

IZT

Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung
Institute for Futures Studies and Technology Assessment

**Umweltstandards für thermische
Solarkollektoren unter besonderer
Berücksichtigung der selektiven
Beschichtung ihrer Absorberoberflächen**

Volker Handke, Christian Kamburow

Werkstattbericht Nr. 97

Berlin, Juli 2009

ISBN 978-3-929173-97-0

© 2009 **IZT**

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

Die deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

(WerkstattBerichte / IZT, Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung ; Nr. 97)

ISBN 978-3-929173-97-0

© 2009 **IZT** by Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung, Berlin

Alle Rechte, insbesondere das Recht der Vervielfältigung und Verbreitung sowie Übersetzung, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (durch Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Printed in Germany

Inhalt

1.	Zusammenfassung	10
2.	Einleitung	13
2.1.	Hintergrund und Zielsetzung	13
2.2.	Vorgehensweise	13
3.	Marktanalyse	16
3.1.	Weltweit	16
3.2.	Europa	19
3.3.	Deutschland.....	21
3.3.1.	Bestand und Zubau	21
3.3.2.	Kostenaspekte	25
3.3.3.	Anbietermarkt	29
3.3.4.	Technologische Differenzierung.....	31
3.3.5.	Neue technische Entwicklungen.....	36
3.3.6.	Forschungsbedarf	37
4.	Analyse der Umweltauswirkungen	39
4.1.	Fragestellung.....	39
4.2.	Vorbemerkung	39
4.3.	Stand der Forschung	40
4.4.	Materialeinsatz.....	40
4.5.	Bestimmung der Umweltauswirkungen.....	41
4.5.1.	Umweltauswirkungen nach ProBas-Datenbank	41
4.5.2.	Umweltauswirkungen durch den Kollektor gemäß EcoIndicator 99.....	44
4.5.3.	Umweltauswirkungen durch den Kollektor gemäß KEA.....	46
4.5.4.	Selektive Absorberbeschichtungen.....	49
4.6.	Vermeidung und Verringerung von Umweltauswirkungen.....	49
4.6.1.	Vermeidung von Gefahrstoffen	49
4.6.2.	Reduzierung des Materialinputs	51
4.6.3.	Reduzierung des Energieverbrauchs	52
4.6.4.	Reduzierung stofflicher Emissionen.....	53
4.6.5.	Zusammenfassung.....	54
5.	Anforderungen an fortschrittliche Umweltstandards	55
5.1.	Bestehende technische Standards und Beurteilungssysteme	55
5.1.1.	Technische Normen.....	55
5.1.2.	Kennzeichnungssysteme	56
5.2.	Konzeptionierung von Umweltstandards.....	58
5.2.1.	Allgemeine Rahmenbedingungen zur Konzipierung	58
5.2.2.	Stand der Technik.....	58
5.2.3.	Anforderungen an anspruchsvolle technische Umweltstandards.....	58
6.	Life Cycle Assessment (Ökobilanz) der Beschichtungsverfahren	63
6.1.	Ziel und Grund der Ökobilanz	63
6.2.	Methodik der produktbezogenen Ökobilanz.....	63
6.3.	Aufbau einer Ökobilanz.....	64
6.3.1.	Festlegung des Zieles und des Untersuchungsrahmens.....	64
6.3.2.	Sachbilanz.....	65
6.3.3.	Wirkungsabschätzung	65
6.3.4.	Auswertung.....	65

6.3.5.	Anwendung.....	66
6.4.	Ökobilanz im vorliegenden Vorhaben.....	66
6.4.1.	Sachbilanz – Geografischer und zeitlicher Bezug sowie Umfang.....	67
6.4.2.	Wirkungsabschätzung.....	67
6.5.	Vergleich der Chrom VI Emissionen in den Vorketten.....	72
6.5.1.	Modellierung.....	72
6.5.2.	Ergebnisse.....	73
7.	Beständigkeitsprüfung der Beschichtungen.....	76
7.1.	Hintergrund des Prüfverfahrens.....	76
7.2.	Prüfung der Temperaturbeständigkeit.....	77
7.2.1.	Option a).....	78
7.2.2.	Option b).....	78
7.2.3.	Option c).....	78
7.3.	Prüfung der Feuchtebeständigkeit.....	78
7.3.1.	Variante 1.....	78
7.3.2.	Variante 2.....	79
7.4.	Prüfung der SO ₂ -Beständigkeit.....	79
7.5.	Zweck der Task 10 Prüfung im Vorhaben.....	79
7.6.	Durchführung der Task 10 Prüfung im Vorhaben.....	79
7.6.1.	Identifizierung der zu beprobenden Schichten.....	80
7.6.2.	Probennahme.....	80
7.7.	Testergebnisse.....	81
7.7.1.	Ergebnisse der Vorprüfung.....	81
7.8.	Prüfung der Temperaturbeständigkeit.....	84
7.8.1.	Probe Nr. 1.....	85
7.8.2.	Probe Nr. 2.....	85
7.8.3.	Probe Nr. 3.....	86
7.8.4.	Probe Nr. 4.....	87
7.8.5.	Probe Nr. 5.....	87
7.8.6.	Zusammenfassung der Ergebnisse der Temperaturprüfung.....	88
7.9.	Prüfung der Feuchtebeständigkeit.....	89
7.10.	Prüfung der Beständigkeit gegen atmosphärische Korrosion.....	91
7.11.	Zusammenfassung der Ergebnisse der Task 10 Prüfung.....	93
7.12.	Lebensdauerbestimmung.....	94
8.	Umweltstandards.....	96
8.1.	Grundsätzlich Anforderungen an Umweltstandards.....	96
8.2.	Substituierte fossile Primärenergie.....	96
8.3.	Selektive Beschichtungen.....	97
8.4.	Schwermetallhaltige Lote.....	98
8.5.	Altkollektoren.....	99
8.6.	Technische Normen.....	100
8.7.	Blauer Engel.....	100
8.8.	Zusammenfassung der vorgeschlagenen Umweltstandards.....	101
8.9.	Entwicklung eines umweltorientierten Förderkonzeptes.....	102
9.	Literatur.....	103
10.	Anhang.....	106
10.1.	Auszüge aus der Task 10.....	106
10.2.	Ergebnisse der Task 10 Prüfung.....	110

10.3.	Modellierung der Lebensdauervorhersage.....	114
10.4.	Sachbilanz der selektiven Absorberbeschichtungen (Input).....	116
10.5.	Unbewertete Wirkungsabschätzung der Absorberbeschichtungen.....	118
10.6.	Bewertete Wirkungsabschätzung der Absorberbeschichtungen.....	123
10.7.	Zusammenfassung der Ergebnisse des Branchen-Workshops.....	131

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1:	Kollektortypspezifische Investitionen nach Kollektorfläche und Anlage.....	26
Tabelle 3-2:	Verwendungsspezifische Investitionen nach Kollektorfläche und Anlage.....	26
Tabelle 3-3:	Wärmegestehungskosten in €/kWh _{therm.} konventioneller Systeme.....	27
Tabelle 3-4:	Wärmegestehungskosten solarthermischer Anlagen in €/kWh _{therm.}	27
Tabelle 4-1:	Materialeinsatz der Kollektoren.....	40
Tabelle 4-2:	Verwendete Umweltindikatoren zur Darstellung der Umweltbelastungen.....	42
Tabelle 4-3:	Umweltbelastung der Kollektoren nach EcoIndicator 99 in mPt/m ²	45
Tabelle 4-4:	Umweltauswirkungen von Beschichtungsverfahren.....	49
Tabelle 4-5:	Umweltindikatoren für ausgewählte Materialien.....	52
Tabelle 7-1:	Geprüfte Beschichtungen.....	80
Tabelle 7-2:	Absorption, Emission und Adhäsion vor Beginn der Prüfung.....	81
Tabelle 7-3:	Ergebnisse der Temperaturmessung.....	84
Tabelle 7-4:	Ergebnisse der Kondensationsmessung.....	90
Tabelle 7-5:	Ergebnisse der SO ₂ Prüfung.....	91
Tabelle 10-1:	Table B1 aus Task 10 zur Bestimmung von T _{max} aus α _s und ε.....	106
Tabelle 10-2:	Table B2 der Task 10 zur Bestimmung von T ₁ , T ₂ , T ₃ sowie t ₁ , t ₂ , t ₃ aus T _{max}	107
Tabelle 10-3:	Sachbilanz der selektiven Absorberbeschichtungen.....	117
Tabelle 10-4:	Auszug (Chrom VI) aus der unbewerteten Wirkungsabschätzung.....	118
Tabelle 10-5:	Unbewerteten Wirkungsabschätzung (gekürzt – größte Werte).....	122
Tabelle 10-6:	Auszug aus der bewerteten Wirkungsabschätzung.....	124
Tabelle 10-7:	Bewerteten Wirkungsabschätzung (gekürzt – größte Werte).....	130

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	Überblick über den Projektablauf.....	14
Abbildung 3-1:	Weltweite Verteilung der Kollektortypen.....	16
Abbildung 3-2:	Geografische Verteilung der Kollektorfläche.....	17
Abbildung 3-3:	2003 weltweit neu installierte Kollektorfläche.....	18
Abbildung 3-4:	In 2003 neu installierte Kollektorfläche pro 1000 Einwohner.....	18
Abbildung 3-5:	2004 weltweit neu installierten solarthermischen Kapazität.....	19
Abbildung 3-6:	2004 in Europa neu installierte solarthermische Kollektoren.....	20
Abbildung 3-7:	Kumulierte Kollektorfläche in Europa zzgl. Schweiz.....	20
Abbildung 3-8:	Kumulierte Kollektorfläche pro 1000 Einwohner.....	21
Abbildung 3-9:	Installierte Kollektorfläche in Deutschland.....	22
Abbildung 3-10:	Verteilung der geförderten Anlagen nach Verwendungsart.....	23
Abbildung 3-11:	Geförderten Anlagen bis 30 m ² nach Kollektorfläche.....	23
Abbildung 3-12:	Geförderte Anlagen > 30 m ² nach Kollektorfläche.....	24
Abbildung 3-13:	Spezifische Investitionen nach Kollektorflächen.....	25
Abbildung 3-14:	Marktanteile der Kollektorhersteller im Jahr 2003.....	29
Abbildung 3-15:	Verbindungstechnologie zwischen Absorber und Rohr.....	31
Abbildung 3-16:	Marktanteile der Beschichtungshersteller in der EU.....	35
Abbildung 3-17:	Marktanteile der Beschichtungshersteller in der EU 2003-2004.....	35
Abbildung 4-1:	Ausgewählte Luftemissionen durch den Materialeinsatz in Kollektoren.....	42
Abbildung 4-2:	Ausgewählte Luftemissionen durch den Materialeinsatz in Kollektoren.....	43
Abbildung 4-3:	Gewässereintrag durch den Materialeinsatz in Kollektoren.....	43
Abbildung 4-4:	Abfallanfall durch den Materialeinsatz in Kollektoren.....	44
Abbildung 4-5:	Ressourcenverbrauch durch den Materialeinsatz in Kollektoren.....	44
Abbildung 4-6:	Umweltbelastung der Kollektormaterialien nach EcoIndicator 99.....	45
Abbildung 4-7:	Verteilung der Umweltbelastungen der Kollektoren nach EcoIndicator 99.....	46
Abbildung 4-8:	KEA für die Kollektorherstellung.....	47

Abbildung 4-9: KEA für Herstellung, Transport, Installation, Betrieb + Wartung der Anlagen	48
Abbildung 4-10: Energetisches Langzeitverhalten zweier Kollektoren	53
Abbildung 5-1: Häufigkeitsverteilung der Kollektorerträge	59
Abbildung 6-1: Wirkungsgefüge und Bestandteile einer produktbezogenen Ökobilanz	64
Abbildung 6-2: Chrom-VI-Mengen aus der Absorberbeschichtungen	67
Abbildung 6-3: Kumulierter Energieaufwand (KEA) der vier Beschichtungsverfahren pro m ² Absorberfläche.....	68
Abbildung 6-4: Globales Klimaerwärmungspotential (nach IPCC 2001, mit einem Wirkungshorizont von 20 Jahren) der vier Beschichtungsverfahren.....	69
Abbildung 6-5: Menschliche Gesundheit – „Human Health“ (nach IMPACT 2002+ (Endpoint) der Beschichtungsverfahren.....	69
Abbildung 6-6: Gewässerversauerung (nach IMPACT 2002+ (Midpoint)) in kg SO ₂ -Äquivalente	70
Abbildung 6-7: Gewässereutrophierung (nach IMPACT 2002+ (Midpoint)) in kg PO ₄ -Äquivalente .	70
Abbildung 6-8: Eco-Indicator 99 (H,A – Hierarchist Perspective)	71
Abbildung 6-9: Gesamtemission von Cr VI bei der Produktion von Chrom und Chromsäure	73
Abbildung 6-10: Cr VI Emission in Wasser.....	73
Abbildung 6-11: Cr VI Emissionen in die Luft.....	74
Abbildung 6-12: Cr VI Emissionen in den Boden	74
Abbildung 7-1: Gemessene solare Absorption der geprüften Proben	81
Abbildung 7-2: Gemessene thermische Emission der geprüften Proben	82
Abbildung 7-3: Gemessene Adhäsion vor Beginn der Prüfung	83
Abbildung 7-4: $\Delta\alpha_s$ und $\Delta\epsilon$ und die Werte der PC-Funktion von Probe Nr. 1.....	85
Abbildung 7-5: $\Delta\alpha_s$ und $\Delta\epsilon$ und die Werte der PC-Funktion von Probe Nr. 2.....	86
Abbildung 7-6: $\Delta\alpha_s$ und $\Delta\epsilon$ und die Werte der PC-Funktion von Probe Nr. 3.....	86
Abbildung 7-7: $\Delta\alpha_s$ und $\Delta\epsilon$ und die Werte der PC-Funktion von Probe Nr. 4.....	87
Abbildung 7-8: $\Delta\alpha_s$ und $\Delta\epsilon$ und die Werte der PC-Funktion von Probe Nr. 5.....	88
Abbildung 7-9: Verlauf der PC-Funktion während der Prüfung der Temperaturstabilität	88
Abbildung 7-10: Verlauf der PC-Funktionen während der Feuchteprüfung.....	91
Abbildung 7-11: Verlauf der PC-Funktionen während der SO ₂ -Prüfung	93
Abbildung 7-12: Verlauf der PC-Funktion über die Zeit (Referenzjahre)	95
Abbildung 10-1: Entscheidungsweg Task 10 bei der Temperaturprüfung.....	108
Abbildung 10-2: Entscheidungsweg Task 10 bei der Kondensationsprüfung.....	109
Abbildung 10-3: Ergebnisse der Kondensationsprüfung bei Probe Nr. 1	110
Abbildung 10-4: Ergebnisse der Kondensationsprüfung bei Probe Nr. 2	110
Abbildung 10-5: Ergebnisse der Kondensationsprüfung bei Probe Nr. 3	110
Abbildung 10-6: Ergebnisse der Kondensationsprüfung bei Probe Nr. 4	111
Abbildung 10-7: Ergebnisse der Kondensationsprüfung bei Probe Nr. 5	111
Abbildung 10-8: Ergebnisse der SO ₂ -Prüfung bei Probe Nr. 1	112
Abbildung 10-9: Ergebnisse der SO ₂ -Prüfung bei Probe Nr. 2.....	112
Abbildung 10-10: Ergebnisse der SO ₂ -Prüfung bei Probe Nr. 3	112
Abbildung 10-11: Ergebnisse der SO ₂ -Prüfung bei Probe Nr. 4.....	113
Abbildung 10-12: Ergebnisse der SO ₂ -Prüfung bei Probe Nr. 5	113
Abbildung 10-13: Verteilungsfunktionen der Temperaturfrequenz für ein Referenzjahr.....	115

Gleichungsverzeichnis

Gleichung 1: Performance Criterion Function (PC-Funktion)	77
Gleichung 2: Generelle Form der PC-Funktion	114
Gleichung 3: Generelle Form der PC-Funktion bei $kt \ll 1$	114
Gleichung 4: Arrhenius Gleichung für die Temperaturabhängigkeit der Degradation	114
Gleichung 5: PC-Funktion für ein Referenzjahr	115
Gleichung 6: PC Funktion als Funktion einer bestimmten Anzahl von Referenzjahren.....	115

Vorbemerkungen

Der vorliegende Werkstattbericht basiert auf einer Studie, die im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, in der Zeit vom März 2005 und November 2006 angefertigt wurde

Die Motivation für die Durchführung der Forschungsarbeit war die beabsichtigte Notifizierung einer Novelle des Marktanzreizprogramms (MAP) als Umweltbeihilfe. Gemäß der Logik des europäischen Umweltbeihilferechts war dabei insbesondere darzulegen, dass mit der Förderung durch das MAP nicht lediglich die Anforderungen des europäischen Umweltrechts erreicht werden soll, sondern eine über den Stand der Technik hinausgehende Umweltleistung. Im Kern wurde diese Aufgabenstellung gelöst, indem einerseits Mindestanforderungen entwickelt und formuliert wurden und andererseits eine weitreichende Differenzierung der Förderung empfohlen wurde. Die ursprüngliche Terminplanung des Notifizierungsverfahrens wurde jedoch während des Forschungsvorhabens geändert. Dies ergab sich zum einen aus Veränderungen auf Seiten der national zuständigen Stellen und zum anderen aus der aktuellen Marktentwicklung, welche einer zu rigiden Marktdifferenzierung entgegenstand. Zusätzlich wurde verstärkt das Bemühen, die Novellierung des Marktanzreizprogramms an die Entwicklungen eines Regenerativen Wärme Gesetzes (Wärme-EEG) zu koppeln, deutlich. Erst Mitte des Jahres 2007 zerschlug sich dieses Bemühen, da sich weder innerhalb der Solarthermie-Branche noch zwischen den politische Verantwortlichen eine Einigung zum Wärme EEG abzeichnete. Daher trat Ende 2007 eine Novellierung des MAP in Kraft¹. Im Kern wurde dabei eine Differenzierung der Förderung vollzogen. Allerdings wurde die Mindestanforderung in Form eines jährlichen Kollektorsertrags in Höhe 525 kWh/m² bei einem solaren Deckungsanteil von 40 % beibehalten, auch wenn dieser Mindestertrag und insbesondere dieser solare Deckungsgrad bereits seit längerem als überaltert und nicht mehr als Stand der Technik beschrieben [Handke 2004a] worden ist. Gleichzeitig wurde die Erfüllung der Kriterien des Umweltzeichens RAL-UZ 73 (Stand 2004) nicht mehr als Mindestanforderung beibehalten, wie sie noch in den Vorgängerrichtlinien zu finden war. Damit sind umweltrelevante Anforderungen nicht mehr Gegenstand der Förderung. Damit hat sich wiederum der im vorliegenden Forschungsvorhaben genutzte Ansatz, auch bei der solarthermischen Technologie infolge ihrer zunehmenden Marktverbreitung von der Notwendigkeit einer ökologischen Betrachtung, Bewertung und der Ableitung von entsprechenden Anforderungen auszugehen, nicht durchgesetzt. Gleichwohl hat sich im Marktanzreizprogramm 2007 eine Differenzierung der Förderung in Basis-, Bonus- und Innovationsförderung durchgesetzt. Als besonders förderwürdig werden dabei diejenigen solarthermischen Teilmärkte adressiert, die bisher eher wenig am Markt etabliert sind. Dazu zählen große kundenspezifisch gefertigte Anlagen, die Herstellung von Prozesswärme, die solare Kälteerzeugung, kombinierte Warmwasserbereitung und der Heizungsunterstützung, Anlagen in Kombination mit Biomassenverbrennung sowie Anlagen mit besonders effizienten Umwälzpumpen oder mit einem Mindest-Pufferspeichervolumen. Demgegenüber ist die Förderung von „Standardkollektoranlagen“ zur Warmwasserbereitung bis 40 m², die im Jahr 2005 noch 97% aller geförderten Anlagen ausmachte, auf 60 Euro/m² abgesenkt worden.

Die Ergebnisse der im vorliegenden Forschungsvorhaben durchgeführten Beständigkeitsprüfung haben überrascht und sind teilweise auf Kritik gestoßen. Ziel der Beständigkeitsprüfung war es, zu überprüfen, ob die galvanisch hergestellten selektiven Absorberbeschichtung beständiger sind als die durch Vakuumprozesse hergestellten Beschichtungen. Diese Vermutung konnte sehr deutlich bestätigt werden. Überrascht hat demgegenüber das Verhalten der Vakuumbeschichtung auf Aluminiumsubstrat. Hier konnte eine deutlich verringerte Beständigkeit bei der thermischen Schichtbeanspruchung festgestellt werden. Die Kritik an diesem überraschenden Ergebnis zielte auf zwei Punkte. Zum einen wurde die untersuchte Absorberprobe als nicht repräsentativ erachtet und zum anderen wurden die verschiedenen Zeiten der Schichtdegradation als nicht vergleichbar kritisiert. Hinsichtlich der Probenahme ist zu erwidern, dass alle Proben der Vakuumbeschichtungen nicht wie sonst bei Beständigkeitsprüfungen üblich von den Beschichtungsherstellern bezogen wurden, sondern stattdessen direkt aus der Kollektorproduktion gezogen wurden. Dieses Vorgehen wurde gewählt, um einen realistischen Eindruck von

¹ Richtlinien zur Förderung von Maßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien im Wärmemarkt vom 5. Dezember 2007

den tatsächlich im März 2006 in Kollektoren verbauten und anschließend auf dem Markt angebotenen Absorbern zu erhalten. Die zu einem früheren oder späteren Zeitpunkt von den Beschichtungsherstellern durchgeführten Beständigkeitsprüfungen und deren möglicherweise abweichenden Ergebnisse sind daher nur eingeschränkt mit den hier dokumentierten Prüfergebnissen vergleichbar. Es handelt sich stattdessen lediglich um Prüfungsergebnisse, die zu einem anderen Zeitraum der Beschichtungsherstellung und unter abweichenden Probenentnahmebedingungen ermittelt worden sind.

Zur Frage der Vergleichbarkeit der Degradationszeiten insbesondere bei der thermischen Beanspruchung ist zu erwidern, dass aufgrund des festgestellten sehr ähnlichen Absorptions- und Emissionsverhaltens, die thermische Beständigkeit aller in Vakuumverfahren hergestellten Absorberbeschichtungen bei der selben Prüftemperatur in Höhe von 265°C durchgeführt wurden. Wir halten daher die unterschiedlichen Zeitpunkte der optischen Leistungsverluste der Schichten sehr wohl für vergleichbar. Denn auch wenn bei den verschiedenen Schichtsystemen und –substraten unterschiedliche Aktivierungsenergien eine Rolle im Prozess der Schichtdegradation gespielt haben mögen, muss nach unserem wissenschaftlich Selbstverständnis ein fundierter Leistungsvergleich unter identischen Prüfbedingungen durchgeführt werden.

Ein weiteres überraschendes Ergebnis ergab sich hinsichtlich der Nutzung der „energetischen Amortisationszeit“. Es konnte gezeigt werden, dass die energetische Amortisationszeit keine Aussagen über die energetischen Erträge über die gesamte Lebensdauer beinhaltet. Dadurch kann der Fall eintreten, dass bei einem Vergleich zweier Kollektoren eine kurze energetische Amortisationszeit des Einen durchaus einem höheren Energieertrag des anderen gegenüberstehen kann, wenn die Kollektorerträge während der gesamte Lebensdauer berücksichtigt werden. Damit ist die energetische Amortisationszeit kein geeigneter Indikator um vergleichende Aussagen über die energetische Effizienz zu treffen. Dies ist insoweit von besonderem Relevanz, als die energetische Amortisationszeit ein weit verbreiteter Indikator im Rahmen ökologischer Bilanzierung und Bewertung von energieverzeugenden Anlagen ist

Volker Handke, Berlin im Juli 2009

Abstract

There are only out-dated research results on the environmental impact of solar thermal collectors which do not reflect the state of the art in this field. Particularly with regard to the long-term resistance and ageing of the absorbers of solar thermal collectors, there are no current scientific findings. There are controversial findings on the different coating technologies with regard to their energy demand, optical performance, environmental impact and long-term resistance.

The research project aims to develop ambitious technical environmental standards to update the "Marktanreizprogramm" (market stimulating program) in accordance with the European Laws and regulations on state aids and grants, taking into account technological and market development.

The following methods were used: empirical market analysis with manufacturers interviews, investigation of the cumulated energy demand and EcoIndicator 99 values of different collectors, life cycle analysis of different coating technologies in accordance with ISO 14040-42 and examination of the resistance according to Task 10 of the IEA SHC.

The following environmental standards are being proposed: the solar thermal generated heat quantity, compliance with the Task 10 resistance requirements, compliance with EN 12975-12977 and Solar Keymark respectively, compliance with RAL UZ 73 as well as a minimum return of 525 kWh/ m²/ year at a solar coverage ratio of more than 40%.

To apply these environmental standards it is being proposed to divide the funding within the "Marktanreizprogramm" into a basic funding option and a funding option based on the performance of the collectors. Prerequisite for receiving the basic funding is the compliance with the environmental standards. The basic funding should be differentiated taking into account the different technologies and applications as well as the competitiveness. Furthermore, the basic funding should be a precondition for receiving the performance funding. The performance funding should be paid in Euro per solar generated kWh.

1. Zusammenfassung

Der vorliegende Werkstattbericht fasst die Ergebnisse des Forschungsvorhabens zusammen. Das Vorhaben ist in folgende Arbeitspakete untergliedert:

- Marktanalyse
- Analyse der Umweltauswirkungen
- Anforderungen an fortschrittliche technische Umweltstandards
- Ökobilanz der Beschichtungsverfahren
- Beständigkeitsprüfung gemäß Task 10 der IEA
- Vorschläge für fortschrittliche technische Umweltstandards

Die folgenden Abschnitte stellen die Ergebnisse dieser Arbeitspaket zusammenfassend dar:

- Der **solarthermische Markt** in Deutschland ist einerseits geprägt von zunehmender Industrialisierung, Standardisierung und Automatisierung der Herstellung. Andererseits ist eine zunehmende technische Diversifizierung mit entsprechend spezialisierten Anbietern sowie Konzentrationstendenzen zugunsten großer Anbieter traditionaler Produkte der Heizungs- und Installationstechnik, zu beobachten. Nach dem rasanten Wachstum in den Jahren 1992 bis 2001 mit i.d.R. zweistelligen Wachstumsraten, erholt sich der Markt nach dem Einbruch im Jahr 2002 nur schleppend. Trotz der vorhandenen erheblichen Wachstumspotenziale, der realisierten Kostensenkungen und der bisher unterschätzten Bedeutung der Solarthermie als erneuerbare Energiequelle, wird bis 2007 nur mit moderaten Wachstumsraten gerechnet. Gleichwohl dürfte sich das globale Marktwachstum mittelfristig sehr dynamisch entwickeln und insbesondere aufgrund der anzunehmenden weiteren Preiserhöhungen für fossile Energieträger wieder zweistellige Wachstumsraten erreichen.
- Hinsichtlich der **Umweltauswirkungen** überwiegen die massenwirksamen metallischen und mineralischen Kollektorbestandteile (Kupfer, Aluminium, Stahl, Mineral- und Glaswolle sowie Glas) bei Ressourcenverbrauch, Energieaufwand, Luft- und Wasseremissionen und Abfall. Die Erfassung und Rückführung von Altkollektoren und die Kreislaufführung ihrer stofflichen Bestandteile ist nahezu unreguliert obwohl Recyclingoptionen vorhanden sind und es sich um klassische Stoffe der Sekundärrohstoffwirtschaft handelt. Diesbezüglich dürfte der stark ansteigende Anfall von Altkollektoren ab dem Jahr 2010 erhebliche konzeptionelle Bemühungen zur Integration in bestehende stoffliche Verwertungsstrategien notwendig machen. Die Umweltauswirkungen der selektiven Absorberbeschichtungen sind bei einer Betrachtung als Kollektorbestandteil aufgrund ihres geringen Massenanteils eher marginal. Gleichwohl wird in den galvanischen Beschichtungsverfahren krebserregendes Chrom VI eingesetzt. Aus diesem Einsatz ergibt sich sowohl aus nationaler als auch aufgrund der europäischen Rechtslage ein besonderes Vermeidungsgebot. Dies gilt insbesondere aufgrund des Vorliegens geeigneter Substitute.
- Hinsichtlich der **Anforderungen an Umweltstandards** zeichnen sich die Einhaltung der einschlägigen europäischen Normen, die Beachtung der effektiv substituierten Energiemenge, eine recyclinggerechte Konstruktion und eine Rücknahmeverpflichtung sowie die Vermeidung von Beschichtungen die unter Einsatz von krebserregendem Chrom VI hergestellt werden, als wesentliche Optionen ab. Bei der Vermeidung des Einsatzes von krebserregendem Chrom VI sind einerseits auf die nationalen wie internationalen –insbesondere europäischen- Umweltschutzziele Bezug zu nehmen, andererseits jedoch mögliche Einsatzgrenzen (z.B.: Solardach oder Aufdach-Verglasungen) der verfügbaren Chrom VI freien Substitute zu beachten. Die Nutzung des bestehenden Umweltzeichens RAL UZ 73 stellt sich ambivalent dar. Einerseits wäre eine Nutzung vorteilhaft hinsichtlich eines Rückgriffes auf einen bestehenden Katalog von umweltrelevanten Anforderungen sowie hinsichtlich der Marktdurchdringung des Umweltzeichens. Andererseits birgt die seit der Novellierung vom Februar 2005 dort verwendete energetische Amortisationszeit die Gefahr, dass bei einer energetischen Betrachtung über die gesamte Lebensdauer einer Solaranlage nur noch bedingt richtungssichere Beurteilungen über die tatsächliche Umweltleistung vorgenommen werden können.

- In der vergleichenden **Ökobilanz der Beschichtungsverfahren** konnte festgestellt werden, dass die Schwarzverchromung das Beschichtungsverfahren mit den höchsten Chrom VI Emissionen darstellt. Hinsichtlich des Energieaufwands wurde kein signifikanter Unterschied zwischen der galvanischen und den nicht-galvanisch hergestellten Beschichtungen festgestellt. Die nickel-pigmentierte Aluminiumoxid-Beschichtung auf Aluminium-Substrat wies jedoch hinsichtlich Energieaufwand, Klimaerwärmungspotential, menschliche Gesundheit sowie bezüglich der Gewässereutrophierung und -versauerung die höchsten Umweltwirkungen auf. Hinsichtlich der Frage nach den Chrom VI Emissionen in den Vorketten der chromhaltigen Sputtertargets konnte mit Hilfe einer ökobilanziellen Einzelbetrachtung gezeigt werden, dass die in der Galvanik eingesetzte Chromsäure während ihrer Herstellung drei mal so viel Chrom VI Emissionen verursacht wie die Prozesse zur Herstellung von metallischem Chrom, wie es in einigen Sputtertargets verwendet wird. Dabei wurde festgestellt, dass Chrom VI hauptsächlich in Gewässern emittiert wird.
- Die **Prüfung der Beständigkeit** führte zu dem Ergebnis, dass die untersuchte Beschichtung auf Aluminium-Substrat hinsichtlich der Temperaturbeständigkeit nicht den Anforderungen der Task 10 genügte. Insbesondere aufgrund der Zunahme der thermischen Emissionen, überstieg der Verlust ihrer optischen Leistungsfähigkeit bereits nach kurzer Zeit den zulässigen Wert. Die galvanisch hergestellte Beschichtung wies dagegen mit Abstand die höchste Beständigkeit sowohl bei der Temperaturbeanspruchung als auch hinsichtlich der Kondensation und der atmosphärischen Korrosion auf. Erstaunlicherweise konnte sie ihre optische Leistungsfähigkeit sogar steigern. Die nicht-galvanisch hergestellten Beschichtungen auf Kupfersubstrat erfüllten die Beständigkeitsanforderungen der Task 10 in allen Beanspruchungsarten. Hinsichtlich der zu erwartenden Lebensdauer lagen diese zwischen 42 und 43 Jahren. Für die galvanische Beschichtung konnte lediglich festgestellt werden, dass ihre Lebensdauer größer als 43 Jahre ist. Für die Beschichtung auf Aluminiumsubstrat wurde eine Lebensdauer von 15 Jahren bestimmt.

