Tab. 86. Umwelterhebliche Stoffe zur Herstellung der Solartankstelle, konventionelle Aufständigung und multikristalline Module: (Variante S1)

Stoffname	UE	NUE	nicht eingestuft
Methan		X	
Sauerstoff		X	
Kohlendioxid (CO ₂)		X	
Kohlenmonoxid		X	
Schwefeldioxid (SO ₂)	X		
Stickstoffoxide (NO _x)	X		

Stoffname	UE	NUE	nicht eingestuft
Argon (Ar)		X	
NM VOC	X		
defekte PV - Module			X
Trennfolie (HD-PE)			X
Waschmittel			X
Siliziummonoxid		X	
Feststoffe im Wasser			X
Kohlenwasserstoffe	X		
Stickstoff		X	
Staub			X
Schadstoffe der Klasse 1, TA Luft			X
Schadstoffe der Klasse 2, TA Luft			X
Schadstoffe der Klasse 3, TA Luft			X
Abraum aus Eisenerzgewinnung			X
Phosphorpentoxid (II/V)		X	
Dibortrioxid		X	
Phosphorpentoxid (IV/X)		X	
Titanoxid-Schlamm (neue Verfahren)		X	
Abfälle aus Eisenerzaufbereitung			X
Abraum aus Eisenerzgewinnung			X
Hochofenschlacke			X
Elektrofilterstaub			X
Konverterschlacke			X
Reststoffe Walzwerk			X
Rückstände aus Kalzinierung			X
Bauxitabraum			X
Bauxitabfall		X	
Kesselasche		X	
Flugasche			X
REA-Gips			X
Granulat			X
Grobasche			X

Tab. 87. Umwelterhebliche Stoffe zur Herstellung der Solartankstelle, konventionelle Aufständering und amorphe Module: (Variante S2)

Stoffname	UE	NUE	nicht eingestuft
Säuren			X
BSB5			X
CSB			X
Blei		X	
Anorganische Stoffe			X
Fluoride			X
Teer			X
Wasserstoff		X	
Salzsäure			X
Sauerstoff		X	
Methan		X	
Terpentinöl			X
Chloride		X	

Stoffname	UE	NUE	nicht eingestuft
Fluorwasserstoff	X		
Chlor		X	
Fluor	X		
inertter Staub			X
Kohlenmonoxid		X	
Kohlendioxid (CO ₂)		X	
Stickstoffoxide (NO _x)	X		
Pumpenöl			X
P ₄ O ₁₀		X	
P ₂ O ₅		X	
Argon (Ar)		X	
NMVOC	X		
B ₂ O ₃		X	
Siliziumoxid			X
Terpentinöl			X
Waschmittel			X
defekte PV - Module			X
Trennfolie (HDPE)			X
Titanoxid (neue Verfahren)		X	
Schwefeldioxid	X		
Feststoffe im Wasser			X
Kohlenwasserstoffe	X		
Stickstoff		X	
Staub			X
Schadstoffe der Klasse 1, TA Luft			X
Schadstoffe der Klasse 2, TA Luft			X
Schadstoffe der Klasse 3, TA Luft			X
Abfälle aus Eisenerzaufbereitung			X
Abraum aus Eisenerzgewinnung			X
Hochfenschlacke			X
Elektrofilterstaub			X
Konverterschlacke			X
Reststoffe Walzwerk			X
Rückstände aus Kalzinierung			X
Bauxitabraum			X
Bauxitabfall		X	
Rotschlamm			X
Steinsalzrückstand			X
Steinsalzabraum			X
Wasserstoff		X	
Inertter Feststoff			X
Filterstaub			X
Rückstände aus der Schrottaufbereitung			X
Rückstände aus Aluminiumschmelze			X
Kathodenausbruch			X
Kesselasche		X	
Flugasche			X
REA-Gips			X
Granulat			X
Grobasche			X

Tab. 88. Umwelterhebliche Stoffe zur Herstellung der Solartankstelle, Seilnetz-
Aufständerung und amorphe Module: (Variante S3)

Stoffname	UE	NUE	nicht eingestuft
Säuren			X
BSB5			X
CSB			X
Blei		X	
Anorganische Stoffe			X
Fluoride			X
Teer			X
Calciumnitrat		X	
Essigsäure		X	
Aceton		X	
Reinigungsmittel			X
Natriumnitrat		X	
Siliziumdioxid (in Wasser)		X	
Natriumfluorid	X		
Natriumacetat		X	
Fluor	X		
Fluorwasserstoff	X		
Chlor		X	
Chloride		X	
Teer			X
Stickstoff		X	
Natriumhydroxid			X
Stickstoff + Siliziumtetrafluorid			X
Kohlendioxid		X	
Methan		X	
NMVOG	X		
Schwefelwasserstoff		X	
Kohlenmonoxid		X	
Argon		X	
Aceton		X	
Wasserstoff		X	
HCl MeCl H ₂ O CO ₂		X	
Aluminiumoxid			X
Si-Reste			X
Dimethylphthalat			X
Acryl-Gießharzreste in Dimethylphthalat			X
Buthyl-Kautschuk			X
defekte Module			X
defekte Solarzellen			X
Quarz - Feinstaub (SiO ₂)			X
Chlorwasserstoff			X
Sauerstoff		X	
Cäsiumchlorid		X	
Kaliumchlorid		X	
Schwefeldioxid	X		
Stickstoffdioxid	X		
Feststoffe im Wasser			X
Kohlenwasserstoffe	X		

Stoffname	UE	NUE	nicht eingestuft
Staub			X
Calciumfluorid	X		
Epoxidkleber	X		
Vakuumpumpenöl			X
PE		X	
PTFE/TF			X
Siliciumdioxid		X	
Graphittiegel			X
Graphit		X	
Baumwolle		X	
Abfälle aus Eisenerzaufbereitung			X
Abraum aus Eisenerzgewinnung			X
Hochofenschlacke			X
Elektrofilterstaub			X
Konverterschlacke			X
Reststoffe Walzwerk			X
Rückstände aus Kalzinierung			X
Bauxitabraum			X
Bauxitabfall		X	
Rotschlamm			X
Steinsalzrückstand			X
Steinsalzabraum			X
Wasserstoff		X	
Inertter Feststoff			X
Filterstaub			X
Rückstände aus der Schrottaufbereitung			X
Rückstände aus Aluminiumschmelze			X
Kathodenausbruch			X
Schadstoffe der Klasse 1, TA Luft			X
Schadstoffe der Klasse 2, TA Luft			X
Schadstoffe der Klasse 3, TA Luft			X
Kesselasche		X	
Flugasche			X
REA-Gips			X
Granulat			X
Grobasche			X

Tab. 89. Umwelterhebliche Stoffe zur Herstellung der Solartankstelle, Seilnetz - Aufstellung und MIS-I-Module: (Variante S4)

6.0 Beurteilungsphase

Bei der Durchführung einer Umweltvorsorgeuntersuchung ist es unverzichtbar, eine umfassende Analyse der wichtigsten bestehenden und neuen konkurrierenden Techniken durchzuführen, indem die Stoffströme der einzelnen Alternativen über die gesamte Produktionsprozeßkette, also von der Bereitstellung der Rohstoffe über die Zwischenprodukte bis zur Entsorgung betrachtet werden.

Bei einer Umweltvorsorgeprüfung ist es wenig sinnvoll, zur Beurteilung der Umweltverträglichkeit eine weitgehende Aggregation der Einzelaspekte zu einer umfassenden Belastungsgröße vorzunehmen.

Die mangelnde Transparenz und Nachvollziehbarkeit einer derartigen Größe erschwert die Diskussion zwischen Entscheidungsträgern, Interessenverbänden und Öffentlichkeit. Die Beurteilung der Untersuchungsergebnisse soll daher nicht nach einem starren Schema, sondern von den Entscheidungsträgern selbst oder in Diskussion mit diesen vorgenommen werden.

Die Beurteilung selbst sollte auf Umweltqualitätsziele gerichtet sein, wobei sich die Auswahl und Entwicklung geeigneter Umweltqualitätsziele einerseits an den natürlicherweise vorkommenden Konzentrationen und Wirkungsschwellen orientieren, andererseits die gesellschaftlichen Rahmenbedingungen beinhalten sollte. Diese Ziele sind nicht statisch und können geänderten Bedingungen angepaßt werden /Band 2 dieses Berichtes/.

Bei der Wahl des Beurteilungsverfahrens ist vor allem zu prüfen, ob sie folgenden Kriterien genügen:

- Objektivität,
- Reproduzierbarkeit,
- Transparenz,
- Aufwand
- Handhabbarkeit

Häufig finden Verfahren Anwendung, die nach gesetzlich vorgeschriebenen oder nach politisch motivierten Leitlinien eine Beurteilung ermöglichen. Diese erfolgt dann aufgrund von Grenz-, Richt- und Orientierungswerten.

Folgende Verfahren erscheinen hierzu weiterhin besonders geeignet:

- Toxizitätsäquivalente
- Ökotoxikologische Bewertung

Hier erfolgt die Beurteilung in zwei getrennten Verfahren (die allerdings zuletzt auch in einer zusammenfassenden Bewertung einmünden):

1. Es werden - weil meist nur solche Daten vorliegen und daher weitgehend nur diese diskutiert werden - nur die Emissionen in die Atmosphäre betrachtet und deren Mengen miteinander verglichen. Schwerpunkte dieser Analyse sind zum einen die

Luftschadstoffe CO, NO_x, SO_x, Kohlenwasserstoffe (HC), Partikel (Stäube) und zum anderen - das ungiftige, aber klimagefährdende - CO₂.

2. Es werden alle Abgaben an die Umwelt betrachtet und auf ihre Toxizitäten hin bewertet mit weiter unten angegebenen Toxizitätsäquivalenten. Der Hauptteil dieses Kapitels ist dann dieser Fragestellung gewidmet.

6.1 Mengenvergleich der atmosphärischen Emissionen

Für die Deckung von 90,4 Mrd Pkm B-PNV (Zeitraum um 2005, nur alte Bundesländer) stehen hier 10 Alternativen zum Vergleich an:

- vier konventionelle PKW-Flotten:

Variante B1	KFZ-Bestand 1987
Variante B2	Trend-Szenario
Variante B3	Reduktions-Szenario
Variante D	Öko-Polo

- zwei E-PKW-Typen und Deckung des Strombedarfs über den Kraftwerk-Mix allein:

Variante E1	"Mittelklasse" (35 kWh/100 Pkm)
Variante E2	"Kleinwagen" (15 kWh/100 Pkm)

- zwei E-PKW-Typen und Deckung des Strombedarfs über "Solartankstellen" ("STS") mit vier verschiedenen Modultypen und Kraftwerk-Mix:

Variante S1	"Mittelklasse" (35 kWh/100 Pkm) Multikristalline Module Konventionelle Aufständerung
Variante S2	"Mittelklasse" (35 kWh/100 Pkm) Amorphe Module Konventionelle Aufständerung
Variante S3	"Kleinwagen" (15 kWh/100 Pkm) Amorphe Module Seilnetz-Aufständerung
Variante S4	"Kleinwagen" (15 kWh/100 Pkm) Monokristalline MIS-I-Module Seilnetz-Aufständerung

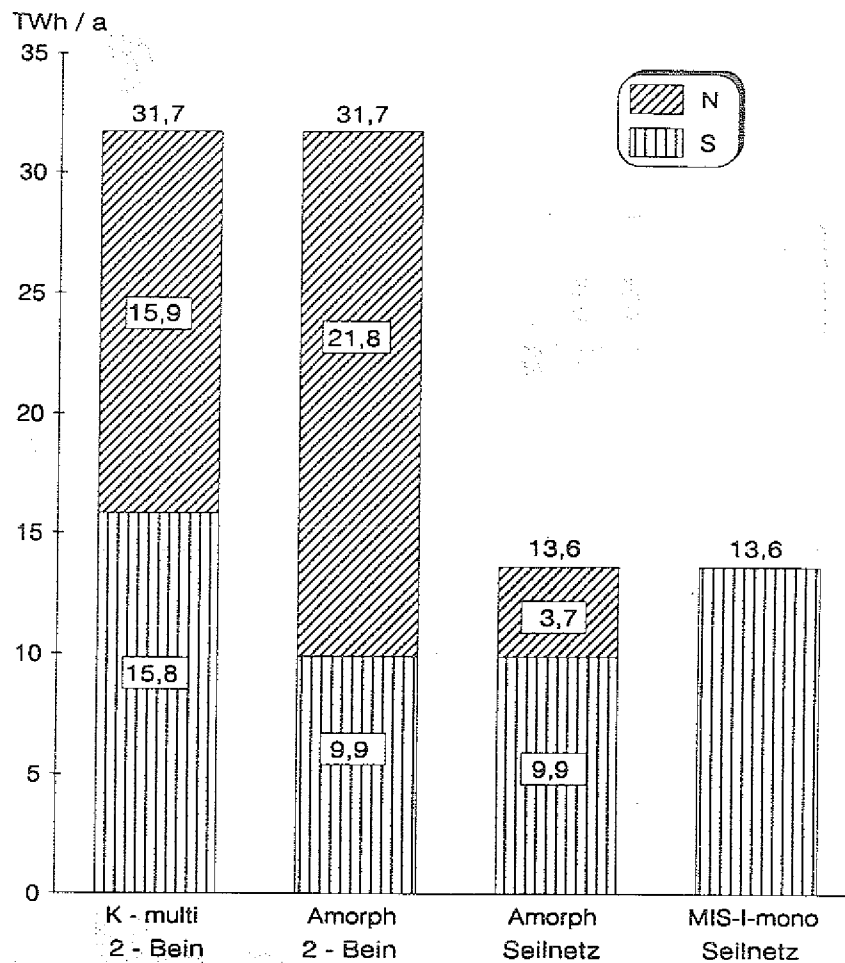
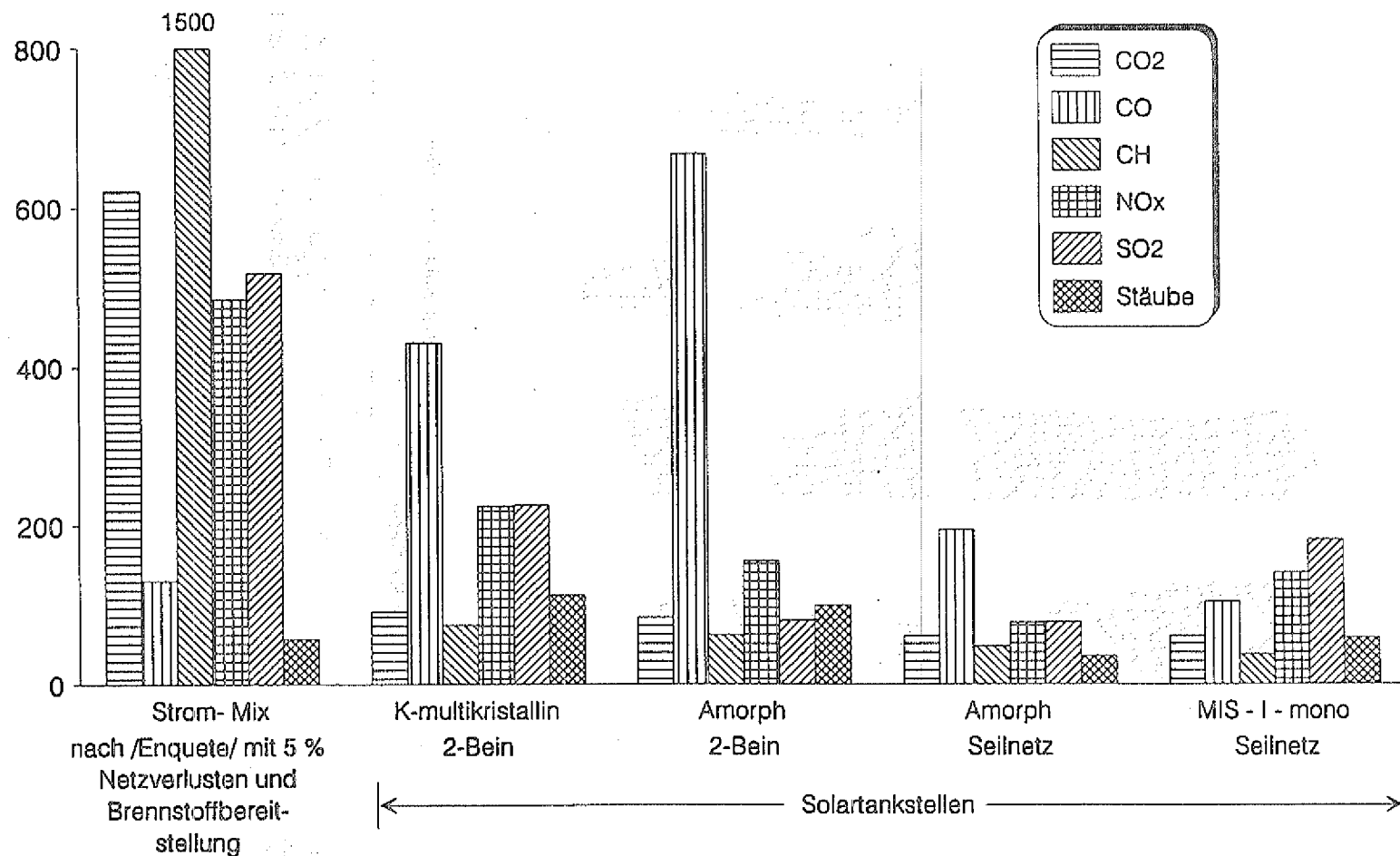


Abb. 25. Solare Deckungsbeiträge der betrachteten Solartankstellen:
¹ N = Netz; ² S = Solar

Abb. 25 zeigt graphisch die Aufteilung der Deckungsbeiträge durch das Netz und die PV-Module für die betrachteten Typen von Solartankstellen. Abb. 26 auf Seite 198 sowie Tab. 90 auf Seite 199 geben die spezifischen Emissionen pro kWh_{el} für die einzelnen Versorgungsvarianten wieder.

Abb. 26. Spezifische Emissionen der einzelnen Versorgungsbeiträge

mg Schadstoff / kWh (CO₂ in g / kWh)

Variante	CO ₂ ¹	CO	KW	NO _x	SO ₂	Stäube	
Strom-Mix	592	126	1497	464	495	54	
S1	91	431	74	224	226	112	
S2	83	669	62	155	80	99	
S3	60	194	48	77	78	35	
S4	60	103	37	140	182	58	

Tab. 90. Spezifische Emissionen der Varianten zur Strombereitstellung:
in mg/kWh
¹ in g/kWh

Der schnellen Übersicht halber seien hier nochmals die atmosphärischen Emissionen der 10 genannten Alternativen aufgelistet:

Variante	CO ₂	CO	HC	NMVO ¹	NO _x	SO ₂	Stäube
B1	16500	994	208	181	190	12	11
B2	15000	226	68	50	44.3	5.2	4.3
B3	11900	181	44.3	26	34.4	4.2	1.1
D	11000	74	26	13	60	19	0.2
E1	8035	1.7	20	0.3	6.3	6.7	0.7
E2	18740	4	46.7	0.6	14.7	15.7	1.7
S1 K ²	9393	2.0	23.4	0.3	7.4	7.9	0.9
S1 S ³	1439	6.8	0.5	0.1	3.5	3.6	1.0
S2 K ²	12880	2.7	32.1	0.4	10.1	10.8	1.2
S2 S ³	821	6.6	0.5	0.1	1.5	0.8	1.0
S3 K ²	2168	0.5	5.4	0.1	1.7	1.8	0.2
S3 S ³	592	1.9	0.4	0.1	0.8	0.8	0.3
S4 K ²	-	-	-	-	-	-	-
S4 S ³	820	1.4	0.2	0	1.9	2.5	0.2

Tab. 91. Jahresemissionen der gerechneten Varianten:
bezogen auf 90,4 Mrd Pkm des B-PNV in 1000 t/a
¹ = Non Methane Volatile Organic Compounds
² = Kraftwerksbedingt
³ = Solarbedingt über Vorleistungen

Luftschadstoffemissionen

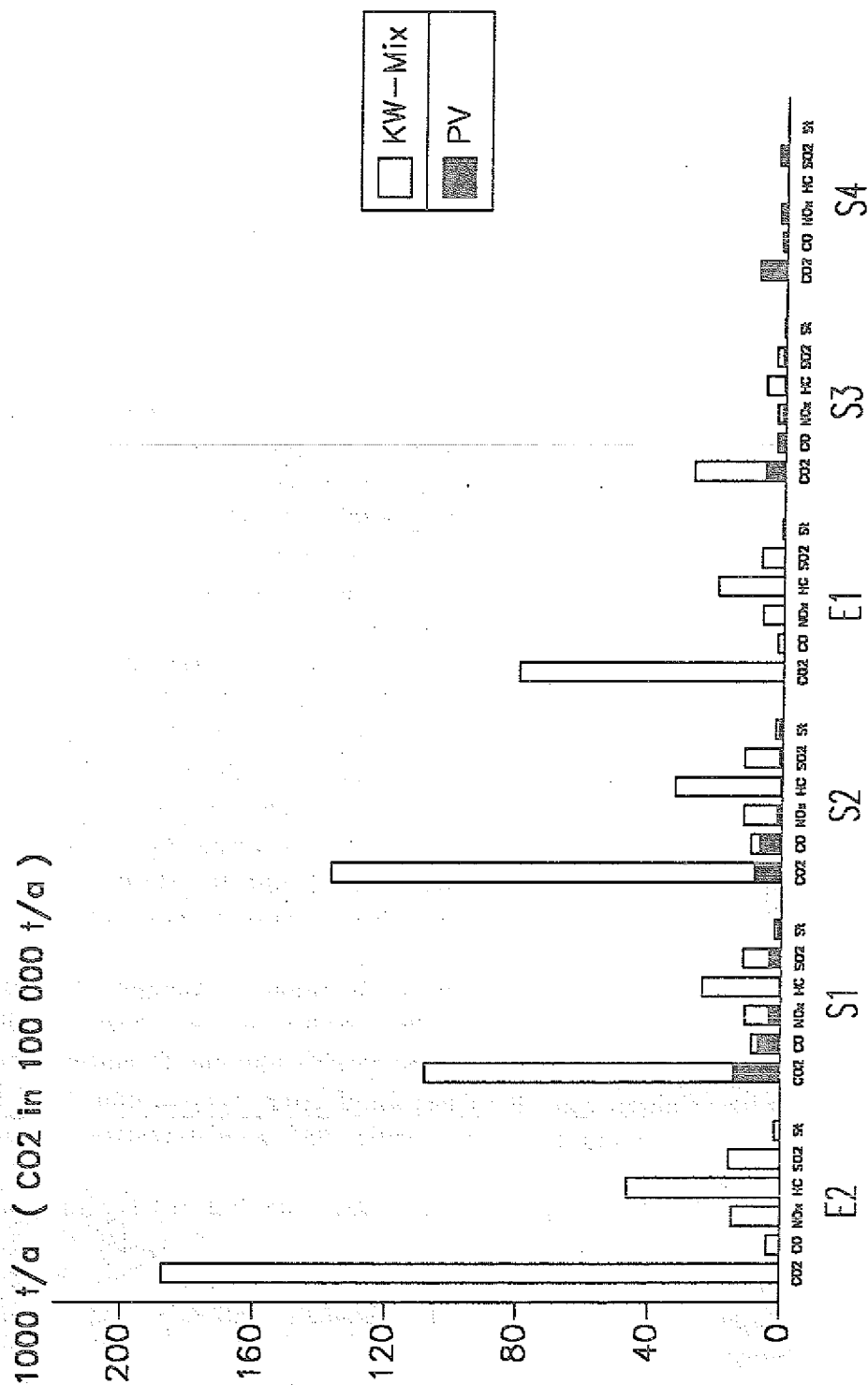


Abb. 28. Emissionserwartungen im beruflich bedingten Personen-Nahverkehr: bei 90.4 Mrd Pkm - Solare Strategien

Abb. 27 auf Seite 200 stellt graphisch diese Emissionen der einzelnen Szenarios dem PKW-Emissionsstatus von 1987 gegenüber.

Die graphische Wiedergabe der Emissionen der solar gestützten Strategien zusammen mit einer reinen Abdeckung durch den Kraftwerk-Mix zeigt (im gleichen Maßstab wie Abb. 27 auf Seite 200) Abb. 28 auf Seite 201

Ergebnisse des Emissionsmengenvergleichs

Aus dem Vergleich der quantitativen Ergebnisse sind unter anderem folgende Aussagen herzuleiten:

- Technische Rückhaltemaßnahmen und motorische Leistungsreduzierungen lassen eine deutliche Abnahme der Emissionen sowohl bei CO_2 als auch bei den "konventionellen" Luftschadstoffen erwarten. Der hier vorgestellte ÖKO-Polo ist den Mittelwerten der "Trend"- und "Reduktions"-Szenarios aus /Enquete 90/ deutlich überlegen mit Ausnahme von NO_x und SO_2 (Diesel!).

- Bei Versorgung der Elektro-PKW's aus dem Netz ist festzuhalten:

1. Auch hier ist die Größe der Fahrzeuge (ihr spezifischer Energiebedarf) ein wesentlicher Faktor bei den Emissionen
2. Die Struktur des Kraftwerksparks ist der entscheidende Faktor: Der Mix der alten Bundesländer mit seinem hohen fossilen Anteil führt bei großen E-PKW's zu sehr hohen CO_2 -Emissionen. Bei kleinen E-PKW's liegen die Emissionen deutlich besser als bei den PKW's - mit Ausnahme von SO_2 und eventuell HC. Bei anderen Kraftwerksparks würden die Relationen anders liegen. So wären z.B. in Bayern mit seinem starken Beitrag von Kernenergie und Wasserkraft (ohne Berücksichtigung von Flächenverbrauch und Belastungen aus dem nuklearen Brennstoffkreislauf) deutlich günstigere Emissionsdaten anzusetzen /Wagner 92, Scheurer 92/).

An dieser Stelle sei nochmals auf die implizite Annahme hingewiesen, daß bei Einspeisung von solarem Überschußstrom ins Netz jeweils genau der Kraftwerksmix in Betrieb ist und gleichmäßig um die eingespeiste Solarleistung zurückgefahren wird. Bei einer detaillierten Analyse müßte der jeweilige Lastgang und der Einsatz der konventionellen Kraftwerkstypen berücksichtigt werden /Sporckmann 92/.

3. Uneinheitlich ist das Bild bei HC wegen der hohen CH_4 -Emissionen (durch die Bewetterung der Gruben) bei der Kohlebereitstellung. Die SO_2 -Emissionen sind bei den konventionellen PKW's relativ günstig, allerdings würde ein forciertes Einsatz von Diesel heutiger Konsistenz ($\sim 0.5\%$ S) hier wieder einen Anstieg bringen.

- Bei den solar gestützten E-PKW's ("Solartankstellen") ist folgendes festzustellen:

1. Auch hier ist die Leistungsgröße ein wesentlicher Faktor für die Emissionen, gefolgt vom Wirkungsgrad der Solar-Module. Beide Größen bestimmen den solaren Deckungsgrad und damit den Beitrag der Kraftwerksemissionen.
2. Die Emissionen des Kraftwerkanteils überwiegen meist deutlich die Emissionen des PV-Teils mit den zwei wichtigen Ausnahmen CO und Stäube. (Der hohe

CO-Ausstoß kommt im wesentlichen vom Materialaufwand bei der Aufständigung, vor allem vom Stahl).

3. Untereinander sind die Optionen mit und ohne PV nur für gleiche Leistungsklassen ("groß" bzw. "klein") vergleichbar:
 - Bezüglich einer reinen Kraftwerksversorgung sind CO_2 , NO_x und SO_2 bei solaren Teilversorgung niedriger, CO aber deutlich höher.
 - Im Vergleich zu den konventionellen PKWs liegt beim großen E-PKW SO_2 höher als bei den PKWs "Trend" und "Reduktion". Weiter würden beim großen E-PKW a-Si-Module mit heutigem Status keine CO_2 -Entlastung bringen. Die CO_2 -Emissionen wären wesentlich höher als beim "Reduktions"-PKW und beim ÖKO-Polo. Letzterer wäre sogar beim HC-Wert günstiger.
4. Staubemissionen (SiO_2 -Feinststäube bei der Herstellung von Roh-Si) sind die "atmosphärische" Schwachstelle der kristallinen Photovoltaik. Diese Staubwerte der PV liegen mindestens so hoch wie bei alleiniger Kraftwerksversorgung und vergleichbar mit den PKW-Werten.
5. Solarmodule mit hohem Wirkungsgrad zeigen gegenüber allen anderen Varianten ein günstigeres Emissionsverhalten.

Als **Schlußfolgerungen** seien hier vier Aussagen gemacht:

1. Der Einsatz von PV als Antriebsenergie im zukünftigen PKW-Sektor würde - mit Ausnahme eventuell bei Stäuben - nur eine deutliche Entlastung bei den atmosphärischen Emissionen konventioneller Schadstoffe der konventionellen PKWs bringen, nicht aber generell bei den CO_2 -Emissionen.
2. E-PKWs sind unter "atmosphärischen" Umweltgesichtspunkten vor allem mit kleinen Leistungen für Nischen (hier: "Berufspendlerverkehr") vertretbar, weil dann ein deutlicher solarer Deckungsbeitrag vorstellbar ist (und auch schon eine alleinige Versorgung mit dem Kraftwerk-Mix der Alt-BRD umweltentlastend wäre).
3. Hohe Solarbeiträge und generell geringe Emissionen erfordern hohe PV-Wirkungsgrade, leichte Aufständigung sowie minimierte Nachfrage.
4. Eine - leicht abgewandelte - TÜV-Aussage /Brosthaus 90/:
"Der Einsatz von Elektrofahrzeugen größerer Leistung wirkt sich nur dann positiv auf die Emissionen der betrachteten Luftschadstoffe aus, wenn die für den Betrieb der Fahrzeuge benötigte elektrische Energie überwiegend aus Energiequellen stammt, die die betrachteten Emissionen nicht und bei den Vorleistungen nur in relativ kleinen Mengen aufweisen".

6.2 Vergleich der Primärenergieaufwände

Die Berechnung des Primärenergieaufwands der 10 verschiedenen Varianten umfaßt hier folgende Anteile:

- Bei den "Solartankstellen" den gesamten Energieaufwand für die Erstellung der PV-Module und die "Tankstellen" Komponenten Aufständigung, Verkabelung, Gleichspannungsverteilung, Wechselrichter und Netzanschluß /Hagedorn 92/. Die Betriebsdauer der Solartankstellen wird mit 20 a vorausgesetzt. Erst danach sollen die Anlagenteile zu ersetzen sein.

- Bei den Kraftwerken und den brennstoffmotorischen PKWs nur den Brennstoffdurchsatz und dessen Bereitstellungsaufwand, aber keine Anlagen- oder PKW-Herstellung.
- Beim Elektrofahrzeug wird ebenfalls kein Herstellungsaufwand berücksichtigt.

Damit errechnen sich über die jeweils betrachteten Prozeßketten folgende Primärenergieaufwendungen in TWh/a für die 90,4 Mrd Pkm/a (vgl. nachfolgende Tabelle):

Varianten	Kraftwerksmix	Solartankstelle	Gesamt
E1	41,1	-	41,1
E2	95,9	-	95,9
S1	48,1	13,7	61,8
S2	66,0	7,8	73,8
S3	11,1	6,6	17,7
S4	-	7,7	7,7
B1	-	-	63,8
B2	-	-	59,0
B3	-	-	46,2
D	-	-	39,1

Tab. 92. Primärenergieaufwendungen der betrachteten Varianten:
bezogen auf 90,4 Mrd Pkm / a.

Die in diesen Tabellen aufgeführten Werte sind für die Varianten E1, E2 und S1 bis S4 aus den Tab. 85 auf Seite 188 und Tab. 69 auf Seite 174, Tab. 73 auf Seite 177, Tab. 77 auf Seite 181 sowie Tab. 81 auf Seite 185 übernommen.

Die spezifischen Aufwendungen inkl. Treibstoffbereitstellung der Varianten B1 bis B3 sind dem Band 7 von 'Enquete 90' entnommen: 2540 kJ/Pkm (B1); 2350 (B2); 1840 (B3). Für den ÖKO-Polo (Variante D) wurden 4 l/100 Pkm Dieseltreibstoff angesetzt (unterer Heizwert 35,65 MJ/l /Weidmann 92/, Wirkungsgrad der Bereitstellung 91,5 % /Blandow 91/. Nach /Blandow 91/ müßte man beim "kleinen" E-PKW ca. 12-18 TWh/a und beim "großen" E-PKW ca. 20-28 TWh/a zusätzlichen Primärenergieaufwand aus der Herstellung ansetzen, bei den normalen PKWs nur 7-12 TWh/a wegen der entfallenden Batteriespeicher. Diese Zahlen würden deutliche Korrekturen darstellen, mit entsprechenden in dieser Arbeit nicht berücksichtigten Emissionsbeiträgen.

Abb. 28 auf Seite 201 zeigt für alle 10 vorgestellten Alternativen die Primärenergieaufwendungen, ausgedrückt in TWh/a, Abb. 29 auf Seite 205 auch die Aufstockungsbreiten durch die Herstellungsvorleistungen für die (E-)PKWs.

Bewertend sei hier folgendes festgehalten:

1. Gute Wirkungsgrade der PV-Tankstellen senken den energetischen Gesamtaufwand gegenüber einer reinen Netzversorgung der E-PKW's, aber deutliche Vorteile bringt dies nur bei "kleinen" E-PKW's.
2. Gegenüber Normal-PKW's bringen auch nur "kleine" E-PKW's eine Absenkung, dann sogar ohne PV-Teilversorgung. Der - zitierte - Herstellungsaufwand für Normal- und E-PKW's verringert die Differenz, hebt aber den Vorteil bei PV-Teilversorgung nicht auf.

Primaerenergieaufwand

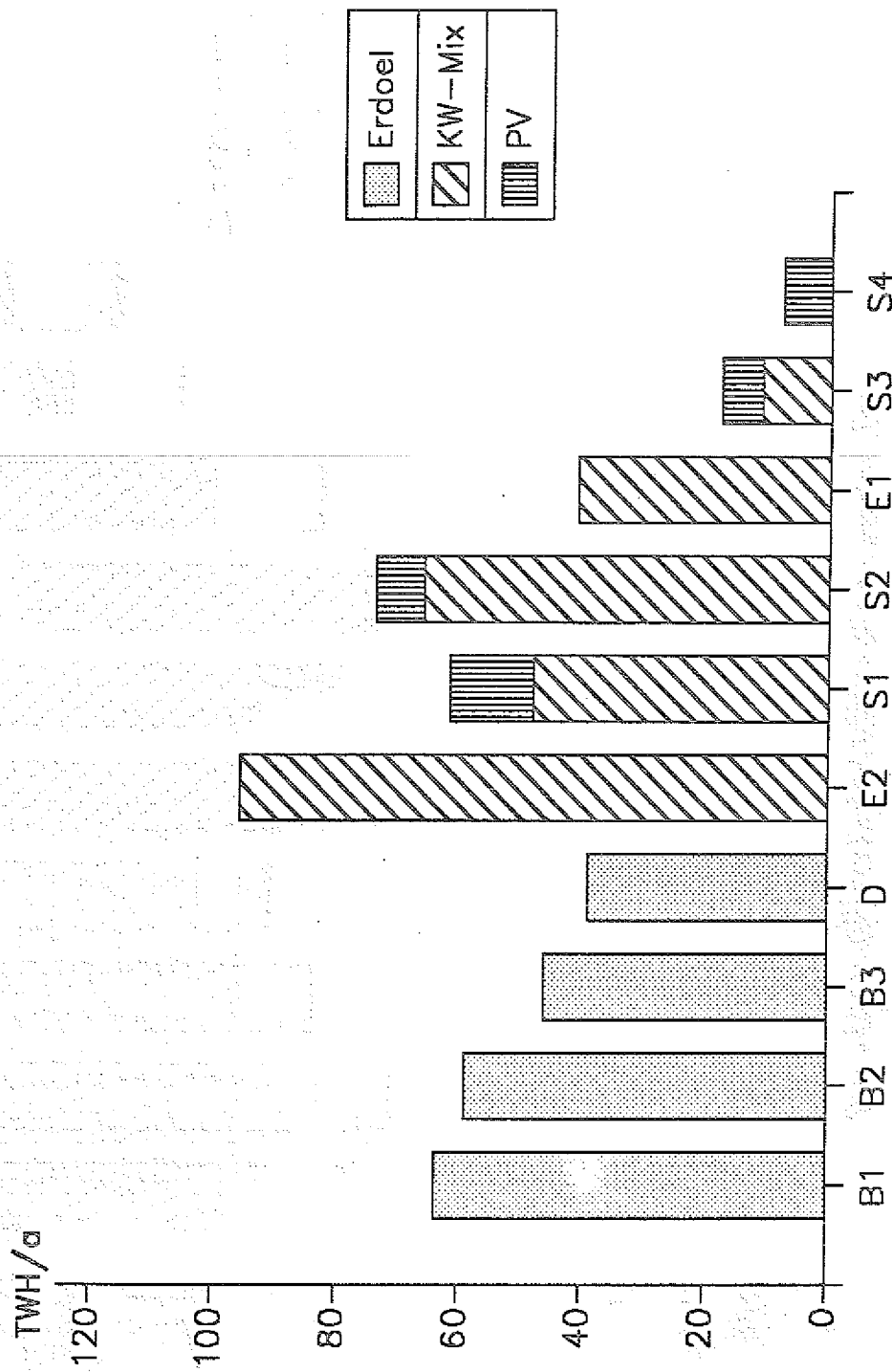


Abb. 29. Primärenergieaufwand im beruflich bedingten Personen-Nahverkehr: bei 90.4 Mrd Pkm

Primaerenergieaufwand

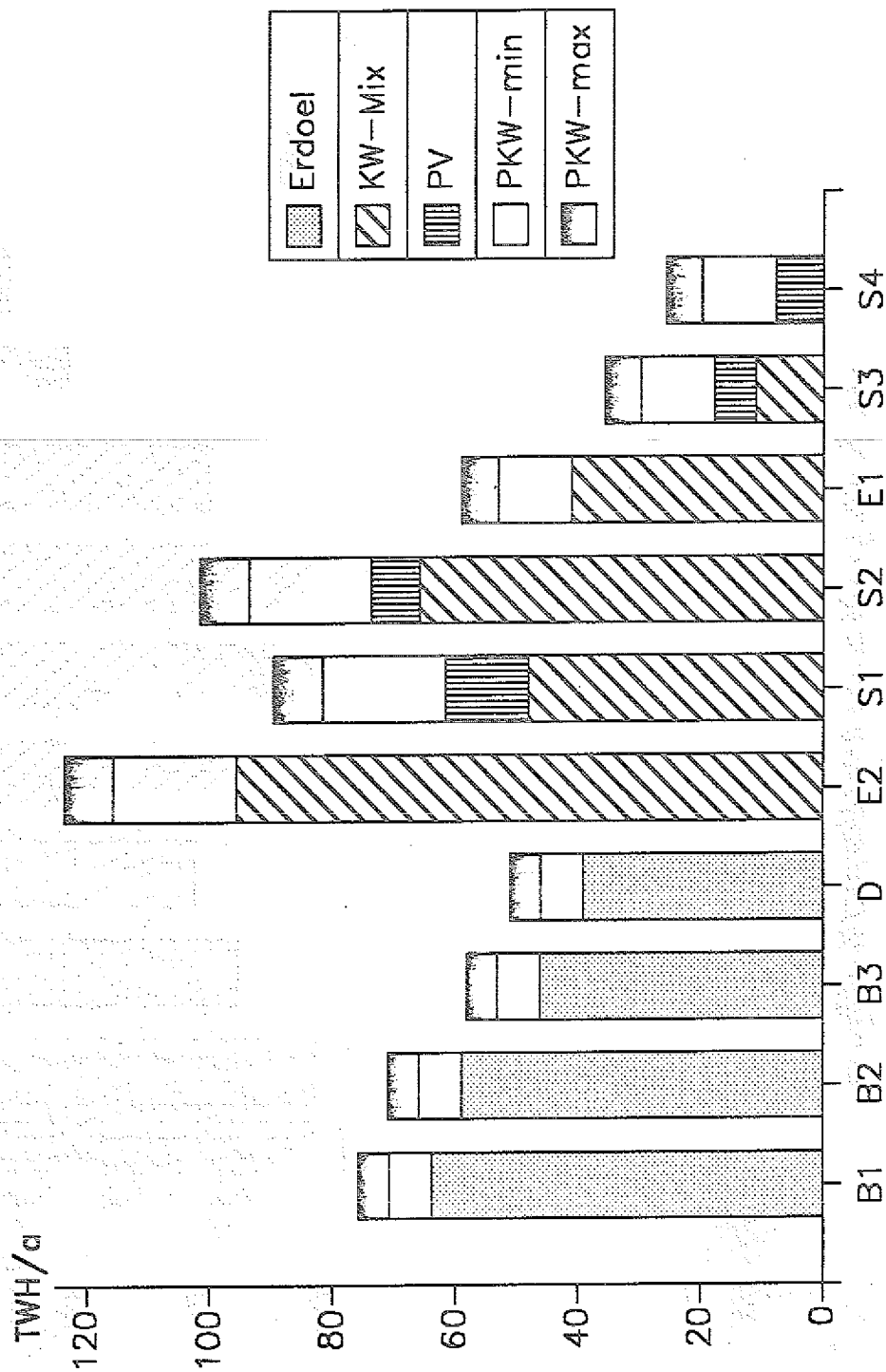


Abb. 30. Primärenergieaufwand im beruflich bedingten Personen-Nahverkehr mit Vorleistungen: für die (E-)PKW-Herstellung bei 90.4 Mrd Pkm

6.3 Beurteilung nach toxischen bzw. ökotoxischen Kriterien

6.3.1 Methodisches Vorgehen

Für die gewählte Vorgehensweise in der Umweltvorsorgeprüfung wird im folgenden eine Kurzübersicht gegeben. Eine detaillierte Beschreibung findet sich in Band 2 dieser Reihe. Die Beurteilungsverfahren bauen auf drei unterschiedlichen Wertesystemen auf:

- Grenz- und Richtwerte
- toxikologische Daten
- ökotoxikologische Daten.

6.3.1.1 Eingangsdaten

Datengrundlage für die in die Umwelt eingetragenen Stoffe ist der Datensatz aus dem Prozeßkettenanalysemodell. In die Beurteilung fließen nur die als umwelterheblich ermittelten Stoffe ein. Dabei werden die Mengen pro Kompartiment und Jahr angegeben.

6.3.1.2 Die Beurteilungsverfahren

Grundsätzlich stehen mehrere unterschiedliche Beurteilungsverfahren zur Verfügung. Je nach Zielsetzung des Vergleiches und den Präferenzen des Beurteilenden und der verfügbaren Datenbasis ist die Auswahl zu treffen. Hier werden die drei oben genannten Verfahren angewendet und miteinander verglichen.

a) Nach Grenz- und Richtwerten

Es gibt eine Vielzahl von Bestimmungen, die Umweltbereichen zugeordnet werden können. Innerhalb dieser Umweltkompartimente kann nach Akzeptoren (Mensch, Flora, Fauna) unterschieden werden. Eine große Differenzierung (z.B. nach empfindlichen Pflanzen, sehr empfindliche Pflanzen etc.) ist insbesondere für Luftschadstoffe möglich. Je nach Fragestellung sind somit unterschiedliche Grenz- bzw. Richtwerte für die Untersuchung heranzuziehen. Einen Überblick gibt Tab. 93 auf Seite 208:

Atmosphäre	Hydrosphäre	Pedosphäre
* TA-Luft * VDI-Richtlinien * MAK-Werte * WHO-Luftqualitäts-Leitlinien * LRV-Schweiz	* TrinkwV * EG-Richtlinie (80/778/EWG), * WHO-Leitlinien * Leitfaden Bodensanierung, Niederlande (Grundwasserschutz) * Beurteilungsverfahren der Hamburger Baubehörde (Grundwasserschutz) * EG-Richtlinie (75/440/EWG) * DVGW-Arbeitsblatt W 151 * Schweizer Qualitätsziele (Abwasser)	* Kloke-Liste * Leitfaden Bodensanierung, Niederlande * Richtlinien für kontaminierte Böden, England * VSBO Schweiz * Beurteilungsverfahren der Hamburger Baubehörde * Kalifornischer Leitfaden * Klärschlammverordnung * EG-Richtlinie * Klärschlammverordnung, Schweiz

Tab. 93. Ausgewählte Beurteilungsverfahren zur Bestimmung der Umweltgefährdung nach Richt- und Grenzwerten: zusammengestellt aus /LfUBW 89/

17

Die Gleichung für den Stoff i im Kompartiment k zur Definition der Belastungszahl B_G lautet dann:

$$\text{Belastungszahl } B_G(i_k) = \frac{\text{Stoff } i_k}{\text{Grenzwert } i_k} \left[\frac{m^3}{a} \right] \quad (1)$$

Die Belastungszahl einer Technik wird getrennt nach Kompartimenten angegeben. Sie ergibt sich aus der Summe aller Belastungszahlen in einem Kompartiment. Die Definition für eine Technik lautet dann:

$$\sum_{i=1}^n B_G(i_k) \left[\frac{m^3}{a} \right] \quad (2)$$

Diese Zahl gibt das kritische Volumen an, das zur Verdünnung der Stoffe notwendig ist, um den Grenzwert einzuhalten.

b) Nach Toxizitäten

Hierbei wird die Stoffmenge durch den LD-Wert dividiert, der am sensibelsten Organismus ermittelt wurde. Aufgrund der vorhandenen Daten empfiehlt es sich, als Toxizitätswert den LD_{50} oder LD_0 -Wert zu nehmen. Die folgende Gleichung gibt die Definition der Belastungszahl B_T im Kompartiment k an:

¹⁷ soweit die Abkürzungen und Begriffe nicht im Text erläutert sind, sind diese in den Anhängen C und D zu finden

$$\text{Belastungszahl } B_T(i_k) = \frac{\text{Stoff } i_k}{LD_{\min}} \left[\frac{t \text{ Biomasse}}{a} \right] \quad (3)$$

Die Belastungszahl der Technik summiert sich aus den Einzelbelastungen der Stoffe pro Kompartiment.

$$\sum_{i=1}^n B_T(i_k) \left[\frac{t \text{ Biomasse}}{a} \right] \quad (4)$$

Diese Zahl gibt die kritische Biomasse an, die notwendig ist, damit die zugrunde gelegte Wirkschwelle nicht überschritten wird.

c) Nach Ökotoxizitäten

Der Toxizitätswert wird als Belastungszahl $B_T(i_k)$ nach b) ermittelt. Er setzt sich zusammen aus der in die Umwelt gebrachte Menge eines Stoffes in einem Kompartiment und der am sensibelsten Organismus ermittelten Toxizität (meist als letale Dosis -LD- angegeben). Zusätzlich werden die Persistenz sowie die Akkumulation (eingesetzt als Biokonzentrationsfaktor BCF) berücksichtigt. Der dimensionslose Persistenzfaktor PF wird durch die Geschwindigkeitskonstante k (in 1/Stunden) beschrieben, wobei unter Abbau hier sowohl der Abbau des Stoffes im Kompartiment als auch das Verlassen (z.B. trockene Deposition) eines Kompartimentes zu verstehen ist. Nach Gleichung (5) wurde der folgende Persistenzfaktor ermittelt.

$$PF = \frac{\frac{1}{k} - \frac{1}{k} \times e^{-k \times 8760}}{8760} \quad (5)$$

Die Ökotoxizitäts-Belastungszahl $B_{\bar{O}}$ ergibt sich aus der Multiplikation der Toxizitätsbelastungszahl B_T mit dem Persistenzfaktor PF und dem Biokonzentrationsfaktor BCF wie folgt:

$$B_{\bar{O}}(i_k) = BCF_i \cdot PF_i \cdot B_T \left[\frac{t \text{ Biomasse}}{a} \right] \quad (6)$$

Die Belastungszahl einer Technik summiert sich aus den Belastungszahlen der Stoffe pro Kompartiment:

$$\sum_{i=1}^n B_{\bar{O}}(i_k) \left[\frac{t \text{ Biomasse}}{a} \right] \quad (7)$$

Diese Zahl gibt die kritische Biomasse an, die notwendig ist, damit die zugrunde gelegte toxikologische Wirkschwelle unter Berücksichtigung ökotoxikologischer Parameter nicht überschritten wird.

6.3.1.3 Einschätzung der erzielbaren Ergebnisse

Es wird mit diesen Verfahren ermöglicht, die Belastung von Schadstoffen in der Umwelt quantitativ vergleichend darzustellen. Die quantitativen Umweltauswirkungen werden über den gesamten Lebenszyklus aufsummiert und zu einem Gesamtwert aufaddiert. Dieser Wert einer Technik gilt jeweils für ein bestimmtes Kompartiment. Eine Gesamtbeurteilung in einem Wert erscheint nicht sinnvoll, da Standortunterschiede nicht berücksichtigt werden können und da alle Emissionen nach dem gleichem Schema beurteilt werden. Hinzu kommt, daß ein allgemein anerkanntes Wertesystem fehlt, das die Schutzgüter Atmosphäre, Pedosphäre und Hydrosphäre in ihrer Schutzwürdigkeit untereinander wichtet.

Die Beziehungen der einzelnen Verfahren untereinander sind dadurch gekennzeichnet, daß bei allen drei Verfahren ein Bezug zu einem limitierenden Wert hergestellt wird. Die Beurteilung der Technik erfolgt durch lineares Aufsummieren der einzelnen Belastungszahlen. Eine Berücksichtigung von nichtlinearen Einflüssen wie Synergismen und Antagonismen ist somit nicht möglich.

6.3.2 Ermittlung der Belastungszahlen

Die Ermittlung der Belastungszahlen erfolgt auf der Basis der in den Kapiteln „Ergebnisse der Prozeßkettenanalysen zu den Solartankstellen“ auf Seite 170 und „Ergebnisse der Prozesskettenanalysen zu den konventionellen PKW's“ auf Seite 187 für die einzelnen Varianten genannten Zahlen.

Zur Beurteilung wurden folgende Größen verwendet:

- Mengenbetrachtung: Erforderliches Deponievolumen
- Nach Grenz- und Richtwerten
 - Grenzwerte für Luftschadstoffe nach BUWAL
 - Grenzwerte für Luftschadstoffe nach der VDI-Richtlinie Nr. 2310
 - Richtwerte für Luftschadstoffe nach UBA, WHO, VDI
 - Grenzwerte für Wasserschadstoffe nach BUWAL
 - Grenzwerte für Wasserschadstoffe nach der Trinkwasserverordnung
- Nach Toxizitäten
 - Letale Dosen (LD_0)
 - Letale Dosen (t_x) nach Gebler
- Nach Ökotoxizitäten
 - Ohne Klasseneinteilung auf der Basis von Daten zu Akuter Toxizität (LD_0), sowie Akkumulationsvermögen und der Persistenz
 - Mit Klasseneinteilung auf der Basis von Daten zu Akuter Toxizität (t_x), Cancerogenität und Mutagenität sowie Akkumulationsvermögen und der Persistenz
- Genotoxizität
 - Cancerogenes Risiko auf der Basis von Schätzwerten des Krebsrisikos bei einer lebenslangen Exposition gegenüber einer Konzentration von $1 \mu g/m^3$
 - Cancerogenität nach Gebler
 - Mutagenität nach Gebler

Die detaillierten Ergebnisse sind im Anhang A wiedergegeben. Die Diskussion erfolgt im nachfolgendem Abschnitt.

6.3.3 Vergleich der ermittelten Belastungszahlen

Eine vergleichende zahlenmäßige Gegenüberstellung der einzelnen Varianten erfolgt im Anhang B. Nachfolgend erfolgt lediglich eine knappe Kommentierung der nach den verschiedenen Beurteilungsverfahren erhaltenen Ergebnisse. Insbesondere werden folgende Punkte diskutiert:

- Einschätzung und Relevanz des Kriteriums
- Im Ergebnis gewichtige Stoffe
- Unterschiedliche Datenlage in bezug auf Kriterien
- Sachliche Einschätzung der Relationen
- Kritik, z.B. fehlende Grenzwerte

Die Varianten sind folgendermaßen festgelegt worden:

- vier konventionelle PKW-Flotten:

Variante B1	KFZ-Bestand 1987
Variante B2	Trend-Szenario
Variante B3	Reduktions-Szenario
Variante D	Öko-Polo

- zwei E-PKW-Typen und Deckung des Strombedarfs über den Kraftwerk-Mix allein:

Variante E1	"Mittelklasse" (35 kWh/100 Pkm)
Variante E2	"Kleinwagen" (15 kWh/100 Pkm)

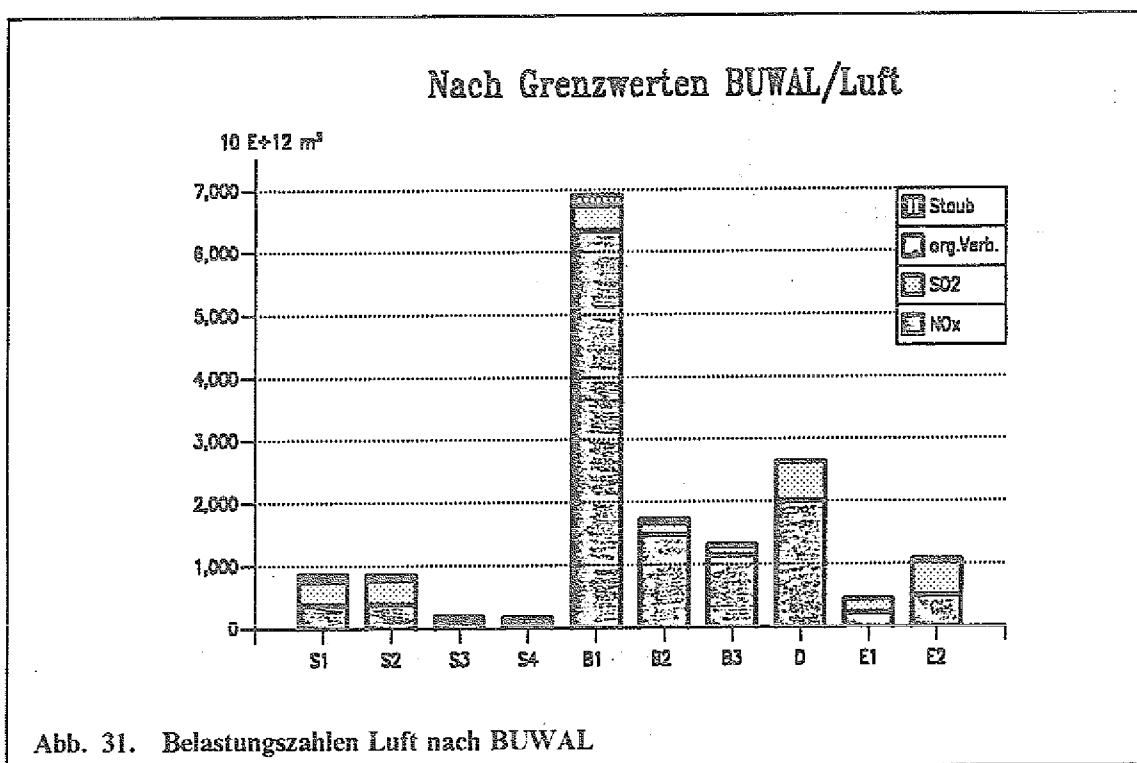
- zwei E-PKW-Typen und Deckung des Strombedarfs über "Solartankstellen" ("STS") mit vier verschiedenen Modultypen und Kraftwerk-Mix:

Variante S1	"Mittelklasse" (35 kWh/100 Pkm) Multikristalline Module Konventionelle Aufständerung
Variante S2	"Mittelklasse" (35 kWh/100 Pkm) Amorphe Module Konventionelle Aufständerung
Variante S3	"Kleinwagen" (15 kWh/100 Pkm) Amorphe Module Seilnetz-Aufständerung
Variante S4	"Kleinwagen" (15 kWh/100 Pkm) Monokristalline MIS-I-Module Seilnetz-Aufständerung

6.3.3.1 Nach Grenzwert- und Richtwerten

Beurteilungsverfahren 1

Im Beurteilungsverfahren 1 werden die maximalen Immissionskonzentrationen der Schweizerischen Bundesanstalt für Wasser, Abfall und Luft (BUWAL), die allgemein auf den Schutz von Mensch und Umwelt ausgerichtet sind, herangezogen. Die Stoffliste umfaßt 17 Stoffe bzw. Stoffklassen.



Bei allen Varianten fallen NO_x und SO_2 entscheidend ins Gewicht. Alle übrigen Stoffe sind nach diesem Beurteilungsverfahren vernachlässigbar.

Bezüglich der von der BUWAL-Liste erfaßten Stoffe ist die Datenlage insbesondere im Blick auf die hier relevanten Stoffe SO_2 und NO_x als gut zu bezeichnen.

Bei den benzin- und dieseltreibenden PKWs spielt NO_x die dominierende Rolle, während bei den übrigen Varianten SO_2 und NO_x in etwa zu gleichen Teilen zur Belastungszahl beitragen.

Im Gegensatz zu der konventionellen PKW-Flotte werden bei der Stromerzeugung die hier relevanten Schadstoffe SO_2 und NO_x spezifisch betrachtet effektiver zurückgehalten. Dies spiegelt sich auch im Vergleich der untersuchten Varianten wider. Die Varianten S3 und S4 zeigen die geringsten Belastungszahlen.

Generell werden folgende Kritikpunkte gesehen:

- Staub

Die unterschiedliche Zusammensetzung und Toxizität der Stäube kann nicht berücksichtigt werden.

- Organische Verbindungen

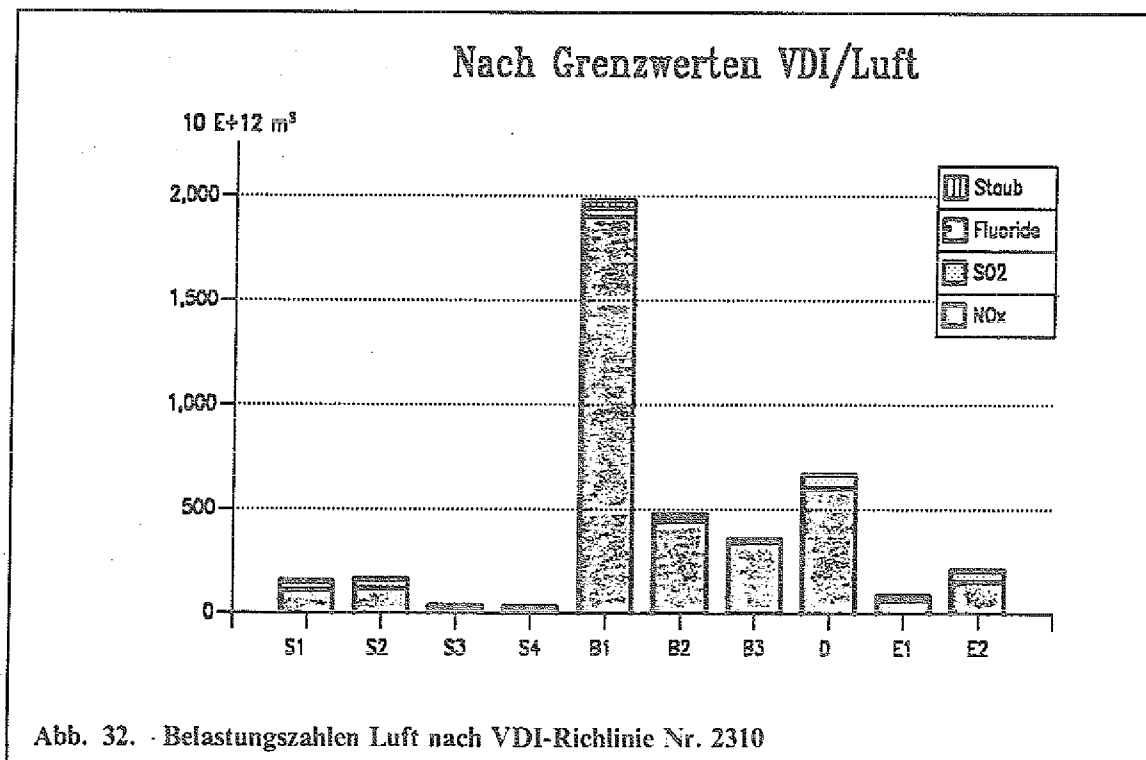
Die Zuordnung der organischen Verbindungen ist aufgrund der fehlenden Angaben der Zusammensetzung und Art der organischen Verbindungen nicht eindeutig möglich. So wird bei BUWAL unterschieden in Mercaptane, Aldehyde, Kohlenwasserstoffe und restliche organische Verbindungen (als Ethylenimin). Die Zuordnung zu den in der Literatur üblicherweise angegebenen Werten (Kohlenwasserstoffe, NMVOC, Methan, VOC) ist nur bedingt möglich.

- Kohlenmonoxid

Kohlenmonoxid wurde hier nicht berücksichtigt. Selbst bei Emissionen von ca. 10^6 t/a bei der Variante B1 ergeben sich im Vergleich zu den anderen Werten nur Belastungszahlen von $100 \times 10^{12} \text{ m}^3$. Der geringe Einfluß des Kohlenmonoxids an der Gesamt-Belastungszahl wurde daher an dieser Stelle vernachlässigt.

Beurteilungsverfahren 2

Im Beurteilungsverfahren 2 werden die maximalen Immissionskonzentrationen der VDI-Richtlinie 2310 zur Beurteilung herangezogen. Die hier festgelegten Grenzwerte sind definiert als diejenigen Konzentrationen in bodennahen Schichten der freien Atmosphäre bzw. bei Staub auch als diejenigen Niederschlagsmengen im Gelände, unterhalb derer nach dem heutigen Wissensstand Mensch, Tier, Pflanze und Sachgüter nach Maßgabe der Präambel sicher geschützt sind. Hier wurden nur die Grenzwerte zum Schutz des Menschen herangezogen. Die Stoffliste für den Menschen umfaßt 11 Stoffe.



Bei allen Varianten fallen NO_x und SO_2 entscheidend ins Gewicht. Alle übrigen Stoffe sind nach diesem Beurteilungsverfahren vernachlässigbar.

Bezüglich der von der VDI-Liste erfaßten Stoffe ist die Datenlage insbesondere im Blick auf die hier relevanten Stoffe SO_2 und NO_x als gut zu bezeichnen.

Bei den benzin- und dieseltreibenden PKWs spielt NO_x die dominierende Rolle, während bei den übrigen Varianten SO_2 und NO_x in etwa im Verhältnis 1:2 zu den Belastungszahlen beitragen.

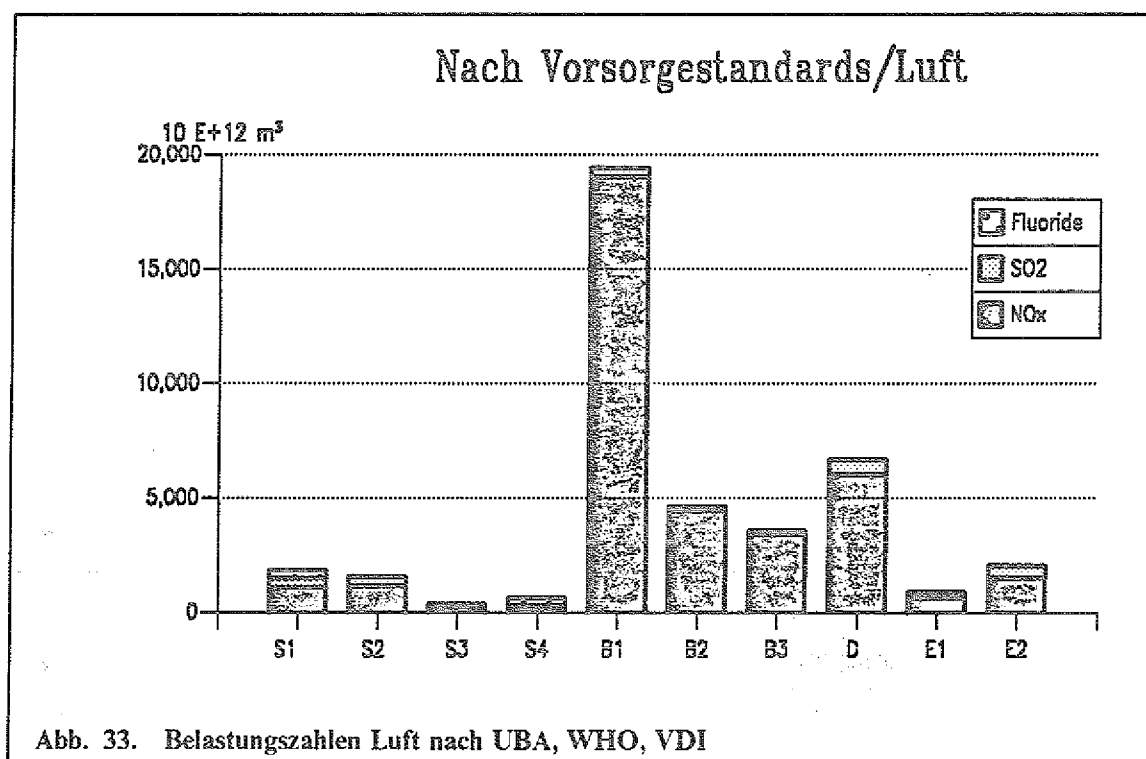
Im Gegensatz zu der konventionellen PKW-Flotte wird auch hier deutlich, daß bei der Stromerzeugung die hier relevanten Schadstoffe SO_2 und NO_x spezifisch betrachtet effektiver zurückgehalten werden. Dies spiegelt sich auch im Vergleich der untersuchten Varianten wider. Die Varianten S3 und S4 zeigen die geringsten Belastungszahlen.

Generell werden folgende Kritikpunkte gesehen:

- Staub
Die unterschiedliche Zusammensetzung und Toxizität der Stäube kann nicht berücksichtigt werden.
- Organische Verbindungen
In der VDI-Richtlinie werden nur für Dichlormethan und Trichlorethen Grenzwerte genannt. Die Zuordnung der erfaßten organischen Verbindungen zu den Grenzwerten ist daher nicht möglich.
- Kohlenmonoxid
Kohlenmonoxid wurde hier nicht berücksichtigt. Selbst bei Emissionen von ca. 10^6 t/a bei der Variante B1 ergeben sich im Vergleich zu den anderen Werten nur ein unbedeutender Beitrag zu der Belastungszahl.

Beurteilungsverfahren 3

Die verwendeten Vorsorgewerte sind den Richtlinien von VDI 2310 (Fluor), WHO (SO_2) und UBA (NO_x) nach /Kühling 90/ entnommen. Diese Werte sollen den Schutz sehr empfindlicher Pflanzen sowie forstwirtschaftlicher Flächen und nährstoffarmer Vegetationsgesellschaften sicherstellen.



Wichtigster Schadstoff bei allen Varianten ist NO_x. Nur bei der Variante S4 ist die entscheidende Komponente Fluor.

Für die drei genannten Stoffe ist die Datenlage im allgemeinen als gut zu bezeichnen, allerdings ist anzumerken, daß bei Fluor die Erhebung nicht durchgängig bzw. nicht in derselben Detaillierungstiefe wie für die Silizium-Prozeßkette für alle Vorprodukte (z.B. Glas, Aluminium) erfaßt worden sind.

Bei den konventionellen PKWs spielt NO_x die dominierende Rolle, während bei den Varianten S1 - S4 SO₂ und/oder Fluor einen signifikanten Anteil an den Belastungszahlen haben. Die Varianten S3 und S4 zeigen die geringsten Belastungszahlen.

Generell werden folgende Kritikpunkte gesehen: Es sind nur drei Stoffe zur Beurteilung der Auswirkungen auf die Vegetation berücksichtigt worden.

- Staub

Die unterschiedliche Zusammensetzung und Toxizität der Stäube kann nicht berücksichtigt werden. Allgemein wird der Einfluß der hier emittierten Stäube auf die Vegetation aufgrund der Zusammensetzung (v.a. Siliziumoxide) und Menge gering sein. An Staub gebundenes Fluor wurde bei den Fluorverbindungen bereits mitbilanziert.

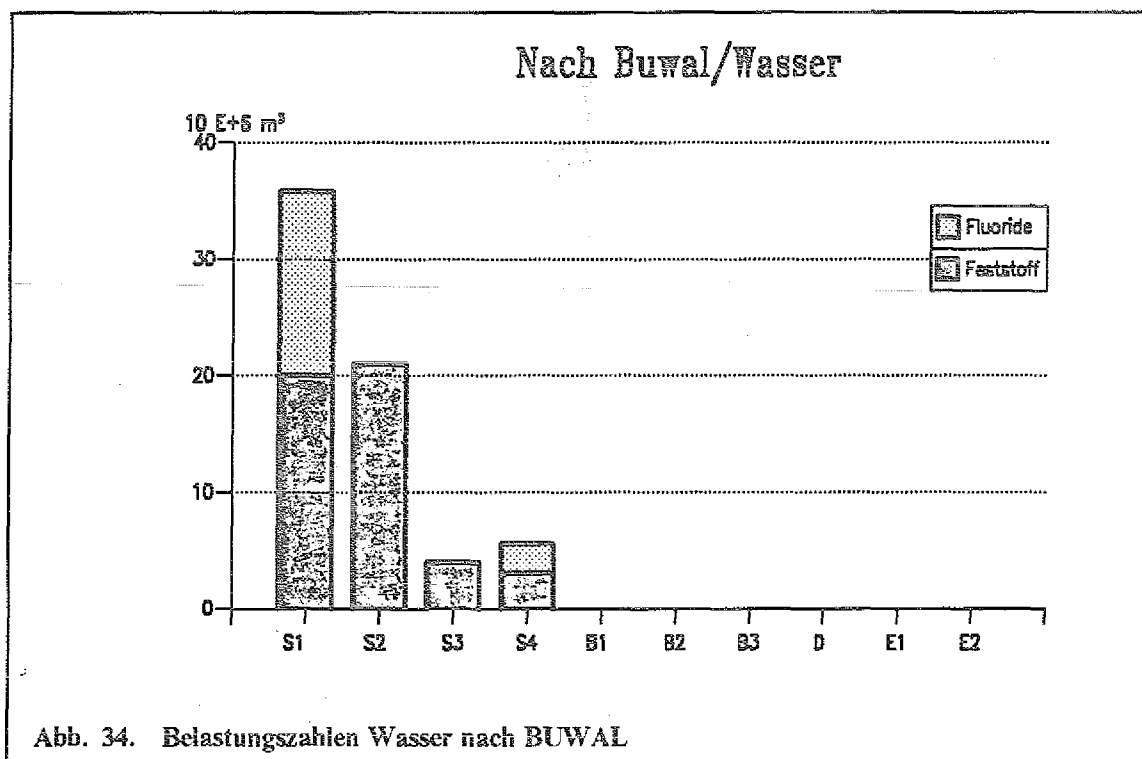
- Organische Verbindungen

Es kann keine Aussage getroffen werden, ob die emittierten organischen Verbindungen pflanzenphysiologisch relevant sind oder nicht. Im allgemeinen wird dieser Einfluß jedoch als gering erachtet.

Die Bedeutung der Emissionen für den Schutz landwirtschaftlicher Flächen bzgl. der Nahrungs- und Futtermittelerzeugung kann aufgrund der mangelnden Datenverfügbarkeit nicht berücksichtigt werden.

Beurteilungsverfahren 4

Im Beurteilungsverfahren 4 werden die Grenzwerte Wasser der Schweizerischen Bundesanstalt für Umweltschutz, Wald und Landschaft (BUWAL) herangezogen, die allgemein für die Einleitung in Gewässer gelten und auf den Schutz von Oberflächengewässern zielen. Die Stoffliste umfaßt 23 Stoffe bzw. Stoffklassen.



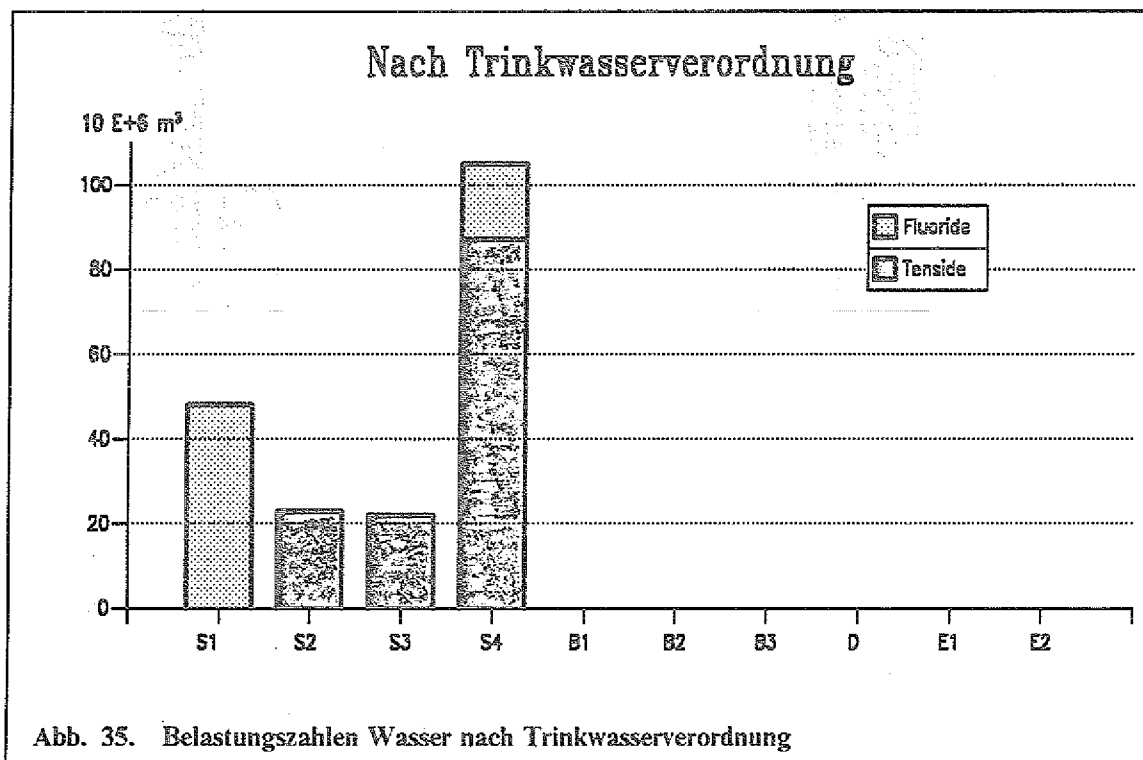
Auf der Basis der hier erfaßten Stoffe und der unterstellten Grenzwerte zeigen sich 'Un-
gelöste Stoffe' und Fluoride als relevante Stoffgruppen. Nur für die Varianten S1 - S4
konnten Belastungszahlen errechnet werden, wovon die Variante S3 die geringste Bela-
stungszahl aufweist.

Das Ergebnis wird unseren Erachtens dadurch geprägt, daß die Gewässeremissionen bei
der Bereitstellung von Strom aus dem Kraftwerksmix sowie bei der Bereitstellung der
Endenergieträger Benzin und Diesel nicht berücksichtigt werden konnten. Hinzu kommt,
daß die aus der Photovoltaik-Prozeßkette resultierenden Gewässeremissionen bei zu-
künftigen Produktionsanlagen noch erheblich gesenkt werden können. So steht z.B. kein
ausreichendes Datenmaterial zu den Abwasser-Emissionen aus den Bereich der
Brennstoffbereitstellung sowie aus den Rauchgasreinigungsanlagen bei Kraftwerken zur
Verfügung. Eine grobe Auflistung der verschiedenen anfallenden Abwässer wird in
/VDEW-VGB 90/ beschrieben. Allerdings fehlt eine Quantifizierung der Emissionen in
die Gewässer.

Aus vorgenannten Aspekten ist ersichtlich, daß dieses Kriterium im vorliegenden Fall für
eine vergleichende Betrachtung der Varianten keinen Beitrag zur Entscheidungsfindung
liefern kann.

Beurteilungsverfahren 5

Die Trinkwasserverordnung legt die Anforderungen an die Beschaffenheit von Trinkwasser und von Brauchwasser für Lebensmittelbetriebe nach mikrobiologischen und chemischen Kriterien fest. Die Grenzwerte entsprechen Höchstkonzentrationen, die in der Regel nicht zu überschreiten sind. Sie umfaßt 34 Stoffe und Stoffgruppen.



Im Gegensatz zum vorigen Beurteilungsverfahren ergeben sich hier für die vier analysierten solaren Strategien die Belastungszahlen aus Fluorid- und Tensidemissionen. Variante S3 weist die geringste Belastungszahl auf.

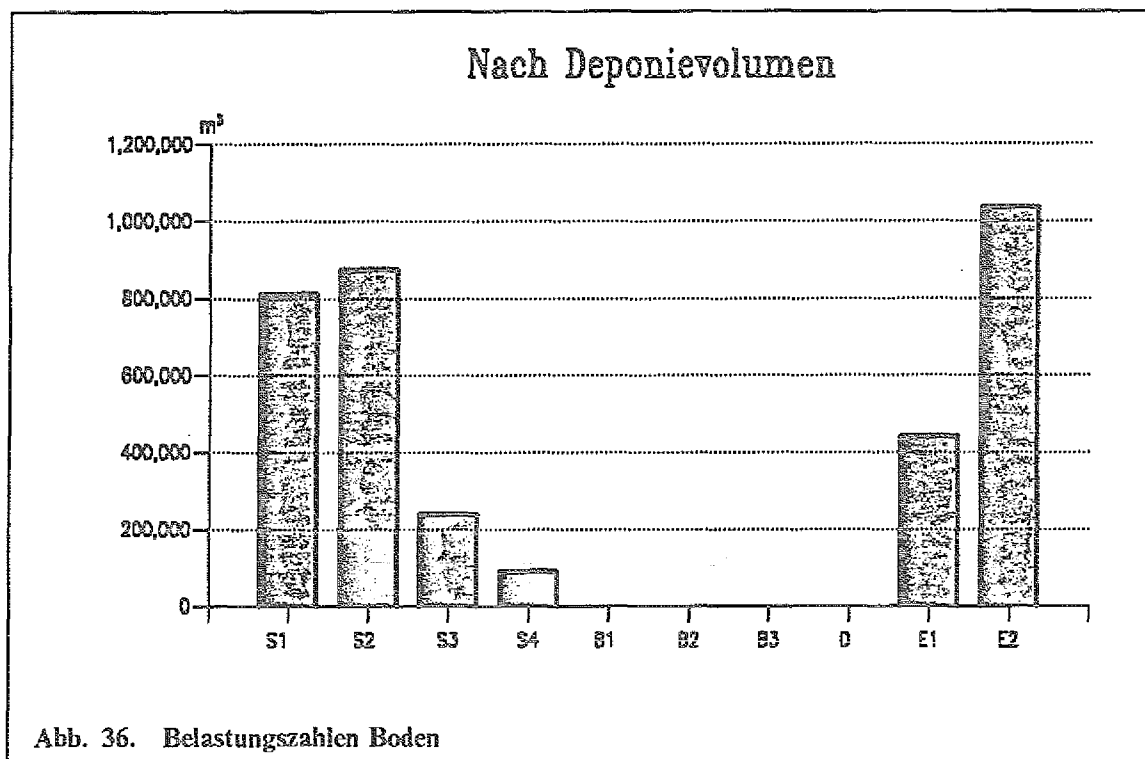
Die Verwendbarkeit dieses Kriteriums ist im vorliegenden Fall stark eingeschränkt, vgl. vorhergehendes Beurteilungsverfahren 4.

6.3.3.2 Belastungszahlen Boden

Beurteilungsverfahren 6

Für diese Belastungszahl wird das erforderliche Deponievolumen als Beurteilungsbasis herangezogen.

Das hier zugrunde gelegte Kriterium macht keine Aussage bzgl. der Toxizität der Abprodukte. Auch konnte nicht berücksichtigt werden, inwieweit eine umweltgerechte Verwertung möglich ist. In Einzelfällen, z.B. bei Kraftwerksnebenprodukten, werden Wiederverwertungsraten von nahezu 100% angestrebt, wodurch sich das Ergebnis deutlich verändern kann. Insofern kann dieses Kriterium nur als Hinweis auf mögliche Entsorgungsengpässe und damit verbundene Kosten verstanden werden.



Die ausgewiesene Belastungszahl für die Variante S1 ergibt sich überwiegend aus Kraftwerksnebenprodukten (65 %) sowie zu 12 % aus Abprodukten aus der Stahlherstellung und zu 9 % aus der Silizium-Gewinnung. Bei der Variante S2 tragen Kraftwerks-Nebenprodukte zu ca. 80% und Abprodukte aus der Stahlherstellung zu ca. 11 % bei. Bei Variante S3 besitzen Abprodukte aus der Strombereitstellung einen Anteil von 52 %, aus der Stahlherstellung von 13 % und aus der Bereitstellung von Aluminium von 26 %. Der dominierende Anteil bei Variante S4 ist mit 46 % Aluminium, danach folgen Stahl mit 28 % und Silizium-Verbindungen aus der Silizium-Prozeßkette mit 16 %. Der Kraftwerksanteil beträgt nur noch 4 %.

Für die konventionelle PKW-Flotte mit den Varianten B1-B3 und für die Variante D wurden nach /Enquete 90/ keine Abprodukte angegeben.

Für die Varianten E1 und E2 ergeben sich die hier berechneten Belastungszahlen aus der Bereitstellung des Energieträgers Strom. Es sei an dieser Stelle nochmals darauf hingewiesen, daß bei der Berechnung der spezifischen Emissionen und Abprodukte des Kraftwerkmixes die aus kerntechnischen Anlagen stammenden Emissionen und Abprodukte nicht erfaßt wurden.

Der mengenmäßige Anfall der Abprodukte ist gut bekannt. Allerdings wäre für eine fundierte Beurteilung die Kenntnis der Verwertungsraten sowie der Inhaltsstoffe und der Abfallart notwendig. Dies war in der hier durchgeführten Arbeit nicht möglich, da die Angabe nicht für alle Produktionsprozesse erhältlich war.

Der überwiegende Anteil der anfallenden Stoffe stammt bei den Varianten S1 - S3 aus dem bereitgestellten Strom des Kraftwerkmixes, bei der Variante S4 aus der Herstellung des Aluminiumrahmens.

Auch bei guter Datenlage bzgl. der Menge der anfallenden Abprodukte ist kritisch anzumerken, daß

- eine Einteilung in Wert- oder Abfallstoff nicht eindeutig möglich ist, und zudem oft von ökonomischen Überlegungen bestimmt ist
- Konzentration und Art von Begleit- und Spurenstoffen meist unbekannt sind. Das Umweltverhalten und die Einstufung in Deponieklassen wird aber gerade durch diese Stoffe wesentlich mitgeprägt.

6.3.3.3 Nach akuten Toxizitäten und Ökotoxizitäten

Beurteilungsverfahren 7-10

Für die Beurteilungsverfahren 7 bis 10 werden Toxizitäts- bzw. Ökotoxizitätswerte auf der Basis der letalen Dosen LD_0 herangezogen. Die verwendeten Werte stammen aus unterschiedlichen Literaturangaben.

- Beurteilungsverfahren 7: RTECS¹⁸
- Beurteilungsverfahren 8: Gebler
- Beurteilungsverfahren 9: RTECS, Umweltbundesamt, Rippen
- Beurteilungsverfahren 10: Gebler

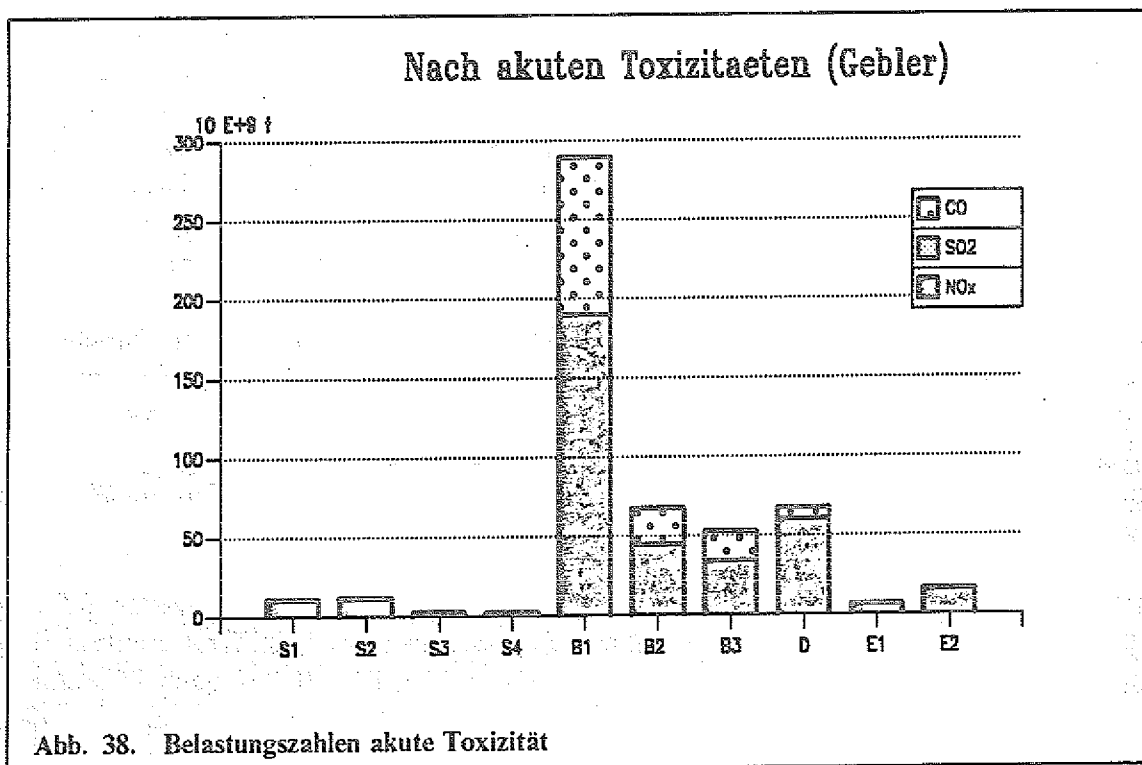
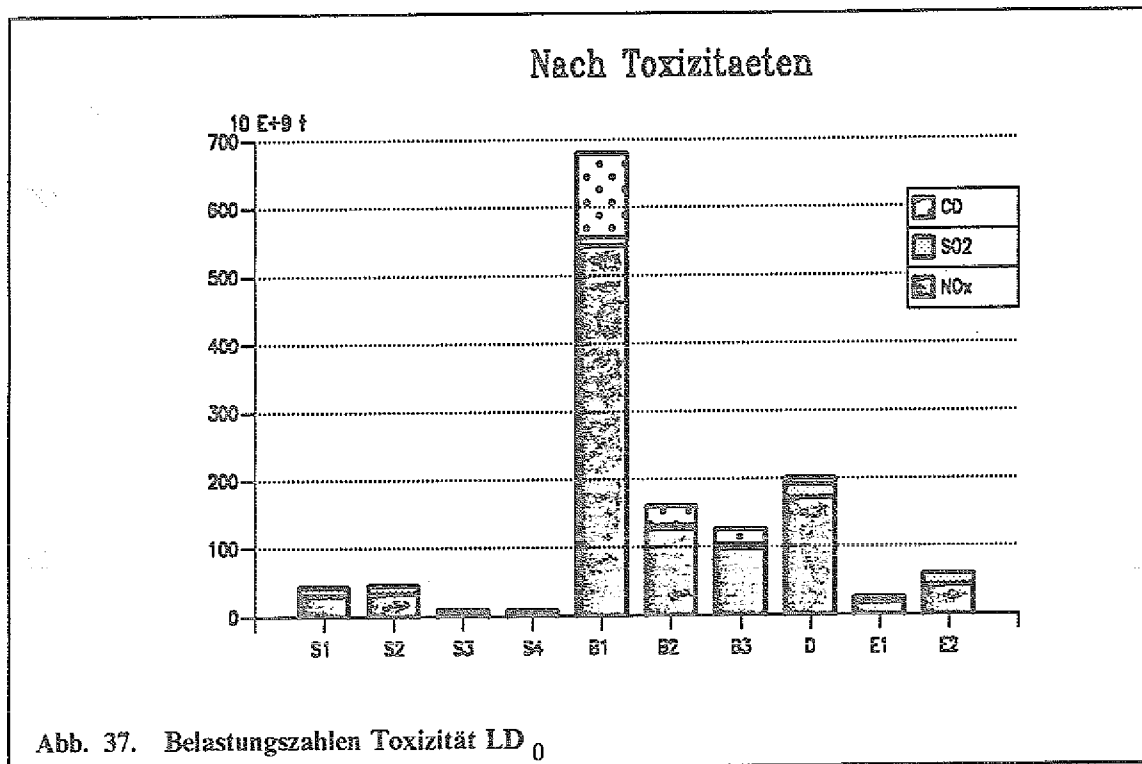
Die akuten Toxizitäten werden bei Gebler einem Klassifizierungsschema unterworfen. Dies ist nach Gebler deswegen notwendig, um den LD-Werten den Charakter der Scheingenauigkeit zu nehmen und um eine verbesserte Trennschärfe zwischen verschiedenen Toxizitätsstufen zu erreichen. Nach dem Prinzip der pessimalen Annahme wird einem Stoff als Toxizitätsfaktor der untere Wert desjenigen Streubereiches zugeordnet, in welchen der LD-Wert fällt. Beispielsweise wird allen Stoffen mit LD-Werten zwischen 100 und 999 der Toxizitätsfaktor 100 zugewiesen /Gebler 90, S.54/.