Im letzten Schritt werden als Schlussfolgerung aus allen vorangegangenen Arbeitspaketen **anspruchsvolle technische Umweltstandards** von thermischen Solarkollektoren unter besonderer Berücksichtigung der selektiven Beschichtung ihrer Absorberoberflächen vorgeschlagen.

Als zentraler fortschrittlicher Umweltstandard wird vorgeschlagen, die Menge an substituierter fossiler Primärenergie zu nutzen. Dabei wird empfohlen, aktuelle und gängige Standardrahmenbedingungen zu Grunde zu legen. Die kumulierten Energieaufwendungen für die Herstellung, den Betrieb und die Wartung des Kollektors sind zwar ein zielgenauer Indikator für seine Umweltauswirkung, sollten aber trotz dessen bei der Bestimmung der substituierten fossilen Primärenergie nicht berücksichtigt werden, denn ihre Energiemengen betragen nur ein Bruchteil verglichen mit dem solaren Ertrag während der gesamte Lebensdauer.

Vor dem Hintergrund der Ergebnisse der Beständigkeitsprüfung wird vorgeschlagen, die Beschichtungsverfahren selbst nicht bei der Entwicklung der Umweltstandards einzubeziehen. Des weiteren wird empfohlen, die galvanisch hergestellten Schichten nicht aus einer Förderung auszuschließen. Ausschlaggebend ist dabei ihre Beständigkeit und ihre lange Lebenserwartung sowie ihre sich daraus ergebende prädestinierte Nutzung in besonders beanspruchten Anwendungsfeldern. Ihre Beständigkeit und Lebensdauer überwiegen letztlich ihre negativen Umweltauswirkungen in Form der Emissionen von krebserregenden sechswertigen Chroms. Diese abwägende Schlussfolgerung erscheint insbesondere daher gerechtfertigt, weil sowohl bei der Herstellung von Chromsäure, als auch bei der Schwarzverchromung selbst davon ausgegangen werden kann, dass der Stand der Technik in der Luftreinhaltung und dem Gewässerschutz sowie die nationalen und internationalen emissionsrechtlichen Vorschriften zu Chrom VI eingehalten werden.

Allerdings wird aufgrund der heterogenen Ergebnisse der Beständigkeitsprüfung vorgeschlagen, die erfolgreiche Task 10 Prüfung als Umweltstandard festzulegen.

Hinsichtlich der Verwendung schmermetallhaltiger Lote wird keine Berücksichtigung in den Umweltstandards empfohlen, da bleihaltige Weichlote nicht im Kollektorbereich, sondern in der Verrohrung

eingesetzt werden und bei den cadmiumhaltigen Hartloten weder belastbare Praxiskenntnisse über Substitutionsmöglichkeiten vorliegen, noch auf übertragbare Regelwerke, wie z.B. die europäische RoHS-Richtlinie, zurückgegriffen werden kann.

Es wird ferner vorgeschlagen, die Einhaltung der technischen Normen EN 12975 bis 12977 als Umweltstandard zu nutzen. Die technischen Normen beinhalten insbesondere Anforderungen an Qualitätsstandards und umweltbezogene Empfehlungen, u.a. auch zur recyclinggerechten Konstruktion.

Schließlich wird empfohlen, die Vergabegrundlage zur RAL UZ 73 als Umweltstandard zu nutzen. Dies ergibt sich zum Einen aus den umweltbezogenen Anforderungen der Vergabegrundlage, insbesondere zur Rücknahmeverpflichtung der Altkollektoren. Zum anderen handelt es sich um eine marktdifferenzierende Produktkennzeichnung, mit deren Hilfe den Anforderungen des europäischen Umweltbeihilferahmens entsprochen werden kann, nur dann Investitionsbeihilfen zu gewähren, wenn der Stand der Technik übertroffen wird.

Für eine zukünftige umweltorientierte Förderung, die sich an diesen Umweltstandards orientiert, wird eine Grund- und eine Leistungsförderung vorgeschlagen. Für den Erhalt der Grundförderung müssen die Umweltstandards eingehalten werden. Ferner sollte die Grundförderung technologie- und anwendungsspezifisch differenziert ausgestaltet werden, um so zwischen noch zu erschließenden Marktsegmenten und bereits wirtschaftlichen System unterscheiden zu können. Die Leistungsförderung sollte demgegenüber für alle Systeme gleich ausgestaltet sein und sich lediglich an der solar erzeugten Wärmemenge orientieren.

2. Einleitung

2.1. Hintergrund und Zielsetzung

Auf dem Weg zu einem zukunftsfähigen und nachhaltigen Energiesystem nimmt die Nutzung regenerativer Energieträger insbesondere aus Gründen von Umwelt- und Klimaschutz eine Schlüsselstellung ein. Um die verstärkte Nutzung von regenerativen Energieträgern und die Marktdurchdringung der entsprechenden Technologien zu erreichen, stellen finanzielle Anreize wichtige Förderinstrumente dar. Dazu zählt neben dem EEG² insbesondere die Richtlinien zur Förderung von Maßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energie (Marktanreizprogramm). Derartige finanzielle Anreize und Fördermechanismen unterliegen jedoch nationalen³ und insbesondere europäischen Rahmenbedingungen⁴. Das Marktanreizprogramm der Bundesregierung zur Förderung von Maßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien sieht unter anderem aus diesen Gründen, aber auch aus Gründen der generellen Zielerreichung und der Anpassung an die aktuellen Marktentwicklungen, jährliche Überprüfungen der Fördersätze, der technischen Anforderungen und der Umweltstandards vor.

Das europäische Umweltbeihilfenrecht legt insbesondere die Voraussetzungen für die Genehmigung von Umweltschutzbeihilfen im Energiesektor fest. Beihilfen gelten dabei insbesondere dann als gerechtfertigt, wenn sie einen Anreizeffekt besitzen, die bestehenden technischen Normen der europäischen Gemeinschaft zu übertreffen. Demzufolge sind Beihilfen nicht gerechtfertigt, wenn sie lediglich auf die Einhaltung bestehender technischer Normen abzielen, sondern wenn sie einen Anreiz darstellen, einen höheren Umweltschutz als den aufgrund der Gemeinschaftsnormen geforderten zu verwirklichen.

Vor diesem Hintergrund zielt das Forschungsvorhaben auf die Analyse und Beschreibung des aktuellen Stands der Technik solarthermischer Kollektoren und ihrer Beschichtungen sowie die Ableitung und Fortschreibung von technisch machbaren und wirtschaftlich zumutbaren anspruchsvollen Umweltstandards.

Mit der wissenschaftlich fundierten Festlegung von fortschrittlichen Umweltstandards soll sichergestellt werden, dass bei der Weiterentwicklung der Förderung von Maßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien die Genehmigungsvoraussetzungen gemäß des europäischen Umweltbeihilferahmens eingehalten werden.

2.2. Vorgehensweise

Das Forschungsvorhaben gliedert sich in folgende sechs Arbeitspakete

1. Marktrecherche
2. Analyse der Umweltwirkung
3. Auswertung und Ableitung von Anforderungen
4. LCA der Beschichtungsverfahren
5. Lebensdauerbestimmung der Beschichtungen
6. Vorschläge für anspruchsvolle technische Umweltstandards

Während der Marktrecherche erfolgte eine umfassende Ermittlung der derzeitigen technischen und ökonomischen Situation der solarthermischen Wärmezeugung, um eine ausreichende Daten- und Erkenntnisgrundlage für die nachfolgenden Arbeiten zu erhalten.

Im Rahmen der Analyse der Umweltauswirkungen wurde mit Hilfe unterschiedlicher Indikatoren die Umweltauswirkungen von solarthermischen Kollektoren beschrieben.

² Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) vom 25.02.2000

³ z.B.: Verwaltungsvorschriften zur Bundeshaushaltsverordnung

⁴ z. B.: Gemeinschaftsrahmen für staatliche Umweltbeihilfen (200/C 37/03)

Die Ableitung von Umweltaanforderungen umfasste zunächst eine Bewertung der analysierten Umweltauswirkungen, mit deren Hilfe eine technologische Einordnung vorgenommen wurde sowie die Potentiale zur Minderung der Umweltauswirkungen aufgezeigt wurden. Daraus wurden Vorschläge für Umweltaanforderungen formuliert, welche grundsätzlich für die Fortschreibung anspruchsvoller technischer Umweltstandards geeignet sind. Die so identifizierten Umweltaanforderungen wurden im Rahmen eines Workshops mit fachlich involvierten Wissenschaftlern validiert.

Während der LCA⁵ der Beschichtungsverfahren erfolgte eine ökobilanzielle Detailbetrachtung der Beschichtungsverfahren gemäß DIN/EN/ISO-Normen 14040 bis ISO 14043 mit dem Ziel, die Bedeutung ihrer Umweltauswirkungen zu bestimmen.

Die Lebensdauerbestimmung der Beschichtungen erfolgte mit Hilfe des Prüfverfahrens der Task 10 der IEA⁶. Ziel dieses Arbeitspaketes war es, durch eine Detailbetrachtung verschiedener Beschichtungssysteme Aussagen über deren Langzeitverhalten treffen zu können.

Im letzten Arbeitspaket wurden schließlich auf der Grundlage der identifizierten Umweltaanforderungen und der Ergebnisse der Detailbetrachtungen der selektiven Beschichtungen Vorschläge für anspruchsvolle technische Umweltstandards entwickelt.

Die entwickelten Umweltstandards wurden im Rahmen eines Workshops mit Vertretern der beteiligten Branche diskutiert und ggf. angepasst.

Einen Gesamtüberblick über die Arbeitspakete liefert die folgende Abbildung:

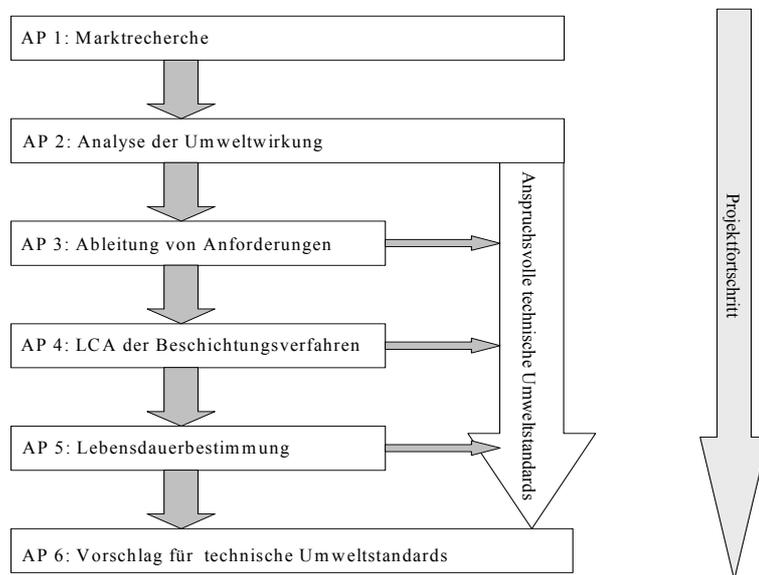


Abbildung 2-1: Überblick über den Projektablauf

Wesentlicher methodischer Ansatz ist die umfassende und indikatorübergreifende Untersuchung der Umweltauswirkungen von solarthermischen Kollektoren. Dabei wird einerseits ein umfassender Umweltbegriff zugrundegelegt, der zum Beispiel auch Aspekte der Gesundheit am Arbeitsplatz bzw. in der Herstellung beinhaltet. Andererseits werden die Umweltauswirkungen sowohl entlang des gesamten Produktlebenszyklus – von der Herstellung über die Nutzung bis zur Entsorgung – als auch unter Berücksichtigung wesentlicher Vorketten betrachtet. Insbesondere Überlegungen zur Nachnutzungsphase nehmen einen besonderen Stellenwert ein, da bisher über die Möglichkeiten der Verwertung und des stofflichen Recyclings sehr wenig bekannt ist. Die Vorgehensweise im Vorhaben orientiert sich zunächst an den drei funktionalen Schritten

1. Bereitstellung einer Informationsgrundlage

⁵ Life-Cycle-Assessment

⁶ Von der Arbeitsgruppe MSTC (Materials in Solar Thermal Collectors) des IEA-SHCP (International Energy Agency – Solar Heating and Cooling Programme) entwickeltes und als Entwurf für ISO/CD 12592.2, Solar Energy – Materials for flat plate collectors – Qualification test procedure for solar surface durability⁶ vorgelegtes Prüfprogramm

2. Beurteilung der Umweltauswirkungen
3. Ableitung von fortschrittlichen Umweltstandards.

Die Schritte zwei und drei wurden im Rahmen einer iterativen Vorgehensweise zweimal durchlaufen. Das erste Mal zur übergreifenden Feststellung der Umweltauswirkungen und zur Identifizierung von Umwelтанforderungen sowie zur Validierung dieser Anforderungen durch wissenschaftliche Experten (Phase 1).

In der zweiten Phase erfolgte die Beurteilung der Umweltauswirkungen und die Ableitung von fortschrittlichen Umweltstandards einerseits mit dem inhaltlichen Schwerpunkt der Lebensdauerbestimmung unterschiedlicher Beschichtungssysteme und andererseits mit dem methodischen Schwerpunkt eines Life-Cycle-Assessment unter Berücksichtigung wesentlicher Vorketten. Die anschließende Ableitung von fortschrittlichen Umweltstandards stellte einerseits eine Erweiterung der in Phase 1 entwickelten Ansätze für fortschrittliche Umweltstandards dar und diente andererseits als wissenschaftliche Grundlage zur generellen Neuausrichtung der umweltbezogenen Förderbedingungen im Marktanreizprogramm.

Der vorliegende Abschlussbericht behandelt die Arbeitsschritte

- Marktrecherche
- Analyse der Umweltwirkung
- Auswertung und Ableitung von Anforderungen an Umweltstandards sowie erste Schlussfolgerungen im Hinblick auf die Entwicklung von fortschrittlichen Umweltstandards

welche im Zeitraum zwischen März und September 2005 durchgeführt wurden und in einem Zwischenbericht erstmalig dokumentiert sowie im Rahmen eines wissenschaftliche Workshop am 8. November 2005 präsentiert und diskutiert wurden.

Die Arbeitsschritte

- Ökobilanz der Beschichtungsverfahren
- Durchführung der Beständigkeitsprüfung und Vorhersage der Lebensdauer sowie
- Vorschläge für technische Umweltstandards

wurden zwischen Oktober 2005 und September 2006 durchgeführt. Die Gesamtergebnisse aus allen Arbeitsschritten wurden am 16. Oktober 2006 im Rahmen eines Branchenworkshops präsentiert und diskutiert. Eine detaillierte Beschreibung des Branchenworkshops ist in Anhang 10.7 zu finden.

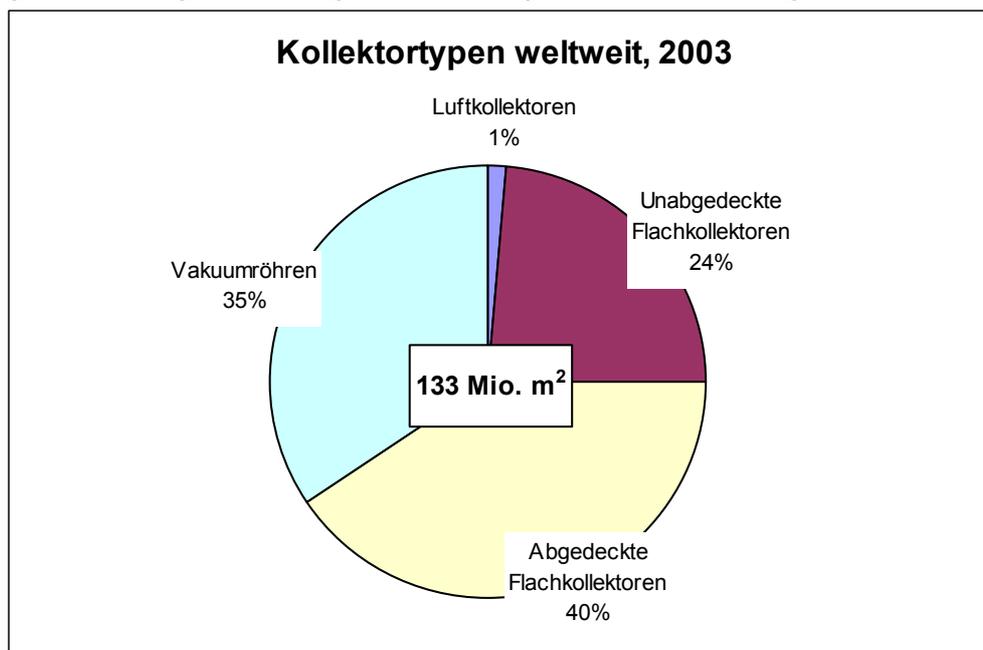
3. Marktanalyse

Der weltweite Beitrag von thermischen Solaranlagen für Warmwasser und Raumheizung wurde bisher stark unterschätzt. Gemäß des zwischen der IEA SHC⁷ und den wichtigsten Industrieverbänden der solarthermischen Branche vereinbarten Umrechnungsfaktors von 0,7 kW_{th} pro Quadratmeter Kollektorfläche, ergibt sich für das Jahr 2003 eine kumulierte Kapazität von 60 GW_{th}⁸. Diese Kapazität entspricht einer Menge von 8,8 Mrd. Liter Erdöläquivalent sowie eine entsprechend vermiedene Emissionsmenge von 26,2 Mio. t Kohlendioxid. Damit liegt die Solarthermie noch vor der Windenergie mit 40 GW_{el} und der Photovoltaik mit 1,8 GW_{el}.

Dennoch beruht erst ein geringer Teil der Energie am Wärmemarkt auf Sonnenenergie. Schätzungen zufolge könnte die Hälfte des weltweiten Warmwasserbedarfs solar erzeugt werden, beim Heizbedarf ein Viertel, bei Prozesswärme bis 150°C etwa zum Auto waschen oder Pasteurisieren, könnten Solaranlagen ein Viertel der Energie beisteuern. Bei der Gebäudekühlung, einer der weltweit am stärksten wachsenden Märkte, wäre Solarenergie ebenfalls in der Lage, einen beträchtlichen Teil der Energie beizusteuern [SARAZIN 2004]

3.1. Weltweit

Weltweit war im Jahr 2003 eine solarthermische Kollektorfläche von 133 Mio. m² installiert. Lediglich ca. 1% dieser Fläche waren Luftkollektoren der Rest verteilt sich auf unterschiedliche Kollektoren mit flüssigen Wärmeträgern. Die folgende Abbildung stellt diese Verteilung dar:



Quelle: [IEA SHC 2005]

Abbildung 3-1: Weltweite Verteilung der Kollektortypen.

Luftkollektoren werden überwiegend für Trocknungsprozesse in der Landwirtschaft eingesetzt (z.B.: In der Teetrocknung). Kollektoren mit flüssigen, meist wässrigen Wärmeträgern werden überwiegend zur Warmwasserbereitung und teilweise zur Raumheizung eingesetzt. Eine weitere Nutzung ist die Verwendung zur Bereitstellung von Prozesswärme im Niedertemperaturbereich. Allerdings wird diese Nutzung nur sehr marginal angewandt. Gleichwohl ist zukünftig insbesondere in diesem Bereich mit deutlichen Zunahmen zu rechnen.

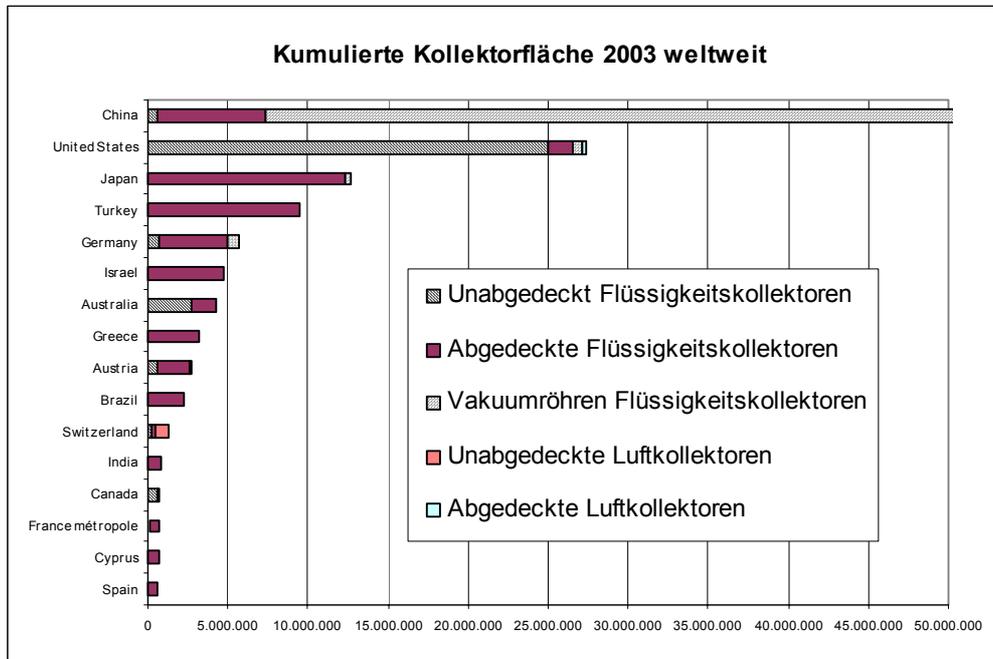
⁷ International Energy Agency Solar-Heating and Cooling Programme

⁸ Diese Zahlen umfassen lediglich die Berichterstattung aus den der IEA angeschlossenen Ländern und stellen daher lediglich eine untere Abschätzung dar. Zudem umfassen sie nicht die unabgedeckten Kollektoren. Daher ergeben sich geringere Kollektorflächen als die in Abbildung 3-1 angegebenen.

Bei den Flüssigkeitskollektoren dominieren die abgedeckten Flachkollektoren als einfache Standardanwendung, gefolgt von den leistungsfähigeren, aber in der Anschaffung teureren Vakuumröhren-Kollektoren. Unabgedeckte Kollektoren stellen das einfachste solarthermische Kollektorsystem dar. Eingesetzt werden diese hauptsächlich zur Beckenwassererwärmung von Schwimmbädern.

Geographisch verteilt sich die kumulierte installierte Fläche auf wenige Länder. Zu nennen sind insbesondere China (39%), USA (21%), Japan (10%), Türkei (7%) und Deutschland (4%).

Die folgende Abbildung stellt die Verteilung von ca. 97% der kumulierten Fläche auf die einzelnen Länder dar:



Quelle: [IEA SHC 2005]

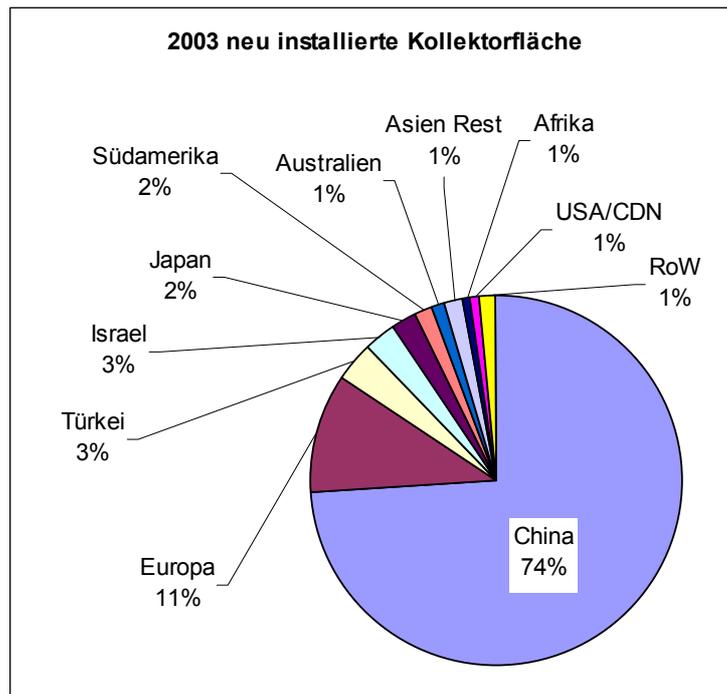
Abbildung 3-2: Geografische Verteilung der Kollektorfläche.

Die Spitzenstellung China resultiert insbesondere aus der hohen Bevölkerungszahl. Allerdings sind auch die Zuwachsraten in den letzten Jahren kontinuierlich gestiegen. Daneben erstaunt der mit 85% hohe Anteil an Vakuumröhren im chinesischen Kollektorbestand. Der hohe Kollektorbestand in der USA beruht zu 91% auf unabgedeckten Kollektoren. Hier ist ein breiter Einsatz bei privaten Swimmingpools anzunehmen.

Die im Jahr 2003 weltweit neu installierte Kollektorfläche betrug 12,9 Mio. m². Im Vergleich zum Jahr 2002 bedeutet dies eine Wachstumsrate von 23%.

Dominiert wird der Markt von China. Daneben stellen Deutschland, Griechenland, Österreich sowie die Türkei, Israel und Japan weitere große Märkte dar.

Die folgende Abbildung gibt einen Überblick über die weltweit im Jahr 2003 neu installierte Kollektorfläche:



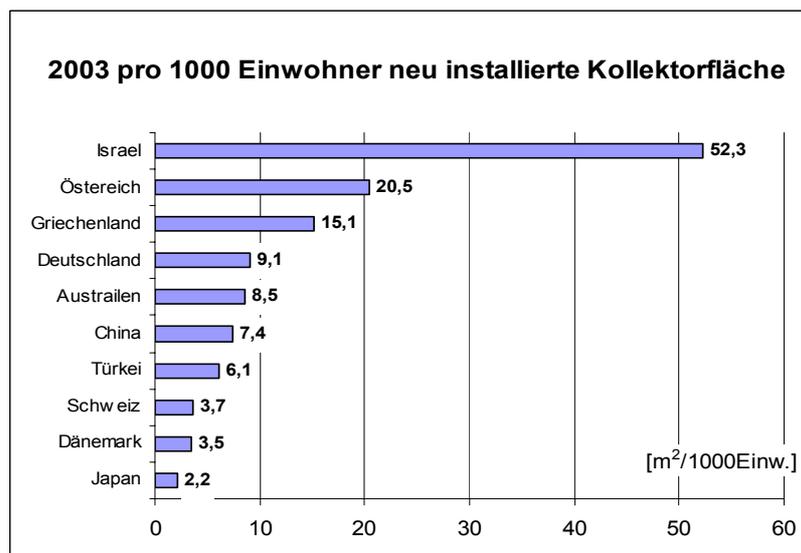
Quelle: [SARAZIN 2004]

Abbildung 3-3: 2003 weltweit neu installierte Kollektorfläche

Die Dominanz von China bei den neu installierten Kollektorfläche geht in erster Linie wiederum auf die große Bevölkerungszahl zurück. Daneben sind Wirtschaftswachstum und die damit einhergehende hohe Energienachfrage ursächlich.

Bei einer Betrachtung der neu installierten Fläche bezogen auf die Bevölkerungszahl ändert sich das Bild erheblich. Die Spitzenstellung wird dann von Israel eingenommen gefolgt von Österreich, Griechenland und Deutschland.

Folgende Abbildung liefert einen Überblick über die im Jahr 2003 pro 1.000 Einwohner neu installierte Kollektorfläche:



Quelle: [SARAZIN 2004]

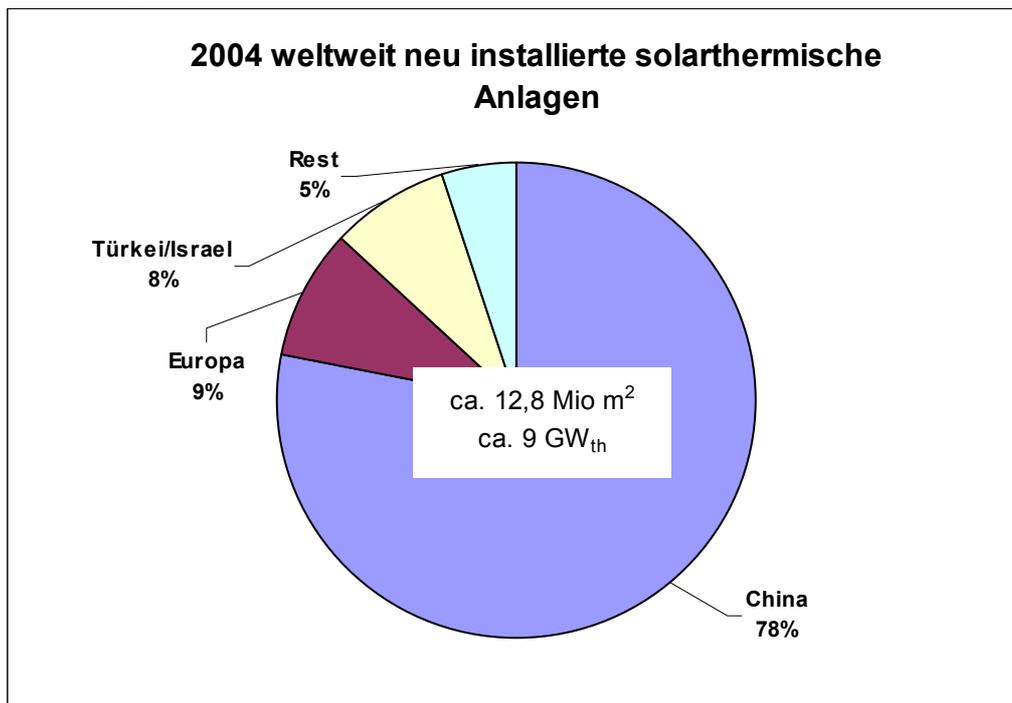
Abbildung 3-4: In 2003 neu installierte Kollektorfläche pro 1000 Einwohner

Zur obigen Abbildung ist anzumerken, dass sie lediglich eine Momentaufnahme darstellt. Bei einer zeitlichen Betrachtung wird erkennbar, dass die neu installierte Kollektorfläche in Israel seit 2001 kontinuierlich abnimmt. Dies liegt insbesondere darin begründet, dass lediglich ca.12% der neu installierten Fläche tatsächlich neu installierte Kapazitäten darstellen und der Rest für den Ersatz von alten Sys-

temen eingesetzt wird. Österreich hält ebenso wie Griechenland seine jährliche Installationsfläche relativ konstant. Deutschland hat mit einem Anstieg der neu installierten Fläche um 34% seinen Kollektorbestand gegenüber 2002 deutlich erhöht. China hat als einziges Land die installierte Kollektorfläche, auch bezogen auf die Einwohnerzahl, zwischen 1995 und 2003 kontinuierlich steigern können. Bemerkenswert ist ferner das Marktwachstum in Australien. Dort hat sich im Vergleich zum Jahr 2002 die neu installierte Fläche im Jahr 2003 von 70.000 auf 170.000 m² (bzw. von 3,6 auf 8,5 m² pro 1.000 Einw.) mehr als verdoppelt.

3.2. Europa

Gemessen an der im Jahr 2004 weltweit neu installierten solarthermischen Kapazität von ca. 9 GW_{th} nimmt sich der europäische Anteil mit ca. 9% eher gering aus. Eine diesbezügliche Übersicht stellt die folgende Abbildung dar:



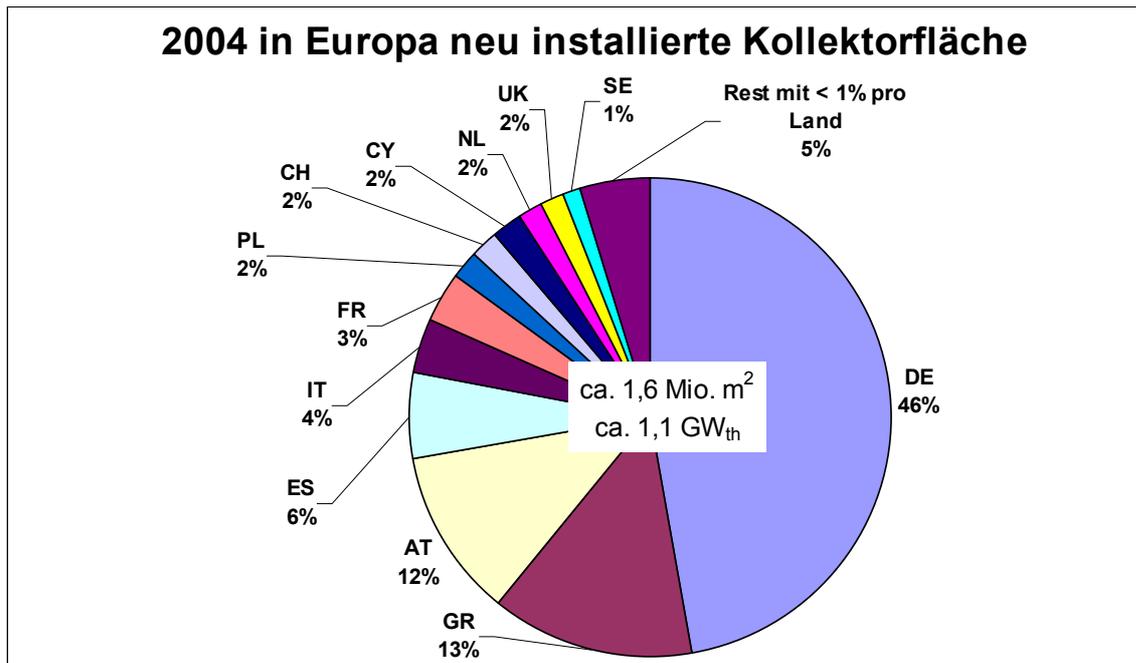
Quelle: [ESTIF 2004]

Abbildung 3-5: 2004 weltweit neu installierten solarthermischen Kapazität

Dieser geringe europäische Anteil am weltweiten Markt erstaunt insoweit, als Europa sowohl in den meisten solarthermischen Technologiefeldern als auch hinsichtlich der Förderbedingungen als führend gilt. [ESTIF 2004]

Erklärbar wird diese Diskrepanz zwischen der technologischen Führungsrolle und den Förderbedingung einerseits und den relativ geringen globalen Marktanteil andererseits, wiederum durch die enorme Größe des chinesischen Marktes.

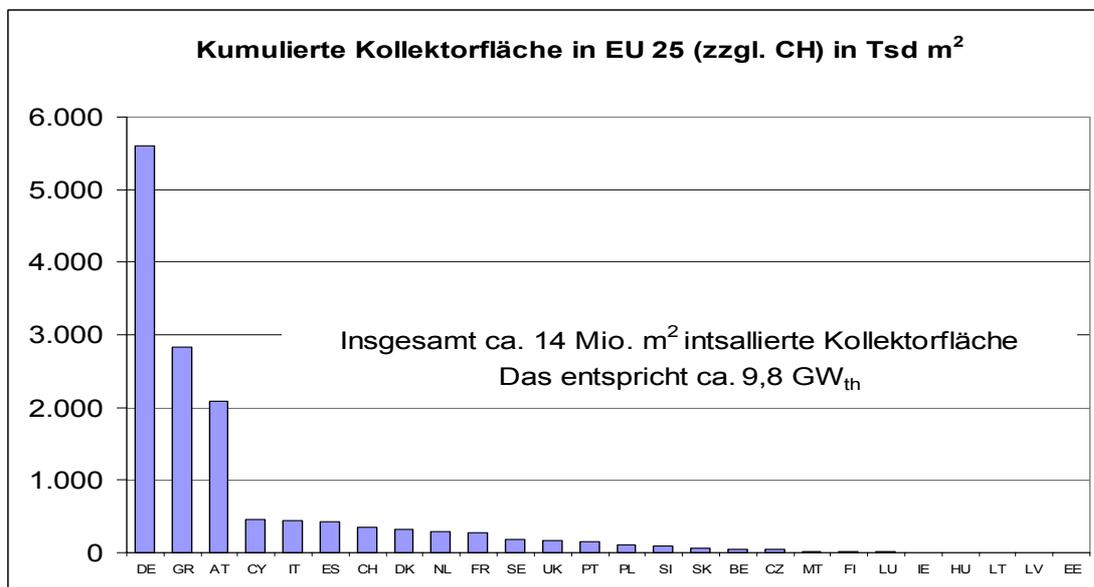
Eine detaillierte Betrachtung der in den europäischen Staaten im Jahre 2004 neu installierten Kollektorfläche liefert die folgende Abbildung:



Quelle: [ESTIF 2004]

Abbildung 3-6: 2004 in Europa neu installierte solarthermische Kollektoren.

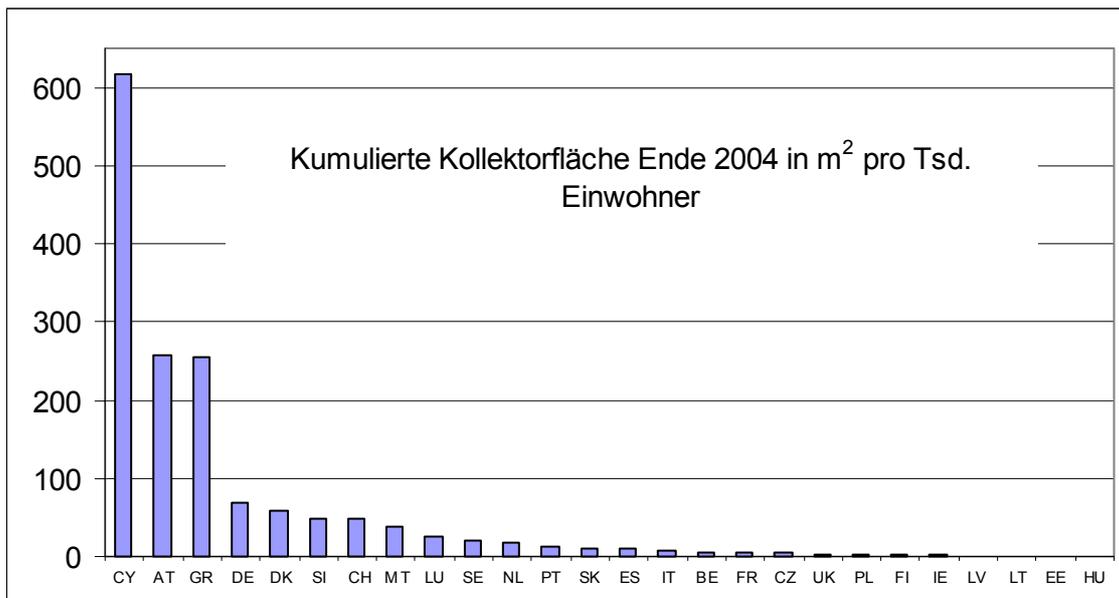
Innerhalb Europas dominierte im Jahr 2004 Deutschland den Markt mit ca. 750 Tsd. m² neu installierter Kollektorfläche. Dies entspricht einer Kapazität von 252 MW_{th}, gefolgt von Griechenland mit 215 Tsd. m² (ca. 151 MW_{th}) und Österreich mit ca. 183 Tsd. m² (128 MW_{th}). Eine ähnliche Verteilung ergibt sich auch bei einer Betrachtung der kumulierten Kollektorfläche, wie die folgende Abbildung zeigt:



Quelle: [ESTIF 2004]

Abbildung 3-7: Kumulierte Kollektorfläche in Europa zzgl. Schweiz.

Die Verteilung ändert sich wenn die kumulierte Kollektorfläche auf die Bevölkerung bezogen wird. Die folgende Abbildung stellt die bis zum Ende 2004 installierte kumulierte Kollektorfläche in Europa zuzüglich der Schweiz bezogen auf 1000 Einwohner dar:



Quelle: [ESTIF 2004]

Abbildung 3-8: Kumulierte Kollektorfläche pro 1000 Einwohner

Im europäischen Vergleich verfügt Zypern mit 616 m² pro 1000 Einwohner über die höchste solarthermische Dichte, gefolgt von Österreich und Griechenland mit je 265 m² pro Tsd. Einwohner. Deutschland liegt mit 86 m² pro Tsd. Einwohner auf Platz vier. Die relativ geringen Zahlen der übrigen EU-Staaten verdeutlichen gleichzeitig das große vorhandene Potential. Gemessen an der solarthermischen Dichte in Österreich, ergibt sich europaweit ein Potential von 105 Mio. m² zusätzlicher Kollektorfläche. Eine durchschnittliche Kollektorfläche von 256 m² pro Tsd. Einwohner wie in Österreich würde übertragen auf die deutsche Bevölkerung einen Zubau von weiteren 15,5 Mio. m² Kollektorfläche bedeuten.

Das Weißbuch der EU-Kommission nennt als Ziel für das Jahr 2010 eine in Betrieb befindliche Kollektorfläche von 100 Mio. m². Dies entspricht ungefähr 260 m² pro 1.000 Einwohner. Die realen Wachstumsraten in der EU der vergangenen Jahre (CAGR 1994-2003: 9,2%) weichen sehr stark von den erforderlichen Raten ab, um das Ziel erreichen zu können. Auch wenn EU-weite Wachstumsraten von mehr als 35% durch verbesserte politische Rahmenbedingungen erreicht werden könnten, würden diese Vorgaben wohl nicht vor 2015 erreicht. [SARAZIN 2004]

Die neuste Zielsetzung der europäischen Vereinigung für erneuerbare Energien [EREC 2004] prognostiziert für die Solarthermie jährliche Wachstumsraten von 23% bis zum Jahr 2020. Hierbei stützt sie sich vor allem auf das noch nicht ausgeschöpfte große Potenzial. Demnach wäre im Jahr 2020 mehr als 200 Mio. m² Kollektorfläche in Betrieb.

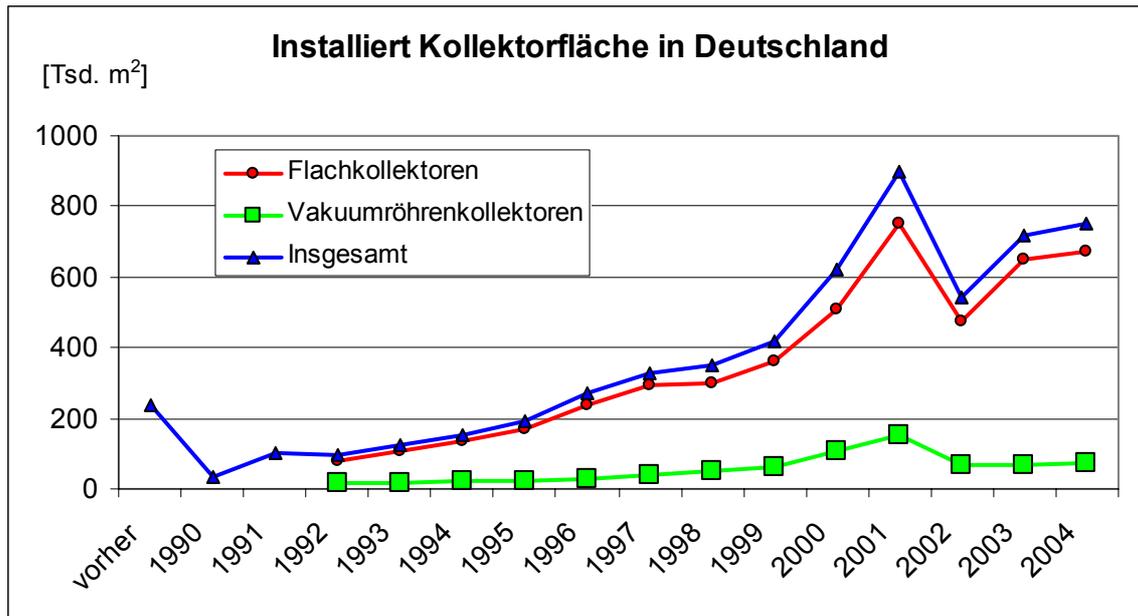
Demgegenüber geht [SARAZIN 2004] nach dem Markteinbruch im Jahr 2002 (-22%) eher von einer annähernden Stagnation bis 2006 mit einem Wachstum von durchschnittlich 5% aus. Erst danach wird mit Hilfe breiter gesetzlicher und politischer Unterstützung verschiedener europäischer Länder sowie weiter steigender Öl- und Gaspreise und neuen Anwendungsfeldern wieder mit größeren Wachstumsraten der neu installierten Fläche gerechnet. [SARAZIN 2004]

3.3. Deutschland

3.3.1. Bestand und Zubau

In Deutschland war zum Ende des Jahres 2004 eine Kollektorfläche von insgesamt ca. 5,8 Mio. m² installiert. Diese Fläche verteilt sich auf 4,75 Mio. m² Flachkollektoren und 0,72 Mio. m² Vakuumröhrenkollektoren. 0,37 Mio. m² aus den Jahren vor 1992 können nicht kollektorspezifisch zugeordnet werden.

Die Folgende Abbildung stellt die zeitliche Entwicklung der installierten Kollektorflächen dar:



Quelle: [BSI 2005]

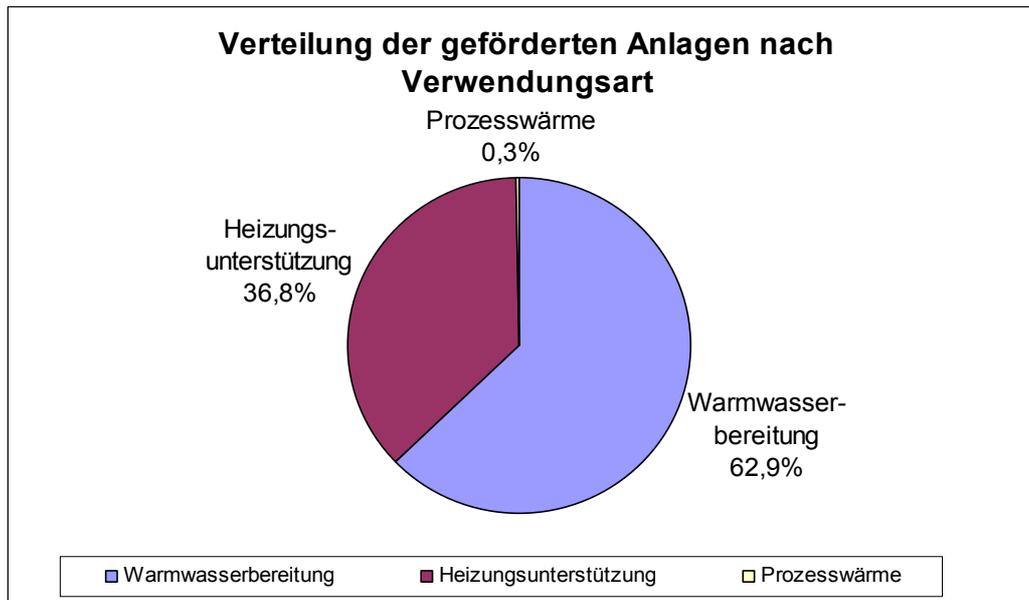
Abbildung 3-9: Installierte Kollektorfläche in Deutschland

Im Jahre 2004 wurden in Deutschland 89.660 Anlagen mit einer Kollektorfläche von insgesamt 795.747 m² im Rahmen der Richtlinie zur Förderung von Maßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energie (Marktanreizprogramm) durch das BAFA gefördert.⁹ Die durchschnittliche geförderte Kollektorfläche lag damit bei 8,9 m² pro Anlage. Insgesamt wurden damit Investitionen von 616 Mio. Euro ausgeführt. Dies entspricht einer durchschnittlichen Investitionssumme von 775,- Euro pro gefördertem m² Kollektorfläche und 6.859,- Euro pro geförderte Anlage.

Bei ca. 87,4% der geförderten Anlagen handelt es sich um Anlagen mit Flachkollektoren, ca. 12,4% sind Anlagen mit Vakuumröhrenkollektoren und ca. 0,1% besitzen Luftkollektoren. 98% der Kollektorfläche wurden im privaten Bereich gefördert und lediglich ca. 1% der Fläche liegt im Bereich Gewerbe und Handel. Der Rest verteilt sich auf die Wirtschaftsbereiche Industrie, Landwirtschaft, Freiberufler, Öffentlich-rechtlich und KMU. Ähnlich eindeutig verteilt sich die Bauart. Über 99% der geförderten Kollektorfläche fiel auf die Neuerrichtung während lediglich ein sehr geringer Anteil auf die Erweiterung fiel.

⁹ Zugrundegelegt werden die im Jahr 2004 tatsächlich ausgezahlten Förderungen. Es ist davon auszugehen, dass ca. 93% der installierten Kollektorfläche auch eine Förderung erhalten haben [vgl.: SWW 2/2005]

Hinsichtlich der Verwendung der geförderten Anlagen ist die Verteilung etwas heterogener, wie die folgende Abbildung illustriert:

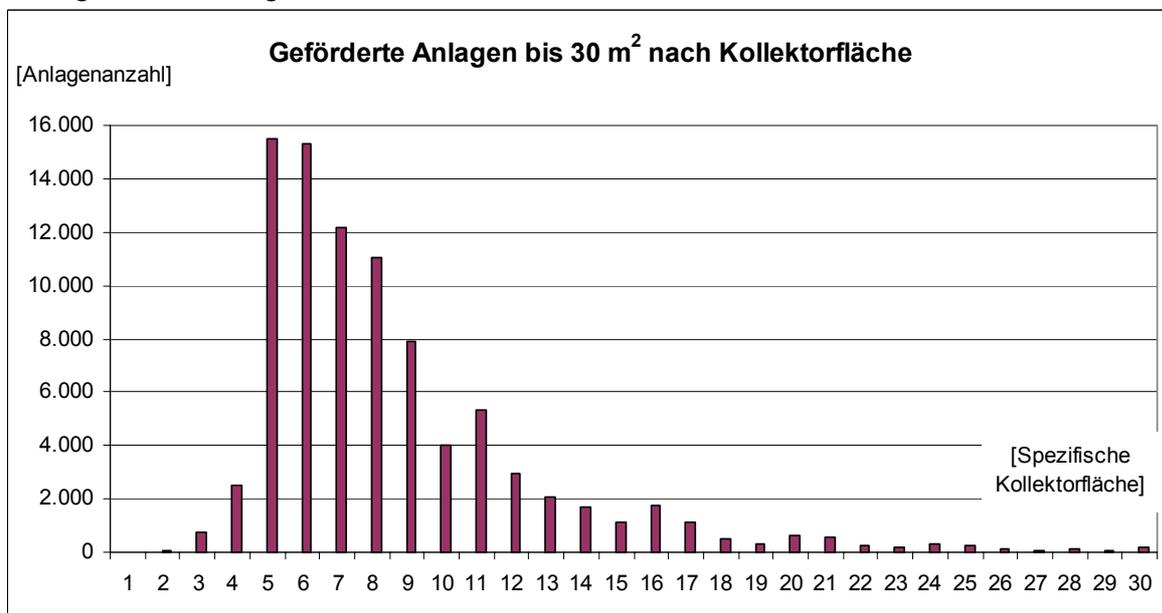


Quelle: [BAFA 2005]

Abbildung 3-10: Verteilung der geförderten Anlagen nach Verwendungsart.

Die Dominanz der Warmwasserbereitung wird etwas gemindert, wenn die Kollektorfläche betrachtet wird. Hier liegt der Anteil lediglich bei ca. 63% während 37% der geförderten Kollektorfläche zur Heizungsunterstützung eingesetzt wird. Der Anteil der Prozesswärme ist auch bezüglich der Kollektorfläche mit 0,3% eher marginal.

Die Verteilung der geförderten Anlagen bis 30 m² nach der anlagenspezifischen Kollektorfläche stellt die folgende Abbildung dar.



Quelle: [BAFA 2005]

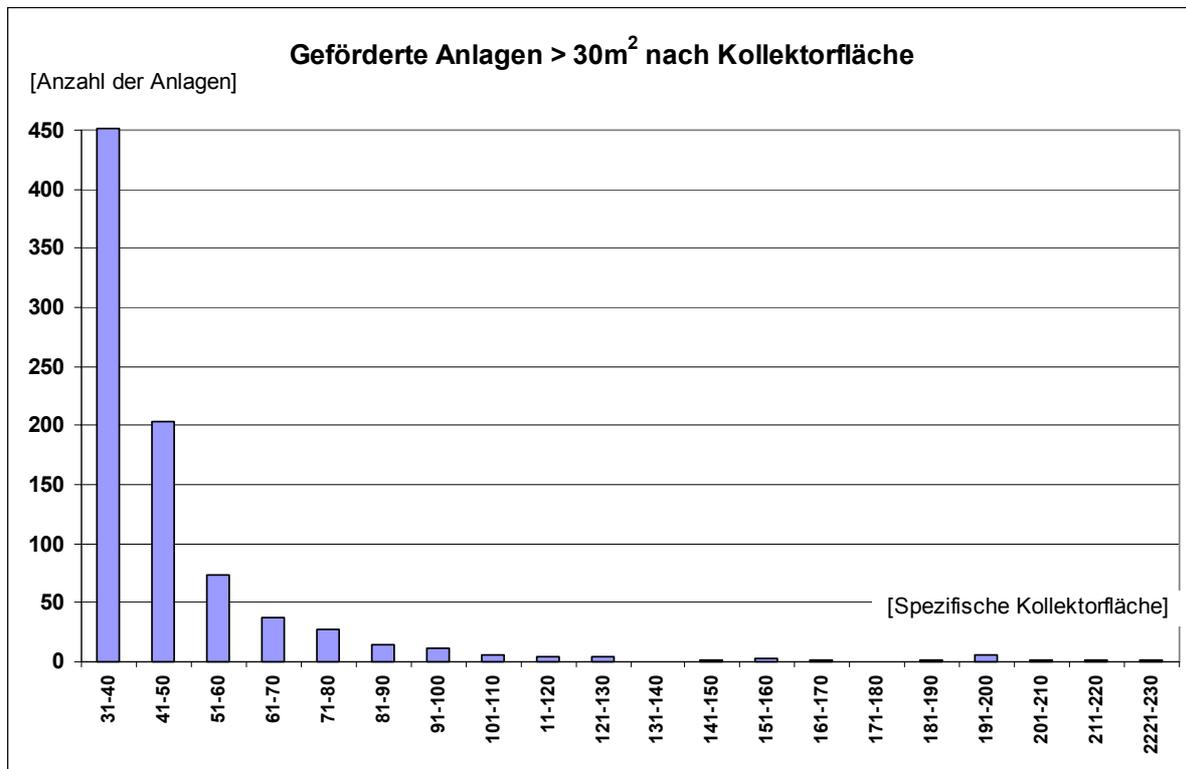
Abbildung 3-11: Geförderten Anlagen bis 30 m² nach Kollektorfläche

Die Anlagen bis zu einer Kollektorfläche von 30 m² umfassen 99% aller geförderten Anlagen und 94% der geförderten Kollektorfläche.

Deutlich erkennbar ist der Schwerpunkt der Verteilung. Ca. 75% aller geförderten Anlagen besitzen eine spezifische Anlagenfläche von 5 bis 10 m².

Im Jahr 2004 wurden insgesamt 849 Anlagen gefördert, die eine spezifische Kollektorenfläche mit mehr als 30 m² besitzen.

Die Verteilung dieser Anlagen nach ihren Kollektorflächen zeigt die folgende Abbildung:



Quelle: [BAFA 2005]

Abbildung 3-12: Geförderte Anlagen > 30 m² nach Kollektorfläche

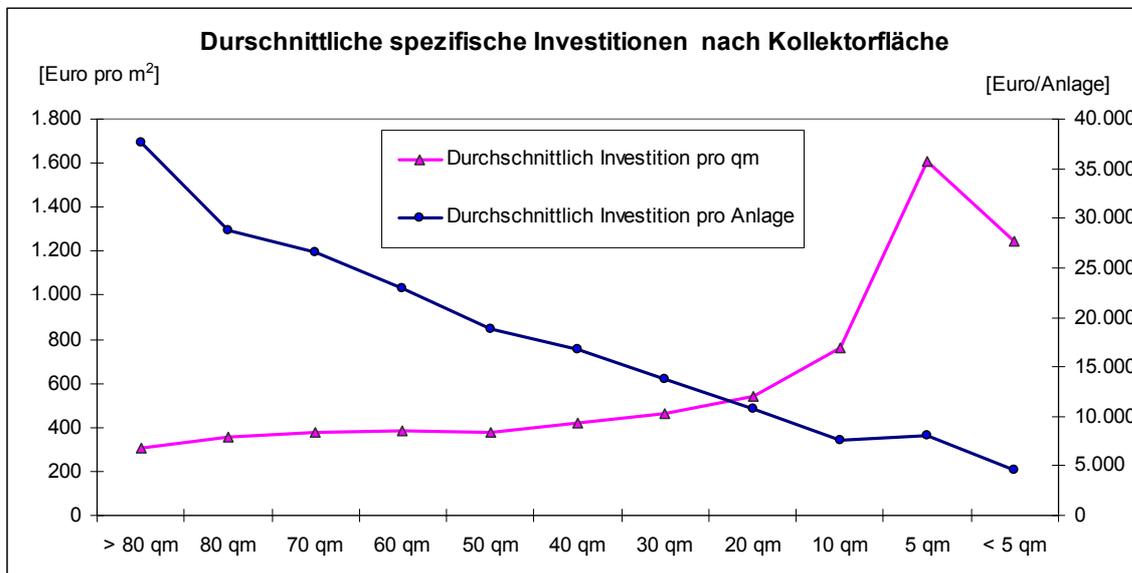
Der Schwerpunkt der Verteilung liegt hier bei einer anlagenspezifischen Kollektorfläche zwischen 31 m² und 50 m². Im Bereich größer als 100 m² wurden im Jahr 2004 lediglich 30 Anlagen und im Bereich von größer als 200 m² nur noch 3 Anlagen gefördert.

3.3.2. Kostenaspekte

Die Kosten für solarthermische Energiesysteme werden, wie bereits in der Vergangenheit, auch künftig deutlich gesenkt werden können. Vor allem durch die zunehmende Großserienfertigung, ist mit weiteren Kostenreduzierungen durch rationelle Herstellungsverfahren und den Einsatz neuer Technologien zu rechnen. Die Fertigung mit zunehmenden Stückzahlen werden weitere Produktionsschritte für eine Automatisierung öffnen, so dass sich die teure Handarbeit weiter verringern wird.

Insbesondere für kleine Anlagen sind erhebliche Kostenreduktionen realisiert worden. Im Zeitraum von 2002 bis 2004 sind bei Flachkollektorenanlagen bis zu 6 m² Kollektorfläche die durchschnittlichen spezifischen Investitionskosten aufgrund standardisierter Anlagen von ca. 970,- €/m² im Jahr 2002 auf 650,- €/m² im Jahr 2004 gesunken. Größere Flachkollektoranlagen zwischen 7 und 50 m² Kollektorfläche sind dagegen in dem selben Zeitraum hinsichtlich der spezifischen Investitionskosten eher konstant geblieben. [ZSW-ISI 2004]

Gleichwohl haben unter einer zeitlich längeren Perspektive auch bei den großen Anlagen erhebliche Kostenreduktionen stattgefunden. Bei einer Untersuchung von 51 solarthermischen Anlagen mit Kollektorflächen über 20 m² die in den Jahren 1980 bis 1996 in Berlin in Betrieb genommen wurden, lagen die spezifischen Investitionskosten im Durchschnitt bei 1.355,- €. [DGS 1997]. Im Jahr 2004 lagen die mittleren spezifischen Investitionskosten in den gleichen Größenklassen bundesweit bei 611,- €/m². [BAFA 2004] Dies entspricht einer Kostenreduktion von ca. 45%, die sich in dieser Größenordnung sowohl bei Vakuumröhren- als auch bei Flachkollektoren wiederfindet. Die gemäß [BAFA 2005] ausgeführte Investitionssumme lag für die im Jahr 2004 geförderten 89.680 Anlagen bzw. für die insgesamt geförderte Kollektorfläche von 795.747 m² bei insgesamt 616.311.173,- €. Daraus ergeben sich im Durchschnitt ausgeführte Investitionssummen in Höhe von 6.859,- € pro Anlage bzw. von 775,- € pro m² Kollektorfläche. Die spezifische Anlagenfläche ist entscheidend für die Investitionssumme. Die folgende Abbildung zeigt die durchschnittlichen Investitionssummen pro Quadratmeter bzw. Anlage für unterschiedliche anlagenspezifische Kollektorflächen:



[BAFA 2005]

Abbildung 3-13: Spezifische Investitionen nach Kollektorflächen

Deutlich ersichtlich ist der gegenläufige Verlauf von anlagen- und flächenspezifischer Investition in Abhängigkeit von der Größe der Kollektorfläche. So sinken die durchschnittlichen Investitionen pro Quadratmeter von 1.244,- € pro Quadratmeter bei Anlagen mit Kollektorflächen von kleiner 5 m² auf 300,- € pro Quadratmeter bei Anlagen mit Kollektorflächen von größer als 80 m².

Demgegenüber steigen die anlagenspezifischen Investitionen von 4.630,- € auf 44.100,- € pro Anlage. Vor dem Hintergrund einer durchschnittlichen Anlagenfläche von 8,9 m² weist die relativ steile Kostendegression der flächenspezifischen Investition im Bereich von 5 bis 20 m² auf noch erzielbare Kostensenkungspotentiale hin. Eine Erhöhung der durchschnittlichen Kollektorfläche wäre aus dieser

Sicht wünschenswert steht jedoch unter dem Vorbehalt der technischen Rahmenbedingungen am Anlagenstandort sowie den tatsächlichen Nutzerbedürfnissen. Interessant ist die relativ moderate Kostendegression der flächenspezifischen Investitionen bei Anlagen größer als 30 m². Hier dürfte sich abnehmende Automatisierung, Standardisierung und Rationalisierung in der Planung, der Fertigung und der Installation aufgrund geringer Stückzahlen und dem zunehmende Anteil kundenspezifisch gefertigter Anlagen bemerkbar machen.

Demzufolge lassen sich bei einer Erhöhung des Anteils großer Anlagen über 30 m² erhebliche Kostensenkungen vermuten.

Auffällig ist die erhebliche Spannweite der Investitionskosten und ihre geografische Verteilung. So variieren die spezifischen Investitionskosten pro Quadratmeter bei Flachkollektoren bis einschließlich 6 m² von 723,- € in Thüringen bis 989,- € in Hamburg. [ZSW-ISI 2004]

Die Höhe der ausgelösten Investitionen variiert nach Kollektortyp erheblich. Die folgende Tabelle stellt die diesbezüglich maßgeblichen Rahmendaten dar:

	Flachkollektor	Vakuumröhrenkollektor	Luftkollektor	Summen bzw. Gesamtdurchschnitt
Anzahl nach Kollektortyp	78.572	11.170	118	89.860
Kollektorfläche nach Kollektortyp	717.871 m ²	77.106 m ²	770 m ²	795.747 m ²
Durchschnittliche Kollektorfläche nach Kollektortyp	9,1 m ²	6,9 m ²	6,5 m ²	8,9 m ²
Durchschnittliche Investition pro Anlage nach Kollektortyp	6.104 €	12.203 €	3.627 €	6.859 €
Durchschnittliche Investition pro m ² nach Kollektortyp	668 €	1.768 €	556 €	775 €

Tabelle 3-1: Kollektortypspezifische Investitionen nach Kollektorfläche und Anlage

Der obigen Tabelle ist zu entnehmen, dass die Vakuumröhrenkollektoren (VR) ca. doppelt so hohe Investitionen pro Anlage und um den Faktor 2,7 höhere Investition pro m² Kollektorfläche auslösen als Flachkollektoren (FK). Die geringen Investitionskosten von Luftkollektoren (LK) erscheinen aufgrund des fehlenden hydraulischen Systems und der sich daraus ergebenden geringeren technischen Anforderungen unmittelbar plausibel. Hinsichtlich der Differenz bei Vakuumröhren- und bei Flachkollektoren dürften neben den erhöhten Beschaffungskosten für Vakuumröhrenkollektoren auch die höheren durchschnittlichen Kollektorflächen bei Flachkollektoranlagen und den dadurch ausgelösten Skaleneffekten (vgl. [BAFA 2005])

Abbildung 3-13) ursächlich sein.