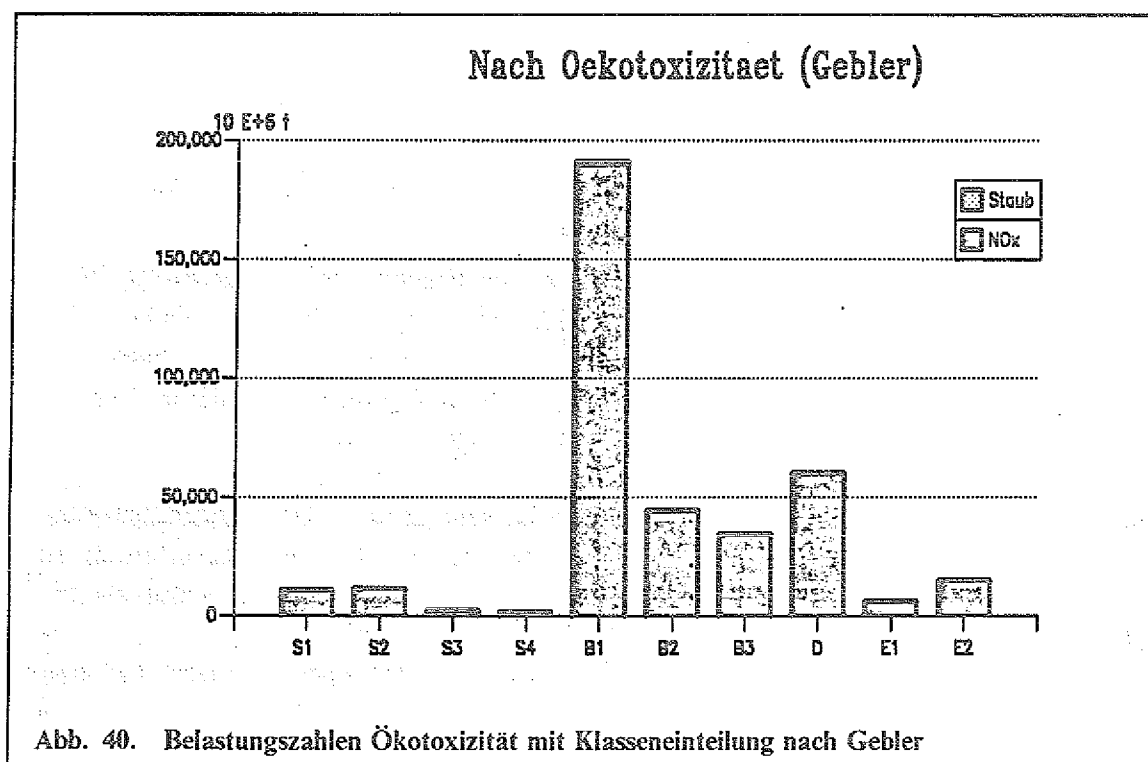
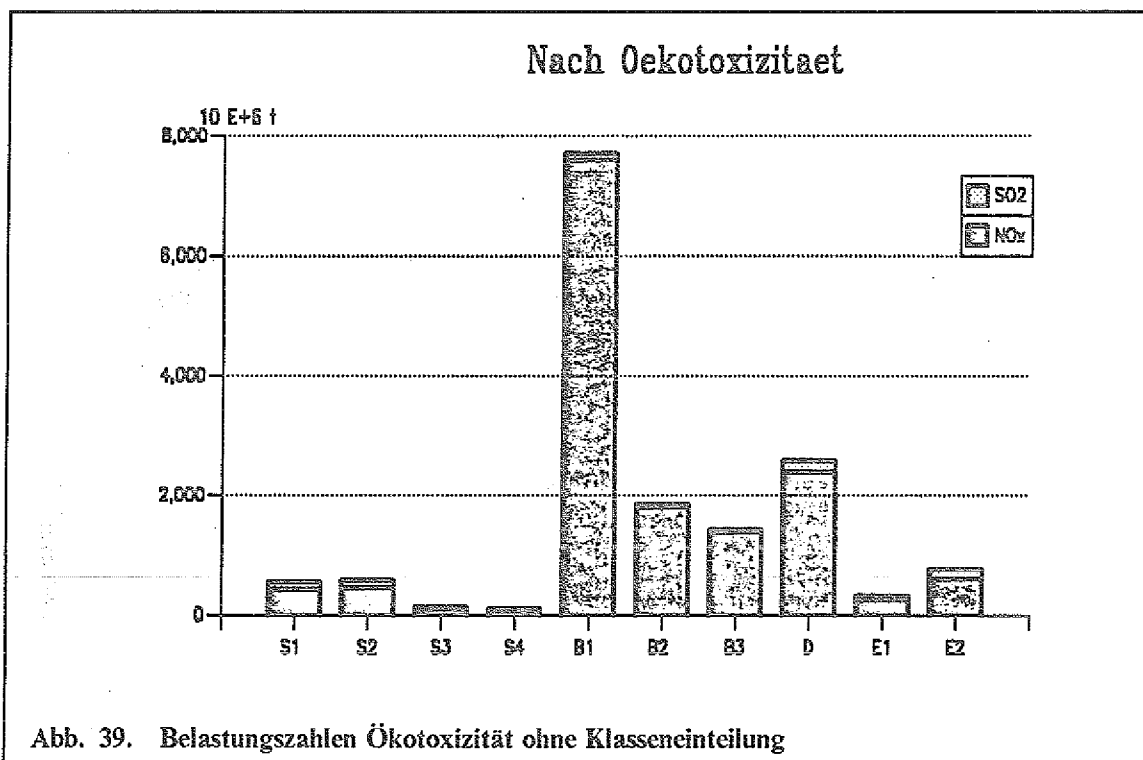
Bei allen Varianten fällt die Dominanz von NO_x an der Belastungszahl auf. Daneben ist bei den Beurteilungsverfahren 7 und 8 im Gegensatz zu allen anderen Beurteilungsverfahren ein nicht unwesentlicher Beitrag durch Kohlenmonoxid gegeben. Alle übrigen Stoffe sind nach diesen Beurteilungsverfahren vernachlässigbar.

Bezüglich der von der Liste erfaßten Stoffe ist die Datenlage insbesondere im Blick auf die hier relevanten Stoffe NO_x und CO als gut zu bezeichnen.

Die geringsten Belastungszahlen weisen die elektrisch angetriebenen Fahrzeuge auf. Für die akute Toxizität der Stoffgruppe Kohlenwasserstoffe konnte kein Wert ermittelt werden. Es kann daher nicht ausgeschlossen werden, daß im Einzelfall je nach Zusammensetzung ein relevanter Beitrag zu den Belastungszahlen durch diese Stoffgruppe möglich ist. Dies ist insbesondere wichtig, wenn persistente und/oder akkumulierende Eigenschaften mit hoher Toxizität zusammenfallen.

¹⁸ RTECS = Registry of toxic effects of chemical substances





6.3.3.4 Nach Genotoxizitäten

Beurteilungsverfahren 11 und 12

Im Beurteilungsverfahren 11 wird die Belastungszahl anhand der mutagenen Eigenschaften nach Gebler ermittelt.

Zur Beurteilung wird der TDL_0 ¹⁹ der jeweils empfindlichsten Organismen herangezogen und entspricht damit einem weitgehenden Vorsorgegedanken. Untersuchungsgegenstand der durchgeführten Tests ist zum einen das genetische Material (z.B. DNA, Chromosomen) und zum anderen die Möglichkeit der Übertragung auf nachfolgende Generationen.

Im Beurteilungsverfahren 12 wird abweichend hiervon auf das cancerogene Risiko beim Menschen abgestellt. Das vorliegende Datenmaterial basiert ausschließlich auf Studien am Menschen. Es handelt sich um errechnete Werte, die sicherstellen sollen, daß bei dieser Konzentration und einer lebenslangen Exposition statistisch ein zusätzlicher Krebsfall pro 1 Million Personen auftritt.

Um der noch unsicheren Datenlage zu entsprechen und um keine Scheingenauigkeit vorzutäuschen, werden die Stoffe entsprechend vorliegender Resultate (z.B. WHO, TRK) in die Klassen I, II oder III eingestuft. Sofern derartige Werte nicht vorlagen, wurden die Stoffe entsprechend den Stoffen mit ähnlichen chemischen Eigenschaften klassifiziert. Für Stoffgemische können nur grobe Abschätzungen erfolgen. So wurde beispielsweise NMVOC in Klasse II eingestuft, da neben Stoffen wie Benzol auch Stoffe wie Benzpyren enthalten sind.

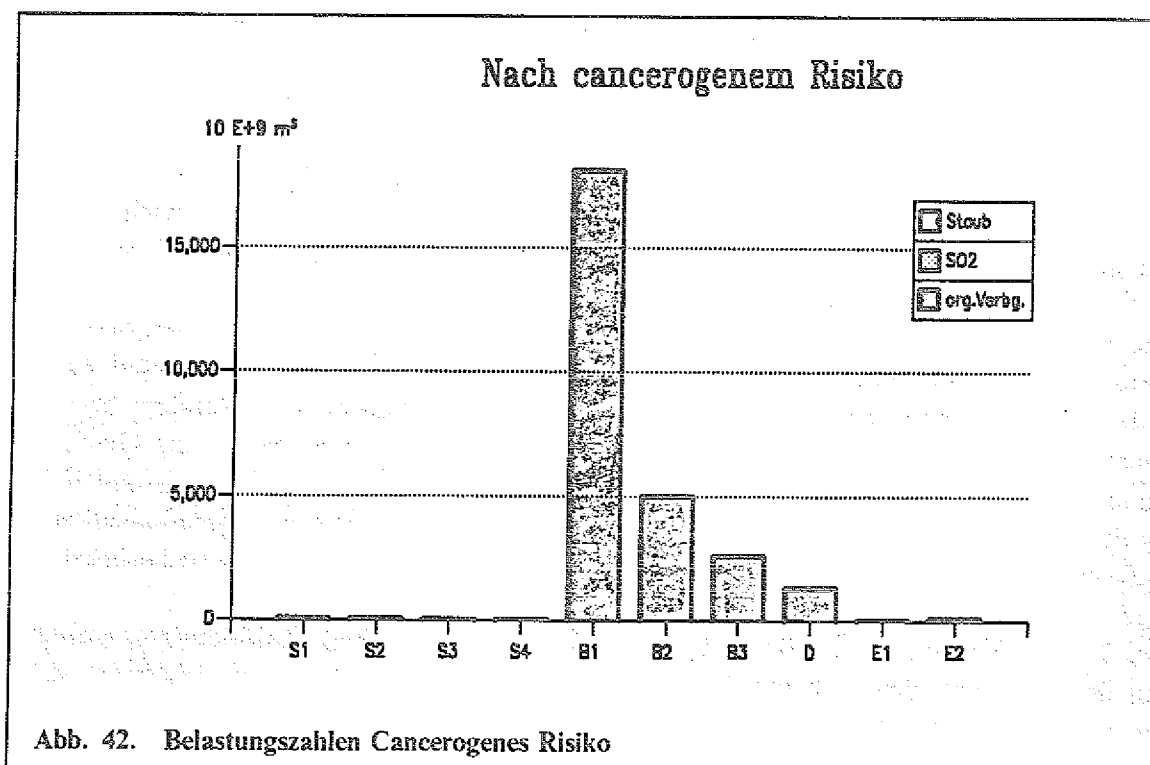
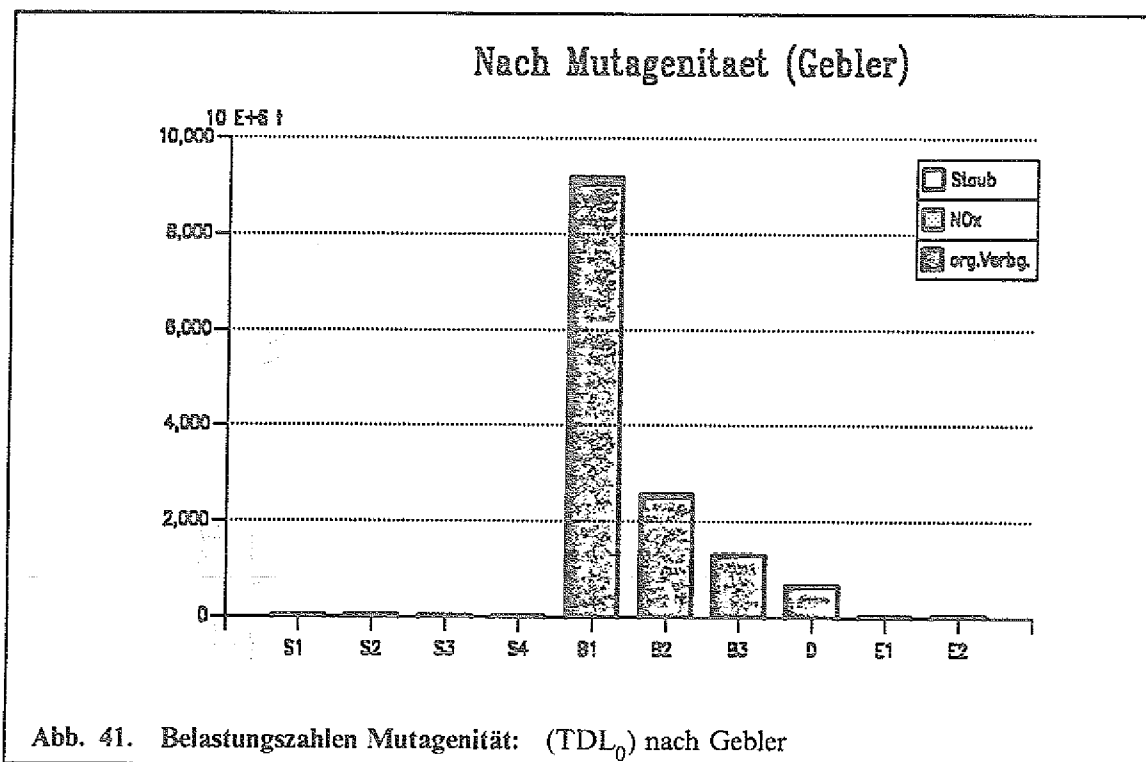
Während das Beurteilungsverfahren 11 für alle Lebewesen relevant ist, ist das Beurteilungsverfahren 12 nur für den Menschen von Relevanz.

Bei beiden Beurteilungsverfahren ergaben sich als im Ergebnis gewichtige Stoffe die organischen Verbindungen (NMVOC). Alle anderen Stoffe spielen im Ergebnis keine Rolle. Die im Vergleich hohen NMVOC-Emissionen der benzin- und dieselbetriebenen PKW bewirken, daß andere (durchaus auch zu beachtende) Emissionen hier im Vergleich keine Rolle spielen (vgl. Abb. 41 auf Seite 223 und Abb. 42 auf Seite 223).

Die Datenlage bzgl. des Cancerogenen Risiko ist sehr schmal. Die Zusammensetzung der Kohlenwasserstoff-Emissionen ist nicht bekannt. Das Beurteilungsverfahren zum Cancerogenen Risiko ist (noch) nicht belastbar. Die Ergebnisse können nur als Indiz gewertet werden.

Auch bei der Mutagenität waren nicht für alle hier zu beurteilende Stoffe belastbare Daten vorhanden. Die Datenlage erscheint aber für eine vergleichende Beurteilung ausreichend.

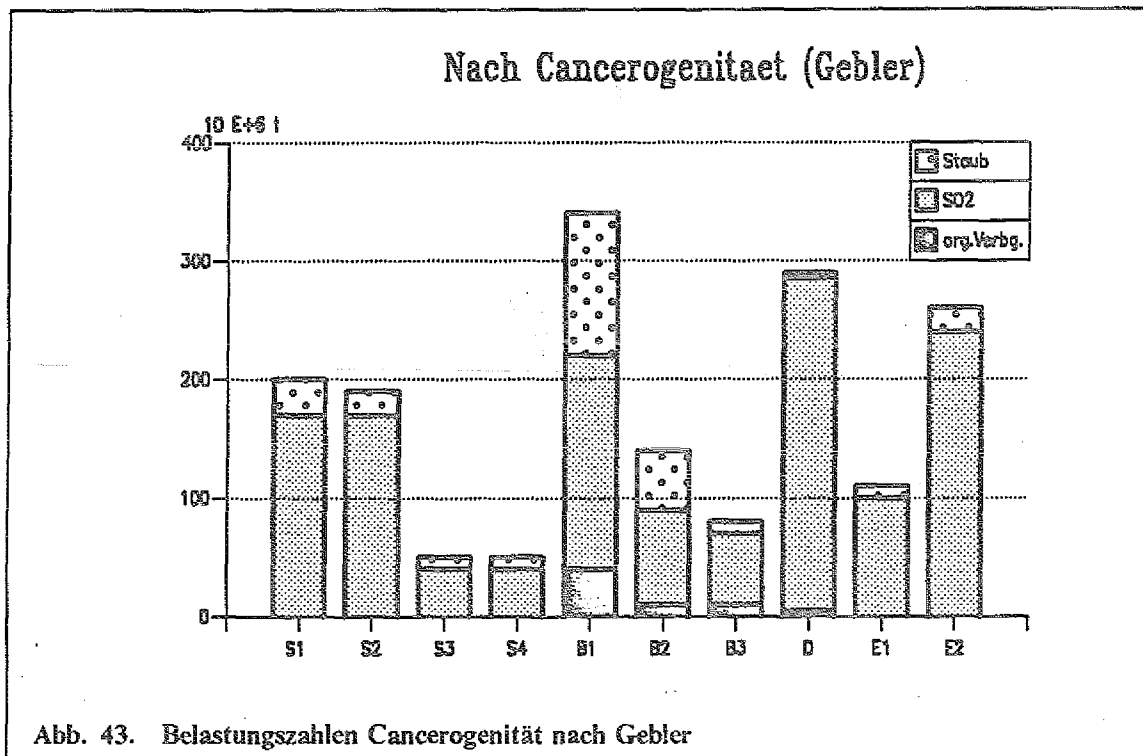
¹⁹ Soweit im Text nicht erläutert, sind Abkürzungen und Begriffserläuterungen den Anhängen C und D zu entnehmen



Beurteilungsverfahren 13

Im Beurteilungsverfahren 13 wird die Belastungszahl anhand der cancerogenen Eigenschaften nach Gebler ermittelt.

Zur Beurteilung wird der TDL_0 der jeweils empfindlichsten Organismen herangezogen und entspricht damit einem weitgehenden Vorsorgegedanken. Der Schutz des Menschen steht bei diesem Kriterium im Vordergrund.



Bei allen betrachteten Varianten fällt die SO_2 -Emission entscheidend ins Gewicht sowie mit geringerem Anteil die Staubemissionen. Bei den Varianten B1 - B3 und D sind zusätzlich organische Verbindungen relevant.

Die Stäube wurden einheitlich als Siliziumdioxid-Feinststaub beurteilt. Diesen Stäuben werden nach Gebler ein cancerogenes Potential vergleichbar wie Schwefeldioxid zugeordnet und ist damit relativ gering. Dennoch fallen die Stäube, insbesondere bei der Variante B1 (Fahrzeugflotte 1987), aufgrund der hohen Emissionsmenge ins Gewicht. Beim Vergleich der Staubwerte ist zu berücksichtigen, daß je nach Variante und Herkunft der Stäube (Kraftwerk, Herstellung der Bau- und Werkstoffe, Straßenverkehr) aufgrund der unterschiedlichen Inhaltsstoffe abweichende Beurteilungen zu berücksichtigen wären.

Die bei den Varianten B1 - B3 und D auftretenden organischen Verbindungen wurden auf der Basis von Benzol beurteilt. Bei genauerer Kenntnis der Zusammensetzung sind auch hier Abweichungen (bis Faktor 10) möglich.

Auffällig beim Vergleich der Belastungszahlen sind die hohen Werte für die Variante B1 (Fahrzeugflotte 1987) sowie für die Variante D (Öko-Polo). Nur wenig darunter liegt die Variante E2 (Elektro-PKW, Mittelklasse). Besonders günstig erscheinen nach diesem Kriterium die Varianten S3 (Elektroauto, Kleinwagen, Solartankstelle mit amorphen Modulen und Seilnetz-Aufständerung) und S4 (Elektroauto, Kleinwagen, Solartankstelle mit MIS-monokristallinen Modulen und Seilnetz-Aufständerung).

Die Beurteilung der Cancerogenität zeigte, daß nur drei Stoffe bzw. Stoffgruppen relevant waren. Beim Vergleich der hier dargestellten Belastungszahlen ist zu berücksichtigen, daß

- bei Schwefeldioxid Hinweise auf Cancerogenität bislang nur im Tierversuch vorliegen und noch keine abschließende Beurteilung zulassen
- bzgl. der Staubinhaltsstoffe insbesondere bei KFZ-Emissionen keine detaillierten Daten vorliegen
- bzgl. der Zusammensetzung der Kohlenwasserstoffe ebenfalls noch weiterer Klärungsbedarf besteht

6.4 Zusammenfassung der erhaltenen Ergebnisse

Die Emissionen der betrachteten neun Zukunftsvarianten (E1, E2, S1-S4, B2, B3,D) und des PKW-Bestands von 1887 (B1) für die 90,4 Mrd Pkm des beruflichen Personennahverkehrs wurden im Kap. „Ermittlung der Belastungszahlen“ auf Seite 210 in 13 Arten von Belastungszahlen (verschiedene Toxizitäten, Konzerogenitäten, Mutagenität etc.) dargestellt. Dazu kommen noch die CO₂-Emissionen und der gesamte Primärenergieaufwand (PEA), so daß hier insgesamt 15 Bewertungskriterien quantifiziert wurden.

Die bewertende Zusammenfassung der Einzelergebnisse sollte nach Auffassung der Autoren den Entscheidungsträgern bzw. jedem Einzelnen, der sich mit den Ergebnissen der Umweltvorsorgeprüfung befaßt, überlassen bleiben.

Eine Wichtung der einzelnen Kriterien untereinander oder ob alle oder nur wenige der genannten Kriterien zur Bewertung herangezogen werden, kann wissenschaftlich nicht begründet werden.

Zum Zwecke einer übersichtlichen quantitativen Vergleichbarkeit der neun Zukunftsvarianten werden in einem weiteren Aggregationsschritt dimensionslose relative Kennzahlen für diese 15 Beurteilungskriterien gebildet (vgl. Tab. 94 auf Seite 227) und in 10 Polardiagrammen für jedes der neun Zukunftsvarianten (E1, E2,..) sowie für den PKW-Bestand 1987 (Szenario B1) wiedergegeben. Diese Kennzahlen sind prozentuale Werte pro Kriterium bezogen auf den Kriterienwert der jeweils schlechtesten (d.h. werthöchsten) Szenariovariante: Die Kennzahl 100 für eine Belastung einer Variante heißt, daß dieses Szenario für diese Belastung den höchsten auftretenden Wert hat. Die Kennzahl 0 für ein Kriterium bedeutet, daß diese Variante zu dieser Belastung nicht beiträgt. Da mit B1 der heutige Belastungsstand (bzw. von 1987) einbezogen ist, liefern die nachfolgenden 10 Polardiagramme (Abb. 44 auf Seite 230 bis Abb. 53 auf Seite 234) auch einen Maßstab für die Bandbreite der grundsätzlichen Verbesserungen, die bis zum Jahr 2005 im angesprochenen Verkehrsbereich zu erwarten sind: Der Stand 1987 (Variante B1) ist (mit Ausnahme CO₂ und PEA) naturgemäß der "schlechte" Ist-Zustand.

Bei der grafischen Darstellung wird nachdrücklich darauf verwiesen, daß durch die Art der Darstellung implizit eine Gewichtung der Kriterien mit dem Faktor 1 unterstellt wird. Dies wird der Aussagekraft einzelner Kriterien bzgl. dem zugrundeliegenden Ziel "Umweltvorsorge", aber auch hinsichtlich der Datenverfügbarkeit und -genauigkeit nicht gerecht.

Das Hauptaugenmerk der letzten Jahrzehnte lag auf der unmittelbaren Gefahrenabwehr. Dies wurde in Grenzwerte festgeschrieben. Heute tritt der Aspekt der Langfristvorsorge in den Vordergrund, wodurch insbesondere die Ökotoxizität von Stoffen und Vorsorgestandards wichtig werden. Sie dienen der langfristigen Erhaltung der natürlichen Lebensgrundlagen (nachhaltige Bewahrung) und sind u.E. mit größerem Gewicht als die übrigen Kriterien zu sehen.

Die Ableitung von Gewichtungsfaktoren sind aber auf jeden Fall stark subjektiv geprägt und nur unzureichend wissenschaftlich begründbar.

Insofern sollten auch immer die Einzelergebnisse des Kapitels „Vergleich der ermittelten Belastungszahlen“ auf Seite 211 (Abb. 31 auf Seite 212 bis Abb. 43 auf Seite 224) zum Vergleich herangezogen werden.

Relative Belastungs-kennzahl	S1	S2	S3	S4	B1	B2	B3	D	E1	E2
Luft BUWAL	13	12	3	2	100	25	18	38	6	15
Luft VDI	8	8	2	2	100	24	19	34	4	11
Luft Vorsorge	9	8	2	3	100	24	18	34	4	11
Kohlendioxid	57	73	15	4	84	76	60	56	43	100
Primärenergieaufwand	64	77	19	8	67	62	48	41	43	100
Deponievolumen	78	84	23	9	0	0	0	0	43	100
Wasser BUWAL	100	58	11	15	0	0	0	0	0	0
Trinkwasserverordnung	46	22	21	100	0	0	0	0	0	0
Toxizität	6	7	1	1	100	19	15	28	4	9
Toxizität nach Gebler	4	4	1	1	100	15	12	21	2	5
Mutagenität	0	0	0	0	100	28	14	7	0	0
Cancerogenes Risiko	0	0	0	0	100	28	14	7	0	0
Kanzerogenität	59	59	15	15	100	41	24	85	32	76
Ökotoxizität nach Gebler	6	6	1	1	100	24	18	31	3	8
Ökotoxizität	7	8	1	1	100	24	16	28	4	8

Tab. 94. Relative Kennzahlen der verschiedenen Varianten

Der Vergleich hebt auf die schon erwähnte "Jetzt Zeit"- (Stand 1987) Variante B1 ab.

Das "Trend"-Szenario B2 zeigt eine ausgeprägte Verbesserung bei allen toxischen Emissionen bzw. deren Belastungszahlen auf nur noch etwa 15-40 %, nur die CO₂-Emissionen und der Primärenergieaufwände (PEA, Kapitel „Vergleich der Primärenergieaufwände“ auf Seite 203) sind unwesentlich besser. Die "Reduktions"-Variante B3 hat eine weitere deutliche Absenkung der Belastungszahlen auf maximal 24 % von B1 zur Folge, aber auch CO₂ und der PEA sind merklich zurückgegangen.

Demgegenüber ist die Variante D (Diesel, Öko-Polo) uneinheitlich: Die Kanzerogenität ist wegen der SO₂-Emissionen sehr hoch (85 % von B1) und auch die übrigen Belastungszahlen liegen wieder zwischen 21 und 38 % von B1. Nur Mutagenität und Cancerogenes Risiko liegen mit jeweils 7 % von B1 sogar deutlich besser als B2 und B3 mit jeweils 28 bzw. 14 %.

Hier ist der Hinweis angebracht, daß der Öko-Polo als Kleinvariante treibstoffbetriebener PKWs und damit als Direktkonkurrenz zum E-PKW angesehen wird. Der Diesel hat zwar seine Vorzüge - niedrigen CO₂-Ausstoß und PEA-, aber belastungsmäßig ist er wegen SO₂ und NO_x ziemlich ungünstig insbesondere auch im Vergleich mit den netzbetriebenen E-PKWs und dies trotz des hohen fossilen Beitrags beim westdeutschen Kraftwerkmix, wie nachfolgend mit den Diagrammen "E1" und "E2" demonstriert wird.

Da nach gängiger Vorstellung E-Autos aus dem Netz versorgt werden, sollen als nächstes die beiden Varianten E1 (Klein E- PKW) und E2 (Groß-E-PKW) analysiert werden: Generell läßt sich feststellen, daß die E-PKW-Größen - hier ausdrückt als Energiebedarf für 100 Pkm - die entscheidende Größe ist: Ein aus dem Netz versorgter Mittelklasse-E-PKW (hier "E2", 35 kWh/100 Pkm) führt bei einigen Kenngrößen zu Maximalwerten, so bei CO₂, PEA und Deponievolumen (vgl. Abb. 49 auf Seite 232). Auch die - SO₂- bedingte-Kanzerogenität ist sehr hoch. Die übrigen Gefährdungen sind rückhaltebedingt klein. Der kleine E-PKW ("E1", 15 kWh/100 Pkm) zeigt die große Entlastung der Umwelt, wenn die Nachfrage entsprechend reduziert wird (vgl. Abb. 48 auf Seite 232). Man darf dabei aber nicht vergessen, daß die Leistungsgröße einen entsprechenden Einfluß auf den Gebrauchswert hat. Hier bedeutet "Kleinwagen" tatsächlich einen Einsitzer (z.B. Mini- El-City) mit einem Kinderplatz auf dem Rücksitz. Der "kleine" E-PKW ist also kein Beispiel für "rationelle Energieverwendung", wo gleicher Gebrauchswert bei vermindertem Energiebedarf angenommen wird!

Die Hauptvarianten dieses Projekts (vgl. Abb. 50 auf Seite 233 bis Abb. 53 auf Seite 234) sind die vier solar gestützten Szenarien S1/S2 (großer E-PKW) und S3/S4 (kleiner E-PKW). S1 bis S3 brauchen Netzunterstützung, S4 ist eine rein solare Variante (in dem Sinne, daß der Jahresbedarf im Mittel solar gedeckt ist - Netzankopplung für sonnen-schwache Zeiten ist natürlich immer notwendig). Es sei auch nochmals betont, daß die Datenerhebung für die PV- Herstellung wesentlich disaggregierter war als bei den Vergleichstechniken. Insbesondere wurden bei der PV auch die Abgaben an Wasser und Boden identifiziert. In dieser Detaillierungstiefe sind die PKW- und Kraftwerksemissionen nicht erhoben worden - mit der Ausnahme des Deponievolumens für die Kraftwerksentsorgung (enthält alle festen Reststoffe der Kohlekraftwerke). Zunächst können hier nur die jeweils gleichen Nachfragegrößen (gleiche E-PKW-Leistung) verglichen werden: Also S1, S2 und E2 (E-PKW groß) bzw. S3, S4 und E1 (E-PKW klein).

E-PKW-groß (Abb. 50 auf Seite 233, Abb. 51 auf Seite 233, Abb. 49 auf Seite 232):

S1 hat konventionell kristalline, S2 amorphe Module. Abgesehen von den wasserbezogenen Werten ist die reine Netzvariante E2 deutlich die ungünstigste, gefolgt vom amorphen Fall S2 mit seinem hohen Netzanteil. Die Kanzerogenität kommt im wesentlichen von den SO₂-Emissionen, mit merklichen Beiträgen durch Stäube bei der PV-Herstellung.

E-PKW-klein (Abb. 52 auf Seite 234, Abb. 53 auf Seite 234, Abb. 48 auf Seite 232):

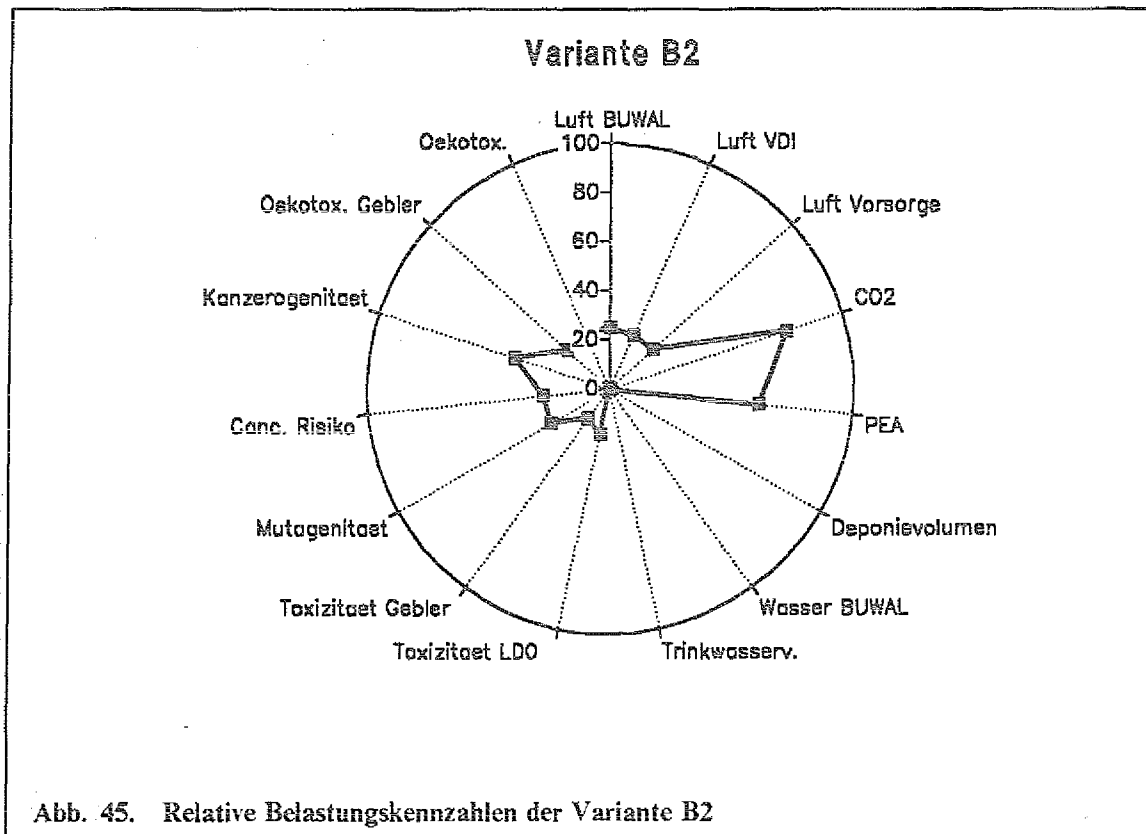
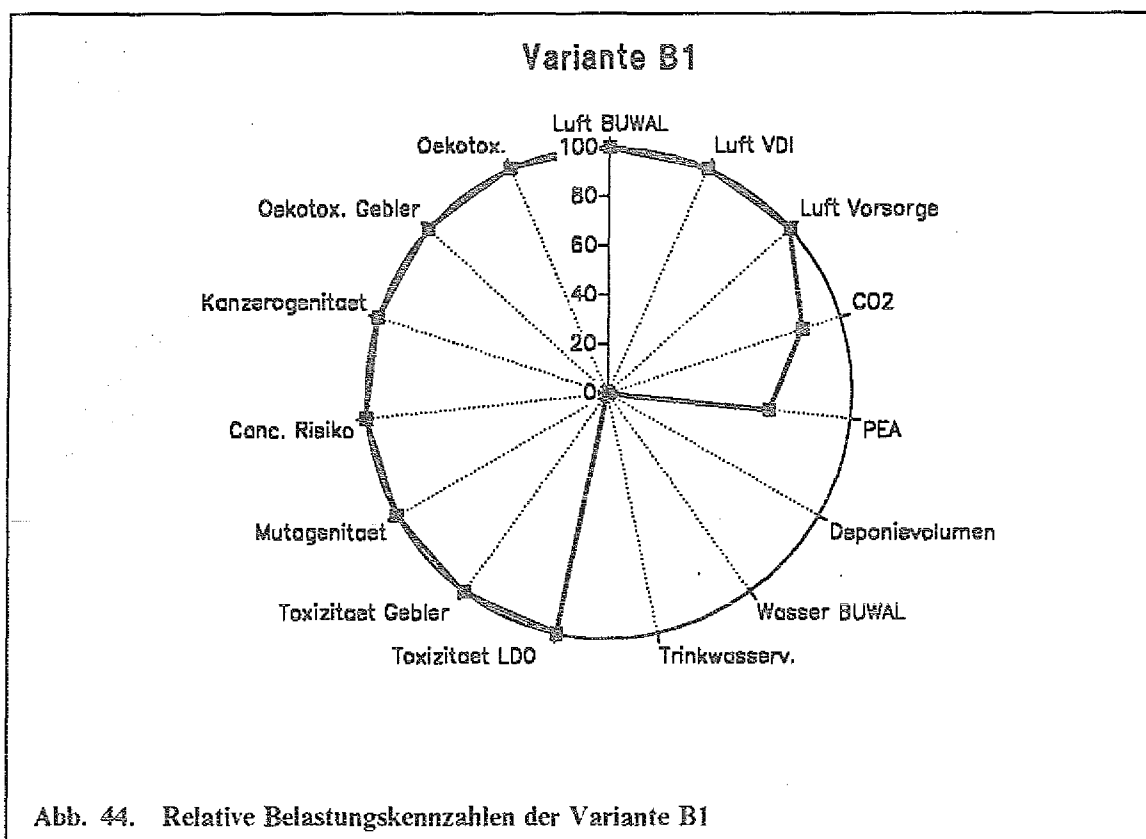
S3 hat amorphe Module, S4 die fortgeschrittene kristalline Variante Mono-MIS-I-Module. Der Vergleich von S3 und S4 mit E1 zeigt - abgesehen von den Wasserbelastungen - die ökologische Überlegenheit der solar gestützten Varianten. Bei S4 - wo nur etwa 2/3 der E-PKW-Parkflächen überdeckt werden mußten, um die Jahresenergie von 13,6 TWh zu erbringen - sind die Relativzahlen mit Ausnahme der Wasserbelastung der gemeinsamen Belastungsgrößen auf ihre Minimalwerte gesunken.

Zu den Wasserbelastungen der Solarstrategien S1 bis S4 ist einschränkend folgendes zu vermerken: Bei den kristallinen Modulen (S1, S4) tragen nach BUWAL etwa je zur Hälfte Fluoride und Feststoffe bei. Nach der Trinkwasserverordnung spielen bei S1 nur

Fluoride, bei S2 und S3 nur und bei S4 überwiegend Tenside (Reinigungsmittel) die wesentliche Rolle. Zu diesen Tensiden sei erwähnt, daß laut Datenlage bei den konventionellen kristallinen Zellen die Tenside in die "Abwasserreinigung" gehen, bei den anderen Zelltypen aber direkt in die "Hydrosphäre". Im ersteren Fall wird angenommen, daß die Tenside abgebaut sind, bevor das Abwasser in den Vorfluter abgegeben wird. Hier ist eine gewisse Unschärfe in der Datenerhebung gegeben. Man kann wohl davon ausgehen, daß bei einer PV-Fertigung im industriellen Maßstab immer eine Abwasserreinigung vorgenommen werden wird.

Insgesamt sind die Belastungen der Hydrosphäre durch PV- Produktion nicht als schwerwiegend anzusehen. Nach den hier erhobenen Daten würde über die Lebensdauer der PV-Module von 20 Jahren die jährliche Wassermenge eines Kleinflusses mit Trinkwasserqualität von ca. $3 \text{ m}^3/\text{s}$ nach der Trinkwasserverordnung zur schadlosen Verdünnung bei der Herstellung von selbst $13,6 \text{ GW}_e = 109 \text{ km}^2$ MIS-I-Modulen ausreichen. Werden die Tenside in einer Reinigungsstufe abgebaut, geht die erforderliche Verdünnungsmenge auf etwa 15 % zurück.

Man muß davon ausgehen, daß die Vorleistungen der Brennstoffversorgung bei den Alternativen (Brennstoffe für die Kraftwerke, Kraftstelle für den Verkehr) auch zu Wasserbelastungen führen, die hier mangels Daten aber nicht berücksichtigt sind.



Variante B3

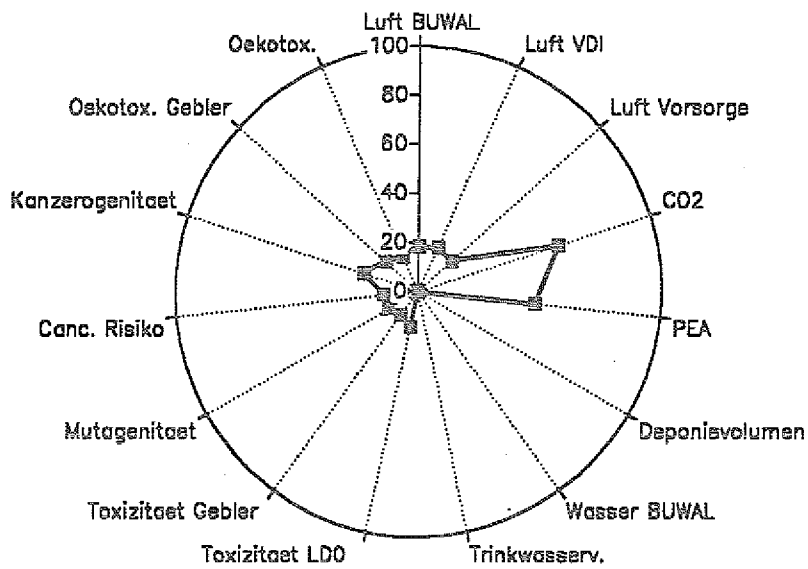


Abb. 46. Relative Belastungskennzahlen der Variante B3

Variante D

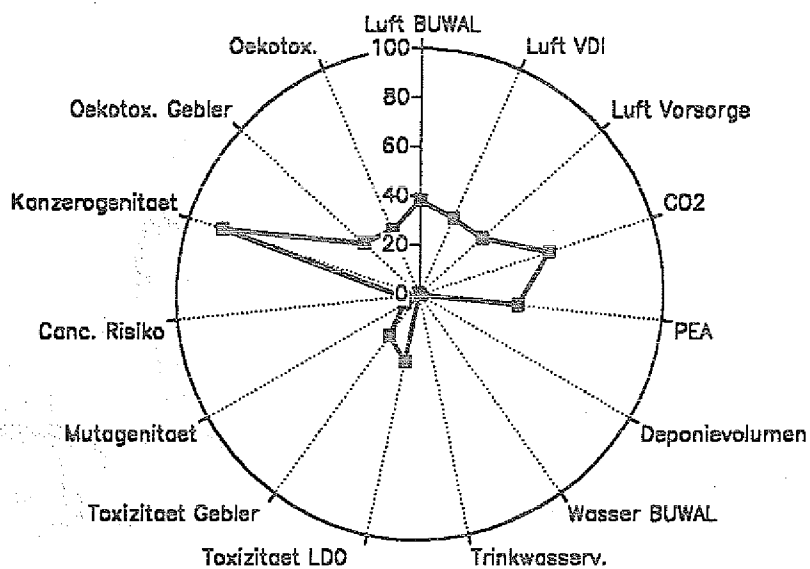
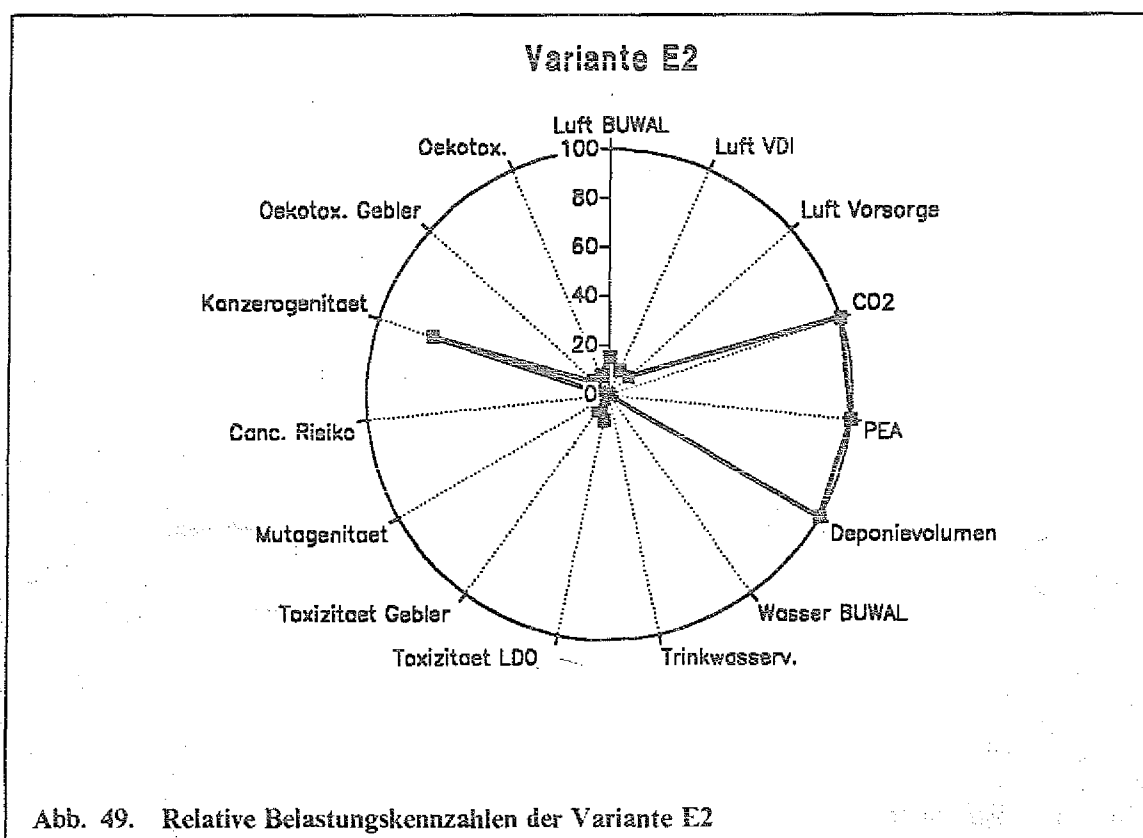
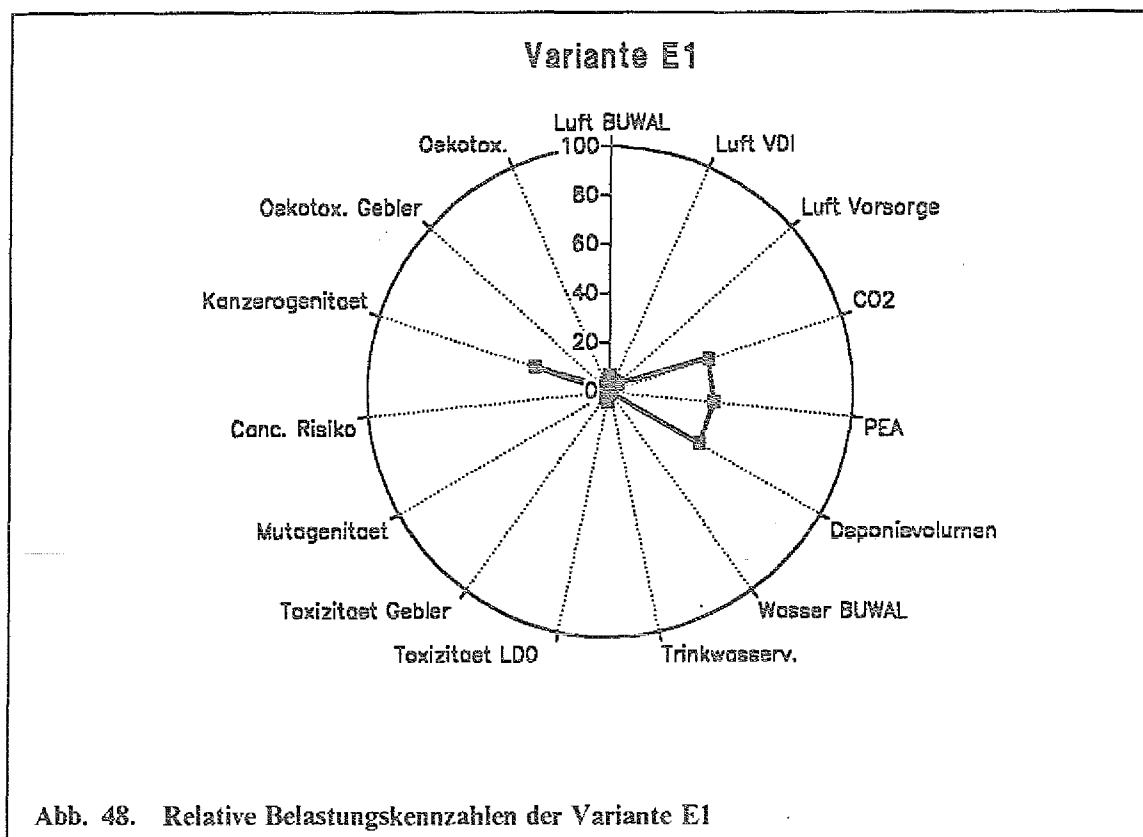