Die ausgelösten Investitionen variieren jedoch auch hinsichtlich der Verwendungsart. Zudem ist diese Betrachtungsperspektive vor dem Hintergrund der jüngsten Novellierung der Förderrichtlinien interessant, welche eine erhöhte Förderung von heizungsunterstützenden Anlagen festlegt. Die anlagen- und flächenspezifischen Investitionskosten hinsichtlich Verwendungsart stellt folgende Tabelle dar:

	Warmwasserbereitung	Heizungsunterstützung	Prozesswärme	Summe bzw. Gesamtdurchschnitt
Anzahl nach Verwendungsart	67.504	22.197	159	89.860
Fläche nach Verwendungsart	500.215 m ²	293.123 m ²	2.408 m ²	795.747 m ²
Durchschnittliche Kollektorfläche nach Verwendungsart	7,4 m ²	13,2 m ²	15,1 m ²	8,9 m ²
Durchschnittliche Investition pro Anlage nach Verwendungsart	6.180 €	8.904 €	9.196 €	6.859 €
Durchschnittliche Investition pro m ² nach Verwendungsart	834 €	674 €	607 €	775 €

Tabelle 3-2: Verwendungsspezifische Investitionen nach Kollektorfläche und Anlage

Die obige Tabelle weist für die verschiedenen Verwendungsarten unterschiedliche anlagen- und flächenspezifische Investitionen aus. Für heizungsunterstützende Anlagen liegt die durchschnittliche Kollektorfläche um den Faktor 1,8 höher und für Prozesswärme sogar um den Faktor 2 höher als bei Anlagen für die Warmwasserbereitung. Wie bereits [BAFA 2005]

Abbildung 3-13 verdeutlicht, sind mit steigenden Kollektorflächen, sinkende flächenspezifische bzw. steigende anlagenspezifische Investitionen festzustellen.

Für eine vergleichende Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von Energiesystemen werden in der Regel die Wärmegestehungskosten herangezogen. Bei einem Vergleich der Wärmegestehungskosten von solarthermischer und fossiler Wärmeerzeugung ist dies zwar grundsätzlich ebenfalls möglich, allerdings sind einige Rahmenbedingungen zu berücksichtigen aus denen sich Einschränkungen hinsichtlich der Vergleichbarkeit ergeben.

Wärmegestehungskosten sind die Kosten einer Wärmeeinheit (z.B. einer kWh) und errechnen sich aus den Investitionskosten und Betriebskosten während der Lebensdauer. In der Regel wird die sogenannte statische Annuitätenmethode gemäß VDI 2067 angewandt. Die Kosten werden dabei unterschiedlichen Kostenarten zugeordnet, um so eine detaillierte Analyse sowie die Identifizierung der Kostentreiber zu ermöglichen. Eine typische Einteilung der Kostenarten ist die Unterscheidung in Betriebs- und Wartungskosten, Kapitalkosten, Energie- und Verbrauchskosten sowie Grundkosten.

Grundsätzlich ist anzumerken, dass die Wärmegestehungskosten maßgeblich von den Investitionskosten und den Brennstoffkosten bestimmt werden. Dabei ist in der Regel und insbesondere im Kraftwerksbereich, mit abnehmenden Wärmegestehungskosten bei zunehmender Anlagenleistung auszugehen (Skalierungseffekte).

Die Wärmegestehungskosten erneuerbarer Energien liegen zum Teil noch über denen fossiler Energieträger. Ursächlich dafür ist die strukturelle Benachteiligung neuer Technologien. Ihr zu Beginn geringer Marktanteil lässt die Skalierungseffekte nicht ausreichend zur Wirkung kommen.

Einschränkend bei der Nutzung der Wärmegestehungskosten ist ferner anzumerken, dass die externen Kosten (insbesondere Kosten für Gesundheits- und Umweltschäden aber auch Subventionen) unberücksichtigt bleiben und die Entwicklung der Preise für fossile Energieträger kaum für die nächsten zehn bis 20 Jahre belastbar prognostizierbar sind. Ferner wird bei Systemen zur solaren Brauchwassererwärmung in der Regel zusätzlich ein konventionelles System benötigt. Das heißt, es entstehen noch Investitionskosten für ein konventionelles System.

Die folgende Tabelle stellt die Wärmegestehungskosten ausgesuchter konventioneller Systeme zur Wärmebereitstellung im privaten Bereich in €/kWh_{therm} dar. Zugrunde gelegt sind jeweils ein Einfamilienhaus (EFH) und ein Mehrfamilienhaus (MFH), Baujahr 1995 mit einem Wärmebedarf gemäß Wärmeschutzverordnung von 1995. [IWU 1990]

	EFH	MFH
Ölheizkessel	0,15	0,14
Gas-Niedertemperatur-Heizkessel	0,13	0,12
Gas-Brennwert-Heizkessel	0,13	0,12

Quelle: [IER 2001]

Tabelle 3-3: Wärmegestehungskosten in €/kWh_{therm} konventioneller Systeme

Folgende Tabelle stellt die Wärmegestehungskosten in €/kWh_{therm} bei solarthermischen Anlagen zur Brauchwassererwärmung bei einem Zinssatz von 6% und jährlichen Betriebskosten von 40,-€ dar. Angenommen wird eine jährlich substituierte Energiemenge von 1.150 kWh_{therm} und eine Nutzungsdauer von 20 Jahren

Investitionskosten	€/kWh _{therm}
5.000,- €	0,41
3.500,- €	0,30
2.500,- €	0,22

Quelle: [Quaschnig 2003]

Tabelle 3-4: Wärmegestehungskosten solarthermischer Anlagen in €/kWh_{therm}.

Tabelle 1 und 2 verdeutlichen, dass die Konkurrenzfähigkeit solarthermischer Systeme zu konventionellen Systemen ohne eine öffentliche Förderung in der Regel nicht gegeben ist. Ausnahmen sind nur in wenigen Fällen, wie zum Beispiel bei einer elektrischen Wassererwärmung gegeben.

Einschränkend zu den in Tabelle 1 angegebenen Wärmegestehungskosten ist anzumerken, dass Brennstoffpreise in Höhe von 3,3 ct/kWh für Gas und von 3,4 ct/kWh Heizöl EL zugrundegelegt wurden [IER 2001]. Zwischenzeitlich sind die Preise für diese Energieträger jedoch drastisch gestiegen. So wurden im August 2005 beispielsweise in der Region Berlin-Brandenburg von Endverbrauchern Arbeitspreise in Höhe von ca. 6,7 ct pro kWh Gas und 6,8 ct pro kWh Heizöl verlangt. Dies entspricht einer Verdoppelung.

Der Anteil der Verbrauchskosten an den Wärmegestehungskosten bei modernen Gas- und Ölkessel mit NT- bzw. Brennwerttechnologie, wird in der Literatur mit ca. 40 % beziffert [bkwk 2005]. Wird die Verdoppelung der Energiepreise gemäß diesem Anteil der Verbrauchskosten berücksichtigt, ergeben sich aus dem Beispiel in Tabelle 1 Wärmegestehungskosten für konventionelle Systeme, in Höhe von 0,22 bis 0,27 ct/kWh.

Damit verringert sich die Differenz der Wärmegestehungskosten zwischen solarthermischen und konventionellen Systemen erheblich.

Es muss jedoch auch hier einschränkend bemerkt werden, dass es sich lediglich um eine überschlägige Betrachtung handelt. Ausschlaggebend sind neben der Investitions- und Verbrauchskosten der tatsächliche Wärmebedarf, die solare Deckungsrate und das bei der solaren Brauchwassererwärmung in der Regel zusätzlich notwendige konventionelle System.

Bei den in Tabelle 3-4 dargestellten Wärmegestehungskosten handelt es sich um gemittelte pauschale Angaben aus der Literatur die in der Praxis und insbesondere bei großen Solaranlagen deutlich unterschritten werden können. In einem Begleitforschungsprogramm zur Errichtung und Erprobung von ca. 100 großen thermischen Solaranlagen zur Brauchwassererwärmung aus dem Förderkonzept „Solarthermie 2000“, wurden neben Zuverlässigkeit und Effizienz dieser Anlagen auch die Kosten beschrieben. Dabei wurden spezifische Kosten großer Solaranlagen von 500,- bis 750,- € pro Quadratmeter Kollektorflächen ermittelt. Das flächegewichtete Mittel der Investitionskosten aller untersuchten Anlagen lag bei 670,- €/m². Die Wärmegestehungskosten inkl. aller Betriebskosten wurden mit ca. 0,12 bis 0,16 €/kWh angegeben. [BINE 2002]

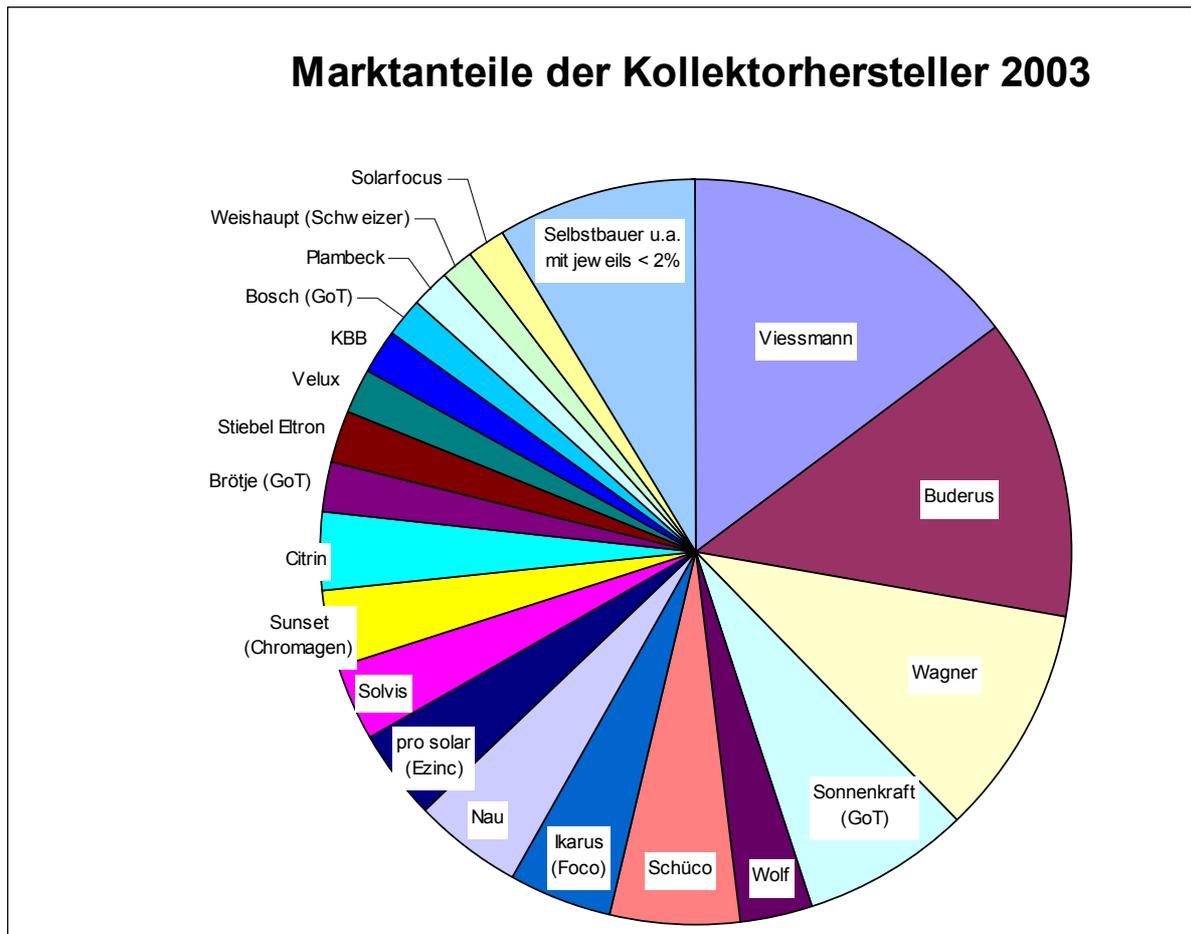
Im Gegensatz zu den flächenabhängigen Verläufen der Investitionskosten, wie sie sich aus den Angaben der BAFA ergeben, sind die in der Praxis ermittelten Investitionskosten höher. So liegen nach BAFA (vgl.: [BAFA 2005]

Abbildung 3-13) die spezifischen Investitionskosten bei Anlagen über 50 m² Kollektorflächen zwischen 300,- und 400,- € pro m², während die in der Praxis festgestellten Investitionskosten aus Solarthermie 2000 im Mittel bei 670,- € pro m² lagen. Derartige Differenzen dürften sich daraus ergeben, dass die BAFA-Zahlen einerseits auf Selbstauskünfte der Antragsteller beruhen, was ihre Unsicherheiten erhöht. Andererseits dürften unterschiedliche Systemgrenzen zugrundegelegt worden sein. So wurden bei den Investitionskosten aus Solarthermie 2000 die gesamten Baukosten der Anlage zugrundegelegt. Ob dies auch bei den BAFA-Zahlen der Fall ist, welche auf die Selbstauskünfte der Antragsteller beruhen, kann nicht abschließend geklärt werden.

3.3.3. Anbietermarkt

Der Anbietermarkt lässt sich in fünf Gruppen unterteilen: Beschichter, die ausschließlich Absorberbleche liefern; „Allesanbieter“, die sowohl Absorber als auch komplette Kollektoren fertigen; Spezialisten, die sich auf bestimmte Baugruppen (z.B. Rahmen) oder Verbindungstechnik (z.B. Lötten und Schweißen) beschränken; Endmonteure, die sich auf die Kollektorfertigung mit zugelieferten Absorbern konzentrieren und Anbieter von OEM¹⁰-gefertigten Kollektoren.

Folgende Abbildung stellt die Verteilung von Hersteller dar, die komplette Kollektoren auf dem Markt anbieten.



Quelle: [Koldehoff 2005]

Abbildung 3-14: Marktanteile der Kollektorhersteller im Jahr 2003

Die obige Abbildung bezieht sich auf ein Marktvolumen von 648 Tsd. m² Kollektorfläche und deckt damit ca. 90% der im Jahr 2003 neu installierten Kollektorfläche ab.

Der gesamte deutsche Kollektormarkt war über die letzten Jahre großen Schwankungen unterworfen. Auch die Marktanteile der einzelnen Akteure zeigten starke Schwankungen. Daher ist die obige Abbildung lediglich als Momentaufnahme zu verstehen. Demnach wurden 66% des deutschen Kollektormarktes im Jahr 2003 durch heimische Hersteller und 33% durch ausländische Hersteller abgedeckt. Der Anteil der OEM-Hersteller beträgt ca. 26%.

Insgesamt sind insbesondere seit dem Markteinbruch im Jahr 2002 verstärkt Konzentrationsprozesse auf dem Anbietermarkt zu beobachten. Mit Buderus und Viessmann, aber auch Bosch, Vaillant,

¹⁰ OEM bedeutet: **O**riginal **E**quipment **M**anufacturer. Damit wird ein Hersteller bezeichnet, der Teile anderer Hersteller zukauf, integriert und unter eigenem Namen auf den Markt bringt

Stiebel-Eltron und Velux (zusammen ca. 39%) haben dabei verstärkt Anbieter traditioneller Heizungs- und Sanitärprodukte sowie der Dach- und Fassadenbranche auf dem Kollektormarkt Fuß gefasst. Mit diesen Konzentrationstendenzen gewinnt auch der Export zunehmend an Bedeutung.

Insgesamt wird das Umsatzvolumen des Solarthermiemarktes im Jahr 2004 mit 550 Mio. € beziffert. Die Anzahl der Arbeitsplätze beträgt ca. 10.000. [BSI 2005].

Gemessen an der neuinstallierten Kollektorfläche, konnte im Jahr 2004 lediglich ein Marktwachstum von 4% gegenüber dem Vorjahr erzielt werden. Ob im Jahr 2005 wieder zweistellige Wachstumsraten erzielt werden können, wie in den Jahren 1999 bis 2001, ist strittig. Laut [SARASIN 2005] ist sogar mit einem Marktrückgang von 10% zu rechnen. Ursächlich werden dafür die gesamtwirtschaftliche Lage, Schwächen bei der Kundenberatung und dem Marketing sowie die attraktive und langfristige Förderung der Photovoltaik verantwortlich gemacht. Letztere führt dazu, dass Kunden mit dem grundsätzlichen Wunsch nach einer Solaranlage, sich bei dem momentan beschränkten Budget eher für die durch das EEG langfristig monetär günstigere und attraktivere Option Photovoltaik entscheiden.

Demgegenüber gehen andere Prognosen für den Zeitraum 2004 bis 2010 von weltweiten Wachstumsraten zwischen 10 und 20% pro Jahr aus. [DB Research 2005]. Allerdings wird auch dort von einer Abschwächung des Marktwachstums ausgegangen, welches ebenfalls mit der hohen PV-Förderung in den Industrieländern begründet wird. Einen erheblichen wachstumsverstärkenden Impuls wird in einem möglichen „Wärme-Gesetz für Regenerative“ gesehen. Dessen politische Durchsetzbarkeit ist jedoch schwierig zu beurteilen.

3.3.4. Technologische Differenzierung

Verbindungstechnik

Bei der Verbindungstechnik der Absorber lassen sich grundsätzlich Löten und Schweißen unterscheiden. Beim Schweißen wird noch einmal in Ultraschall- und Plasmaschweißen differenziert. Obwohl mehr – vor allem kleine Hersteller - die Löttechnologie bevorzugen, haben ultraschall-geschweißte Absorber den größten Marktanteil. Löten ist zwar kostengünstiger, die Verbindungen haben einen guten Wärmeübergang und gelten auch optisch als ansprechender, gleichwohl sind sie hinsichtlich der Temperaturbeständigkeit begrenzt. Diesbezüglich ist festzustellen, dass je besser und selektiver die Absorber werden, umso höhere Stagnationstemperaturen auftreten und die Lötnahte an ihre Belastungsgrenzen gelangen. Daher ist ein starker Trend hin zum Schweißen festzustellen. Insbesondere das Plasmaschweißen besitzt diesbezüglich Vorteile, da durch das Verschmelzen von Rohr und Absorber die Verbindung bis zum Schmelzpunkt des Kupfers thermisch belastet werden kann. Zunehmend an Bedeutung gewinnt das Laserschweißen. Die folgende Abbildung stellt die ungefähre Marktverteilung der Verbindungstechnologien dar:



Quelle: [SWW 7/2004]

Abbildung 3-15: Verbindungstechnologie zwischen Absorber und Rohr

Absorber

Bei den Absorbermaterialien dominiert Kupfer mit 97% den Markt. Daneben werden aber zunehmend auch Aluminiumabsorber angeboten sowie Kombinationen aus Kupfer und Aluminium. Der Grund für die zunehmende Verbreitung von Aluminium liegt insbesondere im stark gestiegenen Kupferpreis. Aluminium besitzt zwar eine geringere Wärmeleitfähigkeit, diese wird jedoch durch den Einsatz von dickeren Aluminiumblechen kompensiert. Bei der Kombination von Kupfer und Aluminium besteht aufgrund unterschiedlicher thermischer Ausdehnungskoeffizienten die Gefahr von Verformungen. Daher ist als Verbindungstechnik das technisch anspruchsvollere Laserschweißen notwendig.

Schließlich gibt es noch Absorber aus Edelstahl, die insbesondere großflächig in ungedeckten Dachkollektoren, welche die gesamte Dachhaut ersetzen, eingesetzt werden.

Bei der Absorberfläche sind zwei Bauformen zu unterscheiden: Die Vollfläche und die Finne. Mit ca. 85% überwiegt die Vollfläche. Bei den Finnenabsorbern wird das durchströmte Rohr als Rohrregister in Form einer Harfe realisiert, bei der jede Finne mit einem Registerrohr verbunden ist, welches wiederum an den Enden jeweils mit einem Sammlerrohr verbunden wird. Mit dem Trend zur Vollfläche setzen die Hersteller jedoch verstärkt auf die sogenannte Mäanderform, bei dem der Absorber mit einem einzigen gebogenen Rohr verbunden wird. Vorteilhaft ist dabei, dass eine derartige Bauform weniger fehleranfällig, insbesondere hinsichtlich möglicher Undichtigkeit, ist und des Weiteren eine gleichmäßigere Durchströmung des Kollektors gewährleistet sowie eingeschlossene Luft effektiver ausgetrieben werden kann. Allerdings ist der Druckverlust sehr viel höher, was die Anzahl der in Rei-

he schaltbaren Kollektoren begrenzt. Ferner reagieren Mäander träger. So steigt bei der Harfenform die erwärmte Flüssigkeit schneller nach oben, so dass der Temperaturfühler die Pumpe frühzeitig startet und somit auch die Beladung des Speichers schneller beginnt. [SWW 7/2004]

Rahmen

Eine weitere wesentliche technologische Differenzierung ist hinsichtlich der Bauart der Rahmenkonstruktion zu treffen. Realisiert werden ein- bzw. zweiwandige Rahmen sowie gelegentlich auch Wannenkonstruktionen. Die meisten Hersteller setzen stranggepresste einwandige Rahmen aus Aluminium ein. Doppelwandige Rahmen zeichnen sich durch eine erhöhte Steifigkeit aus, die insbesondere Spannungsbrüche bei der Glasabdeckung vermeiden. Zudem stellt das Luftpolster im Profil eine zusätzliche Dämmung dar und senkt damit die Wärmeverluste.

Kunststoff, Edelstahl und verzinktes Stahlblech sind als Rahmenmaterial eher die Ausnahme. Bei der Dachintegration werden häufig Holzrahmen eingesetzt. Die In-Dachmontage ist zwar insbesondere aus ökologischer Perspektive hinsichtlich eingesparter Dachhaut, höhere Dämmungseffizienz und geringere Materialintensität bei der Rahmengestaltung günstiger. Dem ist jedoch, aufgrund der besseren Zugangsmöglichkeit bei der Kollektoraufständerung, ein erhöhter Wartungs- und Reparaturaufwand gegenüber zustellen. Zur Erreichung zusätzlicher Stabilität wird die Rahmenkonstruktion meist mit einer Rückwand versehen. In der Regel ist diese Rückwand aus Aluminium, jedoch wird sie auch aus Kunststoff oder als PU-Hartschaumplatte realisiert.

Dämmung

Hinsichtlich der Dämmung ist am häufigsten Mineralwolle anzutreffen, daneben wird ganz oder teilweise auch PU-Schaum eingesetzt. Wesentliches Problem bei der Dämmung ist ihre Temperaturbeständigkeit sowie die Gefahr der Ausgasung bei hohen Temperaturen.

Wärmeträgermedium

In Deutschland werden den Wärmeträgermedien, aufgrund der klimatischen Bedingungen, Frostschutzmittel als Additiv zugesetzt. Standard ist die Beigabe von Glykol. Überwiegend wird dabei Propylenglykol, gelegentlich auch das giftigere Ethylenglykol benutzt. Bei höheren Temperaturen von über 170° C reagiert Sauerstoff mit Glykol und bildet organische Säuren, welche die Metalloberflächen angreifen. Daher werden dem Glykol Inhibitoren zugesetzt, die verhindern sollen, dass die Metallrohre der Solaranlage korrodieren. Um die Bildung von organischen Säuren zu verhindern, halten die Inhibitoren eine sogenannte Reservealkalität vor, die verhindert, dass der pH-Wert in einen kritischen sauren Bereich absinkt. Bis Ende der 90er Jahre waren feste Inhibitoren im Einsatz. Die Entwicklung der Kollektortechnologie führte jedoch zu immer höheren Stagnationstemperaturen. Dabei neigen feste Inhibitoren zur Kristallisierung und zur thermischen Zersetzung. Daher sind heute vielfach und bei Vakuumröhrenkollektoren standardmäßig, flüssige Inhibitoren im Einsatz. Seit 2003 ist zudem für Kollektoren mit Schottrohren, in denen das Wärmeträgerfluid durch Glasrohre strömt, ein Additiv im Einsatz, welches die Glasoberfläche nicht angreift. Frostschutzmittel auf Glykolbasis sind jedoch grundsätzlich einer Alterung unterworfen. Je nach Material- und Dichtungsverträglichkeit sowie Sauberkeit bei der Befüllung und den Temperaturbedingungen, insbesondere im Stagnationsfall, kommt es zur Zersetzung. Daher ist eine regelmäßige Prüfung des Wärmeträgermediums notwendig. Im Durchschnitt ist bei Flachkollektoren alle 5 bis 12 Jahre und bei Vakuumröhrenkollektoren alle 3 Jahre das Wärmeträgermedium mit seinen beigegebenen Additiven auszuwechseln, um den Frostschutz zu gewährleisten. Hinsichtlich der Alterung werden als Alternative auch aromatische synthetische Additive auf Basis von Biphenyl angeboten. Derartige Additive besitzen eine thermische Stabilität bis zu 400° C und kommen in solarthermischen Parabolrinnenkraftwerken zum Einsatz. Nachteilig ist jedoch ihre bedeutend geringere Wärmekapazität und ihre Toxizität, so dass ihr Einsatz in Flach- und Röhrenkollektoren eher selten ist.

Abdeckung

Bei der Abdeckung ist eisenarmes Solarglas Standard. Eisenarmes-Rohglas ist der Grundstoff für die Herstellung von Solar-Flachglas und ist Mindeststandard bei der Abdeckung solarthermischer Kollektoren. Wegen seines geringen Anteils an Eisenoxid ist es besonders strahlungsdurchlässig. Eingesetzt wird es als Struktur- oder Floatglas.

Strukturglas entsteht, indem Walzen dem heißen formbaren Rohglas (Gusselglas) eine feine Oberflächenstruktur aufprägen. An ihm wird einfallendes Licht nicht mehr in einem definierten Winkel, sondern leicht diffus reflektiert. Diese leichte Entspiegelung macht das Glas blendfrei und es erscheint weniger transparent. Während der Produktion von Strukturglas kommt es zu einer geringeren Umsetzung von Licht-schluckendem Eisen-III-Oxid (Fe_2O_3) und damit zu einer höheren Transmission.

Floatglas schwimmt während seiner Herstellung auf einem Zinnbad und wird von dort zu einem endlosen transparenten Glasband abgezogen. Aufgrund der spiegelglatten Oberfläche des Zinnbades ist Floatglas so durchsichtig wie Fensterglas, allerdings reflektiert es auch das einfallende Licht ebenso stark. Mit Antireflexbeschichtungen wird diesem unerwünschten Effekt begegnet. Antireflexbeschichtungen sind insbesondere bei Hochleistungsmodellen anzutreffen. Aufgrund der gleichbleibenden Bedingungen bei der Herstellung, gilt Floatglas als qualitativ hochwertigeres Glas.

Als ein weiteres Verfahren zur Senkung der Reflexion und vice versa zur Erhöhung der Transmission, kommt das Ätzen der Glasoberfläche zum Einsatz. Aufgrund der durch den Ätzprozess erzeugten feinen, porösen Oberflächenstruktur, verändert sich der Brechungsindex des Glases so, dass sich die Transmission um ca. 5% erhöht. Anstatt eine geringe Menge der Glasoberfläche zu entfernen, lässt sich auch eine Antireflexbeschichtung auftragen. Zum Einsatz kommen Tauchverfahren in SiO_2 -haltigen Beschichtungslösungen (Sol-Gel-Verfahren) oder das Aufdampfen durch Sputterverfahren.

In der Regel wird eine Glasstärke von 3,2 mm eingesetzt. Teilweise werden aus Gründen der Sicherheit gegen Windbelastung, Hagelschlag und Schneelast auch Glasstärken von 4 mm verbaut. Nachteilig wirken sich dabei jedoch die erhöhten Transmissionsverluste und das höhere Gewicht aus. [SWW 6/2005]

Bei der Montage der Glasscheibe bestehen zwei Möglichkeiten. Abdichtungen mit einem umlaufenden EPDM-Gummi oder die Verklebung (in der Regel) mit Silikon. Ein EPDM-Band kann unterschiedliche thermische Ausdehnungen wirkungsvoll auffangen, seine Montage ist jedoch im Produktionsprozess aufwendiger, da dass an den Ecken vulkanisierte Gummi per Hand exakt eingelegt werden muss. Die Silikon-Verklebung kann automatisiert werden und gilt als dauerhaft und beständig. Allerdings dauert die Aushärtung länger und erfordert hohe Sauberkeit bei geringen Fehlertoleranzen. Teilweise kommen auch Kombinationen beider Abdichtungstechniken zum Einsatz. Entweder werden dann EPDM-Dichtungen zusätzlich mit Silikon verklebt oder die Scheibe wird innen mit einem selbstverschweißenden Butylband befestigt und zusätzlich mit Silikon verklebt.

Beschichtungen

Zur Verbesserung der Strahlungseigenschaften (hohe Absorption – geringe Emission) werden die Absorber mit selektiven Oberflächen beschichtet. Die selektive Beschichtung von Absorberflächen gehört zum Standard. Die Beschichtungen werden traditionell galvanisch als Schwarzverchromung aufgetragen. Seit einiger Zeit existieren jedoch nicht-galvanische Beschichtungsverfahren, die sich auf dem Markt zunehmend durchsetzen. Zu nennen sind CVD (Chemical Vapour Deposition), PVD (Physical Vapour Deposition), PECVD (PVD-CVD-Kombination), Sputtertechnik, Black Crystal und NiOx (Nickeloxid).

Funktionsweise von Beschichtungen

Die Absorption der Beschichtungen auf der Basis von Lackierungen und galvanischer Verfahren (z. B. Schwarzchrom oder Schwarznickel) basiert auf dem „Verschlucken“ des Lichts. Die Beschichtungen haben, aufgrund ihrer zum Korrosionsschutz erforderlichen Dicke, eine mehr oder weniger hohe thermische Emission und so eine begrenzte Selektivität und Leistungsfähigkeit. Bei Beschichtungen im PVD-/Sputterverfahren (TiNOX, Sunselect) erfolgt die Absorption durch das „Auslöschen“ von verschiedenen Wellenlängen des Lichts durch Interferenz. Aufgrund der geringen Schichtdicke wird eine hohe Selektivität und Leistungsfähigkeit erzielt.

Beim **CVD-Verfahren** wird eine flüchtige chemische Verbindung, die Bestandteile der gewünschten Schicht enthält, mit dem Absorber in einem Reaktionsraum gebracht. Auf dem erhitzten Kupferband zersetzt sich die Verbindung und hinterlässt eine Schicht aus anorganischen Verbindungen.

Beim **PVD-Verfahren** wird in einer Vakuumkammer ein Elektronenstrahl in einen Tiegel mit Beschichtungsmaterial gelenkt. Das Material verdampft und schlägt sich mit hinzugegebenem Sauerstoff

und Stickstoff auf einem Kupferband nieder. Beim TiNOX-Verfahren wird so zunächst Titan und in einem zweiten Durchlauf Quarz aufgetragen. (TiNOX, ECOSELECT)

Das **PECVD-Verfahren** kombiniert Prozessschritte aus den PVD- und dem CVD-Verfahren. Neben einer Beschichtung auf Basis des PVD-Verfahrens, wird bei diesem Fertigungsverfahren eine weitere Schicht im CVD-Verfahren aufgetragen (Ikarus Solar).