Abb. 47. Relative Belastungskennzahlen der Variante D



Variante S1

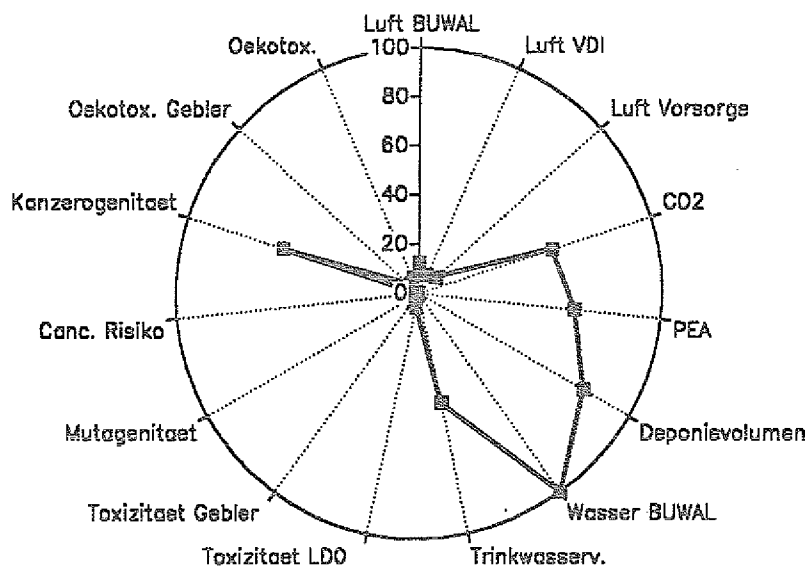


Abb. 50. Relative Belastungskennzahlen der Variante S1

Variante S2

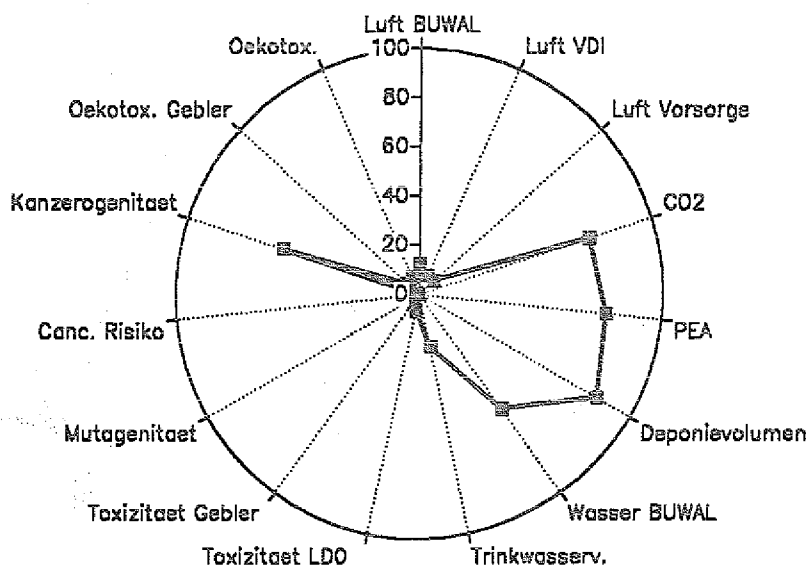
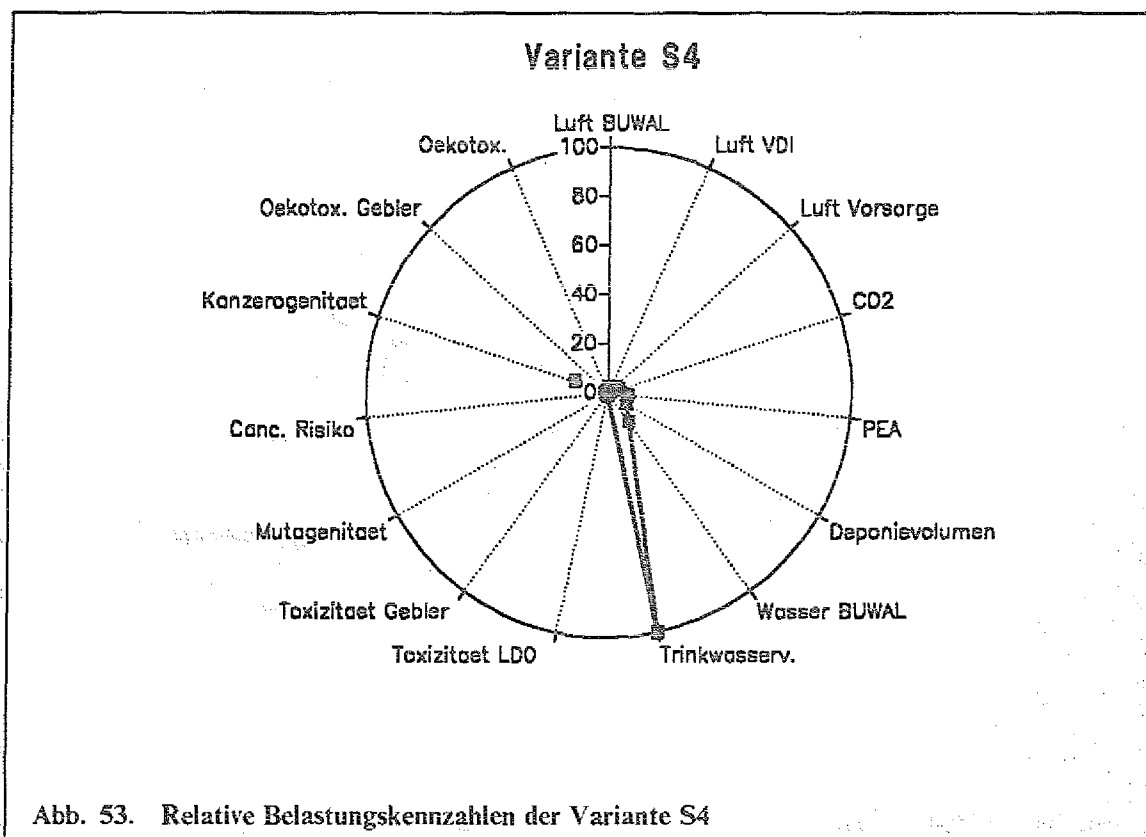
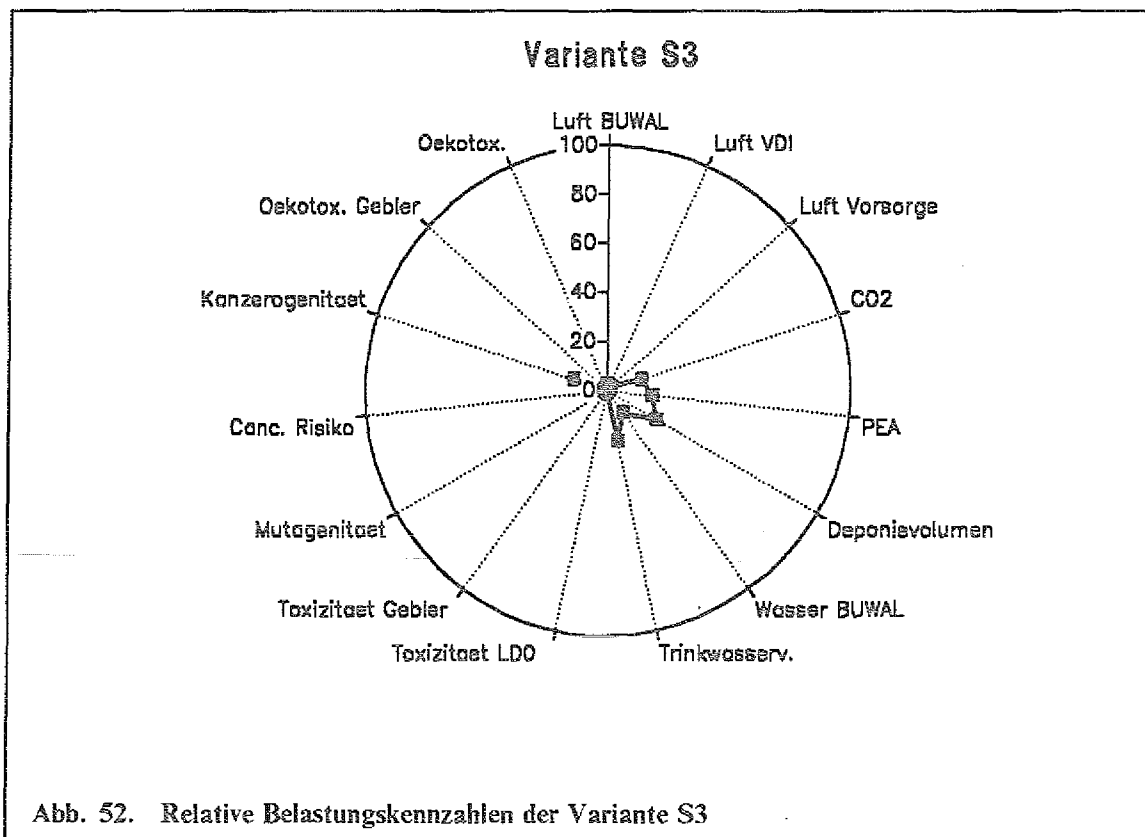


Abb. 51. Relative Belastungskennzahlen der Variante S2



7.0 Nachkontrollphase

In der abschließenden Phase des Prüfverfahrens ist es notwendig, die in der Regel umfassenden Ergebnisse in einer solchen Form aufzubereiten, daß sie für den Entscheidungsträger und die zu informierende (Fach-)Öffentlichkeit verständlich und nachvollziehbar sind.

Auch für Forschungsvorhaben, bei denen die Inhalte des Pflichtenheftes bereits für eine Beurteilung ausreichend sind, sollte in verkürzter Form eine Umweltvorsorgeerklärung erstellt werden.

Eine mögliche Gliederung einer derartigen Umweltvorsorgeerklärung wurde in Anlehnung an /Bechmann 89/ im Band 2 dieses Berichtes dargestellt.

Anhand der Umweltvorsorgeerklärung kann dann geprüft werden, ob die ggf. festgelegten Zielvorgaben erreicht wurden. I.a. wird bei der Nachkontrolle zu prüfen sein:

- ob die beschriebenen Umweltauswirkungen durch die Ergebnisse des F&E-Vorhabens bestätigt wurden
- in welchen Bereichen bzw. bei welchen Annahmen gravierende Fehleinschätzungen vorlagen
- ob die ggf. beschriebenen Maßnahmen zur Emissionsminderung und zu Recyclingmaßnahmen in Art und Umfang realisierbar erscheinen

Entsprechend der Ergebnisse dieser Überprüfung kann sich eventuell ein nachträglicher Handlungsbedarf bzw. Forschungsbedarf ergeben, insbesondere wenn negative Abweichungen festzustellen sind.

Ein weiteres wichtiges Element der Nachkontrolle ist dafür zu sorgen, daß die jeweils neuesten Erkenntnisse aus den Forschungsvorhaben in der Beurteilung dieser Technik Berücksichtigung finden. Ggf. kann hierdurch eine erneute UP ausgelöst werden.

Gleichzeitig können die Ergebnisse dieser Arbeiten dazu genutzt werden, um im Sinne einer Erfolgskontrolle die Öffentlichkeit über die Forschungs- und Entwicklungsergebnisse bzgl. der Umweltbelange in sachgerechter Weise zu informieren.

Im Rahmen der hier durchgeführten Arbeiten zur Entwicklung der Umweltvorsorgeprüfung war die detaillierte Ausgestaltung dieser Phase noch nicht Gegenstand der Betrachtung.

Generell könnte durch verbesserte Wirkungsgrade und über Materialeinsparungen durch dünnere Schichten und rahmenlose Module eine weitere Verbesserung der aus Umweltaspekten positiven Einschätzung von Photovoltaik-Anwendungen erreicht werden.

8.0 Ergebnisse, Schlußfolgerungen

Wesentliches Arbeitsziel war neben der Analyse der Umweltauswirkungen von Photovoltaikanlagen die Entwicklung einer Methode zur Umweltvorsorgeprüfung. Die Untersuchungsergebnisse gliedern sich daher in einen methodisch orientierten Teil sowie in Aussagen zur Photovoltaik.

8.1 Methode

Defizite, Kritik und Schlußfolgerungen zur Methode werden hier nur insoweit wiedergegeben, wie sie im Zusammenhang mit der Bearbeitung der Photovoltaik aufgetreten sind. Allgemeine eher theoretische Überlegungen sind in Band 2 zu finden.

8.1.1 Zielerreichung

Die noch unzureichende vorsorgende Beachtung umweltrelevanter Aspekte in der F&E-Phase ist zum Teil auch durch die noch vorhandenen methodischen Schwächen der Instrumente zur Informationsbeschaffung und Entscheidungsvorbereitung begründet.

Auch die hier vorgeschlagene Methode zur Umweltvorsorgeprüfung kann die vorhandenen Wissensdefizite nicht kompensieren, sondern bestenfalls offenlegen.

Dennoch sind mit diesem Ansatz die Arbeitsziele

- ein Prüfverfahren zu entwickeln, welches dazu beiträgt, möglichst früh die Wirkungen auf Mensch und Umwelt einer durch ein Forschungsvorhaben intendierten technischen Entwicklung zu erkennen,
- entsprechend dem breiten umweltpolitischen Konsens ein Instrument zu entwickeln, welchem der Vorsorgegedanken ("Zukunftsverträgliche Entwicklung") als Richtschnur dient und gleichzeitig erlaubt, die Wissensbasis für eine vorsorgende Umweltforschung sowie zu umweltpolitischen Gestaltungsalternativen zu erweitern,
- dem Entscheidungsträger ein Hilfsmittel an die Hand zu geben, welches zu einem möglichst frühen Zeitpunkt die Entscheidung, welche der Umweltaspekte als relevant anzusehen sind und als Ziele oder Kriterien formuliert Bestandteil des Forschungsvorhaben werden sollen, zu verbessern hilft,
- aus der Sicht der Umweltvorsorge F&E-Lücken aufzuzeigen,

erreicht worden. Die noch bestehenden Mängel und Defizite sollten kein Hinderungsgrund darstellen diesen Weg konsequent weiterzuverfolgen.

8.1.2 Methodische Mängel

Die angestrebte Expositionsanalyse im Rahmen der Umweltvorsorgeprüfung läßt sich zumindest bei marktfernen Vorhaben nicht mit einem vertretbaren Aufwand an Zeit und Mitteln realisieren.

Ein noch weitgehend ungelöstes methodisches Problem, die Beurteilung der vielfältigen und unterschiedlichen Umweltbelastungen, mindert die Treffsicherheit der Instrumente zur Umweltvorsorge noch erheblich. Im vorliegenden Ansatz wurde davon ausgegangen,

daß dem Anwender der Methode zur Umweltvorsorgeprüfung verschiedene Verfahren zur Beurteilung zur Verfügung gestellt werden. Eine vorläufige Einschätzung der verschiedenen Beurteilungsverfahren findet sich im Band 2. Die Aussagekraft einer vergleichenden Darstellung wird über die Verwendung mehrerer Beurteilungsverfahren deutlich verbessert.

8.1.3 Umsetzungsschwierigkeiten am Beispiel der Photovoltaik

8.1.3.1 In der Orientierungsphase

Der Wunsch bzw. die Aufgabenstellung eine Methode zur Umweltvorsorgeprüfung zu entwickeln und gleichzeitig am Beispiel der Photovoltaik diese Methode zu überprüfen führte zunächst zu methodenunabhängigen Schwierigkeiten:

So konnte für die Erhebung der Energie- und Stoffbilanzen der Photovoltaik-Prozessketten kein Hinweis für den notwendigen Detaillierungsgrad der Datenerhebung gegeben werden. Dies führte zu einem deutlich höheren Aufwand als der Aufgabenstellung angemessen war. Das Ziel 'Schnelle Ergebnisse' konnte dadurch nicht erreicht werden.

Bei künftigen Umweltvorsorgeprüfungen werden diese Schwierigkeiten jedoch nicht mehr auftreten.

Weitere nur mit erheblichem Arbeitsaufwand zu überwindende Schwierigkeiten ergaben sich

- bei der Erarbeitung von Basiszahlen zu Bau- und Werkstoffen:
Angaben zu den Primärenergieaufwendungen und den Umweltbelastungen bei der Bereitstellung von Bau- und Werkstoffen liegen nur unvollständig, zum Teil auf veralteter Datenbasis und mit unterschiedlichen Systemgrenzen vor. Für die Stoffe Glas, Zement, Aluminium und Stahl wurden auf Basis der vorliegenden Literatur neue Prozesskettenanalysen durchgeführt. Die Validität der erzielten Ergebnisse ist dennoch als nicht zufriedenstellend zu bezeichnen, aber nur durch gesonderte Untersuchungen zu verbessern.
- beim Zugriff auf Stoffdaten:
Die o.g. Wissensdefizite gelten auch für die Prüfung auf Umwelterheblichkeit bei Stoffen.
Im Allgemeinen sind die benötigten Stoffdaten (Toxizitäten, Persistenz, etc.) nur unvollständig, uneinheitlich und mit unterschiedlicher Qualität vorhanden.
Neben den Daten zur Eigenschaft der Stoffe werden Angaben zu den in die Umwelt voraussichtlich eingebrachten Mengen benötigt. Die Abschätzung dieser Mengen ist aber stark von den gewählten szenarischen Annahmen (z.B. Technischer Stand, Marktdurchdringung, Zeithorizont, Wahl der Technikbausteine) abhängig.
Ist die Datenlage zu gering, so ist eine Beurteilung des Stoffes nicht möglich.

8.1.3.2 In der Durchführungsphase

Der Untersuchungsansatz, die umweltrelevanten Aspekte einer Technik nicht nur horizontal (die einzelnen Umweltbereiche übergreifend), sondern auch vertikal (von der Rohstoffgewinnung über die einzelnen Umwandlungsstufen bis hin zur Entsorgung) zu

analysieren, erfordert im Regelfall die Betrachtung komplexer Technikketten. Sofern es jeweils erforderlich wäre, die gesamte Prozeßkette jeweils neu zu erheben, wäre der zu treibende Aufwand prohibitiv hoch. Nicht nur der Datenumfang stellt einen begrenzenden Faktor dar, sondern auch, daß bei marktfernen Vorhaben die umgesetzten Stoffmengen nur größenordnungsmäßig bekannt sind und zusätzlich oft aus Wettbewerbsgründen der Geheimhaltung unterliegen.

Im Laufe der Untersuchung zeigte sich, daß der gewählte Detaillierungsgrad bei der Untersuchung der Photovoltaik-Prozeßkette deutlich zu hoch angesetzt war. Dagegen weist die Analyse der Alternativketten einen vergleichsweise geringen Detaillierungsgrad auf. Daraus resultiert eine Schiefelage der Wissensbasis, welche sich insbesondere bei der späteren Beurteilung störend bemerkbar macht.

Diese Schiefelage in der Datenbasis - resultierend aus der gleichzeitigen Entwicklung und Erprobung dieser Methode am Beispiel der Photovoltaik - ist bei nachfolgenden Arbeiten zu vermeiden. Die Fokussierung der Arbeiten auf die umwelterheblichen Stoffe ist in der vorliegenden Arbeit ebenfalls - aus den genannten Gründen - nur teilweise gelungen. Sie ist aber für nachfolgende Umweltvorsorgeprüfungen aus Aufwandsgesichtspunkten heraus notwendig.

Ein gesondertes Problem stellt der Einbezug von Recycling- und Weiterverwertungsmöglichkeiten in die Analyse dar. Im vorliegenden Fall konnte dies noch nicht geleistet werden.

8.1.3.3 In der Beurteilungsphase

Besonders die Beurteilung von Gemischen, von Stoffklassen und Sammelbegriffen führt mitunter zu großen Schwierigkeiten. So ist davon auszugehen, daß die Staubemissionen aus der Silizium-Herstellung anders zu beurteilen sind als Staubemissionen aus einem Kohlekraftwerk oder bei der Glasherstellung. In der vorliegenden Untersuchung konnte diese Unterscheidung jedoch nicht getroffen werden. Ebenso schwierig gestaltete sich die Beurteilung von Kohlenwasserstoffemissionen, von NMVOC und Methan aus Kraftwerken und der Brennstoffbereitstellung im Vergleich zu den entsprechenden Emissionen bei Kraftfahrzeugen, da der jeweilige Anteil der Inhaltsstoffe (z.B. Methan, Benzol) mit Sicherheit verschieden, aber nicht im Detail bekannt ist. Hinzu kommt, daß relevante Spurenstoffe (z.B. Schwermetalle, Dioxine) nicht identifizierbar waren.

Ein gesondertes Problem der Beurteilung stellt die vergleichende Betrachtung verschiedener Entsorgungsmöglichkeiten dar. Je nach Recyclingstrategie wird i.a. eine mehr oder weniger große Verlagerung von Umweltbelastungen von einem Kompartiment in ein anderes stattfinden. Die Vielzahl möglicher Entsorgungsstrategien (Deponie, Wieder- bzw. Weiterverwendung, Wieder- bzw. Weiterverwertung, Sekundärrohstoffgewinnung) sowie die geringe Wissensbasis erschweren eine fundierte Einschätzung. Es erscheint daher nur mit großem Aufwand möglich, die identifizierten Abprodukte dahingehend einzuschätzen, ob sie recyclingfähig, marktgängig oder Abfall oder Sonderabfall darstellen.

Im vorliegenden Fall konnte die Beurteilung der Abprodukte nicht an Inhaltsstoffen, sondern lediglich am potentiellen Deponievolumen festgemacht werden.

8.1.4 Aufwand

Neben den vorhandenen methodischen Schwächen der einzelnen Instrumente in der Anwendung sind insbesondere bei den mittelständigen und kleinen Betrieben sowohl die Informationsdefizite noch groß als auch die Anforderungen hinsichtlich der Interdisziplinarität und des Arbeitsumfangs bei der ersten Anwendung der Umweltvorsorgeinstrumente noch sehr hoch.

Eine Umsetzung der vorgeschlagenen Methode in die betriebliche Praxis mittelständischer oder auch großer Industriebetriebe sowie in den Arbeitsalltag forschungstreibender Institutionen ist nur dann möglich, wenn es gelingt, durch eine rechnergestützte Version, welche sowohl die Datengewinnung, die Datenverwaltung als auch die Datenanalyse interaktiv und flexibel unterstützt, die vorgeschlagene Verfahrensweise auch für den Fachspezialisten vor Ort handhabbar und attraktiv zu gestalten.

8.1.5 Weiterführende Aktivitäten, Empfehlungen

Organisatorische Voraussetzungen

Zur Umsetzung der Forderung der Sachverständigen für Umweltfragen, statt der isolierten Betrachtung einzelner Produkte oder Produktionsprozesse, die Gesamtbelastung der Umwelt vom Rohstoff bis zum entstehenden Abfall in Form oder ähnlich einer Produktlinienanalyse in die Betrachtung einzubeziehen, sollte die Integration der vorgeschlagenen Umweltvorsorgeprüfung in ein betriebliches Umweltschutzsystem und in die Entscheidungsabläufe staatlicher und privater Forschungseinrichtungen exemplarisch bei einigen Einrichtungen unterstützt werden.

Um nicht jedesmal für jede Prozeßkettenanalyse alle Teilprozesse erneut untersuchen zu müssen, wäre es notwendig, die Daten zu einzelnen Techniken allen Interessierten verfügbar zu machen.

Die methodischen Weiterentwicklungen sollten möglichst schnell EDV-mäßig umgesetzt und allgemein verfügbar gemacht werden.

Wichtig wäre daher als Service-Funktion für die F&E-treibenden Institutionen eine Informations- und Clearingstelle zu schaffen, deren Aufgabe es u.a. sein könnte:

- Erarbeitung von Richtlinien, z.B. "Gütekriterien" zur Erstellung von Ökobilanzen, zur Durchführung von Umweltvorsorgeprüfungen, von Produktlinienanalysen etc. und zur Beurteilung von umweltrelevanten Aspekten.
- Durchgeführte Produktlinienanalysen, Ökobilanzen, Umweltvorsorgeprüfungen ähnlich wie bei der Technikfolgenabschätzung zu sammeln und für Interessierte bereitzustellen.
- Umweltbezogene Hinweise (Umweltbelastung bei Herstellung, Verwendung und Entsorgung, Primärenergieaufwand, Verwertungsmöglichkeiten, etc.) von Bau- und Werkstoffen und andere Techniken zu sammeln, zu aktualisieren und über geeignete Hilfsmittel (Handbuch, Datenbank) bereitzustellen.
- Hilfsmittel (Prozeßkettenanalysemodell, Beurteilungsverfahren etc.) auf neuestem Stand verfügbar halten.

- Vermeidungsmöglichkeiten und weniger umweltbelastende alternative Verfahren darzustellen.
- Erprobte Branchenlösungen publik zu machen.

Die Einrichtung einer derartigen Informations- und Clearingstelle sollte bei einer bestehenden Organisation (z.B. UVP-Zentrum, Hamm) erfolgen, damit bestehende Infrastrukturen und Vernetzungen genutzt werden können.

Methodische Weiterentwicklung

Die fundierte Beurteilung möglicher Folgen einer Technik auf die Umwelt setzt die Kenntnis der mit dem Betrieb einer Technik verbundenen Freisetzung von Stoffen und deren Expositionsbedingungen voraus. Bei marktfernen Forschungsvorhaben ist aber die Durchführung einer Expositionsanalyse derzeit kaum möglich. Diese Kenntnislücke sollte daher vorrangig geschlossen werden.

Die Bereitstellung EDV-gestützter Instrumente sollte weiter vorangetrieben werden. Uns ist kein kommerziell betriebenes Prozeßkettenmodell bekannt, welches die speziellen Anforderungen im Bereich Umweltvorsorgeprüfung, Ökobilanzen, Produktlinienanalysen ausreichend erfüllen würde.

Darüber hinaus bedarf es der Entwicklung von EDV-gestützten Verfahren zur Beurteilung der mit den Prozeßkettenmodellen erzielten umfangreichen numerischen Ergebnissen.

Der Einfluß der getroffenen Annahmen auf das Ergebnis muß offengelegt werden und einer möglichst breiten Diskussion zugeführt werden.

Die methodische Weiterentwicklung der Beurteilungsverfahren sollte insbesondere auf der Basis von Toxizitätsäquivalenten oder ähnlicher Ansätze erfolgen, wobei die Frage zu prüfen wäre, inwieweit die Expositionsbedingungen in die Beurteilung miteinbezogen werden können.

Dies sollte auch die verbesserte Einschätzung der Umweltrelevanz von Abprodukten unter Berücksichtigung der Recyclingmöglichkeiten bzw. der Einschätzung nach Deponieklassen einschließen.

8.2 Photovoltaik

Die letztliche bewertende Zusammenfassung der Einzelergebnisse sollte nach Auffassung der Autoren den Entscheidungsträgern bzw. jedem Einzelnen, der sich mit den Ergebnissen der Umweltvorsorgeprüfung befaßt, überlassen bleiben. Dies kommt vor allem daher, daß eine Wichtung der einzelnen Kriterien untereinander oder ob alle oder nur wenige der genannten Kriterien zur Bewertung herangezogen werden, wissenschaftlich nicht begründet werden kann. Hier spielen politische Schwerpunktsetzungen und aktuelle Problemwahrnehmungen eine wesentliche Rolle. Beispielsweise waren Ende der 70er Jahre die "konventionellen" Luftschadstoffe, die zum "Sauren Regen" beitrugen, das artikuliert Hauptproblem, das dann ab Mitte der 80er Jahre durch klimagefährdende Emissionen des Energiesektors (CO_2 etc.) als global verstandenes Hauptproblem abgelöst wurde. Das "Saure Regen"-Problem hat sich inzwischen auf den Verkehrssektor konzentriert, weil dieser als der Hauptverursacher der hier relevanten Emissionen angesehen wird.

In der vorliegenden Untersuchung wurde ein Emissionsvergleich zwischen einem energiewirtschaftlich relevanten Einsatz von Photovoltaik auf Si-Basis sowie einer Fortschreibung der konventionellen Alternative durchgeführt. Mit deutlich geringerem Detaillierungsgrad wurde eine erste Einschätzung der CdTe-Solarzelle vorgenommen.

Photovoltaik-Module auf Si-Basis

Konkret wurde ein Bereich des Verkehrssektors, nämlich der tägliche PKW-gebundene berufliche Personennahverkehr (B-PNV) analysiert.

Für die Deckung der jährlichen 90,4 Mrd Pkm B-PNV (Zeitraum um 2005, nur alte Bundesländer) wurden hier 9 alternative "Varianten" zum Vergleich definiert:

- Drei konventionelle PKW-Typen:
"Trend", "Reduktion", ÖKO-Polo (Varianten B2, B3, D)
- Zwei E-PKW-Typen:
"Groß" (35 kWh/100 Pkm), "klein" (15 kWh/100 Pkm)
Zwei Arten der Bedarfsdeckung:
 - Kraftwerk-Mix allein (Varianten E1 "klein", E2 "groß")
 - Kraftwerk-Mix mit "Solartankstelle":
 - Konventionelle multikristalline bzw. amorphe Si-Module für E-PKW "groß" (Varianten S1 und S2, 2-Bein-Aufständigung)
 - Amorphe bzw. monokristalline MIS-I-Module für E-PKW "klein" (Varianten S3 und S4, Seilnetz-Aufständigung)

Zur Demonstration der Veränderungen gegenüber den entsprechenden heutigen Emissionen (genauer: im Jahr 1987) sind diese in den Tabellen und Diagrammen unter der Variantenbezeichnung "B1" angegeben. Die Komprimierung der Einzelergebnisse wurde im Kapitel „Zusammenfassung der erhaltenen Ergebnisse“ auf Seite 226 durchgeführt, indem die 9 Varianten unter Bezug auf B1 (d.h. Emissionsstand 1987) nach 15 Beurteilungskriterien analysiert worden sind. Diese Belastungszahlen (Luftgrenzwerte nach VDI und BUWAL, Vorsorgestandards für Luft, CO_2 , Primärenergieaufwand,

Deponievolumen, Wassergrenzwerte nach BUWAL, Trinkwasserverordnung, Toxizitäten, akute Toxizitäten (Gebler), Mutagenität, cancerogenes Risiko, Kanzerogenität, Ökotoxizitäten nach Gebler, Ökotoxizitäten) sowie die entsprechenden Relativen Belastungszahlen (ausgedrückt in % des Maximalwertes), graphisch dargestellt in Form von Polardiagrammen für jedes der 9 zukünftigen Varianten und für den Emissionsstatus 1987 (siehe Kapitel „Zusammenfassung der erhaltenen Ergebnisse“ auf Seite 226) geben ein klares Bild von der positiven Umweltrelevanz der Photovoltaik auf Silizium-Basis, zumindest soweit sie fossil gestützte Alternativen (hier Kraftwerke und PKWs) ersetzt. Ohne nochmals im Detail die einzelnen Zahlenwerte zu kommentieren, werden hier aus Sicht der Autoren einige generelle Schlußfolgerungen gezogen:

1. Der Einsatz von PV als Substitut für emittierende Energietechniken ist umweltentlastend, aber PV ist (über ihre Fabrikation) kein Nullemitter: Beispielsweise bedingt die relativ energieintensive Herstellung konventioneller kristalliner Modulen samt Aufständigung pro kWh_{el} etwa 15 % CO₂-Emission einer kWh_{el} des Kraftwerkmix der alten Bundesländer.
2. Die PV-Herstellung ist im wesentlichen ein chemischer Prozeß, der z.B. bei der Herstellung amorpher Solarzellen bezüglich Arbeitsschutz (Silane sind selbstentzündlich und giftig!) und Abgaben von Reststoffen an die Außenwelt sorgfältiger Überwachung und Handhabung bedarf /vgl. a. Tietze/.
3. PV-Einsatz im energiewirtschaftlich relevanten Umfang macht nur Sinn mit guten - möglichst besten - Modulwirkungsgraden. Amorphe Si-Modulen mit heutigem Entwicklungsstand ($\eta \leq 6\%$) sind dafür nicht geeignet.
4. Die aufwendige Aufständigung heutiger PV-Kraftwerke bringt ebenfalls teilweise erhebliche Vorleistungsemissionen (z.B. Kohlenmonoxid von der Stahlherstellung). Dies spricht - soweit technisch ausgereift und im Materialbedarf deutlich niedriger - für eine Integration von PV-Panels in Hausfassaden und Dächer, bei einer Feldaufstellung für leichte seilnetzverspannte Flächentragwerke.
5. Vor einer PV-Anwendung im größeren Maßstab sollte zunächst - im Sinne rationaler Energieverwendung - die Stromnachfrage minimiert werden, um möglichst hohe Solarbeiträge zu erreichen.
Im analysierten Beispiel sind unter Umweltgesichtspunkten E-PKWs - vor allem mit kleinen Leistungen - für Nischen (hier: "Berufspendlerverkehr") vertretbar, weil dann ein deutlicher solarer Deckungsbeitrag vorstellbar ist (und auch schon eine alleinige Versorgung mit dem Kraftwerk-Mix der Alt-BRD umweltentlastend wäre).
6. Bei Si-Modulen ist im Betrieb keine Unfallart vorstellbar (Brand, Erdbeben etc.), bei der vom PV-Material selbst eine Umweltgefährdung (Giftigkeit, Klimaschädigung) ausgeht. Im Prinzip ist auch die Entsorgung unter Umweltgesichtspunkten problemlos, weil auch auf Deponien davon keine schädlichen Emissionen ausgehen können. Rückführungsstrategien sind dann vorzuziehen, wenn Vorteile hinsichtlich des Energieaufwandes und der Emissionen im Vergleich zu neuen Modulen zu erwarten sind.

7. Gute Wirkungsgrade der PV-Tankstellen senken den Gesamtaufwand an Primärenergie gegenüber einer reinen Netzversorgung der E-PKWs. Gegenüber Normal-PKWs bringen aber nur "kleine" E-PKWs eine Absenkung, dann sogar ohne PV-Teilversorgung. Der - zitierte - Herstellungsaufwand für Normal- und E-PKW verringert die Differenz, hebt aber den Vorteil bei PV-Teilversorgung nicht auf.

CdTe-Solarzelle

Solarmodule auf der Basis von Verbindungshalbleitern (VHL) sind noch nicht kommerziell aus deutscher Produktion verfügbar.

Als vorläufige Einschätzung muß auf Basis der vorgenommenen Literatursichtung die Verwendung von Cadmium und von Tellur zur Herstellung von Solarzellen als umwelt-erheblich eingestuft werden. Beide Stoffe sowie ihre Verbindungen sind stark toxisch, persistent und liegen wenn sie in die Umwelt gelangen z.T. in pflanzenverfügbarer Form vor.

Das Inventar an Cadmium einer Photovoltaik-Anlage auf der Basis von CdTe-Solarzellen beträgt ca. 12 - 120 g/m² Modulfläche bzw. 0.12 - 1.2 t/MW_{peak}. Das Inventar an Tellur entspricht etwa 1/3 der Cadmiummenge /Bonnet 92a/.

Die Freisetzungsrate von Cadmium beträgt im Falle eines Brandes ca. 10 %, nach einer anderen Literaturquelle jedoch mehr als 50 % /Moskowitz 90, Karus 92/. Über die Freisetzung von Tellur und anderen Stoffen lagen keine Hinweise vor.

Die Wirtschaftlichkeit der CdTe-Solarzelle wird als sehr günstig beurteilt. Der Nutzungsgrad der CdTe-Solarzelle soll in etwa dem Nutzungsgrad einer kristallinen Si-Zelle entsprechen, der Primärenergieaufwand jedoch nur etwa 50 % einer amorphen Si-Solarzelle betragen. Gleichzeitig wird von vergleichsweise geringen Fertigungskosten ausgegangen /Bonnet92a/.

8.2.1 Weiterführende Aktivitäten, Empfehlungen

Wissensdefizite, F&E-Lücken bei PV auf Si-Basis

Da es noch keine großindustriell etablierte PV-Produktion gibt, sind noch erhebliche Wissensdefizite vorhanden:

- Für jede der verfügbaren Basisvarianten, konventionell kristallin und amorph sowie MIS-I, wurden nur für jeweils eine Herstellungsart Daten erhoben
- Verfahrenstechniken und Reststoffbehandlungen entsprechen nicht immer späteren Großproduktionen
- Bei der Panel-Aufständigung, insbesondere in Form der seilnetzverspannten leichten Flächentragwerke liegen nur Grobangaben vor, deren Extrapolationen auf größere PV-Anlagen fragwürdig sind. Auch die Art der konventionellen Aufständigung steht nicht endgültig fest.
- Die Prozeßketten zu den materiellen Vorleistungen für Bau- und Werkstoffe sind unvollständig und teilweise auf nicht mehr ganz aktuelle Literatur abgestützt. Gewisse Aufwendungen wie Materialtransport sind gar nicht berücksichtigt.
- Nach Literaturangaben sind die Aufwendungen für den Bau von (E-) Fahrzeugen relativ hoch gemessen am Betriebsverbrauch und müßten insbesondere mit ihren Vorleistungsemissionen in die Analyse der E-PKWs (wegen der großen Batterien) einbezogen werden. Die verlässliche Datenerhebung ist aber auch dadurch eingeschränkt, daß die Herstellung von batteriebetriebenen Fahrzeugen noch nicht etablierte industrielle Technik ist.

Empfehlungen

Die Analyse einer denkbaren Anwendung der Photovoltaik in einem energiewirtschaftlich relevantem Ausmaß hat insbesondere die herausragende Bedeutung des Zellenwirkungsgrades aufgezeigt, um die Vorteile der PV - ihre relativ sehr niedrigen anrechenbaren Emissionen - zum Tragen zu bringen. Daraus lassen sich die nachfolgenden Empfehlungen herleiten:

- Für die im Labormaßstab demonstrierten hohen Zellenwirkungsgrade sollten intensiv industrielle Fertigungsverfahren entwickelt und implementiert werden
- Fertigungsverfahren sollten in dem Sinne "flexibel" sein, daß sie relativ leicht dem technischen Fortschritt in Form stetig verbesserter Wirkungsgrade folgen können
- Auch bei den amorphen Zellen mit ihren kostengünstigen Depositionsverfahren ist dem Gesichtspunkt hoher stabiler Wirkungsgrade höchste Priorität zu schenken. Werte von mehr als 10 % sind in industriellen Fertigungsverfahren anzustreben
- Die (Weiter-)entwicklung von kostengünstigen wie auch materialmäßig aufwandsarmen Aufständigungen bzw. der Integration in Fassaden und Dächern sollte forciert werden, da damit die großflächige PV-Anwendung ohne zusätzlichen - horizontalen- Flächenverbrauch erreichbar ist.
- Generell sollten für PV-Module bzw. Panels unabhängig von ihrem Basismaterial Rückhol- und Entsorgungsstrategien entwickelt und implementiert werden.

Verstärkte Markteinführung

Wirtschaftliche Aspekte wurden in dieser Analyse nicht explizit betrachtet. Um der Photovoltaik über die derzeitigen vor allem wirtschaftlichen Hürden hinweg zu helfen und ihre positiven Umweltmerkmale zum Tragen zu bringen, wird folgende Markteinführungsstrategie angeregt. Dabei wird die Bereitschaft der Verbraucher vorausgesetzt, die heutigen Mehrkosten einer solaren Mitversorgung an Elektrizität zu tragen und die Kosten "fair" auf möglichst viele Verbraucher zu verteilen, weil diese ja auch die Vorteile einer - mehr oder weniger - emissionsfreien Stromerzeugung konsumieren:

Die Stromversorger (EVUs) sollten ermuntert werden, von privater Seite (Firmen wie Einzelpersonen) angebotene solar geeignete Gebäudeflächen (Fassaden, Dächer etc.) mit *netzgekoppelten* Solarpanels zu versehen und zu betreiben. Die EVUs wären in diesem Modell die zentralen Eigentümer und Betreiber der dezentralen PV-Anlagen, mit Umlage der PV- Stromkosten auf alle jeweils versorgten Verbraucher.

Nach den in dieser Studie hergeleiteten Ergebnissen wären für die Implementierung der PV-Panels folgende zwei technische Aspekte besonders wichtig:

1. Ein möglichst hoher Wirkungsgrad
2. Eine materialmäßig möglichst wenig aufwendige Gebäudeintegration der Panels

Als Nebenprodukte einer solchen PV-Einführungsstrategie in Deutschland werden unter anderem erwartet:

- Ein größerer Auftragsumfang ermöglicht der Industrie den Aufbau einer rationellen PV-Fabrikation im industriellen Maßstab mit entsprechenden spezifischen Kostensenkungspotentialen
- Die Mehrkosten an Strom für den Verbraucher steigen entsprechend der beschränkten Implementierungsraten (derzeit sind in Deutschland nur etwa 7 MWp Produktionskapazität) in kleinen Jahresschritten (Zehntel-Pfennige pro kWh) und erreichen über den klimatisch bedingten grundsätzlich beschränkten PV-Beitrag nur tragbare Ausmaße (im Bereich Pfennige/kWh).

CdTe-Solarzelle

Es werden folgende Wissensdefizite gesehen:

- Die mit der Produktion der Ausgangsmaterialien Cadmium und insbesondere Tellur verbundenen Energieaufwendungen und Stoffeinträge in die Umwelt sind noch weitgehend unbekannt. Wegen der Umweltrelevanz dieser Stoffe sollten die Prozeßkette von der Gewinnung bis zur Entsorgung kritisch geprüft werden.
- Die Herstellung von CdTe wird in Deutschland bisher nur im Labormaßstab durchgeführt. Die starke exotherme Reaktion des Herstellungsprozesses ist bei der großtechnischen Umsetzung als Risikoaspekt gesondert zu behandeln.
- Die Freisetzung von Tellur aus der Solarzelle bei der Verwendung (im Brandfall) und der Entsorgung ist nicht bekannt.

- Zur ökotoxikologischen Beurteilung von Tellur und seinen Verbindungen ist die Datenlage bei weitem nicht ausreichend.
- Das Auslaugverhalten von CdTe-Solarzellen auf Deponien ist noch ungeklärt.
- Entsorgungsstrategien sind zu entwickeln.
- Konzepte zur Rezyklierung der Solarzellen fehlen.
- Die Erarbeitung ökonomischer Instrumente zur Sicherung eines möglichst vollständigen Stoffkreislaufes steht noch aus.

9.0 Literaturverzeichnis

A

- ABB 92** 8. ABB-Presseseminar in Baden-Baden
Elektrizitätswirtschaft, Jg. 91 (1992) H. 6.
- Alsema 90** Alsema E.A., Cuelenaere R.F.A.
Cost Perspectives of GaAs Thin-Film Solar Cells
Dept. of Sciences, Technology and Society, University of Utrecht,
Report No. W 90033, Utrecht, Sept. 1990.
- Aulich 90** Aulich H., Cammerer F., Hassmann K.
Stand und Entwicklungstendenzen der Photovoltaik in der Bundes-
republik Deutschland
etz Bd. 111 (1990) Heft 4, S. 162.

B

- Bechmann 87** Bechmann, A.; van Rijn, M.; Winter, G.
Gesetz zur Durchführung der Umweltverträglichkeitsprüfung,
(UVP-Gesetz), Entwurf mit Erläuterungen, Freiburg 1987.
- Beyer 88** Beyer U.
Start für Europas größtes Solarkraftwerk - Sonnenstrom aus dem
Mosel-Land
Bild der Wissenschaft Nr. 11, 1988.
- Beyer 89** Beyer U., Pottbrock R.
RWE 1 MW Photovoltaic Project Phase 1 - Design, Constuction
and Operation of a 340 kW_{peak} Photovoltaic Plant
Rheinisch-Westfälisches Elektrizitätswerk (RWE), 1989, Essen.
- BINE 92** Hocheffiziente Silizium-Solarzellen
BINE Projekt Info-Service Nr.18, Dezember 1992, Fachinforma-
tionszentrum Karlsruhe
- Birgersson 88** Birgersson, B.; Sterner, O.; Zimerson, E.
Chemie und Gesundheit. Eine verständliche Einführung in die
Toxikologie.
VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim, 1988.
- Blandow 91** Blandow, V., Zittel, W.
Ökologische Bilanzierung von Elektrofahrzeugen im Vergleich mit
konventionell betriebenen Fahrzeugen.
Ludwig-Bölkow Systemtechnik GmbH, 8. Oktober 1991.

- Blümel 91** Blümel H.
CO₂- und Schadstoffaustoß durch den Betrieb von Batterie-, Hybrid- und Verbrennungsmotor - PKW im Vergleich
Umweltbundesamt, Berlin, September 1991.
- BMFT 90** Photovoltaik - Ein Forschungsschwerpunkt zur Erschließung der Sonnenenergie.
Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT), Bonn, 30. April 1990.
- Bonnet 89** Bonnet D.
Solarzellen für die terrestrische Energiegewinnung aus Solarenergie und Wasserstofftechnik
Publikation I des Technologie-Monitors "Solarenergie und Wasserstofftechnik" des Hessischen Ministers für Wirtschaft und Technik, Wiesbaden, Juni 1989.
- Bonnet 92a** Bonnet D.
The CdTe Thin Film Solar Cell - An Overview
Int. J. Solar Energy, Vol. 12, April 1992
- Bonnet 92b** Bonnet D.
Persönliche Mitteilung September 1992
- Brosthaus 90** Brosthaus, J., Quadflieg, H., Wessels, F.
Möglichkeiten der Nutzung von Solarstrom für den Betrieb von Elektrofahrzeugen
Studie BMFT-FKZ. 0329102 A, TÜV Rheinland, Köln, 30.11.90
- BR 100/93** Unterrichtung durch die Bundesregierung
Vorschlag für eine Richtlinie des Rates über Maßnahmen gegen die Verunreinigung der Luft durch Emissionen von Kraftfahrzeugen und zur Änderung der Richtlinie 70/220/EWG. KOM(92)572 endg.; Ratsdok. 4437/93
Bundesrat-Drucksache 100/93 vom 9.2.1993
- Burkner 92** Burkner W., Hellriegel E., Schaefer H., Wagner U.
Elektro-Straßenfahrzeuge - Eine Technik für umweltschonende Mobilität
Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 42 Jg. (1992). H. 6.

C

- ChemG 90** Chemikaliengesetz; Gesetz zum Schutz vor gefährlichen Stoffen vom 14.03.1990
BGBl. I, 13:521-547

D

- Deker 89** Deker U.
Perspektiven durch Gallium Arsenid
Bild der Wissenschaft 9-1989.
- Diekmann 91** Diekmann J. u.a.
Sonnenenergie - Herausforderung für Forschung, Entwicklung und internationale Zusammenarbeit
Forschungsbericht 1 der Akademie der Wissenschaften zu Berlin
Walter de Gruyter Verlag, Berlin, 1991.
- Diefenbach 89** Diefenbach G., Stoy B., Teggers S.
Stromerzeugung mit Solarzellen in Partnerschaft mit der Natur
- Ökologiekonzept für die RWE-Photovoltaik-Anlage in Koblenz-Gondorf -
Rheinisch-Westfälisches Elektrizitätswerk (RWE), Abt. Anwendungstechnik, Juni 1989, Essen.
- Doty 88** Doty M., Meyers P.
Safety Advantages of a CdTe based PV Module Plant
American Institute of Physics 1988.

E

- Einbrodt 90** Einbrodt, H.J.; Eikmann Th.
Wirkungen von Umweltschadstoffen auf den Menschen.
Abteilung für Hygiene und Arbeitsmedizin der RWTH Aachen, Aachen, 1990.
- Enquete 90** Enquete-Kommission "Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre" des Deutschen Bundestages (Hrsg.)
Energie und Klima, Bd. 7: Konzeptionelle Fortentwicklung des Verkehrsbereichs.
Economica Verlag, C.F. Müller, 1990
- EPRI 92** High Hopes for High-Power-Solar
EPRI-Journal, Vol. 17 (1992) No. 8, p. 16, December 1992.
- E-Wi 92** Elektro-Straßenfahrzeuge
Elektrizitätswirtschaft, Jg. 91 (1992) H. 10, Mai 1992.
- Eyer 92** Eyer A., Räuber A.
Flächenhafte Silizium-Herstellung: Potential der Methode und Entwicklung am ISE
Forschungsverbund Sonnenenergie, Themen 91/92: Photovoltaik
c/o DLR, Linder Höhe, 5000 Köln, März 1992.

F

- Fecker 89** Fecker I.
Herstellung von Aluminium: Ökologische Bilanzbetrachtung - Aktualisierte Daten
Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA), St. Gallen, Februar 1989.
- FH Jülich 90** Rgenerative Energiequellen Heute: USA/BRD.
Fachhochschule Aachen, Abt. Jülich
Studienrichtung Energie- und Umweltschutztechnik
Oktober 1990, Jülich
- Fhg 89** Photovoltaik in der Bundesrepublik Deutschland
Fraunhofer-Institut für solare Energiesysteme (ISE)
Freiburg, Mai 1989
- Forschungsverbund 92** Beyer W., Wagner H.
Amorphe Dünnschicht-Solarzellen: Probleme und wissenschaftliche Herausforderung

Eyer A., Räuber A.
Flächenhafte Silizium-Herstellung: Potential der Methode und Entwicklung am ISE

Knobloch J., Wettling W.
Hocheffiziente Silizium-Solarzellen: Technologie und Potential

Forschungsverbund Sonnenenergie, Themen 91/92: Photovoltaik
c/o DLR, Linder Höhe, 5000 Köln, März 1992.
- Fritzsche 89a** Fritzsche U.
Emissionsmatrix für klimarelevante Schadstoffe in der BRD
Öko-Institut, Büro Darmstadt, 61 Darmstadt, August 1989.
- Fritzsche 89b** Fritzsche U.
Zusammenstellung und Diskussion von materialbezogenen Emissionsdaten
Öko-Institut, Büro Darmstadt, 61 Darmstadt, Mai 1989.
- Fritzsche 89c** Fritzsche U., Rausch L., Simon K.-H.
Umweltwirkungsanalyse von Energiesystemen: Gesamt-Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS)
Öko-Institut, Büro Darmstadt, 61 Darmstadt, Mai 1989.
- Fritzsche 88** Fritzsche, A.F.
Gesundheitsrisiken von Energieversorgungssystemen
Köln, 1988.

G

- Gebler 90** Gebler, W.
Ökobilanzen in der Abfallwirtschaft - Methodische Ansätze zur Durchführung einer Programm - Umweltverträglichkeitsprüfung, Stuttgarter Berichte zur Abfallwirtschaft, Band 41
Erich Schmidt Verlag, Bielefeld 1990
- Giesen 89** Giesen G., Huber W., Krapohl H., Pauls R., Wagner H.-J.
Emissionsfaktoren in den Energiemodellen MARNES und EFOM.
Kernforschungsanlage Jülich, Interner Bericht KFA/STE IB- 4/89, Jülich, 1989.
- Geiger 89** Geiger B., Hofer R., Kleeberger H.
Studienkomplex A 1.1. Energieträger- und Emissionsmatrix
Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Kraftwerkswirtschaft, Technische Universität München, September 1989.
- Gmelin 59** Gmelin Institut (Hrsg.)
Cadmium und Tellur,
in: Gmelins Handbuch der anorganischen Chemie, Cadmium Ergänzungsband System-Nummer 33, Verlag Chemie 1959.
- Göbbel 91** Göbbel B., Huber W., Küppers B., Pauls R., Thomas N.
Prozeßkettenanalysemodell, Version 1.0
Forschungszentrum Jülich (KFA), Interner Bericht KFA-STE-IB-6/91, August 1991.
- Greenwood 88** Greenwood, N.N., Earnshaw, A.
Chemie der Elemente
Weinheim, Basel, Cambridge, New York, 1988.
- Grawe 90** Grawe J.
Die ökologische Verträglichkeit unserer Energieträger
Energiewirtschaftliche Tagesfragen 40. Jg., Heft 8, 1990.

H

- Häne 91** Häne D., Gruber N.
Produktlinienanalyse eines monokristallinen Silizium-Solarzellen-Moduls
Semesterarbeit am Institut für Energiesysteme, ETHZ, Mai 1991, Zürich
- Hagedorn 89** Hagedorn G., Lichtenberger S., Kuhn H.
Kumulierter Energieverbrauch für die Herstellung von Solarzellen und photovoltaischen Kraftwerken.
Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE)
Juli 1989, München.

- Hagedorn 92** Hagedorn, G., Hellriegel, E.
Umweltvorsorgeprüfung bei Forschungsvorhaben - Am Beispiel von Photovoltaik.
Band 5: Umweltrelevante Stoffströme bei der Herstellung verschiedener Solarzellen
Bericht des Forschungszentrums Jülich (KFA) in der Reihe Angewandte Systemanalyse der Programmgruppe Systemforschung und Technologie Nr.67,
KFA-Bericht Jül-2636, Juni 1992, Jülich
- Hantzsche 91a** Hantzsche, U.
Prozeßkettenanalyse von Bau- und Werkstoffen -
Bereitstellung von Flachglas
Forschungszentrum Jülich (KFA), Interner Bericht
KFA-STE-IB-7/91
August 1991
- Hantzsche 91b** Hantzsche, U.
Prozeßkettenanalyse von Bau- und Werkstoffen -
Bereitstellung von Portlandzement
Forschungszentrum Jülich (KFA), Interner Bericht
KFA-STE-IB-8/91
Dezember 1991
- Hirtz 90a** Hirtz, W.; Huber, W.
Vorsorgeprüfung bei Forschungsvorhaben - Am Beispiel der Photovoltaik.
Interner Bericht KFA-STE-IB-1/90, Forschungszentrum Jülich GmbH, Juni 1990.
- Hirtz 90b** Hirtz W., Huber W., Kolb G., Sturm D.
Umweltvorsorgeprüfung bei Forschungsvorhaben, Am Beispiel der Photovoltaik, 2. Zwischenbericht Forschungszentrum Jülich (KFA), Interner Bericht KFA-STE-IB- 5/90, Dezember 1990.
- Hirtz 92** Hirtz, W.
Bewertungsansätze zu Umweltaspekten bei Bau- und Werkstoffen - dargestellt am Beispiel der Umweltvorsorgeprüfung -,
in: "Vermeidung und Verwertung von Abfällen 3"
EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik GmbH, Oktober 1992, Berlin
- Hoffmann 91** Hoffmann W.
Kristalline MIS-Inversionsschicht-Solarzelle in der Pilotfertigung
Sonnenenergie & Wärmepumpe, Jg. 16 (1991) H. 3.
- Hollemann-Wiberg 71** Hollemann, A.F.; Wiberg, E.
Lehrbuch der anorganischen Chemie 71-80 A.,
de Gruyter Verlag 1971.

- Hoyne 92** Hoyne
The Selenium and Tellurium Markets.
Selenium - Tellurium. The Bulletin of Development Association,
Inc.; Information Center, 301 Borgstraat, B1850 Belgium, September 1992
- Huber 82** Huber, W. Umweltgefährdung durch Heizungssysteme - Ein Vergleich ausgewählter Systeme
Wissenschaft und Umwelt Nr. 3, 1982, S. 147-156
- I,J**
- Jacobi 85** Jacobi, H.W.
Möglichkeiten der Verringerung von Schwermetallemissionen
Metall 39, 75-78 (1985).
- Jäger 90** Jäger, F.; Räuber, A.
Photovoltaik Strom aus der Sonne - Technologie, Wirtschaftlichkeit und Marktentwicklung
Verlag C.F. Müller, Karlsruhe, 1990.
- Jensch 88** Jensch, W.
Vergleich von Energieversorgungssystemen unterschiedlicher Zentralisierung
Lehrstuhl und Laboratorium für Energiewirtschaft und Kraftwerkstechnik der Technischen Universität München
IfE Schriftenreihe, Heft 22, München, 1988 C.F. Müller-Verlag, Karlsruhe, 1986
- Jury 84** Jury, W.A., Spencer, W.F., Farmer, W.J.
Behavior Assessment Model for Trace Organics in Soil: Application of Screening Model
J. Environ. Quality Vol. 13, Nr.4:573-579
- K**
- Karus 92** Karus, M., Wittassek, R., Linden, W. 1992
Umweltaspekte bei der Nutzung von Cadmium-Tellurid-Solarzellen
8. Internationales Sonnenforum, 30. Juni bis 3. Juli 1992 - Energie und unsere Umwelt, Berlin, Tagungsbericht S. 591-600
- Kleinschmidt 90** Kleinschmidt, V.; Pietzka, F.T.
Grundlagenstudie: Umweltfolgenabschätzung für Forschungsvorhaben des BMFT.
UVP-Forschungsstelle, Universität Dortmund, Juni 1990.
- Koch 89** Koch, R.; Wagner, O.B.
Umweltchemikalien - Physikalisch-chemische Daten, Toxizitäten, Grenz- und Richtwerte, Umweltverhalten.
VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim, 1989.

- Kolb 90** Kolb, G.
Übersicht über Photovoltaik-Aktivitäten in der Bundesrepublik Deutschland.
Interner Bericht KFA-STE-IB-2/90, Forschungszentrum Jülich GmbH, Juni 1990.
- Kolb 92** Kolb, G. (Hrsg.)
Umweltwirkungen bei der Herstellung und Nutzung von Solarzellen
- Übersicht über laufende Arbeiten -
Beitrag zum Statusreport "Erneuerbare Energien", Forum für Zukunftsenergien e.V., Bonn
Bericht des Forschungszentrums Jülich (KFA) in der Reihe Angewandte Systemanalyse Nr. 64 der Programmgruppe Systemforschung und Technologische Entwicklung (STE), Januar 1992, Jülich
- Korte 87** Korte, F.
Ökologische Chemie. Grundlagen und Konzepte für die ökologische Beurteilung von Chemikalien.
Thieme Verlag, 1987.
- Knobloch 92** Knobloch J., Wettling W.
Hocheffiziente Silizium-Solarzellen: Technologie und Potential
Forschungsverbund Sonnenenergie, Themen 91/92: Photovoltaik
c/o DLR, Linder Höhe, 5000 Köln, März 1992.
- Krone 90** Krone K., Krüger J., Orbon H., Sommer H.W., Vest H.
Ökologische Aspekte der Primärenergieerzeugung in der Bundesrepublik Deutschland
Metall 44 (1990) H. 6.
- Kühling 90** Kühling, W.
Luftbelastungen
in: Storm, P.C., Bunge, T. (Hrsg.)
Handbuch der Umweltverträglichkeitsprüfung (HdUVP)
HdUVP IX/90, 2710, S. 1-63

L

- Lahmann 90** Lahmann, E.
Luftverunreinigung - Luftreinhaltung: Eine Einführung in ein interdisziplinäres Wissensgebiet.
Verlag Paul Parey, Berlin, 1990.
- Lexikon 72** Lexikon Technik und exakte Naturwissenschaften
Fischer Taschenbuch Verlag, Dezember 1972
- LfU 89** Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg
Grenzwerte und Richtwerte für die Umweltmedien Luft, Wasser, Boden 1989
Karlsruhe, 1989
- Löffler 85** Löffler, D.; Kruse, H.
Zur Toxikologie des Cadmiums.
Schriftenreihe der Untersuchungsstelle für Umwelttoxikologie des Landes Schleswig-Holstein, Heft 12, Kiel, 1985.

M

- Mann 92a** Mann E.W.
Eine Option für die Zukunft: Elektrofahrzeuge aus der Sicht der Stromversorger
Energie, Jg. 44 (1992) Nr. 5, Mai 1992
- Mann 92b** Mann E.W.
Elektrostraßenfahrzeuge - Umweltentlastung durch Stromanwendung im Individualverkehr
Elektrizitätswirtschaft, Jg. 91 (1992) H. 17, August 1992.
- Marme 80** Marme, W.
Der Primärenergieinhalt von Baustoffen.
Diplomarbeit am Institut für Baustofftechnologie der Universität Karlsruhe, Karlsruhe 1980.
- Menzen 90** Menzen, G.
Das Programm zur Förderung photovoltaischer Solarenergieanlagen
in:
Urban, R.
Statusreport 1990. Photovoltaik
Projektträger Biologie, Energie, Ökologie (BEO), Forschungszentrum Jülich, Mai 1990.
- Menzen 93** Menzen, G.
Persönliche Mitteilung März 1993.

- Metallgesellschaft 87** Metallgesellschaft (Hrsg.)
Metallstatistik, Frankfurt, 1987.
- Mobil E 92** Marktübersicht Elektromobile Schweiz
Mobil E. Die Zeitschrift für Elektro- und Solarmobile, Heft 3 (1992).
- Moskowitz 85** Moskowitz P.D., Fthenakis V.M., Lee J.C.
Potential Health and Safety Hazards Associated with the Production of Cadmium Telluride, Copper Indium Deselenide, and Zinc Phosphide Photovoltaic Cells
Brookhaven National Laboratory, Report BNL 51832, April 1985.
- Moskowitz 87** Moskowitz P.D., Fthenakis V.M., Hamilton L.D., Lee J.C.
Public health issues in photovoltaic energy systems: An overview of concerns
Solar cells 19 (1986-1987), S. 287-299.
- Moskowitz 89** Moskowitz P.D., Fthenakis V.M., Lee J.C.
Protecting worker health and safety in photovoltaic research and development laboratories.
Solar cells 27 (1989), S. 149-158.
- Moskowitz 90a** Moskowitz P.D., Zweibel K., Fthenakis V.M.
Health, Safety and Environmental Issues Relating to Cadmium Usage in Photovoltaic Energy Systems
Solar Energy Research Institute, Report SERI/TR-211-3621, Jan. 1990.
- Moskowitz 90b** Moskowitz P.D., Fthenakis V.M., Zweibel K.
Health and Safety Issues Related to the Production, Use and Disposal of Cadmium-based Photovoltaic Modules
SERI/TP-210-3833, May 1990.
- Moskowitz 91** Moskowitz P.D.
Environmental, Health and Safety Issues associated with the production and use of CIS and CD-Based Photovoltaic Modules
Informationsveranstaltung im Forschungszentrum Jülich am 12. Nov. 1991
in: Kolb 92.
- MWMT 1990** Der Minister für Wirtschaft, Mittelstand und Technologie des Landes Nordrhein-Westfalen (Hrsg.): Kohlekraftwerk der Zukunft, Langfassung, Düsseldorf, März 1990
- MWT 1989** Hessisches Ministerium für Wirtschaft und Technik, Referat Öffentlichkeitsarbeit (Hrsg.): Technologie-Monitor "Solarenergie und Wasserstofftechnik I", Juni 1989

N

- Niklas 87** Niklas, H.
Die Rückgewinnung von Wertstoffen aus Akkumulatoren.
in: Hiller, F. (Hrsg.) Die Batterie und die Umwelt.
Expert Verlag, 1987.

- PV-News 93** PV-News, Vol. 12, No. 2, February 1993
Energy Systems Inc., Casanova, VA 22017

Q

- Queisser 80** Queisser H.J., Wagner P.
Photoelektrische Solarenergienutzung - Technischer Stand, Wirtschaftlichkeit Umweltverträglichkeit
Materialien zur Umweltforschung herausgegeben vom Rat von Sachverständigen für Umweltfragen
Melsungen, März 1980, ISBN 3-17-003209-7.

R

- Rippen 90** Rippen, G.
Handbuch Umweltchemikalien
ecomed, Landsberg/Lech 1990
- Risse 91** Risse, F., Jacobs, J., vom Berg, W., Puch, K.H.
Nebenprodukte aus Kohlekraftwerken und Rückstände aus Müllverbrennungsanlagen in der Bundesrepublik Deutschland, VGB Kraftwerkstechnik 71, H.5, S. 504-508, 1991
- Römpp 88** Neumüller, O.-A.
Tellur
in: Falbe, J.; Regitz, M. (Hrsg.)
Römpps Chemie-Lexikon. Georg Thieme Verlag, 1989
- Römpp 89** Falbe, J.; Regitz, M. (Hrsg.)
Cadmium, Römpps Chemie-Lexikon. Georg Thieme Verlag, 1989
- RTECS 81** Registry of toxic effects of chemical substances
National Institute of Occupational Safety and Health (USA)
- Rupprecht 89** Rupprecht H.S., Diehl R.
Das Zeitalter der Superchips
Bild der Wissenschaft 8-1989.

S

- Sauer 89** Sauer, H.D.
Aufbruch - Notizen von der 9. Europäischen Photovoltaik-Konferenz.
Sonnenenergie 6/89, S.2-7.
- Scheurer 92** Scheurer, K., Schindler, V., Faust, K.
Derzeitiger Stand der Entwicklung bei Elektro-PKW am Beispiel des BMW E1
Elektrizitätswirtschaft, Jg. 91 (1992), Heft 10
- Schmid 88** Schmid, J.
Photovoltaik - Direktumwandlung von Sonnenlicht in Strom.
BINE, Bürgerinformation Neue Energietechniken.
Verlag TÜV Rheinland, Köln, 1988.
- Schöfthaler 90** Schöfthaler M.
Kupferindiumdiselenid - Der Durchbruch in der Solartechnik?
Sonnenenergie Heft 5 (1990), S. 11.
- Seebauer 89** Seebauer H.
Jahresrückblick Europa - Federal Republic of Germany
Aluminium Jg. 65 (1989) H. 7/8., S.669.
- Sigal 89** Sigal, L.L.; Webb, J.W.
The Programmatic Environmental Impact Statement: Its Purpose and Use
in: The Environmental Professional Vol. 11, 1989, S.14-24.
- Sporckmann 92** Sporckmann, B.
Die Stromversorgung von Elektrofahrzeugen in der Bundesrepublik Deutschland (alte Bundesländer)
Elektrizitätswirtschaft, Jg. 91, (1992), Heft 5
- SRU 90** Sachverständigenrat für Umweltfragen
Sondergutachten des Rates von Sachverständigen für Umweltfragen vom September 1990 "Abfallwirtschaft"
BT-Drs. 11/8493
- Steger 92** Steger U.
Marktwirtschaftliche Umweltschutzmaßnahmen im Automobilverkehr
Energiewirtschaftliche Tagesfragen, Jg. 42 (1992) H. 10.
- Stoeppler 84** Stoeppler, M.
Cadmium.
in: Merian, E. (Hrsg.) Metalle in der Umwelt.
Verlag Chemie, 1984.

- Strupp 90** Strupp, D., Lühr, H.P., Grunder, H.T., Gerdesmann, J., Ahlers, J.
Einstufung von Stoffen als "umweltgefährlich"
Zeitschrift Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung
2(3):151 - 156
- Szyska 92** Szyska A.
Erprobung von Solar-Wasserstoff-Techniken
Energie, Jg. 44 (1992) Nr. 3, März 1992
- T**
- TA-Luft 86** Erste allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-
Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der
Luft - TA Luft) vom 27.2.1986.
GMBL 1986, S. 95.
- TensV 86** Tensidverordnung
Dritte Verordnung zur Änderung der Verordnung über die
Abbaubarkeit anionischer und nichtionischer grenzflächenaktiver
Stoffe in Wasch- und Reinigungsmitteln
vom 4.6.1986
BGBL Nr.25:851
- Thalmann 85** Thalmann W.R., Humbel V.
Herstellung von Stahl und Weißblech: Ökologische Bilanz-
Betrachtungen
Eidgenössische Materialprüfungs- und Versuchsanstalt für Indu-
strie, Bauwesen und Gewerbe
St. Gallen, April 1985.
- Tietze 89** Tietze A.
Gefährdungspotentiale bei Herstellung, Implementierung, Betrieb
und Entsorgung von Energiewandlern auf photovoltaischer Basis
Bergische Universität - Gesamthochschule Wuppertal, Fachbereich
14 Sicherheitstechnik
Wuppertal, August 1989
- Tötsch 90** Tötsch, W.
Cadmium - Anwendung, Recycling und Einsatzprodukte.
UWSF - Z. Umweltchem. ökotox. 2(4), 226-230 (1990).

U

UBA 89 Umweltbundesamt (Hrsg.)
Luftreinhaltung '88; Tendenzen-Probleme-Lösungen
Erich Schmidt, Berlin 1989

UBA 92 Umweltbundesamt (Hrsg.)
Ökobilanzen für Produkte
Texte 38/92, Berlin

Urban 93 Urban R.
Persönliche Mitteilung April 1993

V

Varta 91 Varta Batterie AG
Neue Konzepte 1991
Hannover, 1991.

VDI 2310 VDI-Richtlinien für Maximale Immissionkonzentrationen,
(VDI-Kommission Reinhaltung der Luft (Hrsg.)):
VDI-Handbuch Reinhaltung der Luft, Band 1, 2310, Beuth Verlag,
Berlin

VEBA 92 VEBA AG
Das Elektroauto - Fakten und Argumente
Düsseldorf, März 1992.

VDEW/VGB 90 VDEW-VGB-Gemeinschaftsausschuß "Reststoffe und Abfälle"
Verwertungskonzept für Reststoffe aus Kohlekraftwerken, Teil III:
Rückstände aus der Wasser- und Abwasseraufbereitung,
VGB Kraftwerkstechnik 70 (1990), H. 12, S. 1033-1041

W

- Wagner 78** Wagner, H.-J.
Der Energieaufwand zum Bau und Betrieb ausgewählter Energieversorgungstechnologien - Eine nettoenergetische Analyse
Kernforschungsanlage Jülich, Jül-1561, Dezember 1978.
- Wagner 89a** Wagner H.-J., Wassmann B., Hansen K., Schön R.
Ermittlung von Emissionsfaktoren zur Herstellung von Materialien
Kernforschungsanlage Jülich, Jül-Spez-525, Oktober 1989.
- Wagner 89b** Wagner H.-J., Wassmann B., Hansen K., Schön R.
Aufschlüsselung von Investitionskosten und Erstellung von Materialanalysen für vorgegebene Anlagen der Energieversorgung
Kernforschungsanlage Jülich, Jül-Spez-524, Oktober 1989.
- Wagner 92** Wagner, U.
Einsatzpotentiale für Elektrostraßenfahrzeuge in Bayern
Elektrizitätswirtschaft, Jg. 91 (1992), Heft 21
- Wecker 92** Wecker R.
Verwendung photovoltaischer Elemente in Verbindung mit weitgespannten leichten Flächentragwerken
Elektrizitätswirtschaft, Jg. 91 (1992), Heft 21
- Weidmann 92** Weidmann, K., Heinrich, H.
Einsatz nachwachsender Rohstoffe im Kraftfahrzeug
BWK Bd. 44 (1992), Nr. 9
- Winnacker-Küchler 86a** Harnisch, H.; Steiner, R.
Tellur in: Winnacker-Küchler, Chemische Technologie, Band 4, Metalle. Carl Hanser Verlag 1986
- Winnacker-Küchler 86b** Harnisch, H.; Steiner, R.
Cadmium in: Winnacker-Küchler, Chemische Technologie, Band 4, Metalle. Carl Hanser Verlag 1986

Z

- Zängl 92** Zängl W.
Elektro-Autos: Nein danke! Eine kritische Dokumentation
Gesellschaft für ökologische Forschung e.V., München, Januar 1992
- Zweibel 90** Zweibel K., Ullal H., Mitchell R.
Polycrystalline Thin Film Photovoltaics
Solar Energy Research Institute Report SERI/TP-210-3833
Golden, Colorado, USA, May 1990.

Anhang A. Ermittlung der Belastungszahlen

- Vier konventionelle PKW-Flotten:

Variante B1	KFZ-Bestand 1987
Variante B2	Trend-Szenario
Variante B3	Reduktions-Szenario
Variante D	Öko-Polo

- Zwei E-PKW-Typen und Deckung des Strombedarfs über den Kraftwerk-Mix allein:

Variante E1	"Mittelklasse" (35 kWh/100 Pkm)
Variante E2	"Kleinwagen" (15 kWh/100 Pkm)

- Zwei E-PKW-Typen und Deckung des Strombedarfs über "Solartankstellen" ("STS") mit vier verschiedenen Modultypen und Kraftwerk-Mix:

Variante S1	"Mittelklasse" (35 kWh/100 Pkm) Multikristalline Module Konventionelle Aufständerung
Variante S2	"Mittelklasse" (35 kWh/100 Pkm) Amorphe Module Konventionelle Aufständerung
Variante S3	"Kleinwagen" (15 kWh/100 Pkm) Amorphe Module Seilnetz-Aufständerung
Variante S4	"Kleinwagen" (15 kWh/100 Pkm) Monokristalline MIS-I-Module Seilnetz-Aufständerung

A.1 Nach Grenz- und Richtwerten

A.1.1 Variante S1

Stoff	Menge t	Grenzwert BUWAL (MIK) mg/m ³	Äquivalente 10 ⁹ m ³
Kohlenwasserstoffe	69	15	5
Schwefeldioxid	11370	0,03	379000
Silizium-Feinststaub	789,5	0,07	11278
Methylenchlorid	236	0,01	23600
Isopropylalkohol	78,93	0,01	7893
Terpentinöl/Dibutylphthalat	78,93	0,01	7893
Fluor	71,04	0,1	710
NM VOC	437	0,01	43700
KL3: Sb, Pb, Cr, Cu etc.	1,309	0,001	1309
KL2: As, Ni, Co, Te etc.	0,258	-	-
KL1: Cd, Hg, Tl	0,0527	0,00001	5270
Stickoxide	10870	0,03	362333
Staub	1842	0,07	26314
			Summe = 869305

Tab. 95. Belastungszahl Luft nach BUWAL für Variante S1:
nach Grenzwerten /BUWAL 90, in UBA 92, S. 110/.

Stoff	Menge t	Grenzwert VDI 2310 mg/m ³	Äquivalente 10 ⁹ m ³
Kohlenwasserstoffe	69	-	-
Schwefeldioxid	11370	0,3	37900
Silizium-Feinststaub	789,5	0,3	2632
Methylenchlorid	236	-	-
Isopropylalkohol	78,93	-	-
Terpentinöl/Dibutylphthalat	78,93	-	-
Fluor	71,04	0,1	710
NM VOC	437	-	-
KL3 Sb, Pb, Cr, Cu etc.}	1,309	0,003	436
KL2 As, Ni, Co, Te etc.}	0,258	-	-
KL1 Cd, Hg, Tl}	0,0527	-	-
Stickoxide	10870	0,1	108700
Staub	1842	0,3	6140
			Summe = 156518

Tab. 96. Belastungszahl Luft nach VDI für Variante S1:
nach Richtwerten /VDI 2310/; Mensch, 24-h-Mittelwerte

Stoff	Menge t	Vorsorge-standards Vegetation $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Äquivalente 10^9 m^3
Kohlenwasserstoffe	69	-	-
Schwefeldioxid	11370	30	379000
Silizium-Feinstaub	789,5	-	-
Methylenchlorid	236	-	-
Isopropylalkohol	78,93	-	-
Terpentinöl/Dibutylphthalat	78,93	-	-
Fluor	71,04	0,2	355000
NM VOC	437	-	-
Kl.3 Sb, Pb, Cr, Cu etc.	1,309	-	-
Kl.2 As, Ni, Co, Te etc.	0,258	-	-
Kl.1 Cd, Hg, Tl	0,0527	-	-
Stickoxide	10870	10	1087000
Staub	1842	-	-
			Summe = 1821000

Tab. 97. Belastungszahl Luft nach Vorsorgestandards für Variante S1:
nach Werten von UBA, WHO, VDI /Kühling 90/ für die Vegetation

Stoff	Menge t	Grenzwert BUWAL g/m^3	Äquivalente 10^6 m^3
Feststoff	408	20	20,4
Chlorwasserstoff	28570	-	-
Natriumhydroxid	868,6	-	-
Natriumfluorid als Fluorid	158,4 71,7	10	15,8
Kaliumsiloxan	2526	-	-
			Summe = 36,2

Tab. 98. Belastungszahl Wasser nach BUWAL für Variante S1:
nach Grenzwerten /BUWAL 90/, Einleitung in Gewässer

Stoff	Menge t	Grenzwert TrinkwV g/m^3	Äquivalente 10^6 m^3
Feststoff	408	-	-
Chlorwasserstoff	28570	-	-
Natriumhydroxid	868,6	-	-
Natriumfluorid als Fluorid	158 71,7	F 1,5	47,8
			Summe = 47,8

Tab. 99. Belastungszahl Wasser nach TrinkwasserV für Variante S1:
nach Trinkwasserverordnung 86 in /LfU 89/

Stoff	Menge t	Abfallschlüssel	Zeichen
Silizium-Oxid-Staub	73725	31442	
Silizium-haltige Schlacke	3237	31203	
Siliziumcarbid	8919		
Mineral-/Silikonöl	6951	541/-	
Calciumfluorid	1339		
PU/PVC/PV	792	57110/57116/571..	
Isopropylalkohol + Pastenreste	314		
Polysulfidelastomer	314		
Ethylenglykol	245	55303	+ x
Ölbinder	47,4		
PTFE/IT	23,7		
Fluorierte Altöle	7,9	54102	+ x
Si/SiC	12230		
Glas	13390		
Defekte PV-Module	1187		
Dichtmassenreste	554		
EVA-Folienreste	395		
Defekte Wafer	316		
Silikonkleber	15,8		
Cyanacrylatklebstoff	1,58		
Trennfolie (HD-PE)	316		
Methylenchlorid mit Polysulfidelastomeren	1583		
Flugasche	310700	31301	x +
REA-Gips	109800	31445	
Granulat	91600		
Grobasche	12910		
Hochofenschlacke	28800	311.31211	-/x (Alu)
Stahlschrott	948		
Abram aus Eisenerzgewinnung	3203		
Abfälle aus Eisenerzgewinnung	124		
Elektrofilterstaub	51180		
Konverterschlacke	35210		
Reststoffe Walzwerk	26260		
Rückstände aus Kalzinierung	2057		
Bauxitabraum	2122		
	Summe = 812737		

Tab. 100. Belastungszahl 'Boden' für Variante S1:

x = Sonderabfall, + = Beseitigung ist nachweispflichtig, fehlende Bezeichnung bei der Zahl = Beseitigung kann evtl. zusammen mit dem Hausmüll erfolgen

Die größten Mengen an Abfall stammen aus der Energiebereitstellung aus dem Strommix. Von den anfallenden Mengen werden jedoch nach /Risse 91/ bedeutende Mengen wiederverwertet. So werden effektiv nur 1832 t Granulat zu deponieren sein -

bei angenommener gleichbleibender Abnahme - und 3357 t Grobasche aus Steinkohlekraftwerken. Der REA-Gips aus Steinkohlekraftwerken wird zur Zeit verwertet, jener aus der Energieerzeugung aus Braunkohlekraftwerken noch nicht. Daraus ergibt sich eine verbleibende Menge an Deponat von 43846 t REA-Gips. Bei Flugaschen wird eine Menge von 104135 t direkt wiederverwertet. Es verbleiben 206564 t. Die Gesamtmenge reduziert sich somit auf 543326 t. Weitere Wiederverwertungsraten können aufgrund der Datenknappheit nicht berücksichtigt werden. Die Bewertung der abgelagerten Stoffe in Braunkohleaufschlüssen unterbleibt ebenfalls. Durch Berücksichtigung dieser Raten könnte sich die Menge an zu deponierenden Stoffen noch drastisch verringern. Allein der Einsatz von Flugaschen, REA-Gips und sonstigen Abfällen aus Braunkohlekraftwerken als Versatz im Braunkohletagebau würde die o.g. Menge um 233458 t auf 309868 t reduzieren.

A.1.2 Variante S2

Stoff	Menge t	Grenzwert BUWAL (MIK) mg/m ³	Äquivalente 10 ⁹ m ³
Kohlenwasserstoffe	68	15	4
Schwefeldioxid	11555	0,03	385167
Terpentinöl	20	0,01	2000
Kl.3 Sb, Pb, Cr, Cu etc.}	1,327	0,001	1327
Kl.2 As, Ni, Co, Te etc.}	0,261	-	-
Kl.1 Cd, Hg, Tl}	0,0535	0,00001	5350
Stickoxide	11600	0,03	386667
Staub	2151	0,07	30729
NMVOC	430	0,01	43000
			Summe = 854244

Tab. 101. Belastungszahl Luft nach BUWAL für Variante S2:
nach Grenzwerten /BUWAL 90, in UBA 92, S. 110/, NMVOC = Non methane
volatile organic compounds

Stoff	Menge t	Grenzwert VDI 2310 mg/m ³	Äquivalente 10 ⁹ m ³
Kohlenwasserstoffe	68	-	-
Schwefeldioxid	11555	0,3	38517
Terpentinöl	20	-	-
Kl.3 Sb, Pb, Cr, Cu etc.}	1,327	0,003	442
Kl.2 As, Ni, Co, Te etc.}	0,261	-	-
Kl.1 Cd, Hg, Tl}	0,0535	-	-
Stickoxide	11600	0,1	116000
Staub	2151	0,3	7170
NMVOC	430	-	-
			Summe = 162229

Tab. 102. Belastungszahl Luft nach VDI für Variante S2:
nach VDI-Richtlinie /VDI 2310/, Mensch, 24-h-Mittelwerte, in /LfU 89/

Stoff	Menge t	Vorsorge- standards $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Äquivalente 10^6 m^3
Kohlenwasserstoffe	68	-	-
Schwefeldioxid	11555	30	385000
Terpentinöl	20	-	-
Kl.3 Sb, Pb, Cr, Cu etc.	1,327	-	-
Kl.2 As, Ni, Co, Te etc.	0,261	-	-
Kl.1 Cd, Hg, Tl	0,0535	-	-
Stickoxide	11600	10	1160000
Staub	2151	-	-
NM VOC	430	-	-
			Summe = 1545000

Tab. 103. Belastungszahl Luft nach Vorsorgestandards für Variante S2:
nach Werten von UBA, WHO, /Kühling 90/ für die Vegetation

Stoff	Menge t	Grenzwert BUWAL g/m^3	Äquivalente 10^6 m^3
Feststoff	414	20	20,7
Waschmittel	45	-	-
Terpentinöl	3	-	-
			Summe = 20,7

Tab. 104. Belastungszahl Wasser nach BUWAL für Variante S2:
nach Grenzwerten /BUWAL 90/, Einleitung in Gewässer

Stoff	Menge t	Grenzwert TrinkwV g/m^3	Äquivalente 10^6 m^3
Feststoff	414	-	-
Waschmittel	45 (10% als Tensid)	0,2	22,5
Terpentinöl	3	-	-
			Summe = 22,5

Tab. 105. Belastungszahl Wasser nach TrinkwasserV für Variante S2:
nach Trinkwasserverordnung 86 in /LfU 89/

Stoff	Menge t	Abfallschlüssel	Zeichen
Flugasche	425000	31301 ⁹	x +
REA-Gips	150200	31445 ⁹	
Granulat	125300		
Grobasche	17660		
Abraum aus Eisenerzgewinnung	3177		
Abfälle aus Eisenerzgewinnung	123		
Hochofenschlacke	28570	311/31211	-/x (Alu)
Elektrofilterstaub	50770		
Konverterschlacke	34920		
Reststoffe Walzwerk	26050		
Rückstände aus Kalzinierung	2040		
Bauxitabraum	2105		
Pumpenöl	40		
defekte PV-Module	8262		
Trennfolie (HD-PE)	248		
	Summe = 874465		

Tab. 106. Belastungszahl 'Boden' für Variante S2: x = Sonderabfall, + = Beseitigung ist nachweispflichtig, fehlende Bezeichnung bei der Zahl = Beseitigung kann zusammen mit dem Hausmüll erfolgen, evtl. nach Vorbehandlung, ⁹ in Abhängigkeit von Art und Menge der Inhaltsstoffe x und +

Die größten Mengen an Abfall stammen aus der Energiebereitstellung aus dem Strommix. Von den anfallenden Mengen werden jedoch nach /Risse 91/ bedeutende Mengen wiederverwertet. So werden nur 2506 t Granulat zu deponieren sein - bei angenommener gleichbleibender Abnahme - und 4592 t Grobasche aus Steinkohlekraftwerken. Der REA-Gips aus Steinkohlekraftwerken wird zur Zeit verwertet, jener aus der Energieerzeugung aus Braunkohlekraftwerken noch nicht. Daraus ergibt sich eine verbleibende Menge an Deponat von 67552 t REA-Gips. Bei Flugaschen wird eine Menge von 142444 t direkt wiederverwertet. Es verbleiben 281718 t. Die Gesamtmenge reduziert sich somit auf 512673 t. Weitere Wiederverwertungsraten können aufgrund der Datenknappheit nicht berücksichtigt werden. Die Bewertung der abgelagerten Stoffe in Braunkohleaufschlüssen unterbleibt ebenfalls. Durch Berücksichtigung dieser Raten kann sich die Menge an zu deponierenden Stoffen noch drastisch verringern. Allein der Einsatz von Flugaschen, REA-Gips und sonstigen Abfällen aus Braunkohlekraftwerken als Versatz im Braunkohletagebau würde die o.g. Menge um 326920 t auf 185753 t reduzieren.

A.1.3 Variante S3

Stoff	Menge t	Grenzwert BUWAL (MHK) mg/m ³	Äquivalente 10 ⁹ m ³
Kohlenwasserstoffe	33	15	2
Schwefeldioxid	2583	0,03	86100
Terpentinöl	20	0,01	2000
Fluor als Fluorwasserstoff	3,9	0,05	78
Kl.3 Sb, Pb, Cr, Cu etc.	0,26	0,001	260
Kl.2 As, Ni, Co, Te etc.	0,05	-	-
Kl.1 Cd, Hg, Tl}	0,01	0,00001	1000
Chlorwasserstoff	5,2	0,1	52
Stickoxide	2455	0,03	81833
Staub	543	0,07	7757
NM VOC	124	0,01	12400
			Summe = 191482

Tab. 107. Belastungszahl Luft nach BUWAL für Variante S3:
nach Grenzwerten /BUWAL 90, in UBA 92, S. 110/,

Stoff	Menge t	Grenzwert VDI 2310 mg/m ³	Äquivalente 10 ⁹ m ³
Kohlenwasserstoffe	33	-	-
Schwefeldioxid	2583	0,3	8610
Terpentinöl	20	-	-
Fluor	3,9	0,1	39
Kl.3 Sb, Pb, Cr, Cu etc.	0,27	0,003	90
Kl.2 As, Ni, Co, Te etc.	0,05	-	-
Kl.1 Cd, Hg, Tl}	0,01	-	-
Stickoxide	2455	0,1	24550
Staub	543	0,3	1810
Chlorwasserstoff	5,2	-	-
NM VOC	124	-	-
			Summe = 35099

Tab. 108. Belastungszahl Luft nach VDI für Variante S3:
nach VDI-Richtlinie /VDI 2310/, Mensch, 24-h-Mittelwerte, in /LfU 89/

Stoff	Menge t	Vorsorge-standards $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Äquivalente 10^9 m^3
Kohlenwasserstoffe	33	-	-
Schwefeldioxid	2583	30	86000
Terpentinöl	20	-	-
Fluor	3,9	0,2	20000
Kl.3 Sb, Pb, Cr, Cu etc.)	0,27	-	-
Kl.2 As, Ni, Co, Te etc.)	0,05	-	-
Kl.1 Cd, Hg, Tl}	0,01	-	-
Stickoxide	2455	10	246000
Staub	543	-	-
Chlorwasserstoff	5,2	50	0
NM VOC	124	-	-
			Summe = 352000

Tab. 109. Belastungszahl Luft nach Vorsorgestandards für Variante S3:
nach Werten von UBA, WHO, VDI /Kühling 90/ für die Vegetation

Stoff	Menge t	Grenzwert BUWAL g/m^3	Äquivalente 10^6 m^3
Säuren	0,3	-	-
Terpentinöl	3,0	-	-
Feststoff	81,7	20	4,0
Waschmittel	44,4	-	-
Teer	0,01	-	-
Anorganische Stoffe	2,7	-	-
			Summe = 4,0

Tab. 110. Belastungszahl Wasser nach BUWAL für Variante S3:
nach Grenzwerten /BUWAL 90/, Einleitung in Gewässer

Stoff	Menge t	Grenzwert TrinkwV g/m ³	Äquivalente 10 ⁶ m ³
Säuren	0,3	-	-
Terpentinöl	3,0	-	-
Feststoff	81,7	-	-
Waschmittel	44,4 (10% als Tensid)	0,2	22
Teer	0,01	-	-
Anorganische Stoffe	2,7	-	-
			Summe = 22

Tab. 111. Belastungszahl Wasser nach TrinkwasserV für Variante S3:
nach Trinkwasserverordnung 86 in /LfU 89/, Waschmittel als Tensid gerechnet,
Tensid-Anteil durchschnittlich 10-15 %

Stoff	Menge t	Abfallschlüssel	Zeichen
Silizium-Oxid-Staub	198	31442	
Pumpenöl	40	541	-
Defekte PV-Module	8262		
Trennfolie (HD-PE)	247		
Flugasche	74690	31301 ⁹	x +
REA-Gips	26410	31445 ⁹	
Granulat	22020		
Grobasche	3103		
Hochfenschlacke	7628	311/31211	-/x (Alu)
Rückstände aus Stahlschrottaufbe- reitung	158		
Abraum aus Eisenerzgewinnung	848		
Abfälle aus Eisenerzgewinnung	33		
Elektrofilterstaub	13550		
Konverterschlacke	9325		
Reststoffe Walzwerk	6955		
Rückstände aus Kalzinierung	685		
Bauxitabraum	38640		
Rotschlamm	25040		
Steinsalzrückstand	354		
Filterstaub	83		
Rückstände aus Al-Schmelze	296		
Kathodenausbruch	308		
	Summe = 238873		

Tab. 112. Belastungszahl 'Boden' für Variante S3: x = Sonderabfall, + = Beseitigung ist
nachweispflichtig, fehlende Bezeichnung bei der Zahl = Beseitigung kann zusam-
men mit dem Hausmüll erfolgen, evtl. nach Vorbehandlung, ⁹ in Abhängigkeit von
Art und Menge der Inhaltsstoffe x und +, Verwertungsraten nicht berücksichtigt

Die größten Mengen an Abfall stammen aus der Energiebereitstellung aus dem Strommix. Von den anfallenden Mengen werden jedoch nach /Risse 91/ bedeutende Mengen wiederverwertet. So werden nur 440 t Granulat zu deponieren sein - bei angenommener gleichbleibender Abnahme - und 807 t Grobasche aus Steinkohlekraftwerken. Der REA-Gips aus Steinkohlekraftwerken wird zur Zeit verwertet, jener aus der Energieerzeugung aus Braunkohlekraftwerken noch nicht. Daraus ergibt sich eine verbleibende Menge an Deponat von 10546 t REA-Gips. Bei Flugaschen wird eine Menge von 25033 t direkt wiederverwertet. Es verbleiben 49657 t. Die Gesamtmenge reduziert sich somit um 59455 t auf 179418 t. Weitere Wiederverwertungsraten können aufgrund der Datenknappheit nicht berücksichtigt werden. Die Bewertung der abgelagerten Stoffe in Braunkohleaufschlüssen unterbleibt ebenfalls. Durch Berücksichtigung dieser Raten kann sich die Menge an zu deponierenden Stoffen noch drastisch verringern. Allein der Einsatz von Flugaschen, REA-Gips und sonstigen Abfällen aus Braunkohlekraftwerken als Versatz im Braunkohletagebau würde die o.g. Menge um 56128 t auf 123290 t reduzieren.

A.1.4 Variante S4

Stoff	Menge t	Grenzwert BUWAL (MIK) mg/m ³	Äquivalente 10 ⁹ m ³
Kohlenwasserstoffe	20	15	1
Schwefeldioxid	2463	0,03	82100
Siliziumdioxid-Staub	557	0,07	7957
Fluor	72,7	0,1	727
Kl.3 Sb, Pb, Cr, Cu etc.)	0,17	0,001	170
Kl.2 As, Ni, Co, Te etc.)	0,03	-	-
Kl.1 Cd, Hg, Tl)	0,007	0,00001	700
Stickoxide	1902	0,03	63400
Staub	221	0,07	3157
Teer	0,7	0,01	70
Aceton	52	0,01	5200
Stickstoff-Siliziumtetrafluorid	14,4	-	-
NMVOC	34	0,01	3400
Dimethylphtalat	0,2	0,01	20
			Summe = 166902

Tab. 113. Belastungszahl Luft nach BUWAL für Variante S4:
nach Grenzwerten /BUWAL 90, in UBA 92, S. 110/.