Die **Sputtertechnik** wird als eine Beschichtungstechnologie verstanden, unter der sich verschiedene Verfahren subsumieren. Beim Gleichstromsputtern wird in Argon-Gas zwischen einer Anode und dem als Kathode geschalteten Beschichtungsmaterial eine Glimmladung gezündet, in der Argon-Ionen durch das angelegte Feld auf die Kathode hin beschleunigt werden. Diese erodiert durch den Beschuss und zerstäubt. Die freigesetzten Ionen werden unter Verbindung mit zugegebenen Gasen auf das Kupferband abgeschieden. So entstehen mehrere Beschichtungslagen, welche die Selektivität bilden. (Interpane Sunselect, Sunstrip-neu-, Schott-Vakuumröhre, alle CPC Röhren).

Zur Erzeugung von **Black Crystal[®]** wurde ein neuer Produktionsprozess entwickelt. Dieser neue Prozess basiert auf dem Prinzip des „Nieder- oder Raumtemperaturwachstums von Kristallen“. Die Beschichtung wird auch MPNC-Matrix-Beschichtung genannt. (Multi-Phasen-Nano-Kristallations-Matrix-Beschichtung). Mit „Black Crystal“ kann nicht nur Aluminium, Kupfer, Nickel und Edelstahl, sondern auch jedes andere Absorbermaterial beschichtet werden.

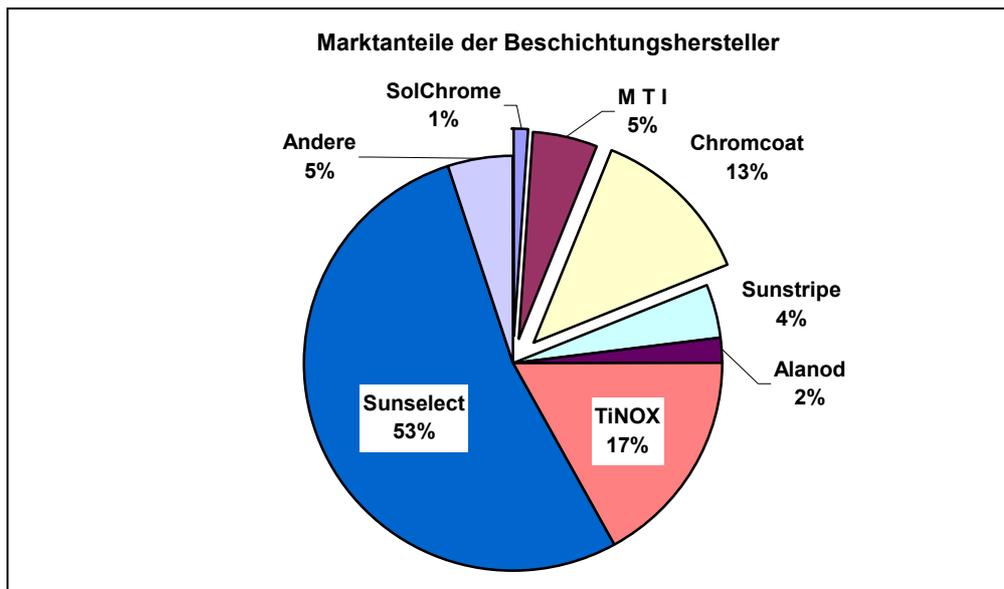
Das physikalische Herstellungsverfahren bei **NiOx** ist elektrochemisch, bei dem in einem Vakuum ein Substrat mit Metallpartikeln beschichtet wird. Das Verfahren besteht aus mehreren Prozessschritten. Eine Rolle von Absorberstreifen mit einer Länge von 1000 bis 1200 Meter wird in einer Vakuumkammer platziert. In der Kammer befinden sich Spenderplatten (Targets) aus Nickel. Durch das Erzeugen eines großen Spannungsfeldes, zwischen Spenderplatte und Substrat (Absorberstreifen), und eines parallel zur Spenderplatte anliegenden Magnetfeldes, werden Nickelatome aus der Spenderplatte herausgelöst und beschleunigt. Diese Atome treffen das Substrat und bleiben an der Oberfläche haften. Während des Vorgangs passieren die Absorberstreifen insgesamt drei Spenderplatten. Bei der ersten wird eine stabilisierende Nickelschicht aufgelegt. Bei der zweiten reagieren die Nickelatome mit Sauerstoff und bilden eine absorbierende Schicht Nickeloxid (NiOx). Auf der dritten Platte erfolgt die Beschichtung mit einer Antireflexschicht (Sunstrip Absorber alt)

Bei den **galvanischen Beschichtungsverfahren** handelt es sich um die sogenannte Schwarzverchromung bzw. das Schwarznickel-Verfahren. Um die Kupferbänder mit einer stabilen Schwarzchromschicht auf Nickelgrundlage zu versehen, werden diese zunächst in mehreren Schritten gereinigt. Danach wird galvanisch die Nickelschicht aufgetragen, in einem weiteren Schritt das Schwarzchrom. An diesem Punkt befindet sich der potentiell gesundheitsgefährdende Teil der Anlage. Das in saurer Lösung vorliegende Chrom VI ist krebserregend. Auch Nickel wird in der medizinischen Fachliteratur als krebserregend diskutiert. Zu unterscheiden sind das Bandverfahren, bei dem ein Kupferband von der Rolle durch mehrere Bäder mit Lösungs- bzw. Reinigungsmittel, Nickel und Chrom geführt und kontinuierlich beschichtet wird sowie das Badverfahren bei dem ganze Absorberplatten in mehreren Einzelbädern nacheinander beschichtet werden.

Schließlich sind noch **selektive Lacke** (z. B. Lack M40Li) zu erwähnen. Lacke haben jedoch heutzutage keine große Bedeutung mehr, was vor allem auf den hohen Emissionsgrad von Lacken zurückzuführen ist. Sie sind jedoch von allen Beschichtungsverfahren am preiswertesten. Gleichwohl sind Lacke mit Nanopartikel, insbesondere für die Anwendung auf solarthermischen Absorberoberflächen, Gegenstand von Forschungsaktivitäten, so dass sie möglicherweise in Zukunft wieder auf dem Kollektormarkt anzutreffen sein werden.

Seit der Markteinführung der im Vakuumverfahren aufgetragenen hochselektiven Beschichtungen ist der Marktanteil der schwarzchrombeschichteten Absorber erheblich zurückgegangen.

Die folgende Abbildung stellt die derzeitige Verteilung der Beschichtungssysteme am europäischen Markt anhand der Beschichtungshersteller dar.

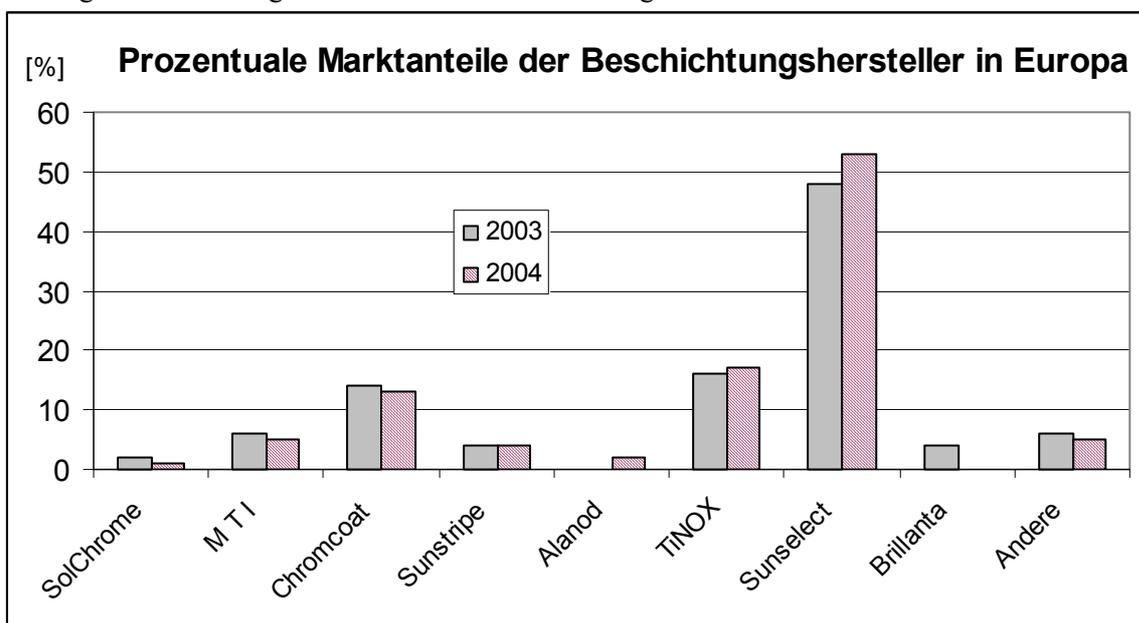


Quelle: [Solarthemen Nr. 208]

Abbildung 3-16: Marktanteile der Beschichtungshersteller in der EU

Die Abbildung zeigt, dass die nicht-galvanischen Beschichtungssysteme mit über 80% auf dem europäischen Markt vertreten sind. Bei den galvanischen Beschichtungsherstellern handelt es sich um dänische (ChromCoat), US-amerikanische (MTI) und indische Anbieter (SolChrome). Demgegenüber handelt es sich bei den Herstellern nicht-galvanischer Beschichtungssysteme überwiegend um deutsche Anbieter (TiNOX, Sunselect).

Die folgende Abbildung stellt die Marktanteile im Vergleich zum Jahr 2003 dar:



Quelle: [Solarthemen Nr. 208]

Abbildung 3-17: Marktanteile der Beschichtungshersteller in der EU 2003-2004

Der Abbildung ist zu entnehmen, dass der Anteil galvanisch hergestellter Beschichtungssysteme (SolChrome, MIT, ChromCoat) von 22% im Jahr 2003 auf 19% im Jahr 2004 gesunken ist. Zugrundegelegt ist der europäische Markt mit 1,45 Mio. m² für 2003 und 1,58 Mio. m² im Jahr 2004. Der Beschichtermarkt ist zudem in jüngster Zeit erneut in Bewegung geraten. Während die Fa. TiNOX im Jahr 2003 Insolvenz angemeldet hatte, inzwischen aber wieder auf dem Markt anbietet, hat 2004 auch die Fa. IKARUS (Brillanta) Insolvenz angemeldet. Gleichzeitig ist mit der Übernahme von Sunselect

durch Alanod im Jahr 2005 eine weitere Marktkonzentration zu beobachten. Diese Übernahme dürfte sich allerdings weniger auf die Anteile der galvanischen Schichten auswirken, als vielmehr auf die Materialauswahl bei den Absorbern, da Alanod traditionell Aluminium beschichtet.

Die zukünftigen Entwicklungen auf dem Beschichtermarkt und insbesondere die Anteile der galvanisch hergestellten Beschichtungen sind ungewiss.

Denkbar ist es sowohl, dass die galvanischen Beschichtungen aufgrund ihrer geringeren Strahlungseffizienz (TiNOX wirbt mit 10% Ertragssteigerung) und schlechteren Umweltimage (Cr VI) sowie aufgrund ästhetischer Vorteile der Nicht-galvanischen Schichten (Realisierung blauer und anderer farbiger Oberflächen) weiter aus dem Markt gedrängt werden, als auch dass die bisherige Marktverdrängung stagniert und die galvanischen Schichten in Nischenprodukten wie kostengünstige Kollektoren oder Großkollektoren wie Dachkollektoren und Auf-Dach-Verglasungen, konstante Marktanteile halten können. Ferner ist denkbar, dass die galvanischen Schichten ihre Marktanteile aufgrund der praxiserprobten Langzeitbeständigkeit und der Robustheit insbesondere im Zusammenhang mit steigenden Anteilen von Großkollektoren wieder ausbauen können.

3.3.5. Neue technische Entwicklungen

Hybridkollektoren

Eine relativ neue Entwicklung im Bereich der Solarthermie stellen die sogenannten Hybridkollektoren dar. Hierbei werden Photovoltaik und Solarthermie kombiniert. Das Prinzip dieser Kombination besteht darin, PV-Module mit dem Wärmeträgermedium des Solarkollektors zu kühlen. Der Vorteil liegt darin, dass die wassergekühlten PV-Module im Sommer mehr Strom produzieren und das dadurch vorgewärmte Kollektorwasser den Warmwasserbedarf deckt. Diese Technologie ist jedoch noch in der Erprobung und entsprechende Produkte werden daher noch nicht auf dem Markt angeboten. [SARASIN 2005]

Weitere Hybridkombinationen existieren bei der Kombination von Luft-Flüssigkeits-Kollektoren. Dabei wird über seitliche Öffnungen am Kollektor das Belüftungssystem des Hauses angeschlossen und wärmt als Luftkollektor direkt die Raumluft. Bei der Standartschaltung mit Luft-Vorrang transportiert das Fluid erst dann Wärme in den Speicher für die Warmwasserversorgung, wenn keine Wärme mehr zum Heizen benötigt wird. Derartige Hybridsysteme werden z.B. von der Fa. Lesotec bereits auf dem Markt angeboten. [SWW 7/2004]

Im weitestgehenden Sinne lassen sich auch solarthermische Großkraftwerke zur Stromerzeugung als solarthermische Hybridtechnologie auffassen. Dabei wird das Wärmeträgermedium auf Temperaturbereiche erhitzt, welche eine Nutzung in Turbinen ermöglicht. Zu unterscheiden sind Farm bzw. Dishsysteme oder Turmkonzepte. Bei Farmanlagen wird das Wärmeträgermedium durch Parabolrinnen erwärmt und die Wärme anschließend zur Stromerzeugung genutzt. Bei Turmanlagen hingegen wird die einfallende Sonnenstrahlung mit Hilfe von Spiegeln auf einen Turm hin gebündelt, das Wärmeträgermedium dort erwärmt und die Wärme anschließend mit Hilfe von Turbine und Generator zur Stromerzeugung genutzt. Derartige solarthermischen Großkraftwerke sind bereits in der Praxis (z.B. in der kalifornischen Mojave-Wüste, Plataforma bei Almería Spanien) realisiert worden. Ihre Stromgestehungskosten liegen zwar bereits unterhalb der Photovoltaik, gleichwohl ist noch keine Konkurrenzfähigkeit zu konventionellen Kraftwerken gegeben. Es wird davon ausgegangen, dass die Kosten für den Strom aus solarthermischen Kraftwerken in den nächsten 15 bis 20 Jahren von heute 15 bis 20 Cent pro Kilowattstunde auf ein konkurrenzfähiges Niveau von etwa 5 bis 7 Cent pro Kilowattstunde für Mittellaststrom in sonnenreichen Gegenden gesenkt werden können. Neben Kostensenkungen durch Maßnahmen zur Hochskalierung von solarthermischen Kraftwerken zu größeren Einheiten und durch Massenfertigungseffekte von Bauteilen, kann eine umfassende Kostensenkung (rund 50% Einsparpotenzial) vor allem durch technische Innovationen erzielt werden. Adressiert sind dabei insbesondere die Bereiche Leichtbau, Glastechnologie, Fertigungslogistik, Anlagen- und Kraftwerksbau und die chemische Industrie. [ECOSTAR 2005]

Solare Kühlung

Eine erfolgsversprechende Option liegt im Bereich der solaren Kühlung. Solarwärme dient dabei als Antriebsenergie für Kälteanlagen. Es gibt verschiedene Arten von solaren Kühltechnologien, wobei zwischen Kälteerzeugung und Klimatisierung zu unterscheiden ist. Ein typisches Beispiel für die Kli-

matisierung stellt die sorptionsgestützte Klimatisierung dar. Potentielle Anwendungsfelder stellen sich insbesondere in geografischen Regionen mit hohem solaren Strahlungsangebot. Dabei wird ein solares Strahlungsangebot, dessen Nutzung über der Nachfrage nach Warmwasser bzw. Heizungsunterstützung liegt, mit der gleichzeitig vorliegenden hohen Nachfrage nach Kühlung zusammengeführt. [SARASIN 2005]

Wärmeträger

Aktuelle Forschungsaktivitäten untersuchen den Einsatz von ionischen Flüssigkeiten (sogenannte „Flüssige Salze“) als Wärmeträgerflüssigkeiten. Flüssige Salze sind bei Raumtemperatur flüssig und leiten und speichern Wärme besser. Darüber hinaus verdampfen sie nicht und vermeiden so umwelt- und gesundheitsschädliche Emissionen, wie sie bei herkömmlichen Wärmeträgern auf der Basis von Wasser und Alkohol möglich sind. Erhofft wird eine höhere Energieausbeute sowie langlebigere, kleinere und insgesamt günstigere und umweltschonendere Solaranlagen. [DBU 2005]

3.3.6. Forschungsbedarf

Die folgende grobe Skizzierung von aktuell anstehenden besonderen Forschungsbedarfe erfolgt in Anlehnung an den formulierten Forschungsprioritäten der European Renewable Energy Centres Agency [EUREC 2005] sowie dem nationalen Strategiepapier der Solarthermiebranche [Strategie 2004]

Der formulierbare Forschungsbedarf leitet sich vor allem aus den sich abzeichnenden technologischen Entwicklungstrends und mittelfristig erschließbaren Marktpotentialen ab. Folgende Schwerpunkte sind dabei zu benennen:

- Solarthermie in Gebäuden
- Solare Nahwärme
- Solare Prozesswärme

Beim Einsatz der Solarthermie in Gebäuden ist einerseits der Einsatz im Mehrfamilienhäusern sowie in gewerblichen Gebäuden und andererseits im Gebäudebestand von Bedeutung. Von besonderer Relevanz in diesen solarthermischen Einsatzgebieten sind insbesondere Fragen nach

- Substitution bisheriger Kollektormaterialien
- Intensivierung der Automatisierung der Kollektorherstellung
- Senkung der Materialvielfalt
- Kollektoren als standardisierte Konstruktionselemente in Gebäuden, insbesondere als Fassadenelemente
- Neue, insbesondere temperaturbeständigere Wärmeträgermedien
- Saisonale Wärmespeicherung
- Integration solarer Systeme in konventionellen Systemen zur Wärme- bzw. Kälteerzeugung
- Weiterentwicklung von Komponenten, insbesondere vormontierter Kompakteinheiten
- Langzeitstabile und wartungsfreundliche Druckhaltungs- und Entgasungssysteme
- Entwicklung dynamischer Betriebskontrollen inkl. Fernwartung und –steuerung
- Weiterentwicklung von Simulationsprogrammen zur Systemauslegung
- Optimierung des baulichen Aufwands bei der Integration in bestehende Gebäude
- Ertragscontrolling und Qualitätsmanagement
- Betriebskontrolle inkl. Abgleich mit meteorologischen Daten
- Konzeptionelle Ansätze zur integrierten Planung von großen Liegenschaften
- Erhöhung der Akzeptanz solarer Wärmeerzeugung und Entwicklung geeigneter insbesondere differenzierter Anreizstrukturen
- Weiterentwicklung des Förderinstrumentariums.

Im Bereich der solaren Nahwärme werden zukünftig insbesondere folgende Forschungsschwerpunkte von besonderer Relevanz sein:

- Entwicklung von höchsteffizienten Kollektoren auf hohen Temperaturniveaus
- Effiziente und kostengünstige große Langzeit-Wärmespeicher

- Wartungsarme und betriebssichere Kollektorfelder
- Systemintegration in bestehende Wärmenetze
- Optimierung und Management von Wärmenetzen mit solaren Wärmeerzeugern.

Im Bereich der solaren Prozesswärme stehen die sich abzeichnenden relevanten Forschungsfragen insbesondere im Kontext mit dem notwendigen Einsatz solarthermischer Systeme in höheren Temperaturbereichen

- Thermisch zyklisch belastbare Kollektormaterialien und -konstruktionen
- Hochtemperaturoptimierte Wärmeübertragung und Wärmeverluste
- Kostengünstige hochtemperaturbeständige Solarfluide
- Integration von Solarwärme in bestehende Produktionsprozesse.

Die skizzierten Forschungsbedarfe sind nicht vollständig und umreißen lediglich grobe Forschungsbereiche anhand absehbarer technologischer Entwicklungen und Marktpotenziale. Daneben gibt es noch eine Vielzahl von quer dazu liegenden Problemstellungen sowie wesentlich konkretere Forschungsfragen. Dazu zählen insbesondere Methodenentwicklungen zur Prüfung und Beurteilung der thermischen Leistungsfähigkeit, der Zuverlässigkeit und der Haltbarkeit sowie die Fort- und Weiterbildung in der Planungs-, Handwerks- und Installationsbranche. Ferner existiert ein erheblicher Bedarf zur Integration solarthermischer Technologie in bestehende bautechnischen Standardisierungen sowie baurechtlichen Vorschriften. Ein weiterer Forschungsbedarf, der quer zu den solarthermischen Einsatzfeldern liegt, besteht hinsichtlich der Entwicklung von Methoden zur Analyse und Bewertung der Umweltleistung der Solarthermie sowie der konzeptionellen Entwicklung von umweltgerechten Umgangsweisen mit Altkollektoren und ihre Einbindung in die Kreislaufwirtschaft.

Zu den konkreteren Forschungsbedarfen zählt die Verbesserung des Strahlungsverhaltens der transparenten Kollektorabdeckung, die Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen sowohl als Material z.B. in der Dämmung, aber auch als Energieträger in der Zusatzheizung und die benutzerfreundliche Wartungskontrolle für überalterte Wärmeträger.

4. Analyse der Umweltauswirkungen

4.1. Fragestellung

Bei der Ermittlung der Umweltbelastungen solarthermischer Energiesysteme ist möglichst der gesamte Lebenszyklus zu betrachten. Dies umfasst die Umweltbelastung während der Produktion, während der Nutzung und in der Nachnutzungsphase.

Während der Herstellung sind insbesondere der Ressourcen- und Energieeinsatz, die produktionsbedingten Emissionen in Abwasser und Luft und das Abfallaufkommen von Interesse.

Während der Nutzung rücken grundsätzlich die Produktemission in Form von Leckagen, Ausdampfungen sowie der Verbrauch an Betriebsstoffen und Ersatzteilen und schließlich der Energiebedarf für die Pumpe und die Regelung in den Betrachtungsfokus.

In der Nachnutzung sind die Umweltbelastungen in Gestalt der anfallenden Abfallmengen, ihre stofflichen Eigenschaften und die Recyclingfähigkeit von Interesse.

Ein besonderes Augenmerk gilt den galvanischen und nicht galvanischen Verfahren zur Beschichtung der selektiven Absorberoberflächen.

4.2. Vorbemerkung

Vor eine nähere Betrachtung der Umweltbelastungen der solarthermischen Technologie seien zwei grundsätzliche Überlegungen gestellt.

Erstens handelt es sich bei der Solarthermie um eine Technologie zur Nutzung einer regenerativen Energiequelle. Mit dem Einsatz von Solarthermie besteht die grundsätzliche Möglichkeit, erschöpfliche und knappe fossile Energieträger durch Sonnenenergie zu substituieren und die Umweltbelastungen aus der Förderung, Bereitstellung und Umwandlung der fossilen Energieträger zu vermeiden. Diese vermiedene Umweltbelastung relativiert die im weiteren festgestellten und aufgeführten Umweltbelastungen der Solarthermie und ist grundsätzlich in Abzug zu stellen. Derartige Gutschriften finden in der vorliegenden Betrachtung jedoch keine Berücksichtigung. Ebenfalls unberücksichtigt bleibt eine ressourcenökonomische Betrachtung der Knappheit der substituierten fossilen Energieträger.

Gleichwohl handelt es sich bei solarthermischen Anlagen und ihren Komponenten hinsichtlich der eingesetzten Werkstoffe, der Vorprodukte sowie der Herstellungs- und Vertriebsweisen um technische Produkte, die grundsätzlich mit jedem industriell hergestelltem technischen Massenprodukt gleichgesetzt werden können. Damit lassen sich für die Ermittlung der Umweltbelastung von solarthermischen Anlagen und ihren Komponenten die üblichen ökobilanziellen Methoden zur Bewertung der Umweltverträglichkeit von technischen Produkten anwenden.

4.3. Stand der Forschung

Eine umweltorientierte Bewertung von solarthermischen Anlagen ist in der Literatur verschiedentlich dokumentiert worden [Bräutigam 1991, ETH Zürich 97, Althaus 1999, Streicher 2002, Handke 2004a]. Bei den dokumentierten Betrachtungen handelt es sich, außer bei [Streicher 2002], die eine Bewertung anhand der kumulierten Energieaufwendungen (KEA) vornimmt, in der Regel um ökobilanzielle Ansätze. Die ökobilanziellen Ansätze gleichen sich weitgehend hinsichtlich Menge und Zusammensetzung der Materialeinsätze der untersuchten solarthermischen Anlagen und ihrer Komponenten. Bezüglich des verwendeten Aggregationsniveaus der Umweltbelastungen unterscheiden sich die methodischen Ansätze jedoch erheblich. [Althaus 1999] bedient sich einer schadensorientierten Methode namens EcoIndicator 99, die jedem Material eine dimensionslose Maßzahl, sogenannte Eco-Points (Pt) zuordnet, die eine kumulierte Umweltbelastung und den damit verknüpften Schaden darstellt. [Bräutigam 1991] und [ETH Zürich 97] führen dagegen die Umweltbelastungen der Materialien ausführlich anhand von ausgesuchten Schadstoffen (z.B. CO₂) bzw. von wirkungsspezifischen Summenindikatoren (z.B. CO₂-Äquivalent) für ausgewählte Umweltmedien bzw. ausgewählte Wirkbereiche auf.

4.4. Materialeinsatz

Bei solarthermischen Anlagen entfallen die größten Massenanteile auf die metallischen und die mineralischen Materialien. Dieses sind: Kupfer, Aluminium, Stahl sowie Glas und Mineral- bzw. Glaswolle. Die folgende Tabelle stellt die materielle Zusammensetzung von 4 typischen Solarkollektoren dar:

Materialeinsatz für den Kollektor in [kg/m ² Aperturfläche]					
Einsatzart	Material	Flachkollektor		Vakuurröhrenkollektor ¹¹	
Beschichtung		Galvanik	Sputter	Galvanik	TiNOX
Absorber	Kupfer	2,83	2,1	6	5,91
Verschraubung	Messing	-	-	k. A.	0,48
Abstandshalter	Edelstahl	-	-	k. A.	0,13
Abdeckung	Glas	9,9	7,5	22	13,14
Rahmen	Aluminium	3,57	2	4	4 ¹²
Wärmedämmung	Mineralwolle	2,35	2	2	2
	Polystyrol	-	2	-	0,32
Dichtung der Abdeckung	EPDMA	0,83	0,3	1	k. A.
Lötmaterial	Cd freies Hartlot	0,022	0,01	0,1	k. A.
<i>Summe</i>		19,48	15,9	35	26

Quelle: [ETH 1997, Klöckner 2002]

Tabelle 4-1: Materialeinsatz der Kollektoren

Bei den exemplarischen Kollektoren handelt es sich um zwei Flachkollektoren (FK) und zwei relativ schwere Vakuurröhrenkollektoren (VR), die jeweils mit Lamellenabsorbern aus Kupfer ausgeführt sind. Auffällig ist die Spannweite bei den Gewichten von Kollektoren. Die selektiven Absorberoberflächen sind für beide Kollektortypen einmal im galvanischen Schwarzchromverfahren (Cr) und einmal im Sputterverfahren bzw. TiNOX (Sputter) ausgeführt. Wesentlich für die Beschichtungssysteme ist, dass der Massenanteil aufgrund der geringen Schichtdicke im µm Bereich vernachlässigbar ist. Neben den Kollektoren bestehen solarthermische Systeme aus weiteren Anlagenkomponenten. Dazu zählen Speicher, Expansionsgefäß, Rohrsystem, Umwälzpumpe und Regelungsaggregate (elektronische Steuerung, Temperaturfühler etc.). Es handelt sich dabei um teilweises sehr materialintensive

¹¹ 0,003 kg Barium pro m² Absorberfläche zur Vakuumentstützung sind nicht berücksichtigt worden.

¹² Datum ist übernommen worden von Vakuurröhrenkollektor mit Kupferlamellen mit Schwarzchrombeschichtung

Systemkomponenten, welche die Materialeinsätze von Kollektoren teilweise um ein Vielfaches übersteigen. Beispielsweise liegt das Gewicht von Solarspeichern je nach Speichervolumen zwischen 270 kg bei 450 l und 483 kg bei 3000 l. Diese Gewichte verteilen sich i.d.R. zu über 90% auf legierte (Chrom-Nickel-Stahl (71Fe16Cr13Ni)) und unlegierte Stähle sowie zu ca. 10% auf Mineral- bzw. Glaswolle als Dämmung. [ETH 97] Umweltrelevante Nebenbestandteile mit geringen Gewichtsanteilen sind Silikon, Alkydharzlack, Kunststoffe und elektrische bzw. elektronische Komponenten (Temperaturfühler, Korrosionsschutzanode u.ä.)

Expansionsgefäße werden in Abhängigkeit des hydraulischen Gesamtvolumens eingesetzt. Das Gewicht typischer Expansionsgefäße beträgt zwischen 6 kg bei 25 l und ca. 14 kg bei 80 l. Ihr Materialeinsatz wird ebenfalls von Stahl dominiert. [ETH 97].

Schließlich sind die Materialeinsätze zur Realisierung des Rohrsystems zu nennen. Die Materialeinsätze sind maßgeblich von den Rohrlängen abhängig. Typische Rohrlängen sind 40 m für ein Einfamilienhaus (EFH) bzw. 114 m bei Mehrfamilienhäusern (MFH). Die damit verbundenen Materialeinsätze liegen bei 46 kg im EFH bzw. 430 kg im MFH. Dominiert werden die Materialeinsätze von Stahl mit ca. 60% und Kupfer mit ca. 30% bis 40%. Dazu kommen noch ca. 5% bis 10% für die Dämmung aus Glas- oder Mineralwolle und ggf. Dämmungsummantelung aus Kunststoffen (meist PVC). Weitere Bestandteile des Rohrsystems sind die unterschiedlichen Armaturen wie Absperr- und Befüllungseinrichtungen, Entlüftungsventile und Ähnliches. Ihre Materialzusammensetzung ist überwiegend metallisch (Grauguss bzw. Messing oder Rotguss). Die Anzahl und die Typen derartiger Armaturen schwanken dabei erheblich.

Die Umwälzpumpe und Regelungsaggregate besitzen als Anlagenkomponenten relativ geringe spezifische Gewichte. Allerdings unterscheiden sie sich hinsichtlich ihrer materiellen Zusammensetzung erheblich von den anderen Anlagenkomponenten. Statt wenigen metallischen und mineralischen Bestandteile, wird ihre Zusammensetzung durch verschiedene metallische Legierungen, unterschiedliche Kunststoffe und elektronischen Bauteile, die ihrerseits stofflich sehr heterogen zusammengesetzt sind, bestimmt.

Im weiteren werden diese Anlagenkomponenten solarthermischer Systeme nicht weiter betrachtet. Es ist jedoch zu beachten, dass sie neben den Kollektoren wesentlich die Umweltauswirkungen von solarthermischen Systemen bestimmen.

Schließlich wird die Umwelteigenschaft hinsichtlich Langlebigkeit und energetische Effizienz durch die Systemauslegung sowie Installation und Wartung bestimmt.

4.5. Bestimmung der Umweltauswirkungen

Trotz der unterschiedlichen gewählten Methoden zur Bestimmung der Umweltauswirkungen, kommen die meisten Untersuchungen zu übereinstimmenden Ergebnissen. So weisen die Umweltbelastungen der Materialien, die in solarthermischen Kollektoren Verwendung finden, auf jeder Aggregationsebene eine direkte Massenabhängigkeit auf. Daraus folgt, dass die massenstärksten Materialien die größte Umweltbelastung verursachen. Diese Massenabhängigkeit lässt sich in der Regel auch in einer Betrachtung nach der KEA-Methode wiederfinden. Für die wesentlichen solarthermischen Komponenten Speicher, Expansionsgefäß, Rohrsystem und Pumpe gelten grundsätzlich die gleichen Aussagen über den Zusammenhang zwischen Massenanteil und Umweltbelastung. Die Bewertung einer einzelnen Umweltbelastung gestaltet sich, außer bei Stoffen, die eine definierte Toxizität besitzen und somit einem grundsätzlichen Vermeidungsgebot unterliegen, schwierig. Da es sich jedoch bei den Materialien, die in solarthermischen Kollektoren Verwendung finden, überwiegend um Massenwerkstoffe handelt, wird im weiteren eine vergleichende Betrachtung der Umweltbelastungen gewählt.