Stoff	Menge t	Grenzwert VDI 2310 mg/m ³	Äquivalente 10 ⁹ m ³
Kohlenwasserstoffe	20	-	-
Schwefeldioxid	2463	0,3	8210
Silizium-Feinstaub	557	0,3	1857
Fluor	72,7	0,1	727
Kl.3 Sb, Pb, Cr, Cu etc.)	0,17	0,003	57
Kl.2 As, Ni, Co, Te etc.)	0,03	-	-
Kl.1 Cd, Hg, Tl)	0,007	-	-
Stickoxide	1902	0,1	19020
Staub	221	0,3	737
Teer	0,7	-	-
Aceton	52	-	-
Stickstoff-Siliziumtetrafluorid	14,4	-	-
NMVOC	34	-	-
Dimethylphtalat	0,2	-	-
			Summe = 30608

Tab. 114. Belastungszahl Luft nach VDI für Variante S4:
nach VDI-Richtlinie /VDI 2310/, Mensch, 24-h-Mittelwerte, in /LfU 89/

Stoff	Menge t	Vorsorge-standards $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Äquivalente 10^9 m^3
Kohlenwasserstoffe	20	-	-
Schwefeldioxid	2463	30	82000
Silizium-Feinststaub	557	-	-
Fluor	72,7	0,2	363500
Kl.3 Sb, Pb, Cr, Cu etc.)	0,17	-	-
Kl.2 As, Ni, Co, Te etc.)	0,03	-	-
Kl.1 Cd, Hg, Tl}	0,007	-	-
Stickoxide	1902	10	190000
Staub	221	-	-
Teer	0,7	-	-
Aceton	52	-	-
Stickstoff/Siliziumtetrafluorid	14,4	-	-
NMVOG	34	-	-
Dimethylphtalat	0,2	-	-
			Summe = 635500

Tab. 115. Belastungszahl Luft nach Vorsorgestandards für Variante S4:
nach Werten von UBA, WHO, VDI /Kühling 90/ für die Vegetation

Stoff	Menge t	Grenzwert BUWAL g/m^3	Äquivalente 10^6 m^3
Feststoff	54	20	2,7
Chlorwasserstoff	20100	-	-
Natriumhydroxid	347	-	-
Natriumfluorid als Fluorid	58 26,3	10	2,6
Reinigungsmittel	173	-	-
Teer	0,009	-	-
Säuren	0,22	-	-
Anorg. Stoffe	1,74	-	-
			Summe = 5,3

Tab. 116. Belastungszahl Wasser nach BUWAL für Variante S4:
nach Grenzwerten /BUWAL 90/, Einleitung in Gewässer

Stoff	Menge t	Abfallschlüssel	Zeichen
Silizium-Oxid-Staub	198	31442	
Defekte PV-Module	8262		
Calciumfluorid	1097		
Graphittiegel (inkl. Heizelemente)	403		
Fluorwasserstoff	550		
Flugasche	2391	31301 ⁹	x +
REA-Gips	846	31445 ⁹	
Granulat	705		
Grobasche	99		
Hochofenschlacke	5015	311/31211	-/x (Alu)
Rückstände aus Stahlschrottaufbereitung	104		
Abraum aus Eisenerzgewinnung	558		
Abfälle aus Eisenerzgewinnung	22		
Elektrofilterstaub	8911		
Konverterschlacke	6130		
Reststoffe Walzwerk	4572		
Rückstände aus Kalzinierung	450		
Bauxitabraum	25400		
Rotschlamm	16460		
Steinsalzrückstand	233		
PTFE-IT	17	-	-
Filterstaub	54		
Rückstände aus Al-Schmelze	194		
Kathodenausbruch	202		
Epoxidkieber	58		
Vakuumpumpenöl	0,01		
Acryl-Gießharzreste	628		
Buthyl-Kautschuk-Reste	126		
Defekte Module	109		
Silizium-Abrieb	6177		
Silizium-Reste	635		
	Summe = 90606		

Tab. 117. Belastungszahl 'Boden' für Variante S4: x = Sonderabfall, + = Beseitigung ist nachweispflichtig, fehlende Bezeichnung bei der Zahl = Beseitigung kann zusammen mit dem Hausmüll erfolgen, evtl. nach Vorbehandlung, ⁹ in Abhängigkeit von Art und Menge der Inhaltsstoffe x und +

Stoff	Menge t	Grenzwert TrinkwV g/m ³	Äquivalente 10 ⁶ m ³
Feststoff	54	-	-
Chlorwasserstoff	20100	-	-
Natriumhydroxid	347	-	-
Natriumfluorid als Fluorid	58 26,3	F ⁻ 1,5	18
Reinigungsmittel	173 10% als Tensid	0,2	86,5
Teer	0,009	-	-
Säuren	0,22	-	-
Anorg. Stoffe	1,74	-	-
			Summe = 104,5

Tab. 118. Belastungszahl Wasser nach TrinkwasserV für Variante S4:
nach Trinkwasserverordnung 86 in /LfU 89/

Wie bei den vorangegangenen Typen werden die Wiederverwertungsraten angegeben für die aus der Energiebereitstellung (Strommix) anfallenden Abfallstoffe. Berechnungen nach /Risse 91/ zeigen eine Reduzierung um 691 t Granulat und 73 t Grobasche aus Steinkohlekraftwerken. Der REA-Gips aus Steinkohlekraftwerken wird zur Zeit verwertet, jener aus der Energieerzeugung aus Braunkohlekraftwerken noch nicht. Daraus ergibt sich eine verbleibende Menge an Deponat von 338 t REA-Gips. Bei Flugaschen wird eine Menge von 801 t direkt wiederverwertet. Es verbleiben 1590 t. Die Gesamtmenge reduziert sich somit um 2073 t auf 88533 t. Weitere Wiederverwertungsraten können aufgrund der Datenknappheit nicht berücksichtigt werden. Die Bewertung der abgelagerten Stoffe in Braunkohleaufschlüssen unterbleibt ebenfalls. Durch Berücksichtigung dieser Raten kann sich die Menge an zu deponierenden Stoffen noch drastisch verringern. Allein der Einsatz von Flugaschen, REA-Gips und sonstigen Abfällen aus Braunkohlekraftwerken als Versatz im Braunkohletagebau würde die o.g. Menge um 1797 t auf 86554 t reduzieren. Bei diesem Typ spielt der Aluminiumrahmen die wichtigste Rolle mit ca. 50% des verbleibenden festen Abfalls.

A.1.5 Variante B1

Stoff	Menge t	Grenzwert BUWAL (MIK) mg/m ³	Äquivalente 10 ⁹ m ³
Nichtmethan- Kohlenwasserstoffe	181000	15	12067
Schwefeldioxid	12000	0,03	400000
Stickoxide	190000	0,03	6333333
Staub	11000	0,07	157143
			Summe = 6902543

Tab. 119. Belastungszahl Luft nach BUWAL für Variante B1:
nach Grenzwerten /BUWAL 90, in UBA 92, S. 110/,

Stoff	Menge t	Grenzwert VDI 2310 mg/m ³	Äquivalente 10 ⁹ m ³
Kohlenwasserstoffe	181000	-	-
Schwefeldioxid	12000	0,3	40000
Stickoxide	190000	0,1	1900000
Staub	11000	0,3	36667
			Summe = 1976667

Tab. 120. Belastungszahl Luft nach VDI für Variante B1:
nach VDI-Richtlinie /VDI 2310/, Mensch, 24-h-Mittelwerte, in /LFU 89/

Stoff	Menge t	Vorsorge- stan- dards µg/m ³	Äquivalente 10 ⁹ m ³
Kohlenwasserstoffe	181000	-	-
Schwefeldioxid	12000	30	400000
Stickoxide	190000	10	19000000
Staub	11000	-	-
			Summe = 19400000

Tab. 121. Belastungszahl Luft nach Vorsorgestandards für Variante B1:
nach Werten von UBA, WHO, /Kühling 90/ für die Vegetation

A.1.6 Variante B2

Stoff	Menge t	Grenzwert BUWAL (MIK) mg/m ³	Äquivalente 10 ⁹ m ³
Nichtmethan- Kohlenwasserstoffe	50000	15	3333
Schwefeldioxid	5200	0,03	173333
Stickoxide	44300	0,03	1476667
Staub	4300	0,07	61429
			Summe = 1714762

Tab. 122. Belastungszahl Luft nach BUWAL für Variante B2:
nach Grenzwerten /BUWAL 90, in UBA 92, S. 110/,

Stoff	Menge t	Grenzwert VDI 2310 mg/m ³	Äquivalente 10 ⁹ m ³
Kohlenwasserstoffe (ohne Methan)	50000	-	-
Schwefeldioxid	5200	0,3	17333
Stickoxide	44300	0,1	443000
Staub	4300	0,3	14333
			Summe = 474666

Tab. 123. Belastungszahl Luft nach VDI für Variante B2:
nach VDI-Richtlinie /VDI 2310/, Mensch, 24-h-Mittelwerte, in /LfU 89/

Stoff	Menge t	Vorsorge- stan- dards µg/m ³	Äquivalente 10 ⁹ m ³
Kohlenwasserstoffe (ohne Methan)	-	-	-
Schwefeldioxid	5200	30	173000
Stickoxide	44300	10	4430000
Staub	4300	-	-
			Summe = 4603000

Tab. 124. Belastungszahl Luft nach Vorsorgestandards für Variante B2:
nach Werten von UBA, WHO, /Kühling 90/ für die Vegetation

A.1.7 Variante B3

Stoff	Menge t	Grenzwert BUWAL (MIK) mg/m ³	Äquivalente 10 ⁹ m ³
Nichtmethan- Kohlenwasserstoffe	26000	15	1733
Schwefeldioxid	4200	0,03	140000
Stickoxide	34400	0,03	1146667
Staub	1100	0,07	15714
			Summe = 1272114

Tab. 125. Belastungszahl Luft nach BUWAL für Variante B3:
nach Grenzwerten /BUWAL 90, in UBA 92, S. 110/,

Stoff	Menge t	Grenzwert VDI 2310 mg/m ³	Äquivalente 10 ⁹ m ³
Kohlenwasserstoffe (ohne Methan)	26000	-	-
Schwefeldioxid	4200	0,3	14000
Stickoxide	34400	0,1	340000
Staub	1100	0,3	3667
			Summe = 383667

Tab. 126. Belastungszahl Luft nach VDI für Variante B3:
nach VDI-Richtlinie /VDI 2310/, Mensch, 24-h-Mittelwerte, in /LfU 89/

Stoff	Menge t	Vorsorge- stan- dards µg/m ³	Äquivalente 10 ⁹ m ³
Kohlenwasserstoffe (ohne Methan)	26000	-	-
Schwefeldioxid	4200	30	140000
Stickoxide	34400	10	3400000
Staub	1100	-	-
			Summe = 3540000

Tab. 127. Belastungszahl Luft nach Vorsorgestandards für Variante B3:
nach Werten von UBA, WHO, /Kühling 90/ für die Vegetation

A.1.8 Variante D

Stoff	Menge t	Grenzwert BUWAL (MIK) mg/m ³	Äquivalente 10 ⁹ m ³
Nichtmethan- Kohlenwasserstoffe	13000	15	867
Schwefeldioxid	19000	0,03	633333
Stickoxide	60000	0,03	2000000
Staub	200	0,07	2857
			Summe = 2637057

Tab. 128. Belastungszahl Luft nach BUWAL für Variante D:
nach Grenzwerten /BUWAL 90, in UBA 92, S. 110/,

Stoff	Menge t	Grenzwert VDI 2310 mg/m ³	Äquivalente 10 ⁹ m ³
Kohlenwasserstoffe (ohne Methan)	13000	-	-
Schwefeldioxid	19000	0,3	63333
Stickoxide	60000	0,1	600000
Staub	200	0,3	667
			Summe = 664000

Tab. 129. Belastungszahl Luft nach VDI für Variante D:
nach VDI-Richtlinie /VDI 2310/, Mensch, 24-h-Mittelwerte, in /LfU 89/

Stoff	Menge t	Vorsorge- stan- dards µg/m ³	Äquivalente 10 ⁹ m ³
Kohlenwasserstoffe (ohne Methan)	-	-	-
Schwefeldioxid	19000	30	633000
Stickoxide	60000	10	6000000
Staub	200	-	-
			Summe = 6633000

Tab. 130. Belastungszahl Luft nach Vorsorgestandards für Variante D:
nach Werten von UBA, WHO, /Kühling 90/ für die Vegetation

A.1.9 Variante E1

Stoff	Menge t	Grenzwert BUWAL (MIK) mg/m ³	Äquivalente 10 ⁹ m ³
Nichtmethan- Kohlenwasserstoffe	269	15	18
Schwefeldioxid	6700	0,03	223333
Stickoxide	6300	0,03	210000
Staub	734	0,07	1043
			Summe = 434394

Tab. 131. Belastungszahl Luft nach BUWAL für Variante E1:
nach Grenzwerten /BUWAL 90, in UBA 92, S. 110/,

Stoff	Menge t	Grenzwert VDI 3210 mg/m ³	Äquivalente 10 ⁹ m ³
Nichtmethan- Kohlenwasserstoffe	269	-	-
Schwefeldioxid	6700	0,3	22333
Stickoxide	6300	0,1	63000
Staub	734	0,3	2447
			Summe = 87780

Tab. 132. Belastungszahl Luft nach VDI für Variante E1:
nach VDI-Richtlinie /VDI 2310/, Mensch, 24-h-Mittelwerte, in /LfU 89/

Stoff	Menge t	Vorsorge- stan- dards µg/m ³	Äquivalente 10 ⁹ m ³
Nichtmethan- Kohlenwasserstoffe	269	-	-
Schwefeldioxid	6700	30	223000
Stickoxide	6300	10	630000
Staub	734	-	-
			Summe = 853000

Tab. 133. Belastungszahl Luft nach Vorsorgestandards für Variante E1:
nach Werten von UBA, WHO, /Kühling 90/ für die Vegetation

Stoff	Menge t	Abfallschlüssel	Zeichen
Flugasche	260000	31301 ⁹	x -
REA-Gips	93000	31445 ⁹	
Granulat	78000		
Grobasche	11000		
	Summe = 442000		

Tab. 134. Belastungszahl 'Boden' für Variante E1: x = Sonderabfall, + = Beseitigung ist nachweispflichtig, fehlende Bezeichnung bei der Zahl = Beseitigung kann zusammen mit dem Hausmüll erfolgen, evtl. nach Vorbehandlung, ⁹ in Abhängigkeit von Art und Menge der Inhaltsstoffe x und +

A.1.10 Variante E2

Stoff	Menge t	Grenzwert BUWAL (MIK) mg/m ³	Äquivalente 10 ⁹ m ³
Nichtmethan- Kohlenwasserstoffe	627	15	42
Schwefeldioxid	16000	0,03	533333
Stickoxide	15000	0,03	500000
Staub	1711	0,07	24443
			Summe = 1057818

Tab. 135. Belastungszahl Luft nach BUWAL für Variante E2:
nach Grenzwerten /BUWAL 90, in UBA 92, S. 110/,

Stoff	Menge t	Grenzwert VDI 3210 mg/m ³	Äquivalente 10 ⁹ m ³
Nichtmethan- Kohlenwasserstoffe	627	-	-
Schwefeldioxid	16000	0,3	53333
Stickoxide	15000	0,1	150000
Staub	1711	0,3	5703
			Summe = 209036

Tab. 136. Belastungszahl Luft nach VDI für Variante E2:
nach VDI-Richtlinie /VDI 2310/, Mensch, 24-h-Mittelwerte, in /LfU 89/

Stoff	Menge t	Vorsorge- stan- dards mg/m ³	Äquivalente 10 ⁹ m ³
Nichtmethan- Kohlenwasserstoffe	627	-	-
Schwefeldioxid	16000	30	533000
Stickoxide	15000	10	1500000
Staub	1711	-	-
			Summe = 2033000

Tab. 137. Belastungszahl Luft nach Vorsorgestandards für Variante E2:
nach Werten von UBA, WHO, /Kühling 90/ für die Vegetation

Stoff	Menge t	Abfallschlüssel	Zeichen
Flugasche	610000	31301 ⁹	x +
REA-Gips	220000	31445 ⁹	
Granulat	180000		
Grobasche	26000		
	Summe = 1036000		

Tab. 138. Belastungszahl 'Boden' für Variante E2: x = Sonderabfall, + = Beseitigung ist nachweislich, fehlende Bezeichnung bei der Zahl = Beseitigung kann zusammen mit dem Hausmüll erfolgen, evtl. nach Vorbehandlung, ⁹ in Abhängigkeit von Art und Menge der Inhaltsstoffe x und +

A.2 Nach Toxizitäten

A.2.1 Variante S1

Stoff	Menge t	Grenzwert LD ₀ mg/kg	Äquivalente 10 ⁶ t
Kohlenwasserstoffe	69	-	-
Schwefeldioxid	11370	0,98	11602
Silizium-Feinststaub	789,5	-	-
Methylenchlorid	236	111	2
Isopropylalkohol	78,93	8600	0
Terpentinöl/Dibutylphthalat	78,93	-	-
Fluor	71,04	-	-
NMVOC	437	-	-
Kl.3 Sb, Pb, Cr, Cu etc.)	1,309	-	-
Kl.2 As, Ni, Co, Te etc.)	0,258	-	-
Kl.1 Cd, Hg, Tl}	0,0527	-	-
Stickoxide	10870	0,35	31057
Staub	1842	-	-
			Summe = 42661

Tab. 139. Belastungszahl nach Toxizitäten für Variante S1:
nach Letalen Dosen LD₀

Stoff	Menge t	t _{x'} mg/kg	Äquivalente 10 ⁶ t
Kohlenwasserstoffe	69	-	-
Schwefeldioxid	11370	100	114
Silizium-Feinststaub	789,5	1000	1
Methylenchlorid	236	100	2
Isopropylalkohol	78,93	-	-
Terpentinöl/Dibutylphthalat	78,93	-	-
Fluor	71,04	1	71
NMVOC	437	-	-
Kl.3 Sb, Pb, Cr, Cu etc.)	1,309	-	-
Kl.2 As, Ni, Co, Te etc.)	0,258	-	-
Kl.1 Cd, Hg, Tl}	0,0527	10	0
Stickoxide	10870	1	10870
Staub	1842	-	-
			Summe = 11058

Tab. 140. Belastungszahl akute Toxizität nach Gebler für Variante S1:
nach akuten Toxizitäten tx' (akute Toxizität)

Stoff	Menge t	Risiko 1:1000000	Äquivalente 10 ⁶ m ³
Kohlenwasserstoffe	69	II	6900
Schwefeldioxid	11370	I	11370
Silizium-Feinstaub	789,5	I	790
Methylenchlorid	236	-	-
Isopropylalkohol	78,93	-	-
Terpentinöl:Dibutylphthalat	78,93	-	-
Fluor	71,04	-	-
NM VOC	437	II	43700
Kl.3 Sb, Pb, Cr, Cu etc.	1,309	I	1
Kl.2 As, Ni, Co, Te etc.	0,258	II	26
Kl.1 Cd, Hg, Tl	0,0527	II	5
Stickoxide	10870	-	-
Staub	1842	I	1842
			Summe = 64634

Tab. 141. Belastungszahl cancerogenes Risiko für Variante S1:
nach WHO-Werten /Kühling 90/, cancerogenes Risiko 1: 1000000 bei lebenslanger
Exposition; Klassen geben weiten Streubereich an, Kl. I = 10⁻⁶ µg/m³, Kl. II =
10⁻⁴ µg/m³, Kl. III = 10⁻² µg/m³

Stoff	Menge t	TDL ₀ mg/kg	Äquivalente 10 ⁶ t
Kohlenwasserstoffe	69	4500	0
Schwefeldioxid	11370	67	170
Silizium-Feinstaub	789,5	90	9
Methylenchlorid	236	> 1000	0
Isopropylalkohol	78,93	-	-
Terpentinöl:Dibutylphthalat	78,93	-	-
Fluor	71,04	-	-
NM VOC	437	4500	0
Kl.3 Sb, Pb, Cr, Cu etc.	1,309	9	0
Kl.2 As, Ni, Co, Te etc.	0,258	64	0
Kl.1 Cd, Hg, Tl	0,0527	4500	0
Stickoxide	10870	-	-
Staub	1842	90	20
			Summe = 199

Tab. 142. Belastungszahl Cancerogenität nach Gebler für Variante S1:
nach Toxizitäten tx''' (Cancerogenität), CKW und NM VOC als Benzol, Kl. 3 als
Chromat, Kl. 2 als Ni, Kl. 1 als Cd Staub als SiO₂

Stoff	Menge t	TDL ₀ mg/kg	Äquivalente 10 ⁶ t
Kohlenwasserstoffe	69	20	3
Schwefeldioxid	11370	-	-
Silizium-Feinstaub	790	-	-
Methylenchlorid	236	-	-
Isopropylalkohol	78,93	-	-
Terpentinöl/Dibutylphthalat	78,93	-	-
Fluor	71,04	43	2
NM VOC	437	20	22
Kl.3 Sb, Pb, Cr, Cu etc.}	1,309	43	0
Kl.2 As, Ni, Co, Te etc.}	0,258	-	-
Kl.1 Cd, Hg, Tl}	0,0527	-	-
Stickoxide	10870	55000	0
Staub	1842	-	-
			Summe = 27

Tab. 143. Belastungszahl Mutagenität nach Gebler für Variante S1:
nach Toxizitäten tx''' (Mutagenität), TDL = Toxic Dose Level, CKW und
NMVOC als Benzol, Kl. 3 als Pb, NO_x als N_2O

A.2.2 Variante S2

Stoff	Menge t	LD ₀ mg/kg	Äquivalente 10 ⁶ t
Kohlenwasserstoffe	68	-	-
Schwefeldioxid	11555	0,98	11791
Terpentinöl	20	-	-
KL3 Sb, Pb, Cr, Cu etc.}	1,327	-	-
KL2 As, Ni, Co, Te etc.}	0,261	-	-
KL1 Cd, Hg, Tl}	0,0535	-	-
Stickoxide	11600	0,35	33143
Staub	2151	-	-
NMVOC	430	-	-
			Summe = 44934

Tab. 144. Belastungszahl nach Toxizitäten für Variante S2:
nach Letalen Dosen LD₀

Stoff	Menge t	t _{x'} mg/kg	Äquivalente 10 ⁶ t
Kohlenwasserstoffe	68	-	-
Schwefeldioxid	11555	100	116
Terpentinöl	20	-	-
KL3 Sb, Pb, Cr, Cu etc.}	1,327	-	-
KL2 As, Ni, Co, Te etc.}	0,261	-	-
KL1 Cd, Hg, Tl}	0,0535	10	-
Stickoxide	11600	1	11600
Staub	2151	-	-
NMVOC	430	-	-
			Summe = 11716

Tab. 145. Belastungszahl akute Toxizität nach Gebler für Variante S2:
nach akuten Toxizitäten tx' (akute Toxizität)

Stoff	Menge t	Risiko 1:1000000	Äquivalente 10 ⁶ m ³
Kohlenwasserstoffe	68	II	6800
Schwefeldioxid	11555	I	11555
Terpentinöl	20	-	-
Kl.3 Sb, Pb, Cr, Cu etc.}	1,327	I	1
Kl.2 As, Ni, Co, Te etc.}	0,261	II	3
Kl.1 Cd, Hg, Tl}	0,0535	II	1
Stickoxide	11600	-	-
Staub	2151	I	2151
NMVOC	430	II	43000
			Summe = 63511

Tab. 146. Belastungszahl cancerogenes Risiko für Variante S2:
nach WHO-Werten /Kühling 90/, cancerogenes Risiko 1: 1000000 bei lebenslanger Exposition; Klassen geben weiten Streubereich an, Kl. I = 10⁻⁶ µg/m³, Kl. II = 10⁻⁴ µg/m³, Kl. III = 10⁻² µg/m³

Stoff	Menge t	TDL ₀ mg/kg	Äquivalente 10 ⁶ t
Kohlenwasserstoffe	68	4500	0
Schwefeldioxid	11555	67	172
Terpentinöl	20	-	-
Kl.3 Sb, Pb, Cr, Cu etc.}	1,327	9	0
Kl.2 As, Ni, Co, Te etc.}	0,261	64	0
Kl.1 Cd, Hg, Tl}	0,0535	4500	0
Stickoxide	11600	-	-
Staub	2151	90	24
NMVOC	430	4500	0
			Summe = 196

Tab. 147. Belastungszahl Cancerogenität nach Gebler für Variante S2:
nach Toxizitäten tx''' (Cancerogenität), CKW und NMVOC als Benzol, Kl. 3 als Chromat, Kl. 2 als Ni, Kl. 1 als Cd Staub als SiO₂

Stoff	Menge t	TDL ₀ mg/kg	Äquivalente 10 ⁶ t
Kohlenwasserstoffe	68	20	3
Schwefeldioxid	11555	-	-
Terpentinöl	20	-	-
Kl.3 Sb, Pb, Cr, Cu etc.}	1,327	43	0
Kl.2 As, Ni, Co, Te etc.}	0,261	-	-
Kl.1 Cd, Hg, Tl}	0,0535	10	-
Stickoxide	11600	55000	0
Staub	2151	-	-
NMVOC	430	20	22
			Summe = 25

Tab. 148. Belastungszahl Mutagenität nach Gebler für Variante S2:
nach Toxizitäten tx''' (Mutagenität), TDL = Toxic Dose Level, CKW und NMVOC als Benzol, Kl. 3 als Pb, NO_x als N₂O

A.2.3 Variante S3

Stoff	Menge t	LD ₀ mg/kg	Äquivalente 10 ⁶ t
Kohlenwasserstoffe	33	-	-
Schwefeldioxid	2583	0,98	2636
Terpentinöl	20	-	-
Fluor	3,9	-	-
Kl.3 Sb, Pb, Cr, Cu etc.}	0,26	-	-
Kl.2 As, Ni, Co, Te etc.}	0,05	-	-
Kl.1 Cd, Hg, Tl}	0,01	-	-
Stickoxide	2455	0,35	7014
Staub	543	-	-
Chlorwasserstoff	5,2	-	-
NMVOG	124	-	-
			Summe = 9650

Tab. 149. Belastungszahl nach Toxizitäten für Variante S3:
nach Letalen Dosen LD₀

Stoff	Menge t	t _x mg/kg	Äquivalente 10 ⁶ t
Kohlenwasserstoffe	33	-	-
Schwefeldioxid	2583	100	26
Terpentinöl	20	-	-
Fluor	3,9	1	4
Kl.3 Sb, Pb, Cr, Cu etc.}	0,26	-	-
Kl.2 As, Ni, Co, Te etc.}	0,05	-	-
Kl.1 Cd, Hg, Tl}	0,01	10	-
Stickoxide	2455	1	2455
Staub	543	-	-
Chlorwasserstoff	5,2	10	1
NMVOG	124	-	-
			Summe = 2486

Tab. 150. Belastungszahl akute Toxizität nach Gebler für Variante S3:
nach akuten Toxizitäten t_x (akute Toxizität)

Stoff	Menge t	Risiko 1:1000000	Äquivalente 10 ⁶ m ³
Kohlenwasserstoffe	33	II	33
Schwefeldioxid	2583	I	2583
Terpentinöl	20	-	-
Fluor	3,9	-	-
Kl.3 Sb, Pb, Cr, Cu etc.}	0,26	I	0
Kl.2 As, Ni, Co, Te etc.}	0,05	II	1
Kl.1 Cd, Hg, Tl}	0,01	II	1
Stickoxide	2455	-	-
Staub	543	I	543
Chlorwasserstoff	5,2	-	-
NMVOC	124	II	12400
			Summe = 15561

Tab. 151. Belastungszahl cancerogenes Risiko für Variante S3:
nach WHO-Werten /Kühling 90/, cancerogenes Risiko 1: 1000000 bei lebenslanger Exposition; Klassen geben weiten Streubereich an, Kl. I = 10⁻⁶ µg/m³, Kl. II = 10⁻⁴ µg/m³, Kl. III = 10⁻² µg/m³

Stoff	Menge t	TDL ₀ mg/kg	Äquivalente 10 ⁶ t
Kohlenwasserstoffe	33	4500	0
Schwefeldioxid	2583	67	39
Terpentinöl	20	-	-
Fluor	3,9	-	-
Kl.3 Sb, Pb, Cr, Cu etc.}	0,26	9	0
Kl.2 As, Ni, Co, Te etc.}	0,05	64	0
Kl.1 Cd, Hg, Tl}	0,01	4500	0
Stickoxide	2455	-	-
Staub	543	90	6
Chlorwasserstoff	5,2	-	-
NMVOC	124	4500	0
			Summe = 45

Tab. 152. Belastungszahl Cancerogenität nach Gebler für Variante S3:
nach Toxizitäten tx''' (Cancerogenität), CKW und NMVOC als Benzol, Kl. 3 als Chromat, Kl. 2 als Ni, Kl. 1 als Cd Staub als SiO₂

Stoff	Menge t	TDL ₀ mg/kg	Äquivalente 10 ⁶ t
Kohlenwasserstoffe	33	20	2
Schwefeldioxid	2583	-	-
Terpentinöl	20	-	-
Fluor	3,9	43	0
Kl.3 Sb, Pb, Cr, Cu etc.)	0,26	-	-
Kl.2 As, Ni, Co, Fe etc.)	0,05	-	-
Kl.1 Cd, Hg, Tl}	0,01	43	0
Stickoxide	2455	55000	0
Staub	543	-	-
Chlorwasserstoff	5,2	43	0
NMVOC	124	20	6
			Summe = 8

Tab. 153. Belastungszahl Mutagenität nach Gebler für Variante S3:
nach Toxizitäten tx^{****} (Mutagenität), TDL = Toxic Dose Level, CKW und
NMVOC als Benzol, Kl. 3 als Pb, NO_x als N_2O

A.2.4 Variante S4

Stoff	Menge t	LD ₀ mg/kg	Äquivalente 10 ⁶ t
Kohlenwasserstoffe	20	-	-
Schwefeldioxid	2463	0,98	2513
Silizium-Feinststaub	557	-	-
Fluor	72,7	-	-
Kl.3 Sb, Pb, Cr, Cu etc.}	0,17	-	-
Kl.2 As, Ni, Co, Te etc.}	0,03	-	-
Kl.1 Cd, Hg, Tl}	0,007	-	-
Stickoxide	1902	0,35	5434
Staub	221	-	-
Teer	0,7	-	-
Aceton	52	24000	0
Stickstoff/Siliziumtetrafluorid	14,4	-	-
NM VOC	34	-	-
Dimethylphthalat	0,2	-	-
			Summe = 7947

Tab. 154. Belastungszahl nach Toxizitäten für Variante S4:
nach Letalen Dosen LD₀

Stoff	Menge t	t _x ' mg/kg	Äquivalente 10 ⁶ t
Kohlenwasserstoffe	20	-	-
Schwefeldioxid	2463	100	24
Silizium-Feinststaub	557	1000	1
Fluor	72,7	1	73
Kl.3 Sb, Pb, Cr, Cu etc.}	0,17	-	-
Kl.2 As, Ni, Co, Te etc.}	0,03	-	-
Kl.1 Cd, Hg, Tl}	0,007	100	-
Stickoxide	1902	1	1902
Staub	221	-	-
Teer	0,7	-	-
Aceton	52	1000	0
Stickstoff/Siliziumtetrafluorid	14,4	-	-
NM VOC	34	-	-
Dimethylphthalat	0,2	-	-
			Summe = 2000

Tab. 155. Belastungszahl akute Toxizität nach Gebler für Variante S4:
nach akuten Toxizitäten t_x' (akute Toxizität)

Stoff	Menge t	Risiko 1:1000000	Äquivalente 10 ⁶ m ³
Kohlenwasserstoffe	20	II	2000
Schwefeldioxid	2463	I	2463
Silizium-Feinstaub	557	I	557
Fluor	72,7	-	-
Kl.3 Sb, Pb, Cr, Cu etc.}	0,17	I	0
Kl.2 As, Ni, Co, Te etc.}	0,03	II	0
Kl.1 Cd, Hg, Tl}	0,007	II	0
Stickoxide	1902	-	-
Staub	221	I	221
Teer	0,7	III	7000
Aceton	52	-	-
Stickstoff/Siliziumtetrafluorid	14,4	-	-
NMVOG	34	II	3400
Dimethylphthalat	0,2	-	-
			Summe = 15641

Tab. 156. Belastungszahl cancerogenes Risiko für Variante S4:
nach WHO-Werten /Kühling 90/, cancerogenes Risiko 1: 1000000 bei lebenslanger Exposition; Klassen geben weiten Streubereich an, Kl. I = 10⁻⁶ µg/m³, Kl. II = 10⁻⁴ µg/m³, Kl. III = 10⁻² µg/m³

Stoff	Menge t	TDL ₀ mg/kg	Äquivalente 10 ⁶ t
Kohlenwasserstoffe	20	4500	0
Schwefeldioxid	2463	67	36
Silizium-Feinstaub	557	90	6
Fluor	72,7	-	-
Kl.3 Sb, Pb, Cr, Cu etc.}	0,17	9	0
Kl.2 As, Ni, Co, Te etc.}	0,03	64	-
Kl.1 Cd, Hg, Tl}	0,007	4500	0
Stickoxide	1902	-	-
Staub	221	90	2
Teer	0,7	-	-
Aceton	52	-	-
Stickstoff/Siliziumtetrafluorid	14,4	-	-
NMVOG	34	4500	0
Dimethylphthalat	0,2	-	-
			Summe = 44

Tab. 157. Belastungszahl Cancerogenität nach Gebler für Variante S4:
nach Toxizitäten tx''' (Cancerogenität), CKW und NMVOG als Benzol, Kl. 3 als Chromat, Kl. 2 als Ni, Kl. 1 als Cd Staub als SiO₂

Stoff	Menge t	TDL ₀ mg/kg	Äquivalente 10 ⁶ t
Kohlenwasserstoffe	20	20	1
Schwefeldioxid	2463	-	-
Silizium-Feinstaub	557	-	-
Fluor	72,7	43	2
Kl.3 Sb, Pb, Cr, Cu etc.}	0,17	-	-
Kl.2 As, Ni, Co, Te etc.}	0,03	-	-
Kl.1 Cd, Hg, Tl}	0,007	43	0
Stickoxide	1902	55000	0
Staub	221	-	-
Teer	0,7	-	-
Aceton	52	-	-
Stickstoff/Siliziumtetrafluorid	14,4	-	-
NMVOC	34	-	-
Dimethylphtalat	0,2	-	-
			Summe = 3

Tab. 158. Belastungszahl Mutagenität nach Gebler für Variante S4:
nach Toxizitäten tx^{****} (Mutagenität), TDL = Toxic Dose Level, CKW und NMVOC als Benzol, Kl. 3 als Pb, NO_x als N₂O

A.2.5 Variante B1

Stoff	Menge t	LD ₀ mg/kg	Äquivalente 10 ⁶ t
Kohlenwasserstoffe	181000	-	-
Schwefeldioxid	12000	0,98	12245
Stickoxide	190000	0,35	542857
Staub	11000	-	-
Kohlenmonoxid	994000	8	124250
			Summe = 679352

Tab. 159. Belastungszahl nach Toxizitäten für Variante B1:
nach Letalen Dosen LD₀

Stoff	Menge t	t _v ' mg/kg	Äquivalente 10 ⁶ t
Kohlenwasserstoffe	181000	-	-
Schwefeldioxid	12000	100	120
Stickoxide	190000	1	190000
Staub	11000	-	-
Kohlenmonoxid	994000	10	99400
			Summe = 289520

Tab. 160. Belastungszahl akute Toxizität nach Gebler für Variante B1:
nach akuten Toxizitäten tx' (akute Toxizität)

Stoff	Menge t	Risiko 1:1000000	Äquivalente 10 ⁶ m ³
Kohlenwasserstoffe	181000	II	18100000
Schwefeldioxid	12000	I	12000
Stickoxide	190000	-	-
Staub	11000	I	11000
			Summe = 18123000

Tab. 161. Belastungszahl cancerogenes Risiko für Variante B1:
nach WHO-Werten /Kühling 90/, cancerogenes Risiko 1: 1000000 bei lebenslanger
Exposition; Klassen geben weiten Streubereich an, Kl. I = 10⁻⁶ µg/m³, Kl. II =
10⁻⁴ µg/m³, Kl. III = 10⁻² µg/m³

Stoff	Menge t	TDL ₀ mg/kg	Äquivalente 10 ⁶ t
Kohlenwasserstoffe	181000	4500	40
Schwefeldioxid	12000	67	179
Stickoxide	190000	-	-
Staub	11000	90	122
			Summe = 339

Tab. 162. Belastungszahl Cancerogenität nach Gebler für Variante B1:
nach Toxizitäten tx''' (Cancerogenität),
CKW als Benzol, Staub als SiO₂

Stoff	Menge t	TDL ₀ mg/kg	Äquivalente 10 ⁶ t
Kohlenwasserstoffe	181000	20	9050
Schwefeldioxid	12000	-	-
Stickoxide	190000	55000	4
Staub	11000	90	122
			Summe = 9176

Tab. 163. Belastungszahl Mutagenität nach Gebler für Variante B1:
nach Toxizitäten tx'''' (Mutagenität), TDL = Toxic Dose Level, CKW als
Benzol, NO_x als N₂O

A.2.6 Variante B2

Stoff	Menge t	LD ₀ mg/kg	Äquivalente 10 ⁶ t
Kohlenwasserstoffe	50000	-	-
Schwefeldioxid	5200	0,98	5306
Stickoxide	44300	0,35	126571
Staub	4300	-	-
Kohlenmonoxid	226000	8	28250
			Summe = 160127

Tab. 164. Belastungszahl nach Toxizitäten für Variante B2:
nach Letalen Dosen LD₀

Stoff	Menge t	t _x ' mg/kg	Äquivalente 10 ⁶ t
Kohlenwasserstoffe	50000	-	-
Schwefeldioxid	5200	100	52
Stickoxide	44300	1	44300
Staub	4300	-	-
Kohlenmonoxid	226000	10	22600
			Summe = 66952

Tab. 165. Belastungszahl akute Toxizität nach Gebler für Variante B2:
nach akuten Toxizitäten tx' (akute Toxizität)

Stoff	Menge t	Risiko 1:1000000	Äquivalente 10 ⁶ m ³
Kohlenwasserstoffe	50000	II	5000000
Schwefeldioxid	5200	I	5200
Stickoxide	44300	-	-
Staub	4300	I	4300
			Summe = 5009500

Tab. 166. Belastungszahl cancerogenes Risiko für Variante B2:
nach WHO-Werten /Kühling 90/, cancerogenes Risiko 1: 1000000 bei lebenslanger
Exposition; Klassen geben weiten Streubereich an, Kl. I = 10⁻⁶ µg/m³, Kl. II =
10⁻⁴ µg/m³, Kl. III = 10⁻² µg/m³

Stoff	Menge t	TDL ₀ mg/kg	Äquivalente 10 ⁶ t
Kohlenwasserstoffe	50000	4500	11
Schwefeldioxid	5200	67	78
Stickoxide	44300	-	-
Staub	4300	90	48
			Summe = 137

Tab. 167. Belastungszahl Cancerogenität nach Gebler für Variante B2:
nach Toxizitäten tx''' (Cancerogenität), CKW als Benzol, Staub als SiO₂

Stoff	Menge t	TDL ₀ mg/kg	Äquivalente 10 ⁶ t
Kohlenwasserstoffe	50000	20	2500
Schwefeldioxid	5200	-	-
Stickoxide	44300	55000	1
Staub	4300	90	48
			Summe = 2549

Tab. 168. Belastungszahl Mutagenität nach Gebler für Variante B2:
nach Toxizitäten tx'''' (Mutagenität), TDL = Toxic Dose Level, CKW als
Benzol, NO_x als N₂O

A.2.7 Variante B3

Stoff	Menge t	LD ₀ mg/kg	Äquivalente 10 ⁶ t
Kohlenwasserstoffe	26000	-	-
Schwefeldioxid	4200	0,98	4286
Stickoxide	34400	0,35	98286
Staub	1100	-	-
Kohlenmonoxid	181000	8	22625
			Summe = 125197

Tab. 169. Belastungszahl nach Toxizitäten für Variante B3:
nach Letalen Dosen LD₀

Stoff	Menge t	t _x ' mg/kg	Äquivalente 10 ⁶ t
Kohlenwasserstoffe	26000	-	-
Schwefeldioxid	4200	100	42
Stickoxide	34400	1	34400
Staub	1100	-	-
Kohlenmonoxid	181000	10	18100
			Summe = 52542

Tab. 170. Belastungszahl akute Toxizität nach Gebler für Variante B3:
nach akuten Toxizitäten t_x' (akute Toxizität)

Stoff	Menge t	Risiko 1:1000000	Äquivalente 10 ⁶ m ³
Kohlenwasserstoffe	26000	II	2600000
Schwefeldioxid	4200	I	4200
Stickoxide	34400	-	-
Staub	1100	I	1100
			Summe = 2605300

Tab. 171. Belastungszahl cancerogenes Risiko für Variante B3:
nach WHO-Werten /Kühling 90/, cancerogenes Risiko 1: 1000000 bei lebenslanger
Exposition; Klassen geben weiten Streubereich an, Kl. I = 10⁻⁶ µg/m³, Kl. II =
10⁻⁴ µg/m³, Kl. III = 10⁻² µg/m³,

Stoff	Menge t	TDL ₀ mg/kg	Äquivalente 10 ⁶ t
Kohlenwasserstoffe	26000	4500	6
Schwefeldioxid	4200	67	63
Stickoxide	34400	-	-
Staub	1100	90	12
			Summe = 81

Tab. 172. Belastungszahl Cancerogenität nach Gebler für Variante B3:
nach Toxizitäten tx''' (Cancerogenität), CKW als Benzol, Staub als SiO₂

Stoff	Menge t	TDL ₀ mg/kg	Äquivalente 10 ⁶ t
Kohlenwasserstoffe	26000	20	1300
Schwefeldioxid	4200	-	-
Stickoxide	34400	55000	1
Staub	1100	-	-
			Summe = 1301

Tab. 173. Belastungszahl Mutagenität nach Gebler für Variante B3:
nach Toxizitäten tx'''' (Mutagenität), TDL = Toxic Dose Level, CKW als Benzol, NO_x als N₂O

A.2.8 Variante D

Stoff	Menge t	LD ₀ mg/kg	Äquivalente 10 ⁶ t
Kohlenwasserstoffe	13000	-	-
Schwefeldioxid	19000	0,98	19388
Stickoxide	60000	0,35	171429
Staub	200	-	-
Kohlenmonoxid	74000	8	9250
			Summe = 200067

Tab. 174. Belastungszahl nach Toxizitäten für Variante D:
nach Letalen Dosen LD₀

Stoff	Menge t	t' mg/kg	Äquivalente 10 ⁶ t
Kohlenwasserstoffe	13000	-	-
Schwefeldioxid	19000	100	190
Stickoxide	60000	1	60000
Staub	200	-	-
Kohlenmonoxid	74000	10	7400
			Summe = 67590

Tab. 175. Belastungszahl akute Toxizität nach Gebler für Variante D:
nach akuten Toxizitäten tx' (akute Toxizität)

Stoff	Menge t	Risiko 1:1000000	Äquivalente 10 ⁶ m ³
Kohlenwasserstoffe	13000	II	1300000
Schwefeldioxid	19000	I	19000
Stickoxide	60000	-	-
Staub	200	I	200
			Summe = 1319200

Tab. 176. Belastungszahl cancerogenes Risiko für Variante D:
nach WHO-Werten /Kühling 90/, cancerogenes Risiko 1: 1000000 bei lebenslanger
Exposition; Klassen geben weiten Streubereich an, Kl. I = 10⁻⁶ µg/m³, Kl. II =
10⁻⁴ µg/m³, Kl. III = 10⁻² µg/m³

Stoff	Menge t	TDL ₀ mg/kg	Äquivalente 10 ⁶ t
Kohlenwasserstoffe	13000	4500	3
Schwefeldioxid	19000	67	284
Stickoxide	60000	-	-
Staub	200	90	2
			Summe = 289

Tab. 177. Belastungszahl Cancerogenität nach Gebler für Variante D:
nach Toxizitäten tx''' (Cancerogenität), CKW als Benzol, Staub als SiO₂

Stoff	Menge t	TDL ₀ mg/kg	Äquivalente 10 ⁶ t
Kohlenwasserstoffe	13000	20	650
Schwefeldioxid	19000	-	-
Stickoxide	60000	55000	1
Staub	200	-	-
			Summe = 651

Tab. 178. Belastungszahl Mutagenität nach Gebler für Variante D:
nach Toxizitäten tx'''' (Mutagenität), TDL = Toxic Dose Level, CKW als
Benzol, NO_x als N₂O

A.2.9 Variante E1

Stoff	Menge t	LD ₀ mg/kg	Äquivalente 10 ⁶ t
NMVOC	269	-	-
Schwefeldioxid	6700	0,98	6837
Stickoxide	6300	0,35	18000
Staub	734	-	-
			Summe = 24837

Tab. 179. Belastungszahl nach Toxizitäten für Variante E1:
nach Letalen Dosen LD₀

Stoff	Menge t	t _x ' mg/kg	Äquivalente 10 ⁶ t
NMVOC	269	-	-
Schwefeldioxid	6700	100	67
Stickoxide	6300	1	6300
Staub	734	-	-
			Summe = 6367

Tab. 180. Belastungszahl akute Toxizität nach Gebler für Variante E1:
nach akuten Toxizitäten t_x' (akute Toxizität)

Stoff	Menge t	Risiko 1:1000000	Äquivalente 10 ⁶ m ³
NMVOC	269	II	26900
Schwefeldioxid	6700	I	6700
Stickoxide	6300	-	-
Staub	734	I	734
			Summe = 34334

Tab. 181. Belastungszahl cancerogenes Risiko für Variante E1:
nach WHO-Werten /Kühling 90/, cancerogenes Risiko 1: 1000000 bei lebenslanger
Exposition; Klassen geben weiten Streubereich an, Kl. I = 10⁻⁶ µg/m³, Kl. II =
10⁻⁴ µg/m³, Kl. III = 10⁻² µg/m³

Stoff	Menge t	TDL ₀ mg/kg	Äquivalente 10 ⁶ t
NMVOC	269	4500	0
Schwefeldioxid	6700	67	100
Stickoxide	6300	-	-
Staub	734	90	8
			Summe = 108

Tab. 182. Belastungszahl Cancerogenität nach Gebler für Variante E1:
nach Toxizitäten tx''' (Cancerogenität), NMVOC als Benzol, Staub als SiO₂

Stoff	Menge t	TDL ₀ mg/kg	Äquivalente 10 ⁶ t
Kohlenwasserstoffe	269	20	13
Schwefeldioxid	6700	-	-
Stickoxide	6300	55000	0
Staub	734	-	-
			Summe = 13

Tab. 183. Belastungszahl Mutagenität nach Gebler für Variante E1:
nach Toxizitäten tx''' (Mutagenität), TDL = Toxic Dose Level, NMVOC als
Benzol, NO_x als N₂O

A.2.10 Variante E2

Stoff	Menge t	LD ₀ mg/kg	Äquivalente 10 ⁶ t
NM VOC	627	-	-
Schwefeldioxid	16000	0,98	16327
Stickoxide	15000	0,35	42857
Staub	1711	-	-
			Summe = 59184

Tab. 184. Belastungszahl nach Toxizitäten für Variante E2:
nach Letalen Dosen LD₀

Stoff	Menge t	t _x ' mg/kg.	Äquivalente 10 ⁶ t
NM VOC	627	-	-
Schwefeldioxid	16000	100	160
Stickoxide	15000	1	15000
Staub	1711	-	-
			Summe = 15160