4.5.1. Umweltauswirkungen nach ProBas-Datenbank

Um detailliertere Aussagen über die Umweltbelastungen treffen zu können, die von solarthermischen Kollektoren ausgehen, ist es notwendig, die Umweltbelastungen in die Umweltmedien zu quantifizieren. Dabei wird auf die Datenbank des Umweltbundesamtes ProBas [ProBas 2002] zurückgegriffen. Für die ausgewählten Materialien **Kupfer, Aluminium, Glas, Mineralwolle und Polystyrol** werden die Einträge in die Umweltmedien Luft und Wasser sowie der anfallende Abfall und der Ressourcenverbrauch der 4 Beispielkollektoren (vgl.: Quelle: [ETH 1997, Klöckner 2002])

Tabelle 4-1) quantifiziert. Die Quantifizierung erfolgt gemäß der in der ProBas Datenbank üblichen Umweltindikatoren. Der Materialinput der Vorprozesse, die genutzte Infrastruktur, der Transport, der energetische Ressourcenverbrauch und eventuelle Gutschriften werden im weiteren nicht berücksichtigt. Die nachfolgende Tabelle stellt die verwendeten Umweltindikatoren im Überblick dar.

Emissionen in Luft	Eintrag in Gewässer	Abfall	Ressourcenverbrauch
SO ₂	N	Asche	Biomasse-Anbau
NO _x	AOX	REA-Reststoff	Biomasse-Reststoffe
CO ₂ -Äquivalent	CSB	Klärschlamm	Eisen-Schrott
HCl	BSB ₅	Produktionsabfall	Erdgas
HF	anorg. Salze	Abraum	Erdöl
Staub			Erze
CO			KSA-andere
NMVOG			KSA-erneuerbar
H ₂ S			KSA-nichterneuerbar
NH ₃			Luft
CO ₂			Mineralien
CH ₄			NE-Schrott
N ₂ O			Sekundärrohstoffe
Perfluormethan			Wasser
Perfluoraethan			
TOPP-Äquivalent			
SO ₂ -Äquivalent			

Tabelle 4-2: Verwendete Umweltindikatoren zur Darstellung der Umweltbelastungen

Die grau unterlegten Indikatoren nehmen bei den betrachteten Materialien annähernd den Wert „null“ ein und werden in den folgenden Darstellungen nicht weiter betrachtet. Die kursiv dargestellten Indikatoren sind wirkungs- bzw. schadstoffspezifische Summenparameter. Um eine redundanzfreie Darstellung zu erzeugen, wurden diese Indikatoren im vorliegenden Kapitel nicht weiter aufgeführt. Eine Auswahl der entstehenden luftförmigen Emissionen durch den Materialeinsatz der Kollektoren stellt die folgende Abbildung dar:

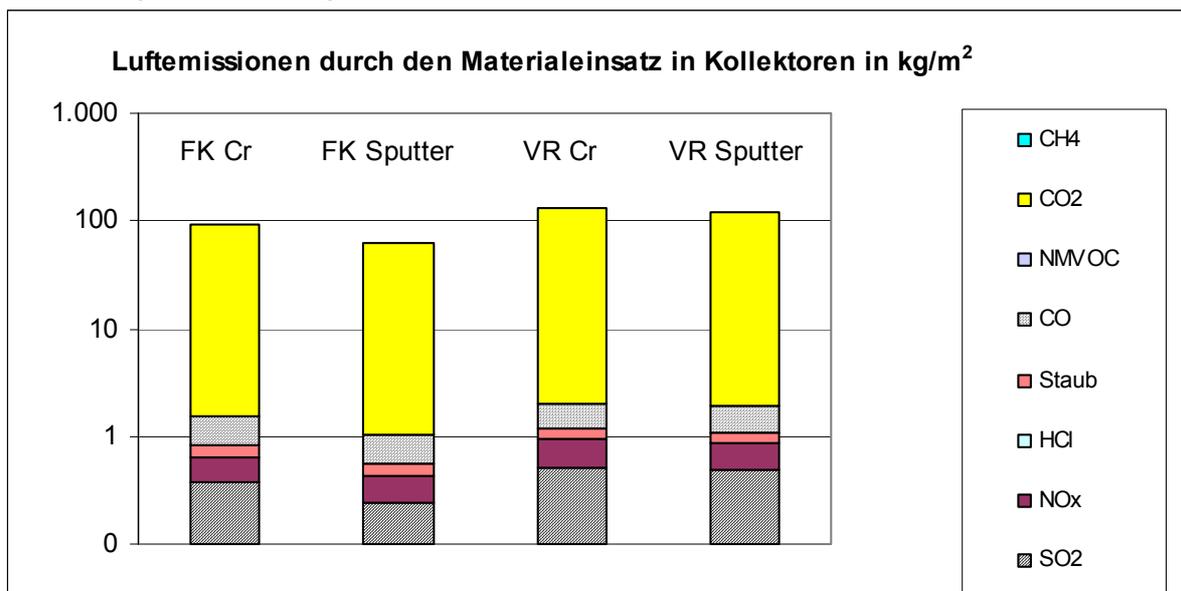


Abbildung 4-1: Ausgewählte Luftemissionen durch den Materialeinsatz in Kollektoren

Die Luftemissionen werden mit 62 bis 128 kg/m² deutlich von den CO₂-Emissionen dominiert. Ursächlich dafür sind die Herstellungsprozesse der Metalle Aluminium und Kupfer. Um weitere Luftemissionen darstellen zu können, wurde eine logarithmische Skalierung gewählt. Neben CO₂ besitzen

CO (0,86-0,47), SO₂ (0,5-0,4), NO_x (0,42-0,19) und Staub (0,24 –0,12), [alles in kg/m²] eine gewisse Relevanz. Eine weitere Auswahl luftförmiger Emission jedoch in der Dimension [g/m²] stellt die folgende Abbildung dar:

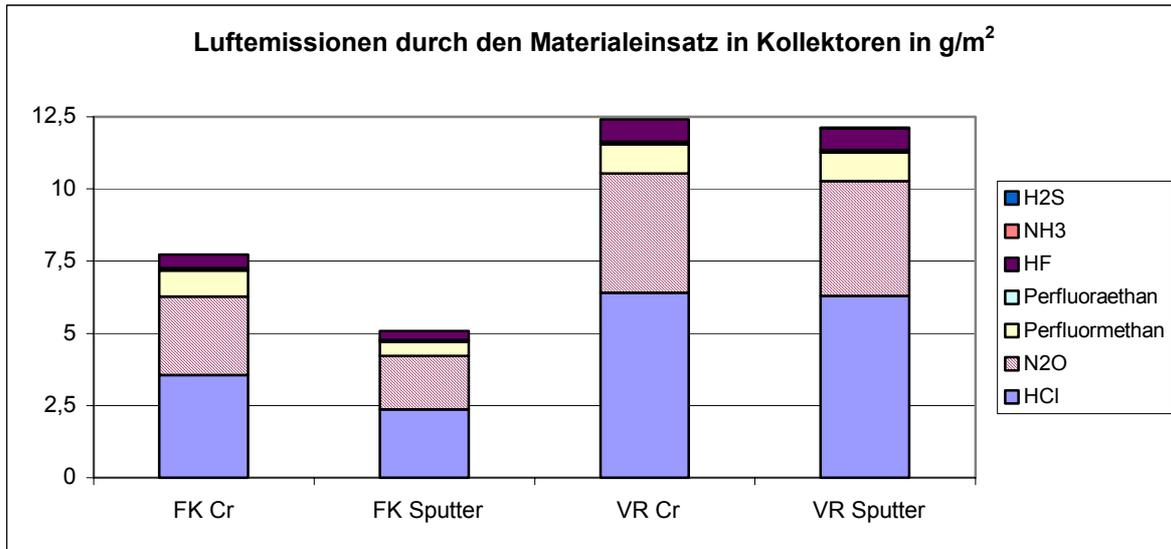


Abbildung 4-2: Ausgewählte Luftemissionen durch den Materialeinsatz in Kollektoren

Bei der obigen Schadstoffauswahl stehen, neben der Emission an HCl und N₂O, insbesondere die hohen Emissionen der treibhausrelevanten Fluorkohlenstoffe Perfluorethan und -methan ins Auge. Diese Emissionen sind ursächlich durch den Prozess der Aluminiumherstellung induziert. Die mit dem Materialeinsatz verbundenen Einträge in Gewässer zeigt Abbildung 4-3

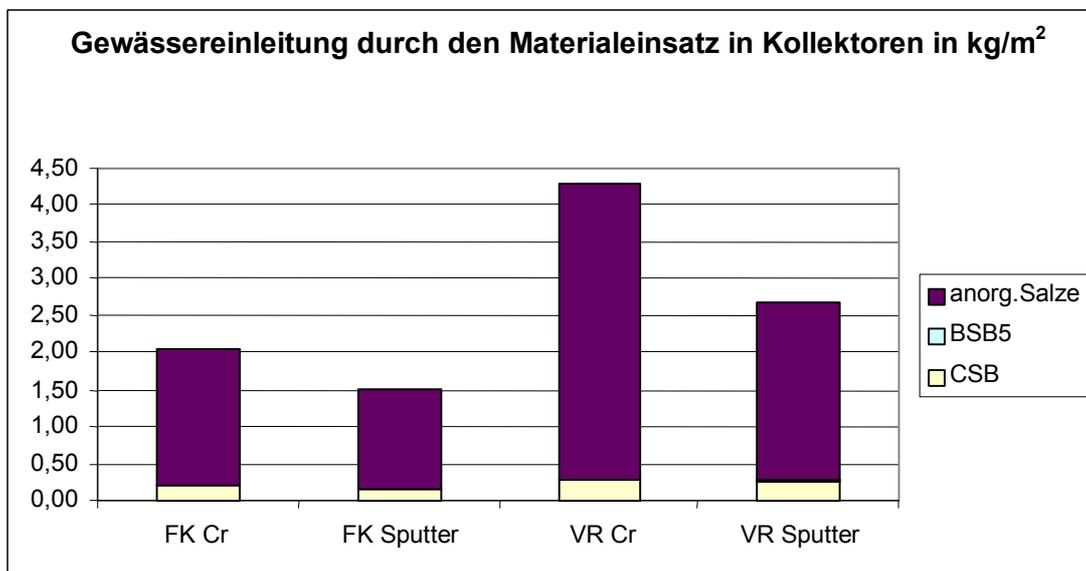


Abbildung 4-3: Gewässereintrag durch den Materialeinsatz in Kollektoren

Der Gewässereintrag wird mit 4,0-1,4 kg/m² von den anorganischen Salzen dominiert. Die Einleitung organischer Salze ist mit 0,2 kg/m² überwiegend auf die Glasherstellung und mit 0,01 kg/m², im geringen Umfang auf die Herstellung von Aluminium zurückzuführen. Der chemische Sauerstoffbedarf liegt bei 0,2 – 0,3 und der BSB₅¹³ liegt bei 0,01 kg/m².

¹³ Biologischer Sauerstoffbedarf

Die mit dem Materialeinsatz in Kollektoren verbundenen Abfallmengen stellt Abbildung 4-4 dar:

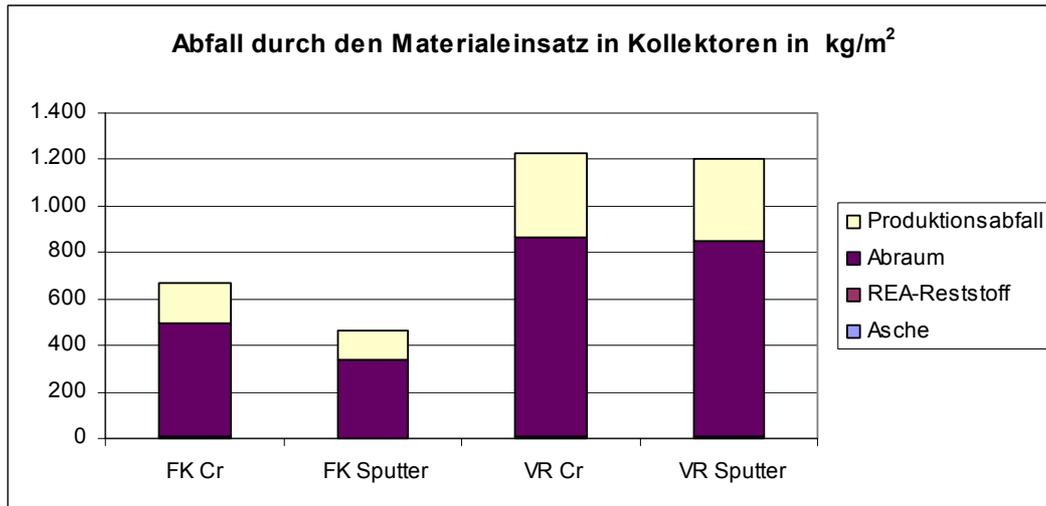


Abbildung 4-4: Abfallanfall durch den Materialeinsatz in Kollektoren

Der anfallende Abfall wird mit 860-333 kg/m² vom Abraum aus der Erzgewinnung und -aufbereitung dominiert. Insbesondere Kupfer induziert mit 108 kg Abraum pro kg Metall etwa doppelt so viel Abraum wie Aluminium. Weitere Abfallmengen sind Produktionsabfälle. Auch bei ihnen ist es vor allem Kupfer, das mit 57 kg pro kg produziertes Metall deutlich mehr Abfall induziert als Aluminium mit 4 kg pro kg. Asche bzw. Reststoffe aus der Rauchgasentschwefelung leisten mit 3-6 kg/m² bzw. 0,4-0,87 kg/m² nur noch geringe bzw. marginale Abfallanteile.

Der stoffliche Ressourcenverbrauch wird durch die folgende Abbildung dargestellt:

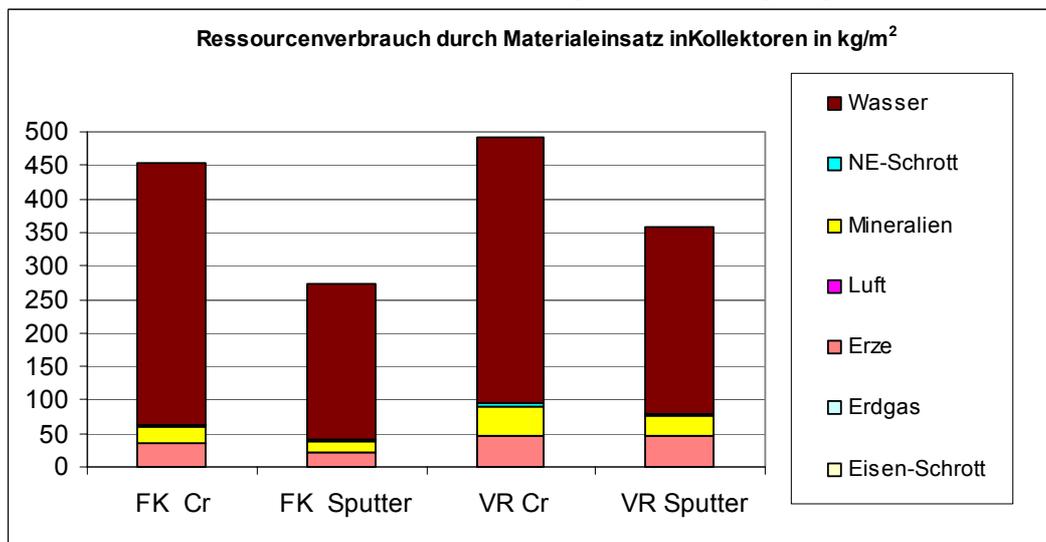


Abbildung 4-5: Ressourcenverbrauch durch den Materialeinsatz in Kollektoren

Der Ressourcenverbrauch wird vom Wasserverbrauch dominiert. Hierzu tragen ursächlich wieder die Herstellungsprozesse der Metalle bei und insbesondere ist Aluminium mit 113 kg Wasser pro kg produziertes Metall zu nennen. Ähnlich verhält es sich mit dem Verbrauch an Erzen der ebenfalls von den Metallen und dabei mit 8,7 kg Erz pro kg produziertes Metall an erster Stelle von Aluminium, gefolgt von Kupfer mit 1,9 kg Erz pro produziertes kg Metall bestimmt wird. Der Mineralienverbrauch wird mit 1,6 kg/kg bzw. 1,2 kg/kg ursächlich durch Glas bzw. Mineralwolle sowie mit 1,0 kg/kg durch Aluminium verursacht.

4.5.2. Umweltauswirkungen durch den Kollektor gemäß EcoIndicator 99

Eine höher aggregierte Bestimmung der Umweltauswirkungen stellt die Methode EcoIndicator 99 dar. Sie erlaubt zudem eine vergleichende Betrachtung der eingesetzten Materialien und Kollektorenbe-

standteile. Allerdings sind die betroffenen Umweltmedien und emittierten Schadstoffe nicht mehr erkennbar.

Eine Verknüpfung der Materialeinsätze der vier Kollektoren, wie sie in Quelle: [ETH 1997, Klöckner 2002]

Tabelle 4-1 aufgeführt sind mit EcoPoints [Pt], gemäß [Pre 2000], ergibt nachfolgende Ergebnisse

Einsatzart	Material	Flachkollektor		Röhrenkollektor		
		Schwarzchrom, Ti- NOX	Galvanik	Sputter	Galvanik	TiNOX
Absorber	Kupfer		3.962	2.940	8.400	8.274
Abstandshalter	Edelstahl		-	-	k. A.	118
Abdeckung	Glas		505	383	1.122	670
Rahmen	Aluminium		2.785	1.560	3.120	3.120
Wärmedämmung	Mineralwolle		143	122	122	122
Dichtung der Abdeckung	EPDM		299	108	360	115
Wärmedämmung	PS		-	740	-	-
Lötmaterial	Cd freies Hartlot		88	40	400	k. A.
<i>Summe</i>			7.782	5.893	13.524	12.420

Tabelle 4-3: Umweltbelastung der Kollektoren nach EcoIndicator 99 in mPt/m²

Zusammenfassend lassen sich die derart ermittelten Umweltbelastungen folgendermaßen visualisieren:

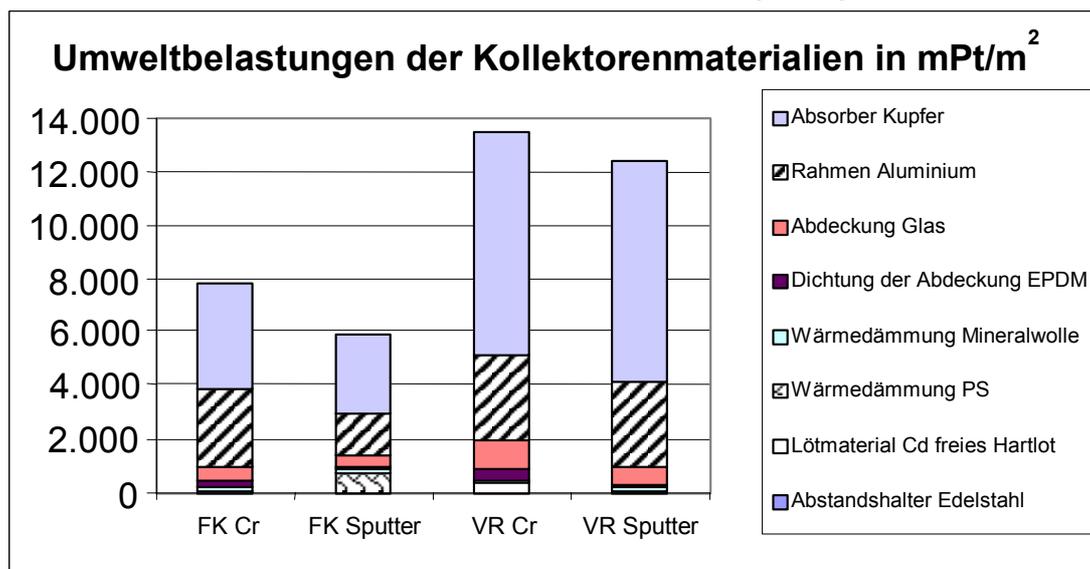


Abbildung 4-6: Umweltbelastung der Kollektormaterialien nach EcoIndicator 99

Erkennbar ist wiederum die starke Massenabhängigkeit der Umweltbelastung. Dieses Ergebnis deckt sich mit Literaturangaben [Althaus 99]. Danach ergibt ein direkter Vergleich der vier Kollektorarten zwar eine annähernd doppelt so hohe Umweltbelastung der Vakuumröhrenkollektoren, dies ist jedoch den entsprechend höheren Materialeinsätzen, insbesondere von Kupfer und Aluminium, geschuldet.

Eine Übersicht über die prozentuale Verteilung, bezogen auf die Gesamtbelastung des jeweiligen Kollektors, gibt folgende Abbildung:

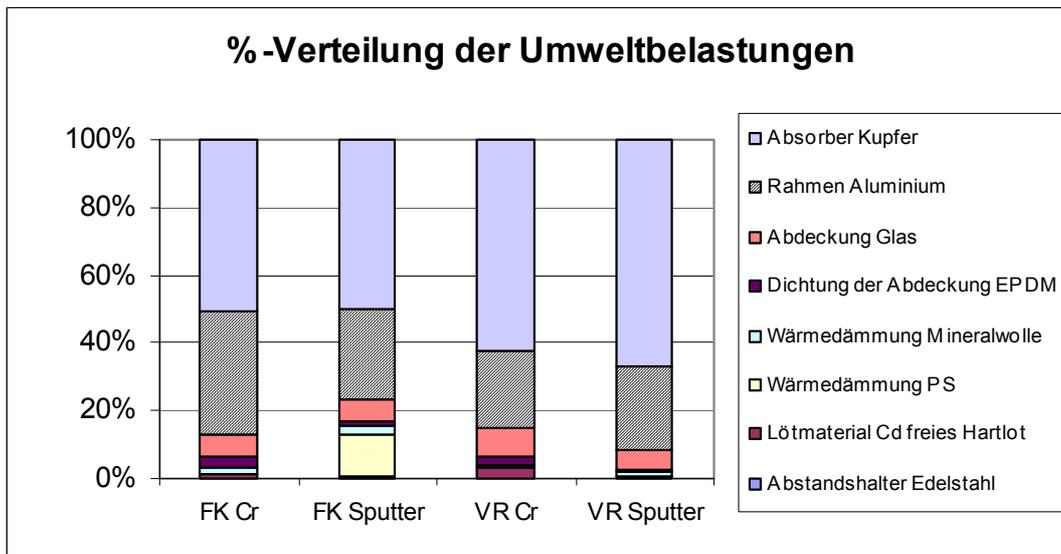


Abbildung 4-7: Verteilung der Umweltbelastungen der Kollektoren nach EcoIndicator 99

Grundsätzlich überwiegen die massenintensiven Materialeinsätze in Form von Metall und Glas. Sichtbar wird allerdings der, im Vergleich zum Kupfereinsatz im Absorber, erhöhte Energieaufwand zur Herstellung der Aluminiumprofile in der Rahmenkonstruktion.

Auf die folgenden Kollektorkomponenten entfallen 80-90% der Umweltbelastungen

- Kupferabsorber 50-67%
- Aluminium Rahmen 23-36%
- Glasabdeckung 6-8%
- EPDM Dichtung 1-4%
- Dämmung aus Mineralwolle 1-2%

Das Beschichtungssystem hat als Material keinen sichtbaren Einfluss. Die Beschichtungssysteme finden aufgrund fehlender Prozessdaten und geringer Materialflüsse in der vorliegenden Anwendung der Methode EcoIndicator 99 keine Berücksichtigung.

4.5.3. Umweltauswirkungen durch den Kollektor gemäß KEA

Die Betrachtung der Umweltauswirkung nach der EcoIndicator 99 Methode liefert zwar eine belastungsfähige und operationalisierbare Kennzahl, lässt jedoch keine Aussagen über die zugrundeliegenden Wirkungsbereiche der Umweltbelastungen zu. Demgegenüber erfordern detaillierte quantitative Aussagen über die Umweltbelastungen in die verschiedenen Umweltmedien, wie sie sich aus der Nutzung der Probas-Datenbank ergeben, gewichtete Bewertungen der einzelnen Umweltbelastungen sowie eine Aussage über die Wertigkeit der Auswirkungen und Schäden.

Da es sich bei der Solarthermie um eine Technologie zur Energiewandlung handelt und ein Großteil der Umweltprobleme ursächlich mit dem Energieeinsatz verbunden ist, liegt die Anwendung der Methode des kumulierten Energieaufwands zur Ermittlung der Umweltbelastungen nahe.

Zu dem lassen sich die mit einem Produkt und seinen Materialien verbundenen Energiemengen relativ leicht bestimmen, zu einer Kennzahl aggregieren und anschließend im Entscheidungsprozess als transparente Orientierungsgröße nutzen.

Darüber hinaus lassen sich die KEA-Werte von Energiewandlungsanlagen zur Berechnung von anlagenspezifischen energetischen Amortisationszeiten nutzen. Ein weiterer Vorteil ist die methodische Robustheit aufgrund der Festlegung von Begriffen, Definitionen und Berechnungsmethoden in der VDI Richtlinie 4600. [VDI 4600]

Einschränkend muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass Produkte, die eine hohe Umweltbelastung (bspw. aufgrund ihrer Toxizität), aber nur einem geringen Energiebedarf (bspw. aufgrund ihres Cha-

racters als Kuppelprodukt) aufweisen, mit der KEA Methode nur unzureichend erfasst, bewertet und abgebildet werden können. So sind wichtige Umweltprobleme nicht mit Energie verknüpft und als Ressourcenindikator zeigt KEA nicht immer in die gleiche Richtung wie andere Umweltindikatoren. vgl. [UBA-KEA 1999, Öko-Institut 1999].

Einen Überblick über die KEA-Werte, die sich aus den Materialeinsätzen der Kollektoren gemäß Tabelle 4-1 ergeben, stellt die folgende Abbildung dar:

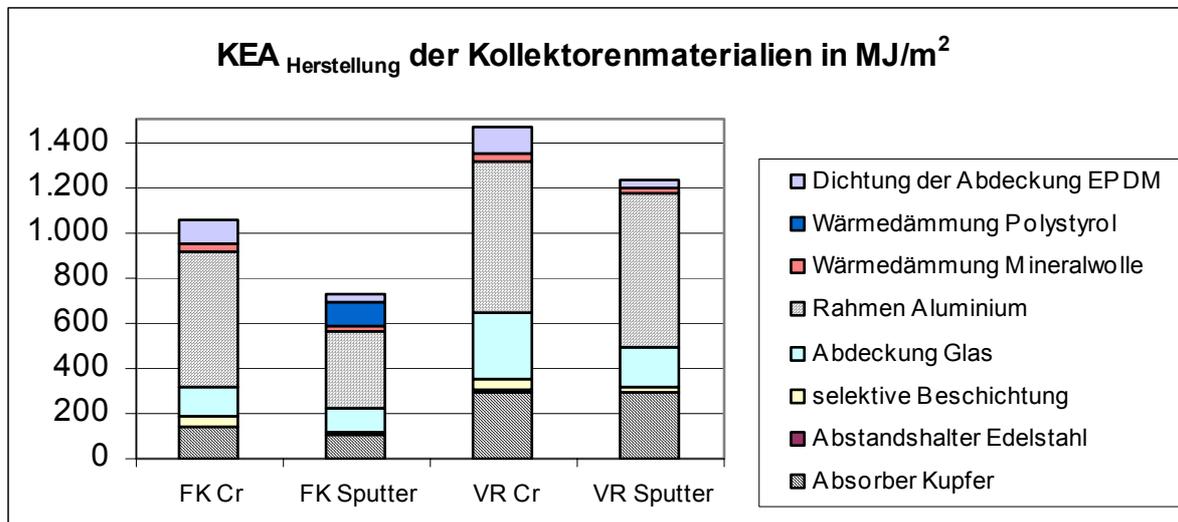


Abbildung 4-8: KEA für die Kollektorherstellung

Eine Betrachtung der Umweltauswirkung durch die Herstellung der Kollektormaterialien nach der KEA-Methode zeigt keine grundsätzlich abweichenden Ergebnisse im Vergleich zu den anderen Betrachtungsmethoden. So ergibt eine Gegenüberstellung der vier Beispielkollektoren die gleiche Reihenfolge, wie sie bereits in den Abbildungen Abbildung 4-1 bis Abbildung 4-5 sowie der Abbildung 4-6 erkennbar ist.

Neben dem kumulierten Energieaufwand aus dem Materialeinsatz der Kollektoren, sind auch die Energiemengen der unterschiedlichen Beschichtungssysteme in der Abbildung 4-8 dargestellt. Deutlich erkennbar ist ihr geringer Einfluss bei einer Betrachtung der energetischen Aufwendung der eingesetzten Kollektormaterialien. Dieser geringe Einfluss ergibt sich aus dem gegenüber der Herstellung der Kollektormaterialien geringen Energieaufwand der Beschichtungsprozesse

Grundsätzlich überwiegen wiederum die massenintensiven Materialeinsätze in Form von Metall und Glas. Sichtbar wird allerdings, der im Vergleich zum Kupfereinsatz im Absorber, erhöhte Energieaufwand zur Herstellung der Aluminiumprofile in der Rahmenkonstruktion.

Gemäß der in [VDI 4600] beschriebenen Vorgehensweise, ist bei einer KEA Betrachtung der gesamte Lebensweg eines Produktes zu berücksichtigen. In Abwandlung dieser Vorgehensweise werden die energetischen Wirkungen in der Nachnutzung hier nicht betrachtet. Unberücksichtigt blieben somit eventuelle Gutschriften durch energetische Nutzungen der Altprodukte oder ihrer Bestandteile sowie für energetische Aufwendungen, die sich durch den Einsatz als Sekundärrohstoff ergeben. Gutschriften aus der Verwendung als Sekundärrohstoff sind insbesondere für die Metalle plausibel. Ferner gehören zu einer entsorgungsseitigen KEA-Betrachtung die energetischen Aufwendungen für Demontage, Aufbereitung und Ablagerung. Gutschriften aufgrund von Substitutionen z. B. von Dachmaterial und deren Transport oder von fossilen Energieträgern werden im weiteren ebenfalls nicht berücksichtigt.

Im weiteren werden die kumulierten energetischen Aufwendungen für Herstellung, Transport, Installation, Betrieb und Wartung der Anlage beschrieben.

Für den Transport wurden 300 km mit einem durchschnittlichen LKW Sattelzug (gemäß ProBas) mit einem KEA Wert von 0,36 kWh pro km transportierte Tonne und 100 km mit einem durchschnittlichen leichten Nutzfahrzeug mit einem KEA Wert von 5,9 kWh pro km transportierte Tonne angenommen. vgl. [oeko2002]

Hinsichtlich des Zusammenbaus sowie der Installation der Anlage und ihrer Komponenten werden 10% der Energieaufwendungen für Herstellung und Transport unterstellt vgl. [Streicher 2002]. Der Energieaufwand für den Einbau variiert zwar je nach Anlagentyp, belastbare Daten über typspezifische Aufwendungen liegen jedoch nicht vor. Daher wird der Energieaufwand für die komplette Anla-

genherstellung über die vier Referenzanlagen gemittelt und dann mit 10% als pauschaler energetischer Installationsaufwand in Ansatz gebracht.

Der Aufwand für den Betrieb der Anlage ergibt sich aus der Leistungsaufnahme der Pumpe von 40 W und einer jährlichen Laufzeit von 1.500 Stunden sowie der Leistungsaufnahme des Reglers der Solarstation von 3 W und einer jährlichen Laufzeit von 8.760 Stunden. Der Stromverbrauch wird mit einem Primärenergieaufwand von 3,8 kWh pro kWh angerechnet. Damit ergibt sich ein jährlicher Energieaufwand für den Anlagenbetrieb in Höhe von 1.060 MJ.

Die Wartung wird lediglich als allgemeine Überprüfungsarbeit in Form der Kontrolle der Konzentration der Solarflüssigkeit, der Dichtigkeit, des Betriebsdrucks u. ä. unterstellt. Ein Austausch von Anlagenkomponenten oder Reparaturen erfolgt nicht. Energetisch wird die Wartung daher nur mit einer jährlichen Fahrt mit einem PKW und einer Streckenlänge von 30 km berücksichtigt. Diese Annahmen führen zu einem jährlichen kumulierten Energieaufwand für die Wartung in Höhe von 147,6 MJ.

Sowohl der Betrieb als auch die Wartung ist in Übereinstimmung mit dem in der Literatur [vgl. Streicher 2002, test 4/02] berichteten Vorgehen auf ein Jahr bezogen. Bei einer mittleren Lebensdauer der Anlage von 20 Jahren ergibt sich ein Energieaufwand für den Betrieb in Höhe von 21.209 MJ und für die Wartung in Höhe von 2.952 MJ. Einen Überblick über den kumulierten Energieaufwand der Herstellung, des Transports, der Montage, des Betriebs und der Wartung gibt die folgende Abbildung¹⁴:

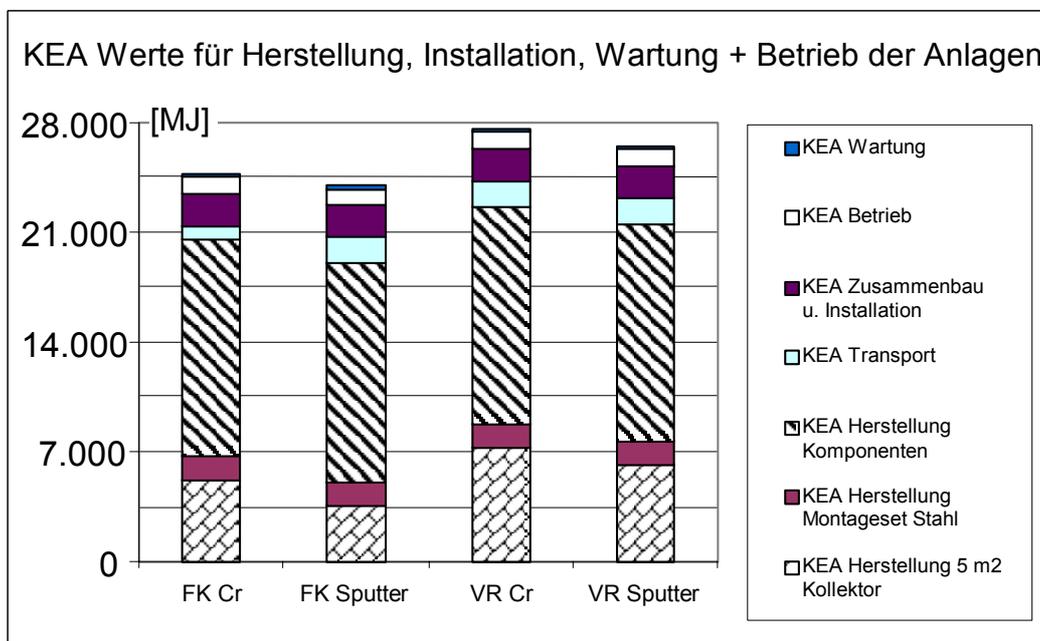


Abbildung 4-9: KEA für Herstellung, Transport, Installation, Betrieb + Wartung der Anlagen

Bei der KEA Betrachtung entlang des Lebenszyklus von solarthermischen Kollektoren überwiegt der energetische Aufwand für die Herstellung. 40% bis 60% der gesamten energetischen Aufwendungen entfallen auf die Herstellung der Kollektoren.

Eine Ermittlung der Umweltauswirkungen der selektiven Beschichtungen der Absorberoberflächen und ihre Beurteilung erfolgt separat in Arbeitspaket 4.2 (vgl.:

Abbildung 2-1). Für eine detaillierte Untersuchung fehlen belastbare Daten über die Herstellungsprozesse.

Gänzlich unbekannt ist die Umweltauswirkung solarthermischer Kollektoren in der Nachnutzungsphase. Zwar bestehen bereits in der alten Vergabegrundlage RAL UZ 73 vom November 2003, Rücknah-

¹⁴ Wartung, Betrieb und Installation lassen sich plausibel nicht nur auf Kollektoren, sondern auf komplette Anlagen beziehen. Der energetische Aufwand für die Installation ergibt sich sogar explizit aus dem energetischen Aufwand für die Herstellung der kompletten Anlage. Daher ist in Abbildung 4-8 der kumulierte Energieaufwand für die Anlagenkomponenten elektrische Zusatzheizung 5 kW, Umwälzpumpe 40 W, Expansionsgefäß 25 l, Rohrleitung EFH (40 m), Speicher 450 l und Solarstation ausgewiesen.

meverpflichtungen, jedoch sind, aufgrund der durchschnittlichen Lebensdauer solarthermischer Anlagen von ca. 20 Jahren, bisher nur sehr geringe Massenströme zurückgenommen worden. Daher existieren noch keine Angaben über Abbau und Demontage sowie Verwertungs- und Entsorgungspraxis. Verfügbare Recyclingoptionen und Kreislaufücken insbesondere von Kupfer, Aluminium und Stahl sind in der Literatur dokumentiert worden [z.B. Handke 2004a]. Der Kupferbestand in Form von solarthermischen Kollektoren bewegt sich in Deutschland in einer Größenordnung von ca. 20.000 t. Dies entspricht ungefähr ca. 20% des jährlichen Primärkupferverbrauchs in Deutschland.

4.5.4. Selektive Absorberbeschichtungen

Der Einsatz von toxischen Stoffen kann mit den verwendeten Umweltindikatoren (Ecco-Indicator99, KEA) nur bedingt beschrieben werden. Zudem besitzt die selektive Beschichtung nur sehr geringe Massenanteile am Gesamtkollektor. Die Verwendung von krebserregendem Chrom VI bei der galvanischen Beschichtung erfolgt überdies im vorgelagerten Beschichtungsprozess. Der galvanisch beschichtete Absorber selber enthält als Kollektorbauteil kein toxisches Chrom VI. Vor diesem Hintergrund ist eine Beschreibung der Umweltauswirkung des toxischen Chrom VI durch die verwendeten Umweltindikatoren nur bedingt möglich. Beim Einsatzes von Chrom VI während der galvanischen Herstellung der selektiven Absorberbeschichtung ist auf folgende Umweltauswirkungen zu verweisen:

- die Luftemissionen von Chrom VI, insbesondere im Zusammenhang mit den Belangen des Immissionsschutzes am Arbeitsplatz,
- der Anfall von Abfällen in Form von schwermetallhaltigen Galvanikschlamm, und
- der Wasserverbrauch und
- der Abwasseranfall.

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die Größenordnung der Umweltauswirkung der galvanischen Beschichtungen im Vergleich zu nicht galvanischen Beschichtungssysteme:

Vergleichsdimensionen	Beschichtungssysteme		Bewertung
	Nicht Galvanik	Galvanik	
Energieeinsatz	2,3 – 3 kWh/m ²	1,4 – 3,5 kWh/m ²	Indifferent
Wasserverbrauch	2,96 – 10 m ³ /m ²	0,2 – 21,22 m ³ /m ²	Kühlwasser vs. Prozesswasser
Abwasseranfall	Kühlwasser	Cr (IV u. III) Cu, Ni	Schlammvermeidung
Luftemissionen	-	Cr (IV u. III) Cu, Ni	Emissionsvermeidung
Alterung	Simulation	Praxiserfahrungen	Indifferent
Emissionsfaktor	0,05 - 0,07	0,07 - 0,1	Quasi-Äquivalent
Absorptionsfaktor	0,93 - 0,95	0,90 - 0,95	Quasi-Äquivalent

Quelle: [Handke 2004a]

Tabelle 4-4: Umweltauswirkungen von Beschichtungsverfahren

Um zu belastbaren Aussagen hinsichtlich der Umweltauswirkungen der Beschichtungssysteme zu gelangen, sind neben den Umweltauswirkungen der Beschichtungsprozesse, insbesondere die Langzeitbeständigkeit, von Belang. Beide Fragestellungen werden daher in den Arbeitspaketen 4 und 5 detailliert untersucht (vgl. Abbildung 2-1).

4.6. Vermeidung und Verringerung von Umweltauswirkungen

4.6.1. Vermeidung von Gefahrstoffen

Ein verbreiteter Umweltstandard solarthermischer Kollektoren und Anlagen, wie er sich aufgrund der Marktbeobachtung und der Nutzung der europäischen Normen darstellt, schließt bereits zahlreiche Anwendungen von Gefahrstoffen aus.

So soll laut EN 12975-1 die Verwendung

- toxischer Wärmeträgerfluiden (haut- u. augenreizend, wasserverunreinigend),
- von Dämmstoffen, die FCKW enthalten oder bei Stillstandstemperaturen sonstige toxische Ausgasungen abgeben sowie
- von nicht recyclingfähigen Werkstoffen

vermieden werden.

Bereits gemäß der alten Vergabegrundlage RAL UZ 73 vom November 2003 dürfen zur Herstellung der Dämmung keine FCKW-haltigen Stoffe eingesetzt werden sowie die Dämmstoffe selbst bei Stillstandstemperaturen keine Stoffe ausgasen, die

- gefährlich nach Verordnungen gemäß § 14 ChemG,
- kennzeichnungspflichtig nach GefStoffV oder
- nach EG Verordnung¹⁵ als umweltgefährlich zu kennzeichnen

sind.

Die gleichen Anforderungen gelten auch für die Inhaltsstoffe der Wärmeträgerflüssigkeit, die allerdings darüber hinaus auch nicht in die Wassergefährdungsklasse 2 oder 3 nach VwVwS¹⁶ eingestuft sein dürfen. Da diese Anforderungen Bestandteil der alten RAL UZ 73 vom November 2003 sind, kann entsprechend der beobachteten Marktdurchdringung des "Blauen Engels" davon ausgegangen werden, dass ca. 80% der installierten Kollektorfläche diese Anforderungen einhalten. Damit ist der verbleibende Optimierungsbedarf zur Vermeidung von Gefahrstoffen in der Wärmeträgerflüssigkeit und den Dämmstoffen gering.

Grundsätzlich weiterhin Gegenstand von Strategien zur Vermeidung von Stoffen mit nachweislich bedeutender öko- und humantoxischen Wirkung sind aber das in solarthermischen Produkten enthaltenen Schwermetalle Blei und das in galvanischen Beschichtungsprozessen eingesetzte Chrom VI.

Für die **Chrom VI** einsetzenden galvanischen Beschichtungsverfahren existieren erprobte Substitutionsmöglichkeiten in Form der nicht galvanischen Beschichtungsverfahren. Die Vermeidung des toxischen Schwermetalls Chrom VI durch die Substitution der galvanischen Beschichtungsverfahren erscheint angesichts des prioritären Vermeidungsgebotes von Abfällen gemäß § 4 KrWG/AbfG auch dann angezeigt, wenn eine metallische Verwertung der galvanischen Abfälle möglich ist. Zudem ergeben sich hinsichtlich der Verwendung von sechswertigem Chrom in der Schwarzverchromung erhebliche Implikationen aus dem europäischen Umweltrecht. Gemäß der Richtlinie 67/548/EWG zählen Verbindungen von sechswertigem Chrom, von einigen Ausnahmen abgesehen, zu den gefährlichen Stoffen¹⁷. Gemäß den Grundsätzen der europäischen Gemeinschaft unterliegt das Inverkehrbringen

¹⁵ Derzeit gültig: Richtlinie der Kommission vom 27. April 1993 zur achtzehnten Anpassung an den technischen Fortschritt der Richtlinie 67/548/EWG des Rates zur Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften für die Einstufung, Verpackung und Kennzeichnung gefährlicher Stoffe.

¹⁶ Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Wasserhaushaltsgesetz über die Einstufung wassergefährdender Stoffe in Wassergefährdungsklassen (Verwaltungsvorschrift wassergefährdende Stoffe - VwVwS) vom 17.5.1999 (Bundesanzeiger 29.5.1999 Nr.98a)

¹⁷ In der Richtlinie 67/548/EWG des Rates zur Einstufung, Verpackung und Kennzeichnung gefährlicher Stoffe werden Verbindungen von sechswertigem Chrom, mit Ausnahme von Bariumchromat und anderer im Anhang genannter Verbindungen, wie folgt eingestuft

- Krebserzeugend, Kategorie 2
- R 49: Kann Krebs erzeugen durch Einatmen
- R 43: Sensibilisierung durch Hautkontakt möglich
- R 50/53: sehr giftig f. Wasserorganismen, kann in Gewässern längerfristig schädliche Wirkungen haben

Im Richtlinienentwurf ROHS 2000/0159 wird zudem sechswertiges Chrom als wichtiger Risikofaktor für die Umwelt in den Industrieländern angesehen, der starke allergische Reaktionen hervorruft und schon in geringen Konzentrationen in der Umwelt zur Erhöhung der Allergiefähigkeit beiträgt. Sechswertiges Chrom ist demnach erbgutschädigend und kann die DNS schädigen und die Verbindungen mit sechswertigem Chrom gelten als umweltschädigend.

gefährlicher Stoffe einem prinzipiellen Vermeidungsgebot. Dieses Vermeidungsgebot ist in verschiedenen Richtlinien präzisiert worden: Dazu zählen die RL 94/62/EG über „Verpackungen und Verpackungsabfälle“ und die RL 91/157/EWG über „gefährliche Stoffe enthaltende Batterien und Akkumulatoren“. Insbesondere die RL Vorschläge WEEE (2000/0158) über „Elektro- und Elektronikaltgeräte“ sowie ROHS 2000/0159 zur „Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in elektrischen und elektronischen Geräten“ schreiben vor, dass die Mitgliedstaaten sicherzustellen haben, dass, von Ausnahmen abgesehen, sechswertiges Chrom zusammen mit anderen ausgewählten gefährlichen Stoffen ab 1.1.2008 durch andere Stoffe zu ersetzen ist.

Für **Blei**, welches gängiger Bestandteil von Loten zur Verbindung der Rohrleitungen ist, existieren bis jetzt noch keine erprobten Substitute. Möglichkeiten bestehen in bleifreien Loten, die jedoch in der Regel höhere Löttemperaturen benötigen oder in anderen Verbindungsverfahren. Materialsubstitutionen sind jedoch noch nicht ausgereift. Es besteht also ein beträchtliches Optimierungspotential, dessen Erschließung jedoch nicht kurzfristig zu erwarten ist.

Für bleihaltige Weichlote zur Verbindung zwischen Absorberblech und Rohr verhält es sich jedoch anders. Hier existieren mit der Schweißtechnologie bleifreie Verbindungstechniken die sich am Markt auch bereits etabliert haben. (vgl.: Quelle: [SWW 7/2004] Abbildung 3-15).

4.6.2. Reduzierung des Materialinputs

Eine Reduzierung des Materialinputs kann über eine Erhöhung der Ressourcenproduktivität erfolgen. Grundsätzliche Ansatzpunkte bieten die Verlängerung der Nutzungsdauer, die Materialauswahl und das Recycling. Die Nutzungsdauerverlängerung besitzt jedoch als Strategie für ein Produkt der Haustechnik mit einer durchschnittlichen Lebensdauer von ca. 20 Jahren nur noch geringe Potentiale.

Zu den Möglichkeiten der Reduzierung des Materialverbrauchs bei solarthermischen Produkten zählt, neben der Materialauswahl, das Recycling. Grundsätzlich ist der Materialeinsatz in der Solarthermie geprägt von relativ reinstofflichen, metallischen und mineralischen Werkstoffen mit ausgeprägten Recyclingmöglichkeiten auf überwiegend hohem Verwertungsniveau. Darüber hinaus verfügt Kupfer über wirtschaftlich gute Erlöseaussichten. Ein Handlungsansatz zur Erschließung der Recyclingpotentiale bildet die Zusammensetzung der Bauteile nach Recyclingpfaden (z.B. Kupfer, Stahl, Aluminium, Glas). Daraus ergibt sich das konstruktive Gestaltungsgebot, Werkstoffe möglichst einstofflich zu verwenden oder zumindest einstofflich leicht separierbar einzusetzen. Daher sollten Kupfer-Aluminium-Verbindungen im Absorber, Stahl-Kupfer-Installationen im Rohrsystem und unlösbare Dämmung-Metall-Verbindungen (Verklebungen) an Rohrleitungen und am Speicher vermieden werden. Neben diesen Anforderungen an eine recyclinggerechte Materialauswahl und Konstruktion, deren grundsätzliche Regeln ausführlich in technischen Richtlinien¹⁸ beschrieben sind, fehlt für solarthermische Altanlagen und ihre Komponenten ein Erfassungssystem. Aufgrund der relativ jungen solarthermischen Technologie und dem bisher geringen Anfall an Altprodukten existiert bisher kein Konzept für die Behandlung solarthermischer Anlagen nach ihrer Nutzung. Ein derartiges Konzept, das die Elemente selektiver Rückbau, getrennte Erfassung, Demontage und Einschleusung in die bestehenden stofflichen Wirtschaftskreisläufe umfasst, ist um so dringender, da das Technologiealter inzwischen die Produktlebensdauer erreicht hat und der Anfall an Altprodukten in absehbarer Zukunft stark zunehmen wird.

Neben der Recyclingebene, bietet die umweltorientierte Materialauswahl einen Ansatzpunkt zur Produktoptimierung an. Aus den in Kapitel 4.5 beschriebenen Umweltbelastungen ergibt sich die Forderung, massenintensive Materialanwendungen zu vermeiden. Eine Orientierung in Richtung umweltverträgliche Materialauswahl liefert die Betrachtung der materialspezifischen Umweltindikatoren.

¹⁸ VDI Richtlinie 2243: „Konstruieren recyclinggerechter technischer Produkte“

Die folgende Tabelle stellt die Werte von Umweltindikatoren für ausgewählte Materialien dar:

Einsatzmaterial	Werte verschiedener Umweltindikatoren					
	KEA [MJ/kg]	EcoIndicator99 [mPt]	Ausgewählte ProBas Indikatoren			
			CO ₂ - Äquivalen t [kg/kg]	SO ₂ - Äquivalen t [kg/kg]	KSA ¹⁹ nicht erneuerbar [kg/kg]	Abraum [kg/kg]
Kupfer	53	1.400	6,0	0,041	2,25	108
Aluminium	169	780	19,8	0,109	9,7	49
Stahl (St37)	32	73	1,8	0,006	1,8	2,4
PVC	61	280	1,7	0,005	0,9	2,9
Styrol	51	370	2,7	0,012	1,8	0,2
Mineralwolle	15	61	1,1	0,003	1,2	1,3
ABS	114	400				
PU-Hartschaum	59	420	5,4	0,013	9,5	7,0

Quelle: [Handke 2004a]

Tabelle 4-5: Umweltindikatoren für ausgewählte Materialien

Bereits die unterschiedlichen Werte der ausgewählten Umweltindikatoren verdeutlichen, dass eine Materialpräferenz oder -diskriminierung selten eindeutig möglich ist. Zu dem muss die Funktionalität berücksichtigt werden. So weist der Einsatz von Stahl als Montageset zwar eine geringere Umweltbelastung als Aluminium auf, gleichwohl ist die Massenintensität von Aluminium in der gleichen konstruktiven Funktion geringer und die Umweltverträglichkeit von Stahl kann so unter Umständen kompensiert werden.

Wesentlich eindeutiger fällt dagegen ein umweltorientierter Vergleich zwischen Mineralwolle und Polyurethan-Hartschaum als Dämmung aus.

4.6.3. Reduzierung des Energieverbrauchs

Bezüglich der Reduzierung des Energieverbrauchs während des Betriebes ist einzig die Energieeffizienz der Pumpe entscheidend. Hier liegt Optimierungspotential in der Anwendung drehzahlgesteuerter Kreiselpumpen. [vgl. BINE 2001] Der Energieverbrauch während des Betriebes spielt jedoch bei solarthermischen Anlagen eine untergeordnete Rolle. Entscheidender sind die Energieeinsätze für die Herstellung. Da solarthermische Anlagen der Energiewandlung dienen und Energie dabei als Wärme bereitstellen, kommt dem energetischen Gesamtverhalten jedoch eine Schlüsselstellung zu. Die Variation der energetischen Amortisationszeiten ist mit 15 bis 27 Monaten [test 4/02] erheblich. Ein wesentliches Optimierungspotential stellt also die Minimierung der Amortisationszeiten dar. Die energetische Amortisationszeit ist jedoch ein Ausdruck für das Verhältnis von aufgewandter zu bereitgestellter Energiemenge des Gesamtsystems. Damit können für seine Minimierung zwei grundsätzlich unterschiedliche Strategien verfolgt werden: Die Minimierung der aufgewandten Energiemenge durch eine entsprechende Materialauswahl einerseits und die Maximierung der bereitgestellten Energiemenge andererseits. In der Praxis werden die Optimierungspotentiale in Form verringerter Amortisationszeiten durch das Verfolgen beider Strategien realisiert.

Einschränkend ist jedoch darauf hinzuweisen, dass eine kurze energetische Amortisationszeit nicht unbedingt auch eine Aussage über die Wärmebereitstellung des Systems über seine gesamte Lebensdauer zulässt. So kann eine relativ lange energetische Amortisationszeit aufgrund hoher KEA-Werte für die Herstellung der Kollektormaterialien bei einem gleichzeitig hohen Kollektorsertrag erheblich höherer Erträge über die gesamte Lebensdauer bedeuten als bei einer Anlage mit geringerer energetischer Amortisationszeit. Um diesen Sachverhalt zu verdeutlichen sei folgendes Beispiel eines Flach- (FK) und eines Vakuumröhrenkollektors (VR) gegeben, wie es in der Stichprobe der Stiftung Waren-test [STIWA 2002, STIWA 2003] vorgefunden wurde und auf welche das Konzept der energetischen

¹⁹ kumulierter Stoffaufwand

Amortisationszeit gemäß Vergabegrundlage RAL UZ 73 vom Februar 2005 angewandt wurde. Die folgende Abbildung visualisiert das energetische Verhalten dieser beiden Kollektoren während der ersten 10 Jahre unter der Annahme gleichbleibender Kollektorerträge.

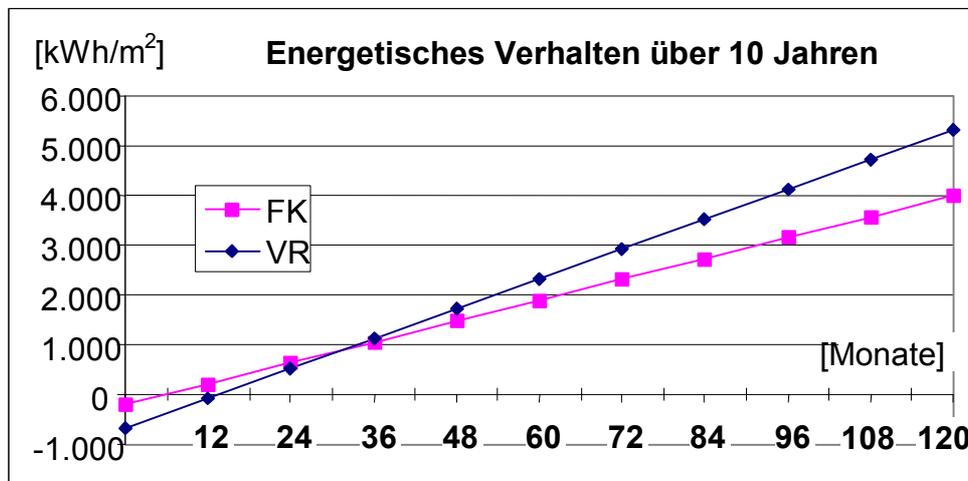


Abbildung 4-10: Energetisches Langzeitverhalten zweier Kollektoren

Die Abbildung veranschaulicht, dass der Vakuumröhrenkollektor aufgrund seines hohen Energieaufwands für die Herstellung von 673 kWh/m^2 trotz einem relativ hohen Kollektorertrag von $601 \text{ kWh/m}^2 \text{ a}$ eine energetische Amortisationszeit von über 13 Monaten besitzt. Der Flachkollektor hingegen besitzt einen KEA –Wert für seine Herstellung von lediglich 211 kWh/m^2 und besitzt einen Kollektorertrag von $421 \text{ kWh/m}^2 \text{ a}$. Daraus ergibt sich für ihn eine energetische Amortisationszeit von lediglich 6 Monaten. Gleichwohl hat der Vakuumröhrenkollektor nach 10 Jahren $5,3 \text{ MW/m}^2$ Wärme bereitgestellt. Während der Flachkollektor im gleichen Zeitraum lediglich ca. 4 MW/m^2 bereitgestellt hat.

Des Weiteren ist auf die zugrundegelegten Systemgrenzen hinzuweisen. So zeigt die Abbildung 4-10 lediglich die energetischen Amortisationszeiten für die Kollektoren. Eine ganzheitliche Sichtweise muss jedoch die gesamte Anlage in den Blick nehmen. Dies gilt um so mehr als die energetischen Erträge zwar maßgeblich von den Kollektorerträgen beeinflusst werden, jedoch die tatsächlich realisierten Erträge von der Gesamtanlage und ihrer Auslegung sowie Installation bestimmt werden.

Bei einer Betrachtung der energetischen Amortisationszeit von Gesamtanlagen ist grundsätzlich von höheren Werten auszugehen. So wurden während der wissenschaftlichen Begleitung im Rahmen von Solarthermie 2000 bei großen Anlagen energetische Amortisationszeiten für Gesamtanlagen von 1,5 bis 2 Jahre ermittelt. [Klingenberger 2005]

4.6.4. Reduzierung stofflicher Emissionen

Als stoffliche Emissionen kommen Leckagen, Ausgasungen und im weitesten Sinne auch Ersatzteile und ausgewechselte Betriebsstoffe insbesondere als ausgewechselte Wärmeträgerflüssigkeit in Betracht. Leckagen im Kollektorkreislauf und der damit einhergehende Austritt von Wärmeträgerflüssigkeit sind außer im schrumpfenden Sektor des Eigenbaus zu vernachlässigen. Zudem wird überwiegend Propylenglycol als Additiv in der Wärmeträgerflüssigkeit eingesetzt, von dem keine erhebliche Umweltgefährdung ausgeht.

Dagegen besitzen Ausgasungen eine gewisse Relevanz. Zwar ist die Ausgasung von Gefahrstoffen aus Dämmmaterial eher gering, jedoch sind bei hohen Temperaturen und in den ersten Lebensjahren der Anlage insbesondere aus dem bleihaltigen Weichlot gasförmige Emissionen möglich. [Remmers 98]. Nichts desto trotz erscheint das Optimierungspotential aufgrund mangelnder Substitute gering.

Ähnlich verhält es sich mit Ersatzteilen, deren Bedarf in solarthermischen Anlagen jedoch ausgesprochen gering ist. Als Austauschteil kommt die Korrosionsschutzanode in Betracht, die als Verbrauchsmaterial im Laufe der durchschnittlichen Anlagenlebensdauer von ca. 20 Jahren je nach Wasserqualität 1 bis 3 mal ausgewechselt wird.

Als Betriebsmittel ist noch das Auffüllen der Wärmeträgerflüssigkeit zu nennen und das mit der Wartung einhergehende Einstellen der Additivkonzentration. Da es sich jedoch um einen unvermeidbaren Stoffumgang handelt, ist derzeit kein realistisches Optimierungspotential erkennbar. Weitgehend un-

bekannt ist der Verbleib der im Zuge der Wartung regelmäßig anfallenden ausgewechselten Wärmeträgerflüssigkeiten.

4.6.5. Zusammenfassung

Die Umweltbelastungen durch solarthermische Anlagen und ihre Komponenten werden insbesondere von den eingesetzten massenwirksamen Materialien hervorgerufen. Namentlich die Metalle Kupfer, Aluminium und Stahl verursachen hinsichtlich der energetischen Aufwendungen, den mit der Herstellung verbundenen CO₂-Emissionen, den mit der Förderung verbundenen Abfällen in Form von Abraum sowie des Verbrauchs nicht erneuerbarer knapper Ressourcen in Form von Erzen die wesentlichen Umweltbelastungen.

Neben den Metallen ist noch Glas zu nennen, das als massenintensives Material neben seinen energetischen Aufwendungen und den CO₂ Emissionen während seiner Herstellung insbesondere Gewässerinträge in Form von anorganischen Salzen induziert.

Daneben liegen Umweltauswirkungen in Gestalt von eingesetzten toxischen Substanzen vor. Dazu zählen zum einen das krebserregende Chrom VI welches in den galvanischen Beschichtungsverfahren der Schwarzverchromung eingesetzt werden und zum anderen bleihaltige Weichlote welche zur Verbindung der Rohre des hydraulischen Systems Verwendung finden.

Die im Betrieb befindlichen Kollektoren stellen zudem ein erhebliches Bestandslager an metallische und mineralische Stoffen dar. Ihre Erschließung als Sekundärrohstoff und der umweltgerechte Umgang mit Altkollektoren ist weitgehend ungeklärt und dringend geboten.

5. Anforderungen an fortschrittliche Umweltstandards

5.1. Bestehende technische Standards und Beurteilungssysteme

Im Bereich der Solarthermie existieren inzwischen zahlreiche technische Standards, Normen sowie Beurteilungs- und Kennzeichnungssysteme.

5.1.1. Technische Normen

Die bisherigen **nationalen Normen**²⁰ DIN V 4757-1 bis -4 sind durch die **europäischen Normen**²¹ DIN EN 12975 -1 bis -2 sowie DIN EN 12977-1 bis -2 teilweise ersetzt worden. Diese europäischen Normen sind für Sonnenkollektoren, vorgefertigte Anlagen, kundenspezifisch gefertigte Anlagen und Warmwasserspeicher erarbeitet worden [vgl.: DRÜCK 2001]. Sie definieren Mindestanforderungen hinsichtlich Sicherheit und Qualität der Produkte sowie Testmethoden zu ihrer Überprüfung und Methoden zur Ermittlung der thermischen Leistungsfähigkeit. In geringem Umfang behandeln sie auch Anforderungen an den Umweltschutz. So sind in der EN 12975-1 im informativen - also im nicht normativen - Anhang C, Empfehlungen zum Wärmeträgerfluid (nicht toxisch, keine Haut- und Augenreizung, nicht wasserverunreinigend und biologische vollkommen abbaubar), zu den Dämmstoffen (keine FCKW Verwendung bei der Herstellung, keine Ausgasung von toxischen und haut- oder augenreizenden Gasen) und zum Recycling der Kollektorwerkstoffe (Vermeidung oder Verringerung der Verwendung nicht recyclingfähiger Materialien) enthalten.

Ferner findet die **Druckgeräterichtlinie 97/23/EG (DGR)** auf Solaranlagen Anwendung. Es handelt sich dabei um eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates vom 29. Mai 1997 nach Art. 95 der Römischen Verträge, die der Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedsstaaten über Druckgeräte dient. In Deutschland erfolgte die nationale Umsetzung durch die 14. Verordnung zum Gerätesicherheitsgesetz, die am 27. September 2002 verabschiedet wurde und die damit auch die Anwendung der Bauartzulassung nach der **Dampfkesselverordnung (DampfKV)** ersetzt. Die DGR definiert über Art. 3 und Anhang II Kategorien, für welche bestimmte Anforderungen an die Konformitätsprüfungen gelten. Diese Anforderungen sind in Module gegliedert. Gemäß der unverbindlichen Leitlinie 2/32 der Arbeitsgruppe „Druck“ der Kommission, muss die anzuwendende Konformitätsprüfung des Absorbers nach DGR, Anhang II Diagramm 2 ermittelt werden.