Tab. 185. Belastungszahl akute Toxizität nach Gebler für Variante E2:
nach akuten Toxizitäten tx' (akute Toxizität)

Stoff	Menge t	Risiko 1:1000000	Äquivalente 10 ⁶ m ³
NM VOC	627	II	62700
Schwefeldioxid	16000	I	16000
Stickoxide	15000	-	-
Staub	1711	I	1711
			Summe = 80411

Tab. 186. Belastungszahl cancerogenes Risiko für Variante E2:
nach WHO-Werten /Kühling 90/, cancerogenes Risiko 1: 1000000 bei lebenslanger
Exposition; Klassen geben weiten Streubereich an, Kl. I = 10⁻⁶ µg/m³, Kl. II =
10⁻⁴ µg/m³, Kl. III = 10⁻² µg/m³

Stoff	Menge t	TDL ₀ mg/kg	Äquivalente 10 ⁶ t
NMVOC	627	4500	0
Schwefeldioxid	16000	67	239
Stickoxide	15000	-	-
Staub	1711	90	19
			Summe = 258

Tab. 187. Belastungszahl Cancerogenität nach Gebler für Variante E2:
nach Toxizitäten tx''' (Cancerogenität), NMVOC als Benzol, Staub als SiO₂

Stoff	Menge t	TDL ₀ mg/kg	Äquivalente 10 ⁶ t
Kohlenwasserstoffe	627	20	31
Schwefeldioxid	16000	-	-
Stickoxide	15000	55000	0
Staub	1711	-	-
			Summe = 31

Tab. 188. Belastungszahl Mutagenität nach Gebler für Variante E2:
nach Toxizitäten tx''' (Mutagenität), TDL = Toxic Dose Level, NMVOC als Benzol, NO_x als N₂O

A.3 Nach Ökotoxizitäten

A.3.1 Variante S1

Stoff	Menge t	LD ₀ mg/kg	BCF	PF	Äquivalente 10 ⁶ t
Kohlenwasserstoffe	69	-	-	-	-
Schwefeldioxid	11370	0,98	-	0,010	116
Silizium-Feinststaub	790	-	-	-	-
Methylenchlorid	236	111	2,3	0,04	0
Isopropylalkohol	79	8600	-	-	0
Terpentinöl/Dibutylphtalat	79	-	-	-	-
Fluor	71	-	-	-	-
Verbrennungsprodukte	437	-	-	-	-
Kl.3 Sb, Pb, Cr, Cu etc.	1,309	-	-	-	-
Kl.2 As, Ni, Co, Te etc.	0,258	-	-	-	-
Kl.1 Cd, Hg, Tl	0,0527	-	-	-	-
Stickoxide	10870	0,35	-	0,014	435
Staub	1842	-	-	-	-
					Summe = 581

Tab. 189. Belastungszahl nach Ökotoxizitäten für Variante S1:
nach Letalen Dosen LD₀, BCF = Biokonzentrationsfaktor, PF =
Persistenzfaktor, /RTECS 81, UBA 89, Rippen 90/

Stoff	Menge t	t _x mg/kg	BCF	PF	Äquivalente 10 ⁶ t
Kohlenwasserstoffe	69	20	19	0,0265	2
Schwefeldioxid	11370	10	-	0,002	2
Silizium-Feinststaub	790	10	-	-	79
Methylenchlorid	236	10	2,3	0,049	3
Isopropylalkohol	79	-	-	-	-
Terpentinöl Dibutylphtalat	79	-	-	-	-
Fluor	71	1	-	-	71
Verbrennungsprodukte	437	-	-	-	-
Kl.3 Sb, Pb, Cr, Cu etc.	1,309	10	-	-	-
Kl.2 As, Ni, Co, Te etc.	0,258	10	-	-	-
Kl.1 Cd, Hg, Tl	0,0527	10	200	-	1
Stickoxide	10870	1	-	-	10870
Staub	1842	10	-	-	184
					Summe = 11214

Tab. 190. Belastungszahl Ökotoxizität nach Gebler für Variante S1:
nach Toxizitätsfaktoren tx, BCF = Biokonzentrationsfaktor, PF =
Persistenzfaktor

A.3.2 Variante S2

Stoff	Menge t	LD ₀ mg/kg	BCF	PF	Äquivalente 10 ⁶ t
Kohlenwasserstoffe	68	-	-	-	-
Schwefeldioxid	11555	0,98	-	0,010	118
Terpentinöl	20	-	-	-	-
Kl.3 Sb, Pb, Cr, Cu etc.}	1,327	-	-	-	-
Kl.2 As, Ni, Co, Te etc.}	0,261	-	-	-	-
Kl.1 Cd, Hg, Tl}	0,0535	-	-	-	-
Stickoxide	11600	0,35	-	0,014	464
Staub	2151	-	-	-	-
NMVOC	430	-	-	-	-
					Summe = 582

Tab. 191. Belastungszahl nach Ökotoxizitäten für Variante S2:
nach Letalen Dosen LD₀, BCF = Biokonzentrationsfaktor, PF =
Persistenzfaktor, /RTECS 81, UBA 89, Rippen 90/

Stoff	Menge t	t _x mg/kg	BCF	PF	Äquivalente 10 ⁶ t
Kohlenwasserstoffe	68	20	19	0,0265	2
Schwefeldioxid	11555	10	-	0,002	2
Terpentinöl	20	-	-	-	-
Kl.3 Sb, Pb, Cr, Cu etc.}	1,327	-	-	-	-
Kl.2 As, Ni, Co, Te etc.}	0,261	10	-	-	-
Kl.1 Cd, Hg, Tl}	0,0535	10	-	200	1
Stickoxide	11600	1	-	-	11600
Staub	2151	10	-	-	215
NMVOC	430	20	19	0,0265	11
					Summe = 11831

Tab. 192. Belastungszahl Ökotoxizität nach Gebler für Variante S2:
nach Toxizitätsfaktoren t_x, BCF = Biokonzentrationsfaktor, PF =
Persistenzfaktor

A.3.3 Variante S3

Stoff	Menge t	LD ₀ mg/kg	BCF	PF	Äquivalente 10 ⁶ t
Kohlenwasserstoffe	33	-	-	-	-
Schwefeldioxid	2583	0,98	-	0,010	26
Terpentinöl	20	-	-	-	-
Fluor	3,9	-	-	-	-
Kl.3 Sb, Pb, Cr, Cu etc.}	0,269	-	-	-	-
Kl.2 As, Ni, Co, Te etc.}	0,05	-	-	-	-
Kl.1 Cd, Hg, Tl}	0,01	-	-	-	-
Stickoxide	2455	0,35	-	0,014	98
Staub	543	-	-	-	-
Chlorwasserstoff	5,2	-	-	-	-
NMVOC	124	-	-	-	-
					Summe = 124

Tab. 193. Belastungszahl nach Ökotoxizitäten für Variante S3:
nach Letalen Dosen LD₀, BCF = Biokonzentrationsfaktor, PF =
Persistenzfaktor, /RTECS 81, UBA 89, Rippen 90/

Stoff	Menge t	t _x mg/kg	BCF	PF	Äquivalente 10 ⁶ t
Kohlenwasserstoffe	33	20	19	0,0265	1
Schwefeldioxid	2583	10	-	0,002	1
Terpentinöl	20	-	-	-	-
Fluor	3,9	1	-	-	4
Kl.3 Sb, Pb, Cr, Cu etc.}	0,269	-	-	-	-
Kl.2 As, Ni, Co, Te etc.}	0,05	10	-	-	-
Kl.1 Cd, Hg, Tl}	0,01	10	-	200	0
Stickoxide	2455	1	-	-	2455
Staub	543	10	-	-	54
Chlorwasserstoff	5,2	10	0,0027	-	0
NMVOC	124	20	19	0,0265	3
					Summe = 2508

Tab. 194. Belastungszahl Ökotoxizität nach Gebier für Variante S3:
nach Toxizitätsfaktoren tx, BCF = Biokonzentrationsfaktor, PF =
Persistenzfaktor

A.3.4 Variante S4

Stoff	Menge t	LD ₀ mg/kg	BCF	PF	Äquivalente 10 ⁶ t
Kohlenwasserstoffe	20	-	-	-	-
Schwefeldioxid	2463	0,98	-	0,010	24
Silizium-Feinststaub	557	-	-	-	-
Fluor	72,7	-	-	-	-
Kl.3 Sb, Pb, Cr, Cu etc.)	0,17	-	-	-	-
Kl.2 As, Ni, Co, Te etc.)	0,03	-	-	-	-
Kl.1 Cd, Hg, Tl}	0,007	-	-	-	-
Stickoxide	1902	0,35	-	0,014	76
Staub	221	-	-	-	-
Teer	0,7	-	-	-	-
Aceton	52	24000	-	-	0
Stickstoff/Siliziumtetrafluorid	14,4	-	-	-	-
NM VOC	34	-	-	-	-
Dimethylphthalat	0,2	-	-	-	-
					Summe = 100

Tab. 195. Belastungszahl nach Ökotoxizitäten für Variante S4:
nach Letalen Dosen LD₀, BCF = Biokonzentrationsfaktor, PF =
Persistenzfaktor, /RTECS 81, UBA 89, Rippen 90/

Stoff	Menge t	t _x mg/kg	BCF	PF	Äquivalente 10 ⁶ t
Kohlenwasserstoffe	20	20	19	0,0265	1
Schwefeldioxid	2463	10	-	0,002	0
Silizium-Feinststaub	557	-	-	-	-
Fluor	72,7	1	-	-	73
Kl.3 Sb, Pb, Cr, Cu etc.)	0,17	-	-	-	-
Kl.2 As, Ni, Co, Te etc.)	0,03	10	-	-	-
Kl.1 Cd, Hg, Tl}	0,007	10	200	-	0
Stickoxide	1902	1	-	-	1902
Staub	221	10	-	-	22
Teer	0,7	-	-	-	-
Aceton	52	1000	-	-	0
Stickstoff/Siliziumtetrafluorid	14,4	-	-	-	-
NM VOC	34	20	19	0,0265	1
Dimethylphthalat	0,2	-	-	-	-
					Summe = 1999

Tab. 196. Belastungszahl Ökotoxizität nach Gebler für Variante S4:
nach Toxizitätsfaktoren t_x, BCF = Biokonzentrationsfaktor, PF =
Persistenzfaktor

A.3.5 Variante B1

Stoff	Menge t	LD ₀ mg/kg	BCF	PF	Äquivalente 10 ⁶ t
Kohlenwasserstoffe	181000	-	-	-	-
Schwefeldioxid	12000	0,98	-	0,010	112
Stickoxide	190000	0,35	-	0,014	7600
Staub	11000	-	-	-	-
Kohlenmonoxid	994000	8	-	0,0008	99
					Summe = 7811

Tab. 197. Belastungszahl nach Ökotoxizitäten für Variante B1:
nach Letalen Dosen LD₀, BCF = Biokonzentrationsfaktor, PF =
Persistenzfaktor, /RTECS 81, UBA 89/

Stoff	Menge t	t _x mg/kg	BCF	PF	Äquivalente 10 ⁶ t
Kohlenwasserstoffe	181000	20	19	0,0265	4557
Schwefeldioxid	12000	10	-	0,002	2
Stickoxide	190000	1	-	-	190000
Staub	11000	10	-	-	1100
Kohlenmonoxid	994000	10	-	0,0005	50
					Summe = 195709

Tab. 198. Belastungszahl Ökotoxizität nach Gebler für Variante B1:
nach Toxizitätsfaktoren t_x, BCF = Biokonzentrationsfaktor, PF =
Persistenzfaktor

A.3.6 Variante B2

Stoff	Menge t	LD ₅₀ mg/kg	BCF	PF	Äquivalente 10 ⁶ t
Kohlenwasserstoffe	50000	-	-	-	-
Schwefeldioxid	5200	0,98	-	0,010	53
Stickoxide	44300	0,35	-	0,014	1772
Staub	4300	-	-	-	-
Kohlenmonoxid	226000	8	-	0,0008	23
					Summe = 1848

Tab. 199. Belastungszahl nach Ökotoxizitäten für Variante B2:
nach Letalen Dosen LD₅₀, BCF = Biokonzentrationsfaktor, PF =
Persistenzfaktor, /RTECS 81, UBA 89/

Stoff	Menge t	t _x mg/kg	BCF	PF	Äquivalente 10 ⁶ t
Kohlenwasserstoffe	50000	20	19	0,0265	1259
Schwefeldioxid	5200	10	-	0,002	1
Stickoxide	44300	1	-	-	44300
Staub	4300	10	-	-	430
Kohlenmonoxid	226000	10	-	0,0005	11
					Summe = 46001

Tab. 200. Belastungszahl Ökotoxizität nach Gebler für Variante B2:
nach Toxizitätsfaktoren t_x, BCF = Biokonzentrationsfaktor, PF =
Persistenzfaktor

A.3.7 Variante B3

Stoff	Menge t	LD ₀ mg/kg	BCF	PF	Äquivalente 10 ⁶ t
Kohlenwasserstoffe	26000	-	-	-	-
Schwefeldioxid	4200	0,98	-	0,010	43
Stickoxide	34400	0,35	-	0,014	1376
Staub	1100	-	-	-	-
Kohlenmonoxid	181000	8	-	0,0008	18
					Summe = 1437

Tab. 201. Belastungszahl nach Ökotoxizitäten für Variante B3:
nach Letalen Dosen LD₀, BCF = Biokonzentrationsfaktor, PF =
Persistenzfaktor, /RTECS 81, UBA 89/

Stoff	Menge t	t _x mg/kg	BCF	PF	Äquivalente 10 ⁶ t
Kohlenwasserstoffe	26000	20	19	0,0265	655
Schwefeldioxid	4200	10	-	0,002	1
Stickoxide	34400	1	-	-	34400
Staub	1100	10	-	-	110
Kohlenmonoxid	181000	10	-	0,0005	9
					Summe = 35175

Tab. 202. Belastungszahl Ökotoxizität nach Gebler für Variante B3:
nach Toxizitätsfaktoren tx, BCF = Biokonzentrationsfaktor, PF =
Persistenzfaktor

A.3.8 Variante D

Stoff	Menge t	LD ₀ mg/kg	BCF	PF	Äquivalente 10 ⁵ t
Kohlenwasserstoffe	13000	-	-	-	-
Schwefeldioxid	19000	0,98	-	0,010	194
Stickoxide	60000	0,35	-	0,014	2400
Staub	1100	-	-	-	-
Kohlenmonoxid	74000	8	-	0,0008	7
					Summe = 2601

Tab. 203. Belastungszahl nach Ökotoxizitäten für Variante D:
nach Letalen Dosen LD₀, BCF = Biokonzentrationsfaktor, PF =
Persistenzfaktor, /RTECS 81, UBA 89/

Stoff	Menge t	t _x mg/kg	BCF	PF	Äquivalente 10 ⁶ t
Kohlenwasserstoffe	13000	20	19	0,0265	327
Schwefeldioxid	19000	10	-	0,002	19
Stickoxide	60000	1	-	-	60000
Staub	1100	10	-	-	110
Kohlenmonoxid	74000	10	-	0,0005	4
					Summe = 60460

Tab. 204. Belastungszahl Ökotoxizität nach Gebler für Variante D:
nach Toxizitätsfaktoren t_x, BCF = Biokonzentrationsfaktor, PF =
Persistenzfaktor

A.3.9 Variante E1

Stoff	Menge t	LD ₀ mg/kg	BCF	PF	Äquivalente 10 ⁶ t
NM VOC	269	-	-	-	-
Schwefeldioxid	6700	0,98	-	0,010	68
Stickoxide	6300	0,35	-	0,014	252
Staub	734	-	-	-	-
					Summe = 320

Tab. 205. Belastungszahl nach Ökotoxizitäten für Variante E1:
nach Letalen Dosen LD₀, BCF = Biokonzentrationsfaktor, PF =
Persistenzfaktor, /RTECS 81, UBA 89/

Stoff	Menge t	t _x mg/kg	BCF	PF	Äquivalente 10 ⁶ t
Kohlenwasserstoffe	269	20	19	0,0265	7
Schwefeldioxid	6300	10	-	0,002	1
Stickoxide	6300	1	-	-	6300
Staub	734	10	-	-	73
					Summe = 6381

Tab. 206. Belastungszahl Ökotoxizität nach Gebler für Variante E1:
nach Toxizitätsfaktoren tx, BCF = Biokonzentrationsfaktor, PF =
Persistenzfaktor

A.3.10 Variante E2

Stoff	Menge t	LD ₀ mg/kg	BCF	PF	Äquivalente 10 ⁶ t
NMVOG	627	-	-	-	-
Schwefeldioxid	16000	0,98	-	0,010	163
Stickoxide	15000	0,35	-	0,014	600
Staub	1711	-	-	-	-
					Summe = 763

Tab. 207. Belastungszahl nach Ökotoxizitäten für Variante E2:
nach Letalen Dosen LD₀, BCF = Biokonzentrationsfaktor, PF =
Persistenzfaktor, /RTECS 81, UBA 89/

Stoff	Menge t	t _x mg/kg	BCF	PF	Äquivalente 10 ⁶ t
Kohlenwasserstoffe	627	20	19	0,0265	16
Schwefeldioxid	16000	10	-	0,002	3
Stickoxide	15000	1	-	-	15000
Staub	1711	10	-	-	171
					Summe = 15190

Tab. 208. Belastungszahl Ökotoxizität nach Gebler für Variante E2:
nach Toxizitätsfaktoren tx, BCF = Biokonzentrationsfaktor, PF =
Persistenzfaktor

Anhang B. Vergleich der Alternativen anhand der Belastungszahlen

- Vier konventionelle PKW-Flotten:

Variante B1	KFZ-Bestand 1987
Variante B2	Trend-Szenario
Variante B3	Reduktions-Szenario
Variante D	Öko-Polo

- Zwei E-PKW-Typen und Deckung des Strombedarfs über den Kraftwerk-Mix allein:

Variante E1	"Mittelklasse" (35 kWh/100 Pkm)
Variante E2	"Kleinwagen" (15 kWh/100 Pkm)

- Zwei E-PKW-Typen und Deckung des Strombedarfs über "Solartankstellen" ("STS") mit vier verschiedenen Modultypen und Kraftwerk-Mix:

Variante S1	"Mittelklasse" (35 kWh/100 Pkm) Multikristalline Module Konventionelle Aufständerung
Variante S2	"Mittelklasse" (35 kWh/100 Pkm) Amorphe Module Konventionelle Aufständerung
Variante S3	"Kleinwagen" (15 kWh/100 Pkm) Amorphe Module Seilnetz-Aufständerung
Variante S4	"Kleinwagen" (15 kWh/100 Pkm) Monokristalline MIS-I-Module Seilnetz-Aufständerung

B.1 Nach Grenz- und Richtwerten

Alternative	NO _x	SO ₂	org. Verb.	Staub	Summe
Variante S1	362300	379000	83100	37600	869300
Variante S2	386700	385200	45000	30700	854200
Variante S3	81800	86100	14400	7800	191500
Variante S4	63400	82100	8600	11100	166900
Variante B1	6333300	400000	12100	157100	6902500
Variante B2	1476700	173300	3300	61400	1714700
Variante B3	1146700	140000	1700	15700	1272100
Variante D	2000000	633300	900	2900	2637000
Variante E1	210000	223300	< 50	1000	434300
Variante E2	500000	533300	< 50	24400	1057700

Tab. 209. Vergleich der Belastungszahlen Luft BUWAL:
in 10⁹ m³, sonstige < 1%

Alternative	NO _x	SO ₂	Fluor.	Staub	Summe
Variante S1	108700	37900	700	8800	156500
Variante S2	116000	38500	-	7200	162200
Variante S3	24600	8600	< 50	1800	35100
Variante S4	19000	8200	700	2600	30600
Variante B1	1900000	40000	-	36700	1976700
Variante B2	443000	17300	-	14300	474700
Variante B3	340000	14000	-	3700	383700
Variante D	600000	63300	-	700	664000
Variante E1	63000	22300	-	2400	87700
Variante E2	150000	53300	-	5700	209000

Tab. 210. Vergleich der Belastungszahlen Luft VDI, Mensch, 24-h-Mittelwerte:
in 10⁹ m³, sonstige < 1%, org. Verb. ohne Grenzwerte

Alternative	NO _x	SO ₂	Fluor.	Summe
Variante S1	1087000	379000	355000	1821000
Variante S2	1160000	385000	-	1545000
Variante S3	246000	86000	20000	352000
Variante S4	190000	82000	363500	635600
Variante B1	19000000	400000	-	19400000
Variante B2	4430000	173000	-	4603000
Variante B3	3400000	140000	-	3540000
Variante D	6000000	633000	-	6633000
Variante E1	630000	223000	-	853000
Variante E2	1500000	533000	-	2033000

Tab. 211. Vergleich der Belastungszahlen Luft nach Vorsorgestandards:
in 10⁹ m³, sonstige < 1%, Akzeptor Vegetation

Alternative	Feststoff	Fluoride	Summe
Variante S1	20	15,8	35,8
Variante S2	21	-	-
Variante S3	4	-	-
Variante S4	3	2,6	5,6
Variante B1	-	-	-
Variante B2	-	-	-
Variante B3	-	-	-
Variante D	-	-	-
Variante E1	-	-	-
Variante E2	-	-	-

Tab. 212. Vergleich der Belastungszahlen Wasser nach BUWAL:
in 10^6 m^3 ,

Alternative	Tenside	Fluoride	Summe
Variante S1	-	48	48
Variante S2	23	-	23
Variante S3	22	-	22
Variante S4	87	18	105
Variante B1	-	-	-
Variante B2	-	-	-
Variante B3	-	-	-
Variante D	-	-	-
Variante E1	-	-	-
Variante E2	-	-	-

Tab. 213. Vergleich der Belastungszahlen Wasser nach Trinkwasserverordnung:
in 10^6 m^3 , Reinigungsmittel als 10% Tensid

Alternative	Deponievolumen
Variante S1	812700
Variante S2	874500
Variante S3	238900
Variante S4	90600
Variante B1	-
Variante B2	-
Variante B3	-
Variante D	-
Variante E1	442000
Variante E2	1036000

Tab. 214. Vergleich der Deponievolumina, ohne Wiederverwertungsraten:
in m^3 , Dichte = 1

B.2 Nach Toxizitäten

Alternative	NO _x	SO ₂	CO	Summe
Variante S1	31100	11600		42700
Variante S2	33100	11800		44900
Variante S3	7000	2600		9600
Variante S4	5400	2500		7900
Variante B1	542900	12200	124200	679400
Variante B2	126600	5300	28250	160100
Variante B3	98300	4300	22600	125200
Variante D	171400	19400	9250	200100
Variante E1	18000	6800		24800
Variante E2	42900	16300		59200

Tab. 215. Vergleich der Belastungszahlen nach Toxizitäten LD₀₁:
in 10⁶ t

Alternative	NO _x	SO ₂	CO	Summe
Variante S1	10900	100		11100
Variante S2	11600	100		11700
Variante S3	2500	< 50		2500
Variante S4	1900	< 50		2000
Variante B1	190000	100	99400	289500
Variante B2	44300	100	22600	67000
Variante B3	34400	< 50	18100	52500
Variante D	60000	200	7400	67600
Variante E1	6300	100		6400
Variante E2	15000	200		15200

Tab. 216. Vergleich der Belastungszahlen nach Toxizitäten (Gebler):
in 10⁶ t, nach Gebler, Sonstige v.a. Fluorverbindungen

Alternative	org. Verb.	SO ₂	Staub	Summe
Variante S1	50600	11400	2600	64600
Variante S2	49800	11600	2200	63500
Variante S3	12400	2600	500	15600
Variante S4	12400	2500	800	15600
Variante B1	18100000	12000	11000	18123000
Variante B2	5000000	5200	4300	5009500
Variante B3	2600000	4200	1100	2605300
Variante D	1300000	19000	200	1319200
Variante E1	26900	6700	700	34300
Variante E2	62700	16000	1700	80400

Tab. 217. Vergleich der Belastungszahlen nach cancerogenem Risiko:
in 10⁶ m³, lebenslange Exposition

Alternative	org. Verb.	SO ₂	Staub	Summe
Variante S1	-	170	30	200
Variante S2	-	170	20	200
Variante S3	-	40	10	50
Variante S4	-	40	10	50
Variante B1	40	180	120	340
Variante B2	10	80	50	140
Variante B3	10	60	10	80
Variante D	< 5	280	< 5	290
Variante E1	-	100	10	110
Variante E2	-	240	20	260

Tab. 218. Vergleich der Belastungszahlen Cancerogenität nach Gebler:
in 10⁶ t

Alternative	org. Verb.	NO _x	Staub	Summe
Variante S1	25	-	-	25
Variante S2	25	-	-	25
Variante S3	10	-	-	10
Variante S4	< 5	0	-	5
Variante B1	9050	5	120	9180
Variante B2	2500	0	50	2550
Variante B3	1300	0	0	1300
Variante D	650	0	0	650
Variante E1	15	0	0	15
Variante E2	30	0	0	30

Tab. 219. Vergleich der Belastungszahlen Mutagenität nach Gebler:
in 10⁶ t

B.3 Nach Ökotoxizität

Alternative	NO _x	SO ₂	Summe
Variante S1	430	120	550
Variante S2	460	120	580
Variante S3	100	30	130
Variante S4	80	20	100
Variante B1	7600	110	7800
Variante B2	1800	50	1850
Variante B3	1380	40	1440
Variante D	2400	190	2600
Variante E1	250	70	320
Variante E2	600	160	760

Tab. 220. Vergleich der Belastungszahlen Ökotoxizität:
in 10⁶ t

Alternative	NO _x	Staub	Summe
Variante S1	10870	180	11210
Variante S2	11600	220	11830
Variante S3	2460	50	2510
Variante S4	1900	20	2000
Variante B1	190000	1100	195700
Variante B2	44300	430	46000
Variante B3	34400	110	35200
Variante D	60000	110	60500
Variante E1	6300	70	6400
Variante E2	15000	170	15200

Tab. 221. Vergleich der Belastungszahlen Ökotoxizität nach Gebler:
in 10⁶ t

Anhang C. Abkürzungsverzeichnis

AFG	Analyse der Folgen auf die Gesundheit des Menschen
AFU	Analyse der Folgen auf die Umwelt
B	Biomassenkonzentration
BCF	Biokonzentrationsfaktor
BMFT	Bundesministerium für Forschung und Technologie
BRD	Bundesrepublik Deutschland
BOD	Biological oxygen demand (s. BSB)
BSB ₅	Biologischer Sauerstoffbedarf nach 5 Tagen
BSB ₂₈	Biologischer Sauerstoffbedarf nach 28 Tagen
BUA	Beratergremium für umweltrelevante Altstoffe
BUWAL	Schweizerische Bundesanstalt für Wasser, Abfall und Luft
DAB	Deutsches Arzneimittelbuch
DNA	Desoxyribonucleinsäure, Träger der Erbsubstanz
DOC	Dissolved organic carbon (gelöster organischer Kohlenstoff)
DVGW	Deutscher Verein von Gas- und Wasserfachmännern e.V.
EC	Effect Concentration; Konzentration, bei der Species aus einer Grundgesamtheit Wirkung zeigen
EPA	Environmental Protection Agency (Umweltbehörde der USA)
FCKW	Fluorchlorkohlenwasserstoffe
GKSS	Forschungszentrum Geesthacht GmbH
GSF	Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit GmbH
k	Geschwindigkeitskonstante des Abbaus von Stoffen
K _H	Henry-Konstante
K _M	Michaeliskonstante bei halbmaximalem Stoffumsatz
K _{oc}	Octanol-/organischer Kohlenstoff-Koeffizient
K _{ow}	Octanol-/Wasserkoeffizient
L	Wasserlöslichkeit
LC	Letale Konzentration
LD ₀	Letale Dosis, bei der die erste Species aus einer Gesamtheit stirbt
LD ₅₀	Letale Dosis, bei der 50 % der Species aus einer Gesamtheit sterben
LRV	Luftreinhalteverordnung
MVA	Müllverbrennungsanlage
NEL	No effect level
NOEL	No observed effect level
NREL	National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado, USA
NRW	Nordrhein-Westfalen
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development

P	Partialdruck
Pa	Pascal
PKA	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
QSAR	Quantitative Structure Activity Relations
S	Substratkonzentration
SCAS	Semi Continuous Activated Sludge Test
SCE	Sister chromatid exchange
SLRL	Sex-linked recessive lethals
SMART	Somatic mutation and recombination
t	time
TCDD	Tetrachlorodibenzodioxin (Dioxin)
TS	Trockensubstanz
UBA	Umweltbundesamt (Berlin)
UDS	Unscheduled DNA synthesis
UP	Umweltvorsorgeprüfung
UsA	Umweltschutzaudit
US-WQC	United States Water Quality Criteria
UVP	Umweltverträglichkeitsprüfung
UVPVwV	Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Ausführung des Gesetzes über die Umweltverträglichkeitsprüfung
v	Geschwindigkeit
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VSBO	Verordnung über Schadstoffe im Boden (Schweiz)
WGK	Wassergefährdungsklasse
WHO	World Health Organisation

Anhang D. Erläuterung der Begriffe

A

ADI-Wert	Acceptable Daily Intake deutsch DTA: Duldbare Tägliche Aufnahme Der ADI- Wert bezeichnet die nach dem gegenwärtigen Wissensstand annehmbare Dosis einer Chemikalie, die auch bei täglicher lebenslanger Aufnahme durch den Menschen keine Schädigung hervorrufen soll. Er dient zur Beurteilung des gesundheitlichen Risikos durch Fremdstoffe in Nahrungsmitteln.
ADNR	Verordnung über den Transport gefährlicher Güter auf dem Rhein (gilt für alle Wasserstraßen ausgenommen die Donau).
ADR (D-GGVS)	Internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße (Gefahrgutverordnung Straße).
Abbau	chemische Verbindungen werden durch physikalische (Licht, Wärme u.a.), chemische (Oxidation, Hydrolyse u.a.) oder biologische Prozesse (Mikroorganismen u.a.) zu einfacheren Molekülen abgebaut, die bis auf wenige Ausnahmen keine schädlichen Einflüsse auf die Umwelt mehr haben. Die Geschwindigkeit des Abbaus wird durch die Halbwertszeit charakterisiert. Bei geringer Abbaubarkeit einer Verbindung spricht man von → Persistenz.
abbaubar (biologisch)	eine (vom Standpunkt des Umweltschutzes positive) Eigenschaft von Umweltchemikalien, durch natürlich vorkommende Enzyme in einfache natürliche Verbindungen (H_2O , CO_2 usw.) überzugehen.
Abbaugrad	Zustand der biologischen oder chemischen Zersetzung einer organischen Verbindung
abiotisch	ohne Mitwirkung von Organismen. So spricht man z.B. von der abiotischen Umwandlung von Umweltchemikalien oder von → abiotischen Umweltfaktoren.
abiotische Umweltfaktoren	Umwelteinwirkungen ("Faktoren") der unbelebten Natur auf Organismen, z.B. Temperatureinwirkungen, Ionenkonzentration in Wasser oder im Boden. Vgl. ferner → biotische Faktoren
Absorption	die Aufnahme und das Auflösen von Gasen und Dämpfen durch chemische Reaktion oder Lösung.
Absorptionskoeffizient	die Gasmenge, die bei $0^\circ C$ und einem Druck von 760 Torr in 1 ml Flüssigkeit gelöst wird.

Acroosteolyse	fortschreitende Auflösung des Knochengewebes der Akren (endende Körperteile, z.B.: Nase, Kinn, Finger, Zehen).
Adhäsion	Anziehung
Adsorption	Bindung von Gasen, Dämpfen oder gelösten Stoffen an der Oberfläche fester Körper durch Adhäsion.
Ästuar	trichterförmige Flußmündung, die durch einen starken und regelmäßigen Wechsel zwischen Meerwasser und Süßwasser gekennzeichnet ist (Tidenhub).
Aerosol	in der Luft feinst verteilte und schwebende Teilchen mit einem Durchmesser bis ca. 10 μm .
Aggregation	die Anhäufung (das Aggregat) oder aber auch der Vorgang der Zusammenlagerung (das Aggregieren) von Atomen, Molekülen, Ionen oder Kolloidteilchen zu größeren Verbänden (Chemie). eine Zusammenlagerung von Zellen, ohne daß die Individualität verlorengeht (Biologie).
Akkumulation	Anreicherung der Vorgang und die Erscheinung, daß Substanzen (Elemente, Isotope, organische Schadstoffe) in einem bestimmten Kompartiment eines Ökosystems in höherer Konzentration auftreten als in anderen. Soweit die Anreicherung in Organismen gemeint ist, spricht man von $\rightarrow$ Bioakkumulation.
Akute Toxizität	Toxizität nach einmaliger Aufnahme, Wirkung innerhalb des Untersuchungszeitraums. Wird für orale, dermale und inhalative Applikationen angegeben. Bei oraler und dermaler Aufnahme erfolgen die Angaben in mg/Körpergewicht. Die inhalative Aufnahme wird als Konzentration der Testsubstanz in der Atemluft bestimmt (mg/m^3 oder in ppm). Testdauer 1-4 Tage
Allergie	heftige Reaktion eines Organismus auf die wiederholte Zufuhr eines Stoffes, vor allem durch Histamin hervorgerufen.
Ames Test	Test auf Punktmutation bei Bakterien Ein nach B.N. Ames benanntes Verfahren, bei dem die erbschädigende (mutagene) Wirkung von Chemikalien auf Bakterien erfaßt wird.
Amoebe	Einzeller, der die Fähigkeit besitzt, wurzelähnliche und formveränderliche Scheinfüßchen auszubilden

anaerob	Bezeichnung für Organismen, die zum Leben keinen freien Sauerstoff benötigen und für chemische Reaktionsweisen, die unter Ausschluß von Sauerstoff ablaufen
anaphylaktisch	stark ausgeprägte allergische Reaktion, die bis zum lebensbedrohlichen anaphylaktischen Schock, Kreislaufkollaps und Tod durch Erstickten führen kann.
Anemometer	Windgeschwindigkeitsmesser
antagonistisch	gegeneinander wirkend Bei Schadstoffen, sich in der Schadwirkung aufhebend.
anthropogen	durch den Menschen beeinflusst, verursacht
Applikation	Auf- oder Einbringen eines Stoffes
Assimilation	Aufnahme von Nahrungsstoffen in den Organismus durch Oxidation und deren Einbau in die lebendige Substanz oder Struktur des Körpers. In der Botanik versteht man darunter den Aufbau organischer Verbindungen aus anorganischen Grundsubstanzen.
Atmosphäre	Lufthülle der Erde Relevant sind insbesondere → Troposphäre und → Stratosphäre.
Austauscharme Wetterlage	gekennzeichnet durch eine Reihe von Parametern wie z.B. geringe Windgeschwindigkeit und stabile Schichtung der Atmosphäre, die durch langsamen Austausch der Luftmassen zu einer Anreicherung von Schadstoffen führt. Sie herrscht, wenn eine Inversion längere Zeit anhält. → Inversion
autotroph	Bezeichnung für Organismen, die zum Aufbau ihrer körpereigenen Substanzen nur anorganische Ausgangsstoffe benötigen.
B	
BCF	→ Biokonzentrationsfaktor
Bildungsenthalpie	→ Bildungswärme
Bildungswärme	die Bildungswärme bzw. Bildungsenthalpie einer Verbindung ist die Reaktionsenthalpie der Reaktion, die zur Bildung dieser Verbindung aus den Elementen führt. Beispielsweise beträgt die Bildungsenthalpie von Kohlendioxid -94 kcal/mol, d.h. bei der Bildung von 1 mol Kohlendioxid aus den Elementen Kohlenstoff und Sauerstoff wird eine Wärmemenge von 94 kcal freigesetzt.

Bioakkumulation biologische Anreicherung
Bezeichnung für die Erscheinung, daß gewisse Isotope, Elemente oder Verbindungen in Organismen in höheren Konzentrationen vorliegen, als im umgebenden Umweltkompartiment oder der Nahrung.

Bioakkumulationsfaktor eine dimensionslose Größe zur Charakterisierung der (Schad-) Stoffanreicherung in einem Organismus.
Er ist definiert als die Konzentration einer Chemikalie in einem Medium oder einem Lebewesen dividiert durch die Konzentration in einem Bezugs- oder Referenzkompartiment (z.B. umgebendes Wasser oder Nahrung).

Biodegradation Abbau von Substanzen in niedermolekulare Stoffe oder anorganische Grundstoffe unter Mitwirkung von Organismen (meist Mikroorganismen)

Bioindikator Lebewesen, das eine spezielle Antwort (Reaktion) auf einen Umweltfaktor gibt, oder durch sein Vorhandensein auf bestimmte Umweltbedingungen hinweist.

Biologische Halbwertszeit Halbwertszeit einer Substanz in einem Organismus, die durch Umwandlung oder Ausscheidung bedingt ist.
→ Halbwertszeit

Biokonzentrationsfaktor BCF
Der BCF gibt das Verhältnis der Konzentration eines Stoffes im untersuchten Organismus zur Konzentration des umgebenden Mediums im Gleichgewichtszustand an. Nach Art der angewandten Testsysteme (Fließwassersystem, stationäres System) wird zwischen $BCF_{fl.}$ und $BCF_{stat.}$ unterschieden.

BSB biochemischer oder biologischer Sauerstoffbedarf
Der BSB_n ist die Menge O_2 , die von Mikroorganismen in n Tagen verbraucht wird, um die in einem Liter Wasser biochemisch verwendbaren Stoffe abzubauen. Er wird in der Regel nach 5 Tagen ($n = 5$) bestimmt (BSB_5)

C

CAS-Nr. Stoffnummer entsprechend der Systematik des Chemical Abstract Service. Die Zahlen ergeben sich hierbei aus der zeitlichen Zitierung in den Chemical Abstract (CA).

CSB chemischer Sauerstoffbedarf
Der CSB-Wert bezeichnet die Menge O_2 , die zur Oxidation der im Wasser enthaltenen Stoffen verbraucht wird.
Im Ablauf einer Kläranlage darf dieser max. 120 mg/l betragen.

Cancerogenität	Eigenschaft von Stoffen, bösartige Tumore (Krebs) zu verursachen
Carcinogenität	→ Cancerogenität
Chromatid	eine Hälfte eines Chromosoms (DNA-Doppelhelix-Strang), genetisch identisch mit der zweiten Hälfte (Schwesterchromatid).
Chromosom	besteht aus DNA-Fäden und Proteinen, die ihrerseits sog. Nucleone bilden. Diese sind die Untereinheiten, aus denen die Chromosomen aufgebaut sind.
Chromosomenanomalie	jede Abweichung der Chromosomen in Bau, Größe und Anzahl von der Norm
Chronische Toxizität	Toxizität bei wiederholter Gabe bzw. Aufnahme von Stoffen.
cocancerogen	Eigenschaft, nicht selbst cancerogen zu sein, aber mit cancerogenen Faktoren (meist verstärkend) zu wirken oder die cancerogene Funktion erst zu ermöglichen
D	
DNA	Desoxyribonucleinsäure Träger der Erbinformationen, ein Makromolekül, bestehend aus Desoxyribose, Phosphorsäure und Basen. Die DNA enthält die vier verschiedenen Basen Adenin, Guanin, Cytosin und Thymin. Die DNA enthält die genetischen Informationen der Zelle.
DOC	Dissolved Organic Carbon Gelöster anorganischer Kohlenstoff
DTA-Wert	→ ADI-Wert
Dampfdruck	der Dampfdruck dient als Maß für die Anzahl der Moleküle, die die Oberfläche eines Stoffes verlassen. Die Höhe des Dampfdrucks ist abhängig von der Temperatur und vom Umgebungsdruck. Steigt die Temperatur so weit an, daß der Dampfdruck so groß wie der Umgebungsdruck wird, beginnt der Stoff zu sied.
Deletion	Verlust von DNA. Dieser kann geringfügig sein
Deposition	das Ausfallen von Stoffen aus der Atmosphäre aufgrund der Gravitation (trockene Deposition). das Ausfallen von Stoffen zusammen mit Niederschlägen inklusive Nebel, Tau, aufliegenden Wolken (nasse Deposition).

Desorption	Übergang sorbierter Substanzen in Lösungen oder in die Gasphase sowie die Freisetzung von Stoffen aus einem Feststoff (s.a. Sorption)
dermal	die Haut betreffend
Dichte	die Dichte eines Stoffes ergibt sich aus dem Verhältnis seiner Masse zu seinem Volumen. Wasser hat die Dichte 1000 kg/m³ bzw. 1 g/cm³ (bei 4°C). Die Dichte ist temperaturabhängig, so daß die Temperatur mit angegeben werden muß. Im allgemeinen wird bei 20°C gemessen.
Diffusion	unter Diffusion versteht man einen Stoffaustausch durch Wandern von Atomen/Molekülen in Kristallgittern, Flüssigkeiten und Gasen.
Diffusionskategorie	die 6 Klassen A-F sind durch unterschiedlichen Temperaturverlauf vom Boden zur Höhe gekennzeichnet, wobei A und B eine labile Schichtung mit Temperaturabnahme > 1°C pro 100 m, E und F eine stabile Schichtung < 1°C pro 100 m Temperaturgradient bzw. bei Inversion eine Temperaturzunahme mit der Höhe angibt. die Kategorien beschreiben die Verdünnungseffektivität bei den einzelnen Wetterlagen. → Inversion
Diskussionswerte	aufzeigende Standards, die sich noch in der wissenschaftlichen Diskussion befinden.
Dissoziationskonstante	unter Dissoziation versteht man die Aufspaltung eines Moleküls in zwei oder mehrere Moleküle, Atome oder Ionen. Die Dissoziationskonstante K_D ist definiert durch den Quotienten aus dem Produkt der Konzentrationen der dissoziierten Anteile und der Konzentration des undissoziierten Moleküls.

$$k_D = \frac{C_{A^-} \cdot C_{B^-}}{C_{AB}}$$

E

ED 50

Dosis bei der 50% der Individuen eines Kollektivs eine Wirkung zeigen

EG-Nr.

Die EG-Nummer dient als ein Ordnungs- und Kennzeichnungskriterium im Anhang VI der Verordnung über gefährliche Stoffe (GefStoffV) vom 26.8.1986. Die Numerierung wurde durch die "Richtlinie Nr. 76/907/EWG vom 14. Juli 1976 zur Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften für die Einstufung, Verpackung und Kennzeichnung gefährlicher Stoffe an den technischen Fortschritt" der Kommission der Europäischen Gemeinschaften festgelegt. Sie erfolgt durch eine Zeichenfolge des Typs ABC-RST-VW-Y. Dabei bedeuten:

ABC Ordnungszahl des charakteristischen chemischen Elementes mit einer oder zwei vorangestellten Nullen bei solchen Zahlen, die weniger als drei Ziffern besitzen, oder konventionelle Zahl der für die organischen Stoffe aufgestellten Ordnung.

RST laufende Nummer der Verbindungen des unter ABC aufgeführten Elementes.

VW Form des durch RST definierten Stoffes, in der er hergestellt, in der Produktion anfällt oder in Verkehr gebracht wird.

Y Kontrollziffer der gesamten vorhergehenden Sequenz.

Elektrophorese

Wanderung geladener Teilchen im elektrischen Feld; sie dient der Trennung und Analyse von vorwiegend kolloidalen und makromolekularen Stoffgemischen, hier: von Einzelzellen

Emission

Abgabe von luftverunreinigenden Stoffen oder Energien in die Atmosphäre.

erheblich

→ Umwelterheblichkeit

epigenetisch

Eigenschaft eines Stoffes, die Häufigkeit des Auftretens von Cancerogenität, Mutagenität oder Teratogenität zu erhöhen

Explosionsgrenzen in Luft die selbständige Verbrennung von Brennstoff / Luft-Gemischen ist nur innerhalb gewisser Konzentrationsbereiche möglich. Diese werden in zwei Meßgrößen angegeben:

(1) in Volumenprozent, gemessen bei 20°C oder Sättigungstemperatur,

(2) in g/m³, bezogen auf einen Ausgangszustand des Gemisches von 1013 hPa und 20°C.

Exposition

äußere Bedingungen, denen Organismen oder Materialien ausgesetzt sind. Häufig verwendet bei Belastung durch Schadstoffe und angegeben in ppm.

Expositionsanalyse

Teilcharakterisierung eines Stoffes oder einer Einwirkung zur Bestimmung der Umweltgefährlichkeit.

Die Höhe der Exposition setzt sich zusammen aus einwirkender Stoffmenge und der Expositionszeit; Zielobjekte der Exposition sind z.B. Individuen, Populationen oder auch andere Systeme.

In die Exposition gehen ein Menge, zeitlicher Verlauf des Eintrags, Verweildauer, Abbaubarkeit und Akkumulierbarkeit am Zielorganismus bzw. -ort.

F**Flammpunkt**

diejenige Temperatur, bei der sich die über dem Stoff gebildeten Dampf/Luft-Gemische durch eine Zündquelle entzünden lassen. Es entsteht eine kleine Verpuffung, ohne daß der Stoff weiterbrennt. Die bei dieser Temperatur gebildeten Dampfkonzentrationen in Luft entsprechen der unteren Explosionsgrenze. Die Entflammungstemperatur ist abhängig vom Luft- bzw. Umgebungsdruck, da bei niedrigerem Druck raschere Verdampfung stattfindet als bei höherem Druck. Schon geringe Verunreinigungen können den Flammpunkt unter Umständen beträchtlich verschieben.

G**Gen**

Träger der Information für ein bestimmtes Merkmal. Es ist durch einen bestimmten Abschnitt des DNA-Moleküls repräsentiert und durch die Reihenfolge der Basen im DNA-Strang bestimmt.

Genotoxizität

Fähigkeit cancerogene, mutagene oder teratogene Wirkungen durch Veränderung oder Beeinflussung von Genen hervorrufen.

Geoakkumulation

Fähigkeit einer Substanz, sich während einer bestimmten Zeitspanne in einer unbelebten Komponente des Ökosystems in steigender Konzentration anzureichern.

Geosphäre

sie ist das ranghöchste Ökosystem, in dem alle lebenden Systeme (Biosphäre) und abiotischen Faktoren zusammengefaßt sind.

Grenzwerte

verbindlich festgelegte Standards aus Gesetzen.

H**Halbwertszeit**

die Zeit, in der die ursprüngliche Konzentration eines Stoffes auf die Hälfte abgesunken ist.

Henry-Konstante

die Henry-Konstante beschreibt die Gleichgewichtsverteilung einer Substanz zwischen ihrer wässrigen Lösung und dem zugehörigen Gasraum im Gleichgewichtszustand. In der dimensionslosen Form ist sie identisch mit dem Reziprokwert der → Ostwald'schen Löslichkeit.

$$H = \frac{C_{\text{Gasraum}}}{C_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{1}{\alpha'}$$

mit

C_{Gasraum} Konzentration des Stoffes im Gasraum über der wässrigen Lösung

$C_{\text{H}_2\text{O}}$ Konzentration des Stoffes in der wässrigen Lösung.

α' Ostwald'sche Löslichkeit

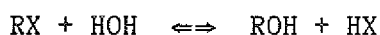
Hormon

Botenstoff bzw. chemischer Signalstoff, der in geringer Konzentration auf die Zellen ihrer Erfolgsorgane wirkt und dort Reaktionen hervorruft.

Hydrolyse

unter Hydrolyse versteht man die Reaktion bzw. Spaltung chemischer Verbindungen durch Wasser.

Die Reaktion wird allgemein beschrieben durch die Reaktionsgleichung



Damit ist die Hydrolyse die Umkehrreaktion der Neutralisation.

Die Geschwindigkeit dieser Reaktion in neutralem Wasser wird nach nachfolgender Gleichung durch die Geschwindigkeitskonstante K_k beschrieben:

$$-\frac{d[\text{RX}]}{dt} = K_k[\text{RX}]$$

wobei $[\text{RX}]$ die Konzentration des Stoffes RX bedeutet.

Hydrosphäre

Wasserhülle der Erde

Relevant sind insbesondere Fließgewässer, Stillwasser, Meer, Grundwasser.

I

IDMG(D-GGV-See)

internationaler Code für die Beförderung von gefährlichen Gütern mit Seeschiffen (Gefahrgutverordnung See).

INFUCHS-Nr.	Nummer eines Stoffes im Informationssystem für Umweltchemikalien, Chemieanlagen und Störfälle (INFUCHS) des Umweltbundesamtes, Berlin
in vitro	außerhalb des Organismus, in einer künstlichen Umgebung
in vivo	im lebenden und intakten Organismus
Inhalation	Aufnahme über den Atmungsweg
Intermittierend	mit Unterbrechung auftretend.
intraperitoneal	in die Bauchhöhle einbringen.
intravenös	in den Blutkreislauf einbringen
Inversion	die normale Abnahme der Temperatur mit der Höhe in der Troposphäre ist in das Gegenteil, in eine Zunahme umgekehrt. Eine Inversion unterbindet vertikale Aufwärtsbewegungen von Luftströmungen und bedingt eine extreme Stabilität der Schichtung in der Atmosphäre. → Atmosphäre → Troposphäre
Ionisierungsenergie	werden ein oder mehrere Elektronen aus dem Atomverband entfernt oder zugefügt, entsteht ein Ion. Die zur Ionisierung erforderliche Energie wird Ionisierungsenergie genannt und kann als ein Maß für die Reaktivität eines Stoffes angesehen werden.
Isomer	unter Isomerie versteht man die Erscheinung, daß Moleküle mit gleicher Summenformel, jedoch verschiedener Struktur oder verschiedener räumlicher Anordnung existieren. Ihre chemischen und physikalischen Eigenschaften zeigen mehr oder weniger große Unterschiede.
K	
K_{oc}	Octanol-/anorganischer Kohlenstoff-Verteilungskoeffizient
K_{ow}	Octanol-/Wasser-Verteilungskoeffizient Gibt die Verteilung zwischen den beiden Phasen an.
Kemler-Zahl	Gefahrenkennzahl In den internationalen Vorschriften wird festgelegt welche Güter als gefährlich anzusehen sind. Geregelt ist auch die Kennzeichnungspflicht beim Transport. Tankfahrzeuge und Trägerfahrzeuge von Aufsetztanks müssen z.B. mit den vorgeschriebenen Warntafeln versehen sein, auf denen die vorgesehenen Kennzeichnungsnummern angegeben sein müssen. Die obere Reihe enthält die Kemlerzahl zur Kennzeichnung der

Gefahr, die untere die UN-Nummer zur Kennzeichnung des Stoffes.

Die Ziffern der Kemlerzahl haben folgende Bedeutung:

1. Ziffer (Hauptgefahr)

- 0
- 1
- 2 Gas
- 3 Entzündbarer flüssiger Stoff
- 4 Entzündbarer fester Stoff
- 5 Entzündend (oxidierend) wirkender Stoff oder organisches Peroxid
- 6 Giftiger Stoff
- 8 Ätzender Stoff
- 9

2. und 3. Ziffer (zusätzliche Gefahren)

- 0 Ohne Bedeutung
- 1 Explosion
- 2 Entweichen von Gas
- 3 Entzündbarkeit
- 4
- 5 Entzündende (oxidierende) Eigenschaften
- 6 Giftigkeit
- 8 Ätzbarkeit
- 9 Gefahr einer heftigen Reaktion, die aus der Selbstzersetzung oder der Polymerisation entsteht.
- X (vorangestellt) : Berührung mit Wasser verboten

Kompartiment

ein Kompartiment ist eine Masse an Substanz, die einer einheitlichen Transport- bzw. Umwandlungskinetik unterliegt und deren Kinetik sich von anderen Kompartimenten unterscheidet. Dabei wird davon ausgegangen, daß sich die Substanzen in dem Kompartiment gleichmäßig verteilen.

Im konkreten Fall ökotoxikologischer Untersuchungen versteht man unter einem Kompartiment einen realen oder imaginären Bereich, in dem sich eine Substanz hinsichtlich ihrer Kinetik einheitlich verhält. Dies bedeutet, daß es sich bezüglich der Beobachtungsskala homogen und augenblicklich verteilt.

Kontamination

anthropogen bedingte Verunreinigung von Organismen oder Ökosystemen mit radioaktiven oder chemisch-toxischen Substanzen, (im militärischen Bereich auch mit pathogenen Mikroorganismen)

Kritischer Druck	→ Kritische Temperatur
Kritische Temperatur	oberhalb der kritischen Temperatur läßt sich ein Gas auch unter Anwendung stärkster Drücke nicht mehr verflüssigen. Den dazu gehörigen Dampfdruck nennt man kritischen Druck.
kumulativ	anhäufend, aufsummierend.
L	
LC 50	Lethal Concentration Fifty Mittlere tödliche Konzentration eines Stoffes oder einer Zubereitung in Luft oder Wasser, die nach Aufnahme innerhalb der Versuchsdauer (1-4 Tage) die Hälfte der Versuchsspecies tötet. Sie wird ausgedrückt in Milligramm pro Liter Luft.
LD 50	letale Dosis einer Substanz , bei der nach der Versuchsdauer vorraussichtlich 50% der Versuchsspecies sterben.
LD 100	letale Dosis, bei der gerade alle Individuen einer Versuchsspecies- Population gestorben sind.
LOEC	(lowest observed effect concentration) Niedrigste Konzentration, bei der ein Effekt beobachtet werden kann.
Langzeituntersuchung	Prüfung eines Stoffes, wobei die Wirkung auf die Fortpflanzung miterfaßt wird.
Latenzzeit	Zeitraum von der Einwirkung von Schadstoffen auf einen Organismus bis zur auftretenden Schädigung
Leberangiosarkom	Geschwulst ausgehend von den Gefäßendothelien der Leber (feine Oberhaut auf der Innenfläche der Lymph- und Blutgefäße)
Leitwerte	verbindlich festgelegte Standards (nur auf EG-Ebene), die ein Minimierungsgebot markieren, um der Gefahr des Ausfüllens von Grenzwerten entgegenzuwirken.
letal	tödlich
Löslichkeit	die maximale Menge eines Stoffes, die das Lösungsmittel bei einer bestimmten Temperatur aufnehmen kann, meist angegeben in g/l.
Lösungswärme	diejenige Wärmemenge, die beim Auflösen eines Stoffes (fest, flüssig oder gasförmig) in einem flüssigen Lösungsmittel durch den Lösungsvorgang freigesetzt oder verbraucht wird.

M

MAK-Wert	Maximale Arbeitsplatzkonzentration Höchstzulässige Konzentration eines (reinen) Arbeitsstoffes als Gas, Dampf oder Schwebstoff in der Luft am Arbeitsplatz, die nach dem gegenwärtigen Stand der Kenntnis auch bei wiederholter und längerfristigen Exposition die Gesundheit der Beschäftigten nicht beeinträchtigt und diese nicht unangemessen belastigt.
Metabolismus	Stoffwechsel, Aufbau, Abbau und Umwandlung von Stoffen im lebenden Organismus
Mikrokern	Mikrokerne sind Bruchstücke des Zellkerns, die auf Fehlern bei der Zellteilung beruhen
mutagen	Fähigkeit, eine Veränderung der Erbanlage hervorzurufen.
Mutagenität	Eigenschaft von Stoffen (Mutagenen), Veränderungen am Erbgut herbeizurufen, wobei die dadurch veränderten Merkmale auf die nächste fortpflanzungsfähige Generation übergehen.

N

NEL	No Effect Level Nicht-Wirkungs-Level, der aber experimentell nicht bestimmt werden kann, da der ermittelte Wert von Art und Ausmaß der Experimente abhängt. → NOEL
NOEL	No Observed Effect Level Konzentration oder Dosis eines Stoffes bei der keine Wirkung mehr beobachtet wird.
Normal-/ Referenzwerte	Standards, die die natürliche Grund- oder Vorbelastung im Ökosystem bezeichnen, die mangels Beweisen auch geschätzt sein kann.

O

Oberflächenspannung	im Innern einer Flüssigkeit erfährt ein Molekül keine einseitig gerichtete resultierende Anziehungskraft durch die Nachbarn. Sofern aber der Abstand von der Oberfläche kleiner ist als der Radius der Wirkungsphäre der Molekularkräfte, ist die resultierende gerichtete Kraft umso größer, je kleiner der Abstand ist. Um ein Molekül aus dem Flüssigkeitsinnern in die Oberfläche zu verschieben, muß daher Arbeit aufgewendet werden. Die Tangential zur Oberfläche der Flüssigkeit wirkende Kraft, die Oberflächenspannung
----------------------------	--

$$\text{Oberflächenspannung } \sigma = \frac{\text{am Rande angreifende Kraft}}{\text{Länge des Randes}} \left[\frac{\text{Kraft}}{\text{Länge}} \right]$$

ist daher gleich der spezifischen Oberflächenenergie.

$$\text{spez. Oberfl.energie } \varepsilon = \frac{\text{Energiezunahme i.d. Oberfläche}}{\text{Oberflächenzunahme}} \left[\frac{\text{Energie}}{\text{Fläche}} \right]$$

Die Oberflächenspannung nimmt mit steigender Temperatur ab und beträgt beispielsweise bei 18°C gegen Luft für Wasser 72.9 dyn/cm, für Benzol 29 dyn/cm, für Äthyläther 17 dyn/cm und für Quecksilber 471 dyn/cm.

Ökosystem	dynamisches Beziehungsgefüge der Lebewesen untereinander und mit ihrem Lebensraum.
Ökotoxikologie	Wissenschaft von der Verteilung und von den Wirkungen chemischer Substanzen auf Organismen, soweit daraus direkt oder indirekt Schäden für Natur und Mensch entstehen.
ökotoxisch	Fähigkeit von Stoffen schädliche Veränderungen an der Struktur, Dynamik oder Funktion von Ökosystemen hervorzurufen.
Ökotoxizität	Auswirkungen von Schadstoffen auf ganze Ökosysteme oder einzelne Komponenten von Ökosystemen.
Ökoverfügbarkeit	gibt an, inwieweit ein Stoff im Ökosystem verfügbar ist
oral	Aufnahme durch den Mund
Orientierungswerte	empfehlende Standards, die von einer Gruppe von Fachleuten vorgeschlagen werden.
Ostwald'sche Löslichkeit	die Gleichgewichtsverteilung eines Stoffes zwischen Lösung und Gasraum wird durch den Ostwald'schen Löslichkeitskoeffizienten beschrieben. Eine näherungsweise Berechnung kann aus der Wasserlöslichkeit, Dampfdruck und der molaren Masse erfolgen, wenn keine Dissoziation stattfindet.

$$\alpha' = R \cdot T \cdot \frac{W}{m \cdot P}$$

R	=	Gaskonstante (8.314 J/mol.K)
T	=	Temperatur (K)
W	=	Wasserlöslichkeit (g/l)
m	=	Molmasse (g/mol)
P	=	Dampfdruck (Hekto-Pascal)

P

ppbv "parts per billion by volume", auch ppb.

ppmv	"parts per million by volume", auch ppm.
Pedosphäre	belebter Teil des Bodens (incl. aquatische und semiaquatische Böden, wie z.B. Wattböden, Sedimente).
Persistenz	Beständigkeit gegenüber chemischen und biologischen Abbau.
Photolyse	Abbau einer Verbindung in niedermolekulare Stoffe oder anorganische Grundstoffe durch Strahlung (meist energiereiche Strahlung)
Polymerisationswärme	Reaktionsenthalpie der Polymerisation, vgl. Bindungswärme.
Postlabelling	Radioaktive Markierung der DNA nach Tötung des Tieres und Isolierung der DNA; diese Markierung dient der Erfassung von mutagenen/kanzerogenen Addukten (Bindung von Stoffen an die DNA) bei äußerst hohen Empfindlichkeiten der Methode
Promotor	hier im Zusammenhang mit Tumoren gebraucht. Es sind Stoffe, die meist nicht genotoxisch sind, aber in der Regel Wachstum in ihren Erfolgsorganen auslösen und direkt die Wahrscheinlichkeit, tumorinizierende Zellen zu erzeugen, erhöhen.

Q

QSAR	Quantitative Structure Activity Relations Aufgrund ähnlicher Molekularstrukturen wird eine Beziehung zwischen den Eigenschaften bekannter und unbekannter Stoffe hergestellt (z.B. ähnliche Toxizität).
------	--

R

Relative Dampfdichte	wird die meist in g/l gemessene Dichte eines Gases oder Dampfes auf die Dichte der Luft bezogen, erhält man eine dimensionslose Zahl, die als relative Dampfdichte bezeichnet wird.
Regenerationsfähigkeit	die Fähigkeit vieler Organismen, verlorengegangene, geschädigte oder zerstörte Teile wieder zu ersetzen.
Relative Dichte	die relative Dichte ergibt sich, wenn die Dichte eines Stoffes auf die Dichte von Wasser bezogen wird. Die relative Dichte eines Stoffes ist dimensionslos, der Zahlenwert entspricht aber dann dem der jeweiligen Dichte wenn als Bezugsgröße die Dichte von Wasser bei 4°C herangezogen wird. Die relative Dichte wird durch das Zeichen D_t^{20} ausgedrückt, wobei die obere Zahl die Temperatur bezeichnet, bei der die Dichte des Stoffes gemessen wurde und die untere die entsprechende Temperatur des Wassers.

rezessiv	genetisch verankert, aber nicht in Erscheinung tretend
Richtwerte	einzuhaltende Standards, die durch ein autorisiertes Gremium gesetzt werden.
RID(D-GGVE)	internationale Ordnung für die Beförderung gefährlicher Güter mit der Eisenbahn (Gefahrgutverordnung Eisenbahn)
Risikoversorge	ein tragendes Element zur stufenweise, drastischen Emissionsminderung aller vom Menschen in Atmosphäre, Gewässer oder Boden eingebrachte Stoffe.
RTECS-Nr.	alpha-numerische Nummer zur Kennzeichnung der Stoffe im Registry of Toxic Effects of Chemical Substances. Diese Datenbank beinhaltet zur Zeit Angaben zu Toxizität, chemische Identität, Grenzwerte etc. zu etwa 90 000 chemischen Substanzen. Anbieter in der Bundesrepublik ist das deutsche Institut für medizinische Dokumentation und Information (DIMDI).

S

S-A-Beziehung	Struktur-Aktivitäts-Beziehung Ableitung von stofflichen Eigenschaften aufgrund ähnlicher Strukturen des Molekülaufbaus von Verbindungen
Sättigungskonzentration	viele Stoffe sind in einem anderen Stoff, Lösungsmittel etc. bei einer bestimmten Temperatur nur bis zu einer Höchstmenge löslich. Eine Lösung bzw. Stoffgemisch, die diese Höchstmenge enthält, wird als gesättigt bezeichnet, die zugehörige Konzentration als Sättigungskonzentration bezeichnet.
Schaden	rechtlich gesehen jede Beeinträchtigung von Rechtsgütern, wobei das volle Interesse des Geschädigten umfasst wird. → Umweltschaden
Schwellenwerte	Standards, die einen vermuteten kritischen Punkt oder Bereich bezeichnen, ab dem rasante Prozesse der Umweltveränderung eintreten und z.B. Ökosysteme aus dem Gleichgewicht geraten.
Schmelzpunkt	die Temperatur, bei der ein Stoff aus dem festen in den flüssigen Zustand übergeht.
Schmelzwärme	Umwandlungswärme, die beim Übergang eines Stoffes aus der festen in die flüssige Phase freigesetzt oder aufgenommen wird, angegeben in KJ/mol.
Screening Test	Kurzzeittest im Labor von 1-4 Tagen Dauer zur Bestimmung der akuten Toxizität an einer definierten Testspecies.
Segregation	Ab-/Aussonderung, Entmischung, Trennung

Sklerodermie	allmähliche Verlederung, Verhärtung der Haut
Stratosphäre	auf die → Troposphäre folgende Schicht der Atmosphäre; gekennzeichnet durch gleiche Temperatur über große Vertikaldistanzen.
Sorption	Aufnahme eines Stoffes an eine Oberfläche aufgrund der Eigenschaft von mineralischen und organischen Teilchen, Moleküle und Ionen an ihren Grenzflächen zu binden
Subchronische Toxizität	Toxizität bei wiederholter Aufnahme.
Sublimation	direkter Übergang vom festen in den gasförmigen Zustand.
synergetisch	zusammen wirkend Bei Schadstoffen, sich in der Wirkung ergänzend.
T	
TCL 0	Toxic Concentration Low niedrigste publizierte Konzentration einer Substanz in Luft, die nach gegebener Expositionsdauer irgendeine toxische Wirkung an der Versuchsspecies verursacht hat; Einheit: mg/l, mg/m ³ oder ppmv.
TDL 0	Toxic Dose Low niedrigste auf angegebene Weise applizierte Dosis einer Substanz, für die bei gegebener Einwirkungsdauer irgendeine toxische Wirkung im Menschen bzw. eine genotoxische Wirkung in einer Species publiziert wurde. Einheit: mg/kg Körpergewicht
TRK-Wert	technische Richtkonzentration Diejenige Konzentration eines Stoffes als Gas, Dampf oder Schwebstoff in der Luft, die als Richtgröße für die zu treffenden Schutzmaßnahmen und die meßtechnische Überwachung am Arbeitsplatz heranzuziehen ist.
Tensid	wasserlösliche, grenzflächenaktive Stoffe, die aus einer Lösung heraus an deren Grenzfläche wandern und dort die Grenzflächenspannung herabsetzen. Grenzfläche ist dabei die Phasengrenze zwischen zwei nicht mischbaren Flüssigkeiten, zwischen Flüssigkeit und Gas oder zwischen Flüssigkeit und Festkörpern.
Teratogenität	Sammelbegriff für genetisch bedingte Schäden an der Nachkommenschaft. Mißbildungen bei Neugeborenen, Absterben der Leibesfrucht, Störungen, die eine Beeinträchtigung auch nach der Geburt

bedingen (z.B. verlangsamte Entwicklung, verkürzte Lebenserwartung).

Toxikologie zusammenfassender Begriff für die Lehre von den durch Stoffe verursachte Störungen auf belebte Systeme, das heißt von Giftwirkungen.

toxisch Fähigkeit von Stoffen, schädliche und unerwünschte Wirkungen hervorzurufen.

Toxizität Giftigkeit eines Stoffes.

Toxizität der Arbeitsstoffe ein Teilgebiet der Toxikologie mit dem Ziel gesundheitliche Risiken von Arbeitsstoffen abzuschätzen.

Toxizitätsäquivalent Umrechnung von Einzeltoxizitäten auf eine einheitliche Basis, zum Beispiel auf eine bestimmte Verbindung (s. Dioxine) oder eine Referenztoxizität (z.B. LD-Werte), dadurch wird der T. dimensionslos und kann zur relativen Bewertung herangezogen werden

Troposphäre unterer Teil der Atmosphäre zwischen 8-9 km (Pol) und 16-17 km (Äquator).
Die eigentlich wetterwirksame Schicht der Atmosphäre.

Tumor gut- oder bösartige Neubildung (Geschwulst) des Organismus,

U

Ubiquitär Allgegenwart; überall vorkommend, verbreitet.

Umweltchemikalien Stoffe, die durch menschliche Aktivitäten beabsichtigt oder unbeabsichtigt in die Umwelt gelangt sind, als Folge menschlicher Tätigkeit in der Umwelt entstehen, oder in deutlich höherer Konzentration als natürlich auftreten.

Umwelterheblichkeit potentielle Fähigkeit bei Stoffen, akute oder langfristige Schäden im Ökosystem bzw. Veränderungen im abiotischen und biotischen Bereich hervorzurufen, die außerhalb der natürlichen Schwankungen liegen, sowie die Fähigkeit empfindliche Bereiche zu erreichen.

Im Bezug auf den Menschen als Teil der Umwelt sind Auswirkungen erheblich, wenn das physische und psychische Wohlbefinden beeinträchtigt wird, also alle psychischen und physiologischen Veränderungen bis hin zu Krankheit und Tod.
nach UVPVwV:

entscheidungserheblich nach vorhandenen Gesetzen
nach Umweltvorsorgeprüfung:

Das Verfahren, Stoffe als umwelterheblich einzustufen dient dazu, den Untersuchungsrahmen einzugrenzen. Es werden

Stoffe erfaßt, die umweltgefährlich sein können und die relevante Konzentrationen überschreiten.

Umweltgefährlichkeit

das Potential von Stoffen, Ökosysteme und Teile davon derart zu verändern, daß dadurch erhebliche Gefahren und erhebliche Nachteile für die Allgemeinheit herbeigeführt werden.

"Umweltgefährlich sind Stoffe oder Zubereitungen, die selbst oder ihre Umwandlungsprodukte dazu geeignet sind, die Beschaffenheit des Naturhaushaltes, von Wasser, Boden oder Luft, Klima, Tieren, Pflanzen oder Mikroorganismen derart zu verändern, daß dadurch sofort oder später Gefahren für die Umwelt herbeigeführt werden können."

/ChemG 90/

Umweltgefährlich sind Stoffe, die

"ein sehr hohes Wirkungspotential haben, oder in der Umwelt längere Zeit stabil sind bzw. sich anreichern, und die in der Umwelt entstehenden Konzentrationen zu schädlichen Langzeitwirkungen für Ökosysteme führen können."

/BROECKER 91/

Umwelthygiene

Teilgebiet der Umweltmedizin oder der Hygiene. Die Umwelthygiene befasst sich mit Vorsorgemaßnahmen, die eine Verunreinigung der Umwelt, des Trinkwassers und der Lebensmittel verhindern und die dadurch umweltbedingte Krankheiten vermeiden helfen.

Umweltkompartiment

relativ deutlich abgrenzbarer Ausschnitt aus der Umwelt (z.B. Luft, Wasser, Boden)
→ Kompartiment

Umweltqualitätsziele

politisch definierte Ziele über zu erreichende Niveaus der Umweltgüte; die auf Immissionen bzw. Betroffene bezogene Zielaussagen

Umweltschadstoff

zusammenfassende Bezeichnung für die vom Menschen in die Umwelt eingebrachten → Umweltchemikalien und die "natürlichen Schadstoffe" in der Umwelt, die das Potential haben, auf den Menschen, auf andere Lebewesen, auf Ökosysteme oder auf Sachgüter schädliche Wirkungen auszuüben.

Umwelttoxikologie

ein Teilgebiet der → Ökotoxikologie.

Es steht speziell die jeweilige Rückwirkung der Umweltverunreinigungen im Vordergrund der Betrachtung, die eine direkte oder indirekte toxische Wirkung auf die Spezies Mensch ausüben.

Umweltvorsorge

Umweltvorsorge ist es, das Risiko auszuschließen oder zu verringern, daß stoffbedingte akute oder langfristige Schäden im

Ökosystem oder Teilen davon auftreten und keine Veränderungen außerhalb der natürlichen Schwankungen vorkommen. Sie umfaßt alle Handlungen, die

- der Abwehr konkreter Umweltgefahren,
- im Vorfeld der Gefahrenabwehr der Vermeidung oder der Verminderung von Risiken für die Umwelt (RISIKOVORSORGE)
- und die vorausschauend der Gestaltung unserer zukünftigen Umwelt, insbesondere dem Schutz und der Entwicklung der natürlichen Lebensgrundlagen (ZUKUNFTSVORSORGE) dienen.

/BUNDESTAG 86/

→ Risikovorsorge

→ Zukunftsvorsorge

UN-Nummer entstammt den Empfehlungen der Vereinten Nationen (UN) "Recommendations Prepared by the Committee of Experts on the Transport of Dangerous Goods" (Orange Book) und dient der Kennzeichnung gefährlicher Stoffe beim Transport.

UQZ → Umweltqualitätsziele

V

Verlängerter Tox.-Test Prüfung der Wirkung eines Stoffes über 14 oder 28 Tage.

W

WGK → Wassergefährdungsklasse

WHO Weltgesundheitsorganisation

Wassergefährdungsklasse Einteilung von Stoffen in die WGK 0 - 3

0 im allgemeinen nicht wassergefährdend

1 schwach wassergefährdend

2 wassergefährdend

3 stark wassergefährdend

Die Einteilung erfolgt aufgrund der Stoffeigenschaften bzw. der Eigenschaften ihrer Reaktionsprodukte im Wasser, die Beschaffenheit von Gewässern direkt oder indirekt so zu verändern, daß

- die Gesundheit des Menschen und seine belebte Umwelt bedroht oder anderweitig nachteilig beeinflusst, oder

- die örtliche Nutzung von Gewässern nachteilig beeinflusst oder über ein im Gesamtinteresse aller Nutzer tolerierbares Maß beeinträchtigt werden.

Wasserqualitätskriterien es wird aufgrund chemischer Parameter (z.B. O₂-Gehalt, Ammoniumgehalt, BSB, CSB) und/oder biologischer Parameter (Vollständigkeit von Lebensgemeinschaften) sowie der Be-

schaffenheit des Bettes (incl. Wasserführung), für Abschnitte von Fließgewässern der Grad der Verschmutzung festgelegt.

Wirkungsgrad

die Güte der Umwandlung in einem Energiewandler wird durch den Wirkungsgrad angegeben. Man versteht darunter das Verhältnis der abgegebenen Leistung zur zugeführten Leistung
 $\eta = P_{ab} / P_{zu}$

X

xenobiotisch

nicht natürlich vorkommend

Z

Zukunftsvorsorge

Zukunftsvorsorge bedeutet, nicht nur Emissionen zu kontrollieren, sondern umweltschonende Produktionsprozesse und Produkte zu entwickeln, die Emissionen von umweltbelastenden Stoffen erst gar nicht entstehen lassen oder zumindest so weit wie möglich vermeiden.

/BUNDESTAG 86/

Berichtsreihe
Angewandte Systemanalyse
der Programmgruppe S T E

Nr. 1

Schmitz, K., Niehaus, K., Rath-Nagel, St., Voß, A.
Die Entwicklungsmöglichkeiten der Energiewirtschaft
in der Bundesrepublik Deutschland - Untersuchung mit
Hilfe eines dynamischen Simulationsmodells,
KFA-Bericht JÜL-Spez-1, Bd. I, Nov. 1977

Schmitz, K. et al.

Die Entwicklungsmöglichkeiten der Energiewirtschaft
in der Bundesrepublik Deutschland - Untersuchung mit
Hilfe eines dynamischen Simulationsmodells,
KFA-Bericht JÜL-Spez-1, Bd. II, Nov. 1977

Nr. 2

Bohn, Th., Eich, P., Hansen, U., Jehle, B.
Künftige Stromgestehungskosten von Großkraftwerken,
KFA-Bericht JÜL-Spez-2, Nov. 1977

Nr. 3

Wibbe, H.-B.

Probleme der kurzfristigen Markteinführung eines
nuklearen Fernenergiesystems - eine Betrachtung aus
Abnehmersicht für einen räumlich begrenzten Markt,
KFA-Bericht JÜL-1486, Febr. 1978

Nr. 4

Jehle, B.

Einsatzmöglichkeiten und Einsatzbeispiele der
Kernenergie in NRW unter besonderer Berück-
sichtigung ihres Beitrages zur Strukturverbesserung,
KFA-Bericht JÜL-Spez-11, Juni 1978

Nr. 5

Hensel, W.

Beitrag zur Standardisierung der Standortbestimmung
von Kernkraftwerken,
KFA-Bericht JÜL-Spez-12, Juni 1978

Nr. 6

von Lojewski, D.

Wärme-, Strom- und Synthesegasversorgung von
Ballungsräumen durch Fernenergie - aufgezeigt am
Großraum Köln,
KFA-Bericht JÜL-1516, Juni 1978

Nr. 7

Lenhardt, W.

Entwicklung des Strombedarfs in der Bundesrepublik
Deutschland und alternative Möglichkeiten seiner
Deckung,
KFA-Bericht JÜL-Spez-18, Juli 1978

Nr. 8

Kolb, G. (Redaktion) gemeinsam mit KFA/IRE,
KFA/PTH, HRB, GHT

Studie über die Wirtschaftlichkeit der Strom-
erzeugung mit Hochtemperatur-Reaktoren,
KFA-Bericht JÜL-1527, Aug. 1978

Nr. 9

Meliß, M.

Möglichkeiten und Grenzen der Sonnen-
energienutzung in der Bundesrepublik
Deutschland mit Hilfe von Niedertemperatur-
kollektoren - Grundlagen, Technische Systeme,
Wirtschaftlichkeit,
KFA-Bericht JÜL-Spez-25, Dez. 1978

Nr. 10

Wagner, H.J.

Der Energieaufwand zum Bau und Betrieb
ausgewählter Energieversorgungstechnologien -
eine nettoenergetische Analyse,
KFA-Bericht JÜL-1561, Dez. 1978

Nr. 11

Bartholdi, J.

Einführung der Nuklearen Fernenergie -
umweltbedeutsame Konsequenzen und deren
Bewertung,
KFA-Bericht JÜL-1573, Jan. 1979

Nr. 12

Egberts, G.

Kostenoptimale Entwicklungsperspektiven
des Raumheizungssektors im Energiesystem
der Bundesrepublik Deutschland,
KFA-Bericht JÜL-Spez-41, Juni 1979

Nr. 13

Düring, K.

Transport- und Verteilungskosten konven-
tioneller Systeme zur Wärmeversorgung der
Bundesrepublik Deutschland,
KFA-Bericht JÜL-Spez-57, Okt. 1979

Nr. 14

Leimkühler, K.

Metallische Rohstoffe - Rezyklierung - Energieeinsatz.
Untersuchung mit Hilfe eines Simulationsmodells,
KFA-Bericht JÜL-Spez-44, Juli 1979

Nr. 15

Lenhardt, W., Schwefel, H.P., Sievert, D. et al.

Ein Energieversorgungsmodell zur Langfrist-
prognose der Umwandlungskapazitäten,
KFA-Bericht JÜL-Spez-63, Dez. 1979

Nr. 16

Kollmann, H.

Die räumliche Wärmebedarfsverteilung der Haushalte
und Kleinverbraucher in der Bundesrepublik
Deutschland,
KFA-Bericht JÜL-Spez-64, Dez. 1979

Nr. 17

Orth, D.

Niedertemperatur-Wärmeversorgung unter besonderer Berücksichtigung ausgewählter neuer Technologien,
KFA-Bericht JÜL-Spez-65, Dez. 1979

Nr. 18

Manthey, Ch. (Editor)

Energy Technology Data Handbook - Conversion Technologies,
KFA-Bericht JÜL-Spez-70, vol. I, Jan. 1980

Nr. 19

Manthey, Ch., Tosato, G.C.

Energy Technology Data Handbook - End Use Technologies. Insulation, Space- and Water Heating Systems,
KFA-Bericht JÜL-Spez-70, vol. II, Oct. 1980

Nr. 20

Hildebrandt, T.

Die nächsten 50 Jahre. Analyse und Szenarien der wirtschaftlichen Evolution,
KFA-Bericht JÜL-Spez-81, Juni 1980

Nr. 21

Finnis, M.W.

Phase II - Final Report of MARKAL Studies for the United Kingdom,
KFA-Bericht JÜL-Spez-92, Oct. 1980

Nr. 22

Scharff, E., Walbeck, M. (Federführung)

Planstudie: Halboffene Fernenergieversorgung, insbesondere für den Raum Frankfurt a.M. mit Heißwasser-Fernwärmeversorgung für den Raum Köln,
KFA-Bericht JÜL-Spez-95, Dez. 1980

Nr. 23

Costa, J.O., Gil Sordo, V.,

Blasco, M., Jara, A.

Energy Scenarios and Implementation of New Technologies for Spain,
KFA-Bericht JÜL-Spez-110, April 1981

Nr. 24

Jack, W.

Mögliche Entwicklung des weltweiten Ausbaus der Kernenergie unter Berücksichtigung wirtschaftlicher, gesellschaftlicher und politischer Aspekte,
KFA-Bericht JÜL-Spez-118, Juli 1981

Nr. 25

Schmitz, J.

Abschätzung des energiesparenden Innovationspotentials der Industrie Steine und Erden,
KFA-Bericht JÜL-1729, Aug. 1981

Nr. 26

Bansal, N.K., Uhlemann, R., Boettcher, A.
Plastic Solar Air Heaters of a Novel Design - Testing and Performance,
KFA-Bericht JÜL-1783, April 1982

Nr. 27

Höpfinger, E., Drepper, F., Heckler, R., Schwefel, H.P.

unter Mitarb. von Hermes, U., Horst, H.
Zur Einbettung der Energiewirtschaft in die Volkswirtschaft - Vier dynamische Modelle -
KFA-Bericht JÜL-Spez-166, Juli 1982

Nr. 28

Grüter, J.W., Wolff, M.

Die Energieversorgung der Gemeinde Seedorf im Landkreis Lüchow-Dannenberg/Niedersachsen - Eine Endenergieanalyse,
KFA-Bericht JÜL-Spez-170, Aug. 1982

Nr. 29

Huber, W., Allhorn, H., Birnbaum, U.

Emissionen von Kohlenutzungsanlagen und mögliche Minderungsmaßnahmen,
KFA-Bericht JÜL-1815, Nov. 1982

Nr. 30

Müller, M., Maher, K.J.,

with contributions of Rath-Nagel, St., Tosato, G.C.

Summary Report on Technology Characterizations. International Energy Agency: Energy Technology Systems Analysis Project,
KFA-Bericht JÜL-Spez-185, Dec. 1982

Nr. 31

Hildebrandt, T.

Wechselwirkungen zwischen Energiewirtschaft und Gesamtwirtschaft,
KFA-Bericht JÜL-Spez-192, Dez. 1982

Nr. 32

Höpfinger, E., Huber, W.

EFOM 12 C CASE STUDIES - Candidate Technologies to Relieve the EUROPEAN Energy System, Germany,
KFA-Bericht JÜL-Spez-193, EUR 8428 EN, Jan. 1983

Nr. 33

Späte, F.

Bestimmung des thermischen Verhaltens von zwei Thermosiphonanlagen,
KFA-Bericht JÜL-Spez-194, Febr. 1983

Nr. 34

Uhlemann, R.

Performance and Cost Analysis of Pressurized and Nonpressurized Domestic Solar Water Heating Systems with Thermosiphonic Flow,
KFA-Bericht JÜL-1882, Dec. 1983

Nr. 35

Kollmann, H., Plewnia, M., Schmitz, J., Huber, W.

Stand und Entwicklungstendenzen der Raumwärmeversorgung der Haushalte -

Bd. 1: Determinanten des Heizwärmedarfs von Gebäuden,

Bd. 2: Kosten für Energieeinsparung durch Wärmedämmung von Gebäuden und heizungstechnische Maßnahmen,

Bd. 3: Vergleich ausgewählter Heizungssysteme unter energetischen, ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten,

KFA-Bericht JÜL-Spez-234, Dez. 1983

Nr. 36

Heckler, R., Pohlmann, M., Schwefel, H.P.

Ein Modell zur Analyse der Umwandlungskapazitäten im Energiesektor der Bundesrepublik Deutschland,
KFA-Bericht JÜL-Spez-237, Dez. 1983

Nr. 37

Aringhoff, R., Bezerra, S.,

Hymmen, H.A., Kolb, G., Pimentel, R. (Working Group KFA/STE, CAEEB/Brasilien, SETEC/Brasilien)

Program of Research and Development on the Utilization of Brazilian Coal and on Energy Systems Analysis and Planning for Brazil,
KFA-Bericht JÜL-Spez-261, June 1984

Nr. 38

Correa-Guzman, E.J.

Erweiterung des unscharfen linearen Programmierens bei Mehrfachzielsetzungen. Beschreibung und Anwendung auf Energiesystemanalysen,
KFA-Bericht JÜL-Spez-262, Juli 1984

Nr. 39

Allhorn, H.

Modellmäßige Analyse der Energie- und Massenströme einer Kohleverflüssigungsanlage zur Bestimmung der Wirtschaftlichkeit unter besonderer Berücksichtigung von Maßnahmen zur Emissionsminderung,
KFA-Bericht JÜL-1937, Juli 1984

Nr. 40

Romahn, B.

mit Beiträgen von Wilde, D.

Redaktion der Kurzfassung: Kolb, G.

Energiestudie für die Provinz Guangdong/
Volksrepublik China;

Kurzfassung des Bandes V: Energiever-

sorgungsstrategien für die Provinz Guangdong
bis zum Jahr 2000,

KFA-Bericht JÜL-Spez-264, Aug. 1984

Nr. 41

Wensierski, P.W.,

unter Mitarbeit von Scheller, W.

Analytische Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit von Solaranlagen zur Warmwasserbereitung,
KFA-Bericht JÜL-Spez-268, Aug. 1984

Nr. 42

Wensierski, P.W.

Analyse und Optimierung solarer Warmwasser- und Raumheizungssysteme von Wohnbauten mit verschiedenem Wärmeschutz,
KFA-Bericht JÜL-Spez-301, Febr. 1985

Nr. 43

Riemer, H.

Analyse der Einsatzmöglichkeiten solarthermischer Heizungssysteme zur zentralen Niedertemperatur-Wärmeversorgung in der Bundesrepublik Deutschland,
KFA-Bericht JÜL-Spez-307, April 1985

Nr. 44

Jobsky, Th.

Elektrizität im industriellen Energiemarkt. Eine sektorale Analyse der Gründe und Ursachen der Elektrizitätsanwendung unter Berücksichtigung der Kraft-Wärme-Kopplung,
KFA-Bericht JÜL-Spez-308, April 1985

Nr. 45

Wensierski, P.W.

SOLARYS - ein interaktives Modell zur Simulation von Solarsystemen, Teil I und Teil II,
KFA-Bericht JÜL-Spez-346, Febr. 1986

Nr. 46

Giesecke Sara-Lafosse, C.R.

World Computer Model of Oil Markets: OPEC Pricing Strategy Model in the Short and Long Run,
KFA-Bericht JÜL-Spez-352, March 1986

Nr. 47

Scheller, W.

Solaranlagen zur Warmwasserbereitung. Analytische Untersuchungen von Thermosiphon- und Pumpenanlagen unter mitteleuropäischen Klimabedingungen,
KFA-Bericht JÜL-2047, März 1986

Nr. 48

Sanchez Buelga, A.
Mathematical Programming Studies of Short Run
Oil Refinery Rents,
KFA-Bericht JÜL-Spez-377, Nov. 1986

Nr. 49

Kollmann, H.
Analyse der Auslegung, des Betriebes und der
Beschaffung von Heizsystemen für Haushalte -
Wärmebedarf, technische Systeme, Kosten,
Markentscheidung,
KFA-Bericht JÜL-Spez-384, Dez. 1986

Nr. 50

Vos, H.
Foraminiferenökologie im Rhonedelta,
KFA-Bericht JÜL-2110, Dez. 1986

Nr. 51

Müller, M.
Anpassung der Mineralölverarbeitung der
Bundesrepublik Deutschland an die Produkten-
nachfrage des Jahres 2000 -
eine modellgestützte Analyse -
KFA-Bericht JÜL-Spez-389, Febr. 1987

Nr. 52

Plewnia, M.
Analyse photovoltaisch unterstützter Strom-
versorgungssysteme am Beispiel eines
Einfamilienhauses,
KFA-Bericht JÜL-Spez-415, Sept. 1987

Nr. 53

Kolb, G. (Editor)
International Energy Agency: Energy Technology
Systems Analysis Project (IEA/ETSAP),
Final Report on Annex II, July 1983 - June 1986,
KFA-Bericht JÜL-Spez-421, Nov. 1987

Nr. 54

Hövelmann, A.
Neue Entsorgungsprobleme kohlegefeuerter
Kraftwerke,
KFA-Bericht JÜL-2172, Dez. 1987

Nr. 55

Bundschuh, V., Martinsen, D., Wagner, H.J.,
Walbeck, M. and Belyaev, L.S., Kavelin, I.Ya.,
Kaganovich, B.M., Filippov, S.P.
Integrated Energy System Studies in USSR and FRG
- A Working Report -
KFA-Bericht JÜL-Spez-508, July 1989

Nr. 56

Hourfar, D.
Analyse der Einsatzmöglichkeiten und
-bedingungen von Handhabungssystemen in
kerntechnischen Anlagen,
KFA-Bericht JÜL-Spez-512, Juli 1989

Nr. 57

Wagner, H.J.; Hansen, K.H., Schön, R.,
Wassmann, B.
Aufschlüssel
ung von Investitionskosten und
Erstellung von Materialanalysen für vorgegebene
Anlagen der Energieversorgung,
KFA-Bericht JÜL-Spez-524, Oktober 1989

Nr. 58

Wagner, H.J.; Wassmann, B., Hansen, K.H.,
Schön, R.
Ermittlung von Emissionsfaktoren zur Herstellung
von Materialien,
KFA-Bericht JÜL-Spez-525, Oktober 1989

Nr. 59

Kollmann, H., Heckler, R., Huber, W., Husung, S.,
Sturm, K.D., Wendland, F.
Stoffströme und Emissionen durch Produktion,
Verwendung und Entsorgung von PVC,
KFA-Bericht JÜL-Spez-543, Juli 1990

Nr. 60

Jobsky, Th.
Ermittlung von Potentialen zur industriellen
Prozeßdampfversorgung mit nuklearen Anlagen,
KFA-Bericht JÜL-2411, Nov. 1990

Nr. 61

Markewitz, P.
Theoretische Untersuchungen zum Verhalten von
Schwermetallen in Kohlekraftwerken,
KFA-Bericht JÜL-2497, Juli 1991

Nr. 62

Birnbaum, K.U., Pauls, R.,
Wagner, H.J., Walbeck, M.
Berechnung sektoraler Kohlendioxidemissionen für die
Bundesrepublik Deutschland,
KFA-Bericht JÜL-2530, Okt. 1991

Nr. 63

Hirtz, W., Huber, W.
Umweltvorsorgeprüfung im Forschungsbereich -
Kolloquium 5. Juni 1991, Wissenschaftszentrum Bonn -
KFA-Bericht JÜL-2553, Nov. 1991

Nr. 64
Kolb, G. und Forum für Zukunftsenergien e.V. (Hrsg.)
Umweltauswirkungen bei der Herstellung und Nutzung
von Solarzellen - Übersicht über laufende Arbeiten -
Aus der Reihe des Statusreports "Erneuerbare Ener-
gien" des Forums für Zukunftsenergien e.V., Band 8,
und der STE-Reihe Angewandte Systemanalyse Nr. 64,
März 1992

Nr. 65
Wendland, F.
Die Nitratbelastung in den Grundwasserlandschaften
der 'alten' Bundesländer (BRD),
Berichte aus der Ökologischen Forschung, Bd. 8/1992,
Forschungszentrum Jülich, April 1992,
ISBN 3-89336-089-01

Nr. 66
Markewitz, P.
Daten und Fakten zur Elektrizitätserzeugung in den
neuen Bundesländern,
KFA-Bericht JÜL-2635, Juni 1992

Nr. 67
Umweltvorsorgeprüfung bei Forschungsvorhaben
- Am Beispiel von Photovoltaik -

Band 1: Hantzsche, U., Hirtz, W., Huber, W., Kolb, G.
Zusammenfassung und Ergebnisdarstellung
(in Vorbereitung)

Band 2: Hirtz, W., Huber, W.
Methodische Überlegungen zur
Umweltvorsorgeprüfung und Darstellung des
gewählten Prüfverfahrens
(in Vorbereitung)

Band 3: Goebbel, B., Hirtz, W., Huber, W.
EDV-gestützte Instrumente
Interner Bericht KFA/STE IB-4/92
Dezember 1992

Band 4: Hantzsche, U., Rey, I.
Emissionen und Primärenergieaufwand konventioneller
Bau- und Werkstoffe
(in Vorbereitung)

Band 5: Hagedorn, G., Hellriegel, E.,
Umweltrelevante Stoffströme bei der Herstellung
verschiedener Solarzellen, Teil I und Teil II,
KFA-Bericht JÜL-2636, Juli 1992

Band 6: Hirtz, W., Huber, W., Kolb, G.
Praktische Durchführung
KFA-Bericht JÜL-2757, Mai 1993

Band 7: Hirtz, W., Rey, I., Reetz, T., Schuller, H.,
Widmann, W.
Materialien zur Umwelterheblichkeitsprüfung
Interner Bericht KFA/STE IB-5/92
Dezember 1992

Nr. 68
Pospischill, H.
Die Methanemissionen der vorgelagerten Kohle- und
Erdgasprozeßkette und ihre Bedeutung am Beispiel
der Strombereitstellung,
KFA-Bericht JÜL-2716, Januar 1993

Nr. 69
Krzikalla, N.
Das Verhalten ausgewählter Spurenelemente in
GuD-Kraftwerken mit integrierter Kohlevergasung,
KFA-Bericht JÜL-2756, Mai 1993

Jü-2757

Mai 1993

ISSN 0366-0885