Des Weiteren können für den Bereich der thermischen Solartechnik und ihre Montage eine Vielzahl von weiteren technischer Normen und Vorschriften zur Geltung kommen²². Ihre Zielrichtung und

²⁰ **DIN 4757 Teil 1 bis 2 v. 1980-11:** Sonnenheizungsanlagen,

DIN V 4757 Teil 3 v. 1995-11: Solarthermische Anlagen: Sonnenkollektoren: Begriffe, Sicherheitstechnische Anforderungen, Prüfung der Stillstandtemperatur

DIN V 4757 Teil 4 v. 1995-11: Solarthermische Anlagen: Sonnenkollektoren Bestimmung von Wirkungsgrad, Wärmekapazität und Druckabfall

²¹ **EN 12975-1:** Thermische Solaranlagen und ihre Bauteile – Kollektoren – Teil 1: Allgemeine Anforderungen

EN 12975-2: Teil 2: Prüfverfahren

EN 12976-1: Thermische Solaranlagen u. ihre Bauteile – Vorgefertigte Anlagen– Teil 1: Allg. Anforderungen

EN 12976-2: Teil 2: Prüfverfahren

ENV 12977-1: Thermische Solaranlagen u. ihre Bauteile – kundenspezifisch gefertigte Anlagen – Teil 1: Allgemeine Anforderungen

ENV 12977-2: Teil 2: Prüfverfahren

ENV 12977-3: Teil 3: Leistungsprüfung von Warmwasserspeichern für Solaranlagen

²² **Montage auf Dächern:** DIN 18338: Dachdeckungs- u. Dachabdeckungsarbeiten; DIN 18451: Gerüstarbeiten.

AVB Wasser, DVGW-Arbeitsblatt: W 551: Technische Maßnahmen; W 552: Zur Verminderung des Legionellenwachstums.

Installation und Ausrüstung von Wassererwärmern: DIN 18380: Heizungs- und Brauchwassererwärmungsanlagen, DIN 18381: Gas-, Wasser- und Abwasserinstallationsarbeiten; DIN 18421: Wärmedämmarbeiten an wärmetechnischen Anlagen.

Zweckbestimmung ist jedoch vornehmlich auf die Geräte-, Arbeits- und Nutzungssicherheit ausgerichtet. Unmittelbare Umweltschutzbezüge liegen dort in der Regel nicht vor.

5.1.2. Kennzeichnungssysteme

Solar Keymark

Das Solar Keymark ist ein europäisches Gütesiegel, das maßgeblich vom europäischen Verband der solarthermischen Industrie ESTIF entwickelt wurde. Ziel ist es dabei, europaweit einheitliche Qualitätsstandards und ihre Prüfungen zu etablieren, um nationale Unterschiede - insbesondere hinsichtlich der Anforderungen und Voraussetzung zum Erhalt von nationalen Fördermitteln - auszugleichen und so europaweit einheitliche Marktbedingungen sicherzustellen.

Das Solar Keymark basiert im wesentlichen auf den europäischen Normen 12 975 für Sonnenkollektoren und 12 976 für vorgefertigte Solaranlagen, geht über diese allerdings in einigen Punkten hinaus. So muss das Prüfmuster aus der laufenden Produktion stammen, die Hersteller müssen ihre Kollektoren alle zwei Jahre einem Produkttest unterziehen und ihre Fertigungsstätten werden jährlich überprüft. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, dass Verbraucher oder Mitbewerber bereits zertifizierte Produkte durch Sonderprüfungen nachträglich überprüfen lassen. Da das Solar Keymark nur durch zertifizierte Prüfinstitute vergeben werden kann, soll auch eine europaweite gegenseitige Anerkennung der Prüfinstitute erreicht werden.

CE-Zeichen

Beim CE-Zeichen handelt es sich um ein Gütebestätigungszeichen. Es wird als Zeichen der Konformität mit den europäischen Richtlinien am Produkt angebracht und kennzeichnet dieses damit als ein zum freiem Verkehr in der EU zugelassenes Produkt. Diese Konzeption wurde im Grundsatz am 5. Juli 1985 vom EG-Ministerrat auf Vorschlag der EG-Kommission beschlossen. Sie strebt insbesondere eine Harmonisierung unter dem Aspekt der Sicherheitsanforderungen an. In der Regel gilt, dass der Hersteller, Lizenznehmer oder Importeur das CE selbst anbringt, wobei er mit Bußgeld und Strafen rechnen muss, falls er die Richtlinien nicht eingehalten hat.

Mit der im Juli 2005 in Kraft getretenen EuP-Richtlinie²³ und den darauf aufbauenden zukünftigen produktspezifischen Tochterrichtlinien mit entsprechenden spezifischen Umweltauforderungen, zeichnen sich für die Nutzung des CE-Zeichens zukünftig verschärfte Bedingungen ab. Im Rahmen der Strategie der integrierten Produktpolitik, werden für die in der europäischen Gemeinschaft in den Verkehr gebrachten Produkte, die Energie verbrauchen, übertragen oder erzeugen, dann ökobilanzielle Betrachtungen zur Minimierung der Umweltauswirkungen und zur Erhöhung der Umweltverbesserungen verpflichtend sein. Wenn auch im derzeitigen Fokus zunächst Produktgruppen stehen, welche für ihren Betrieb elektrischen Strom oder fossile Energieträger benötigen, fallen thermische Solaranlagen gemäß Art. 2 Abs. 1 grundsätzlich in den Geltungsbereich der EuP-Richtlinie.

Mit diesen anstehenden Änderungen des CE-Zeichens von einer Produktkennzeichnung zur Gewährleistung von Gerätesicherheit und Verbraucherschutz hin zu einem zunehmend umweltrelevanten Kennzeichnung, erhöht sich die Möglichkeit, das CE-Zeichen auch als Umweltstandard mit heranzuziehen. Allerdings dürften diesbezügliche Konkretisierungen in Gestalt von EuP-Tochterrichtlinien und insbesondere hinsichtlich solarthermischer Produkte noch einige Jahre auf sich warten lassen.

Elektrischer Anschluß: VDE 0100: Errichtung elektrischer Betriebsmittel, Erdung, Schutzleiter, Potentialausgleichsleiter; VDE 0185: Allgemeines für das Errichten von Blitzschutzanlagen; VDE 0190: Hauptpotentialausgleich von elektrischen Anlagen, DIN 18382: Elektrische Kabel- und Leistungsanlagen in Gebäuden.

Sonstige Normen: DIN 4807: Ausdehnungsgefäß; DIN 3320: Sicherheitsabsperrentile; DIN 1052: Holzbauwerke; DIN 10555: Lastannahmen für Bauten.

²³ Richtlinie 2005/32/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 6. Juli 2005 zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energiebetriebener Produkte und zur Änderung der Richtlinie 92/42/EWG des Rates sowie der Richtlinien 96/57/EG und 2000/55/EG des Europäischen Parlaments und des Rates.

Blauer Engel

Der Blaue Engel ist ein Umweltkennzeichnungssystem und dient als marktdifferenzierende Orientierungshilfe für den Endkonsumenten hinsichtlich der Umwelteigenschaften eines Produktes. Die neue Vergabegrundlage RAL UZ 73 für die Produktgruppe solarthermische Kollektoren vom Februar 2005 schreibt als zentrale Anforderung die so genannte „energetische Amortisationszeit“ ein. Sie gibt an, wie viele Monate es dauert, bis der Solarkollektor die Energiemenge erzeugt hat, die zur Herstellung und zum Transport verbraucht wurden. Daneben werden Anforderungen an die Dämmung, das empfohlene Trägermedium, die Herstellung der selektiven Beschichtung, die recyclinggerechte Konstruktion, die Rücknahme sowie die Produktinformations- und -kennzeichnung gestellt.

DGS-Gütesiegel

Bei dem DGS-Gütesiegel handelt es sich um eine Ertragsgarantie für große Solaranlagen. Im Rahmen eines Vertrages zwischen Betreiber (Garantiennehmer) und Hersteller bzw. Installateur (Garantiegeber) wird ein Solarertrag garantiert. Grundlage bilden die von der DGS mit den Beteiligten festgelegten Rahmenbedingungen. Die laufende Kontrolle erfolgt durch die DGS. Dazu steht ihr eine Datenfernübertragung von der Solaranlage zur Verfügung. Bei der vorliegenden Anlagenkonfiguration wird der solare Ertrag (kWh), die solare Momentanleistung (kW), der Warmwasserverbrauch (momentan/ kumulativ), die Nachheizenergie (kWh), die Nachheizleistung (kW) sowie sämtliche Temperaturen der Anlage erfasst.

Auf dieser Basis soll eine umfassende Kontrolle der Betriebsweise und der Betriebsergebnisse gewährleistet werden. Ein möglicher Minderertrag zum vereinbarten Ertrag ist durch die Garantiegeber finanziell auszugleichen. Entwickelt wurde das Gütesiegel von der Deutschen Gesellschaft für Sonnenenergie e.V. (DGS) und der Unternehmensvereinigung Solarwirtschaft e.V. (UVS) in enger Kooperation mit dem Verband Berlin-Brandenburgischer Wohnungsunternehmen e.V. (BBU). Die Konzeption des solaren Gütesiegels erfolgte mit finanzieller Unterstützung des Berliner Senats.

5.2. Konzeptionierung von Umweltstandards

5.2.1. Allgemeine Rahmenbedingungen zur Konzipierung

Bei der Entwicklung von Anforderungen an Solarkollektoren, die anspruchsvolle technische Umweltstandards erfüllen, sind zunächst einige grundlegende Überlegungen hinsichtlich der einzuhaltenden Rahmenbedingungen notwendig.

Anspruchsvolle technische Umweltstandards sollten, insbesondere hinsichtlich ihrer Nutzung in Förderprogrammen und der sich daraus ergebenden Notwendigkeit eines degressiven Förderverlaufes, marktdifferenzierend entwickelt werden. Dies bedeutet, dass nicht das gesamte am Markt angebotene Produktspektrum von solarthermischen Kollektoren diese Anforderungen erfüllen darf. Aus diesem Sachverhalt ergibt sich die Notwendigkeit, eine Grenze festzulegen. Eine derartige Grenzsetzung kann als eine Festlegung eines Standes der Technik aufgefasst werden. Anspruchsvolle Umweltstandards müssen also den Stand der Technik übertreffen. Diese Auffassung deckt sich mit der Sichtweise der europäischen Kommission, wie sie im Gemeinschaftsrahmen für staatliche Umweltschutzbeihilfen niedergelegt wurden. Dort wird in Kap. C Abs. 20, Satz 3 explizit darauf hingewiesen, dass Beihilfen für Investitionen, die lediglich darauf abzielen, die bestehenden oder neuen technischen Gemeinschaftsnormen zu erfüllen, nicht gerechtfertigt sind. Vielmehr heißt es dort in Satz 5, dass Beihilfen nützlich seien, wenn sie einen Anreiz darstellen, um einen höheren Umweltschutz, als den aufgrund der Gemeinschaftsnormen geforderten, zu verwirklichen. [EU 2001/C 37/03]

Eine weitere entscheidende Rahmenbedingung für die Festlegung von Umweltstandards stellen die zugrundegelegten Umweltindikatoren und deren Beurteilungssysteme dar. Umweltindikatoren und ihre Bewertungen sollten dabei:

- Aussagekräftig
- Ganzheitlich
- Einfach
- Vergleichbar
- Kommunizierbar und
- Quantifizierbar sein.

Des Weiteren ist zu beachten, dass die Anforderungen zu ihrer Ermittlung und Überprüfung, z.B. durch Prüfinstitute möglichst geringe Kosten verursachen. Schließlich ist sicherzustellen, dass sie mit anderen, international gültigen technischen Normen und Qualitätsstandards möglichst kompatibel sind.

Es wird vorgeschlagen, die Anforderungen an anspruchsvolle technische Umweltstandards zweigliedrig zu konzipieren. Der erste Teil dient der Sicherstellung der Einhaltung des Standes der Technik und der allgemeinen Anforderungen an Qualität und Gerätesicherheit. Der zweite Teil beinhaltet darüber hinausgehende Umweltleistungen.

5.2.2. Stand der Technik

Als Stand der Technik für solarthermische Kollektoren sind die europäischen Normen EN 12975 und EN 12976 heranzuziehen. Für Kollektoren, die das Solar-Keymark besitzen, sollte eine Konformität mit diesen Normen anerkannt werden. Als weitere Kriterien für die Einhaltung des Standes der Technik ist das Vorhandensein eines Wärmemengenzählers einzufordern.

5.2.3. Anforderungen an anspruchsvolle technische Umweltstandards

Mindestertrag

Ein einfaches und bisher auch angewandtes Mittel, anspruchsvolle technische Umweltstandards festzusetzen, ist die Forderung nach einem Mindestertrages des Kollektors. Die Festsetzung eines Mindestertrages sollte sich zunächst am Durchschnittswert der aktuell am Markt vertretenen Kollektoren orientieren und dann eine entsprechende Marktdifferenzierung quantifizieren.

Aus einer Stichprobe von 30 marktgängigen Flach- und Vakuumröhrenkollektoren aus den Jahren 2002 und 2003 [STIWA 2002, STIWA 2003] stellt sich die Verteilung der Kollektorerrträge gemäß folgender Abbildung dar:

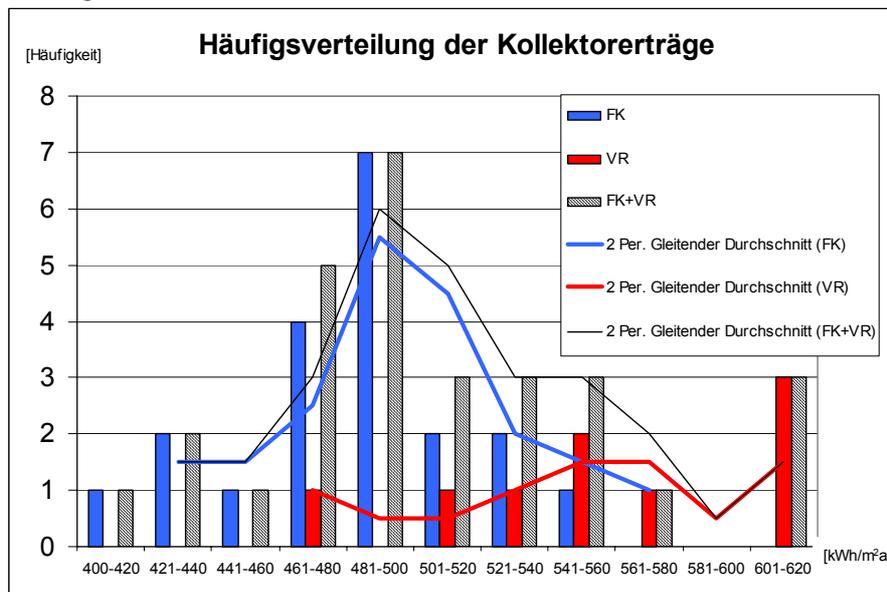


Abbildung 5-1: Häufigkeitsverteilung der Kollektorerrträge

Die Abbildung verdeutlicht, dass sich die Kollektorerrträge zwischen Vakuumröhren (VR) und Flachkollektoren (FK) deutlich unterscheiden. Der durchschnittliche Ertrag liegt für Flachkollektoren bei 484 kWh/m²a und für Vakuumröhrenkollektoren bei 556 kWh/m²a. Insgesamt liegt der durchschnittliche Kollektorerrtrag bei 498 kWh/m²a. Aufgrund der „Zweigipfeligkeit“ wären die Mindesterrträge nach Kollektorart differenziert einzufordern. Gleichzeitig ist jedoch auch sichtbar, dass die Erträge innerhalb eines Kollektortyps in einem breiten Bereich streuen (bei Vakuumröhren 486 bis 609 kWh/m²a und bei Flachkollektoren 420 bis 551 kWh/m²a).

Ferner ist auf die unterschiedliche Berechnungsgrundlage zur Bestimmung der Kollektorerrträge hinsichtlich der dabei zugrundegelegten solaren Deckungsrate zu verweisen. Die solare Deckungsrate gibt an, welcher Anteil der Energie von der Solaranlage gedeckt ist. Er ist definiert als der Anteil der an den Speicher abgegebenen Energie des Solarkreislaufes vom Gesamtenergiebedarf, der sich aus der Nutzenergie und den Speicherverlusten zusammensetzt.

Die alte Vergabegrundlage RAL UZ 73 vom November 2003 legt eine solare Deckungsrate von lediglich 40% zugrunde.

Auf dieser Grundlage wurde ein Mindestertrag von 525 kWh/m²a festgelegt. Dieser Mindestertrag galt für die Vergabe des Umweltkennzeichens Blauer Engel und wurde damit auch als Fördervoraussetzung im Marktanreizprogramm festgelegt. In der Praxis stellte sich jedoch heraus, dass dieser Mindestertrag von nahezu allen Kollektoren eingehalten wird, und dass eine solare Deckungsrate von ca. 60 % eher dem Stand der solarthermischen Technik entspricht.

Daher wurde bei der Überarbeitung der Vergabegrundlage RAL UZ 73, welche seit dem Februar 2005 in Kraft ist, eine solare Deckungsrate von 60% als eine Rahmenbedingung der Berechnungsgrundlage der Kollektorerrträge und somit auch der energetischen Amortisationszeit festgelegt.

Legt man die Kollektorerrträge gemäß Abbildung 5-1, die gemäß einer solaren Deckungsrate von 60% errechnet wurden, zugrunde, würde ein Mindestertrag von 525 kWh/m²a lediglich von ca. 30 % der Stichprobe eingehalten werden. Damit wäre ein beträchtlicher Teil der Kollektoren nicht mehr förderfähig.

Um eine Förderquote von ca. 67 % der Kollektoren der Stichprobe zu erhalten, müsste der Mindestertrag auf 480 kWh/m²a abgesenkt werden. Dies wäre jedoch schwer kommunizierbar und würde ohne genaue Kenntnis der veränderten Berechnungsgrundlage vermutlich als ein Verstoß gegen eine degressive Förderung wahrgenommen werden.

Alternativ ließe sich die alte Berechnungsgrundlage auf Basis einer solaren Deckungsrate von 40% fortschreiben und die Mindesterrträge entsprechend erhöhen, um eine entsprechend annehmbare För-

derquote zu erhalten und gleichzeitig eine Förderdegression in Form einer Verschärfung der Mindesterträge zu kommunizieren. Ein derartiges Vorgehen entspräche jedoch nicht dem Stand der Technik. Es wird vor diesem Hintergrund vorgeschlagen, im Falle einer weiteren Nutzung der Mindesterträge als Förderbedingung, einerseits die zugrundegelegte solare Deckungsrate zu quantifizieren und andererseits den Mindestertrag hinsichtlich Kollektortyp, Verwendungsart und auch bezüglich der Größe der Kollektorfläche zu differenzieren.

Energetische Amortisationszeit

Ein weiterer möglicher Indikator zur Quantifizierung anspruchsvoller technischer Umweltstandards ist die energetische Amortisationszeit. Seine Konzeptionierung und Einordnung als Umweltindikator ist ausführlich beschrieben worden [Streicher 2002, Handke 2004a]. Grundsätzlich stellt dieser Indikator eine Fortentwicklung des Mindestertrages dar, bei dem neben dem Kollektorertrag auch der zur Kollektorherstellung eingesetzte Energieaufwand in Form des kumulierten Energieaufwands (KEA) berücksichtigt wird.

Vorteilhaft wäre, dass bei einer Nutzung der energetischen Amortisationszeit als Förderbedingung auf die Vergabegrundlage RAL UZ 73 vom Februar 2005 und damit auf eine bestehende Umweltkennzeichnung inklusive Berechnungsgrundlage sowie Prüf- und Nachweisverfahren zurückgegriffen werden könnte. Zudem ließe sich damit eine gegebenenfalls politisch gewollte Stärkung des Umweltzeichens „Blauer Engel“ verbinden und insbesondere die breite Nutzung und Marktdurchdringung der novellierten Vergabegrundlage, welche bisher vom Anbietermarkt mit erheblicher Skepsis begegnet wird, unterstützen.

Es ist jedoch einschränkend festzustellen, dass die energetische Amortisationszeit zwar Auskunft über die wesentlichen Umweltauswirkungen bei der Herstellung, dem Vertrieb der Nutzung und auch bei der Nachnutzung zulässt, jedoch nur bedingt Aussagen über die Wärmebereitstellung während der gesamten Lebensdauer eines Kollektors erlaubt. (vgl.: Kap. 4.6.3 und Abbildung 4-10)

Vor diesem Hintergrund wird bei einer Nutzung der energetischen Amortisationszeit als Förderbedingung vorgeschlagen, den zeitlichen Bezug, der in der RAL UZ 73 auf 1 Jahr festgelegt ist, auf mindestens 5 Jahre auszudehnen.

Effektiv substituierte Energiemenge

Um die aufgezeigten Schwächen der energetischen Amortisationszeit zu vermeiden, ist diejenige Wärmemenge, welche über die durchschnittliche Lebensdauer von einer solarthermischen Anlagen bereitgestellt wird, zu berücksichtigen und derjenigen Energiemenge, welche für Herstellung, Vertrieb, Nutzung und Nachnutzung aufgewendet wird, gegenüberzustellen. Dies entspräche der tatsächlich von der thermischen Solaranlage substituierten, überwiegend fossilen, Energiemenge.

Diese Vorgehensweise entspräche am ehesten einer Weiterentwicklung bisheriger Beurteilungssystem der Umweltleistung von thermischen Solaranlagen und böte zudem den Vorteil, dass auf bestehende Systeme aufgebaut werden könnte.

So ist durch die neue Vergabegrundlage RAL UZ 73 vom Februar 2005 ein Verfahren zur Berechnung des eingesetzten Energieaufwandes auf Basis des KEA-Konzeptes vorhanden. Ferner kann für die Berechnung des Kollektorertrages auf die bestehenden europäischen Normenwerke verwiesen werden. Als Lebensdauer wäre ein Wert von ca. 20 Jahren anzunehmen, wie er in der einschlägiger Literatur [Solarpraxis 2001] als plausibel quantifiziert worden ist.

Bei einer Nutzung der effektiv substituierten Energiemenge als Förderkriterium ist deutlich darauf zu verweisen, dass diese hinsichtlich der Energiebereitstellung wesentlich von der Gesamtanlage und ihrer Konfiguration bzw. Installation geprägt wird. Wird dieser Ansatz weiter verfolgt, wäre der Kollektorbezug zu verlassen und stattdessen ein Anlagenbezug zu wählen. Dieser Wechsel der Systemgrenzen macht es jedoch zwingend notwendig, den Anlagenbegriff einheitlich und vergleichbar festzulegen. Ein möglicher Zugang stellen die europäischen Normen EN 12 976 und 12 977 dar, welche vorgefertigte und kundenspezifisch gefertigte Anlagen unterscheiden. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass bei vorgefertigten Anlagen (EN 12 976) sogenannte Jahrespakete mit einem festen Komponentensatz zusammengestellt und vertrieben werden, die durch entsprechend befristete Lieferverträge mit den Zulieferern abgesichert sind. Derartige Lieferbeziehungen unterliegen jedoch aufgrund eventueller Kostensenkungen und der Möglichkeit, technische Innovation zu integrieren, regelmäßiger Überprüfungen. Dies kann, je nachdem in welchem Maße ein Komponentenwechsel erfolgt, dazu füh-

ren, dass die Anlagenerträge ebenfalls variieren. Folgt man also der Anlagendefinition der EN 12 976, so wäre bei jedem Komponentenwechsel von einem neuen System auszugehen mit möglicherweise unterschiedlichen Kollektorerträgen und mit unterschiedlichen KEA-Werten.

Einige Komponenten, insbesondere aus dem Bereich der Regelungen, wie Temperaturfühler, Korrosionsschutzanode, Solarstation u.ä., aber auch Armaturen wie Ventile, Hähne, Druckanzeigen u.ä., sind zudem im Rahmen der Ermittlung ihrer KEA-Werte nur mit erheblichem Aufwand fundiert zu beurteilen und müssten daher entweder gänzlich unberücksichtigt bleiben oder könnten nur pauschaliert Berücksichtigung finden. Eine notwendige Pauschalisierung der KEA Werte ist auch für das Rohrsystem notwendig, da die Streckenlänge sowie die Anzahl der Fittings vom jeweiligen Einzelfall abhängt und somit nicht gleichbleibender Bestandteil eines Anlagen-Komplettpaketes sind.

Gleichwohl bietet ein Wechsel vom Kollektorbezug zum Anlagenbezug eine Reihe von Vorteilen.

Zunächst würde so das tatsächlich für die effektiv substituierte Energiemenge maßgeblich verantwortliche technische System gefördert. Darüber hinaus ließe sich durch die Nutzung der europäischen Normen ein Differenzierungskriterium heranziehen, welches nicht nur ein großes Potential zur Harmonisierung des europäischen Binnenmarktes birgt, sondern auch eine Differenzierung in große und kleine Anlagen ermöglicht. Denn es kann davon ausgegangen werden, dass es sich bei den kundenspezifisch gefertigten Anlagen (EN 12 977) überwiegend um große Anlagen handelt. Damit läge ein weiteres nützliches Differenzierungsmerkmal vor, über welches sich wünschenswerte technologische Entwicklungsimpulse gezielt setzen ließen. Dazu zählen insbesondere heizungsunterstützende und große Solaranlagen. Ferner ließen sich über eine derartige Differenzierung auch die vermeintlichen Ausnahmetatbestände beim Einsatz galvanisch beschichteter Absorberoberflächen abbilden. Schließlich böte sich eine kommunikativ vorteilhafte Förderung pro Kilowattstunde statt pro Quadratmeter an, welche die Ähnlichkeit und Gleichrangigkeit zwischen „Regenerativem Strom“ und „Regenerativer Wärme“ sowie ihrer Förderung unterstreichen würde.

Vor diesem Hintergrund erscheint es empfehlenswert, den Wechsel zum Anlagenbezug unter Zuhilfenahme der EN 12 976 bzw. 12 977 und eine Ausdifferenzierung der Förderbedingung nach Anlagengröße bei einer Nutzung der effektiv substituierten Energiemenge im Projektverlauf weiter zu verfolgen.

Recyclinggerechte Konstruktion

Bezüglich des Umganges mit Kollektoren nach ihrer Nutzung existieren noch keine Erfahrungen. Der effektive Abbau vom Einsatzort, die Erfassung von Altkollektoren und ihre umweltgerechte Demontage sind bisher ebenso ungeklärt, wie die Separierung von recyclingfähigen Bauteilen, die stoffliche Verwertung ihrer Materialien und die eventuelle umweltgerechte Entsorgung von Reststoffen. (vgl.: Kap.: 4.6.2)

Grundsätzlich handelt es sich jedoch bei den Hauptbestandteilen von Kollektoren (Kupfer, Aluminium, Stahl und Glas) um Massenwerkstoffe, für die Recyclingoptionen bestehen. Konzepte, wie diese Materialien aus Altkollektoren als Sekundärrohstoff in die bestehenden Stoffflüsse integriert werden können, stehen jedoch erst am Anfang.

Gleichwohl können, in Analogie zu anderen Produktgruppen und den allgemeingültigen Überlegungen hinsichtlich eines umweltgerechten Umgangs mit Altprodukten, Anforderungen an die recyclinggerechte Konstruktion von Solarkollektoren skizziert werden. Derartige Anforderungen hinsichtlich der recyclinggerechten Konstruktion von Produkten sind bereits in anerkannten technischen Normenwerken zu finden. (vgl.: Kap. 4.6.2) Die VDI-Richtlinie 2243 „Konstruieren recyclinggerechter technischer Produkte“ stellt diesbezüglich einen allgemein anerkannten fortschrittlichen technischen Umweltstandard dar und es wird vorgeschlagen, ihre Einhaltung in die Förderbedingungen zu integrieren.

Rücknahmepflicht

Für einen umweltgerechten Umgang mit Altkollektoren ist ihre systematische Erfassung unverzichtbar. In der alten Vergabe RAL UZ 73 vom November 2003 ist bereits eine Rücknahmeverpflichtung der Hersteller festgeschrieben. Daher wird vorgeschlagen eine derartige Rücknahmeverpflichtung auch in die Förderbedingung zu integrieren.

Selektive Absorberbeschichtung

Gängige Verfahren zur Absorberbeschichtung sind die im Vakuum aufgetragenen hochselektiven Beschichtungen (vgl.: Quelle: [Solarthemen Nr. 208]

Abbildung 3-16). Demgegenüber kommt bei den galvanischen Beschichtungsverfahren der Schwarzverchromung krebserregendes Chrom VI zum Einsatz. Wenn es auch im Produkt nicht in dieser hochtoxischen Oxidationsstufe vorliegt, ist hier zunächst aus Gründen der Vorsorge eine Vermeidung einzufordern. (vgl.: Kap 4.5.4 und 4.6.1). Dies gilt um so mehr, als hinreichend technisch mögliche und wirtschaftlich zumutbare Substitutionsmöglichkeiten vorliegen.

Einschränkend ist darauf zu verweisen, dass nach Herstellerangaben bei ungedeckten Kollektoren (Solardach der Fa. EnergieSolaire) und bei großen Kollektorflächen, die erst auf dem Dach verglast werden (Fa. Buschbeck), galvanische Beschichtungen, aufgrund ihrer höheren Robustheit während der Montage sowie ihrer höherer Beständigkeit gegenüber Witterungseinflüssen (insbesondere Regen), schwer substituierbar scheinen.

Die Fundierung derartiger Aussagen zur Unverzichtbarkeit der galvanisch hergestellten Beschichtungen bei bestimmten Anwendungen steht jedoch noch aus und wird Bestandteil der in den Arbeitspaketen 4 und 5 detaillierten Untersuchungen der Beschichtungssysteme sein.

Vor dem Hintergrund der vorliegenden Information erscheint es zum jetzigen Zeitpunkt jedoch höchst fraglich, ob galvanische Beschichtungen, welche Chrom VI einsetzen, einem fortschrittlichen technischen Umweltstandards entsprechen.

Sonstiges

Die bisherigen Analysen der Marktsituation und der Umweltauswirkungen liefern weitere Hinweise auf Sachverhalte, aus denen sich fortschrittliche technische Umweltstandards ableiten lassen und die daher im weiteren Verlauf des Forschungsvorhabens verfolgt werden.

Zum einen handelt es sich dabei um die **bleihaltigen Weichlote**, die bei Lötverbindungen zwischen Absorberblech und Absorberrohr eingesetzt werden. Blei unterliegt als toxisches Schwermetall einem grundsätzlichen Vermeidungsgebot. Substitute sind in Gestalt von Schweißtechnologien vorhanden und auch auf dem Markt zunehmend vertreten. Ungeklärt ist allerdings die mengenmäßige Bedeutung von Blei als Lotbestandteil in thermischen Solarkollektoren sowie die funktionale Bedeutung und damit die Anwendungsgrenzen der Schweißtechnologien. Schließlich ist auch ungeklärt, inwieweit ein möglicher Ausschluss von bleihaltigen Weichloten die Anbieterstruktur zu Ungunsten kleiner und mittlerer Unternehmen verändern würde.

Ein anderer, bisher wenig beachteter Sachverhalt bezieht sich auf die Verwendung von **Polyurethan (PU) Schäumen** zur Dämmung. Polyurethan (PU) weist in wesentlichen umweltrelevanten Wirkkategorien erheblich höhere Werte auf als Mineralwolle (vgl. Abb. 4-5). Zudem liegt mit Mineralwolle ein weit verbreitetes Substitut vor. Ungeklärt ist allerdings ob PU-Schaum insbesondere hinsichtlich Wärmeleitfähigkeit, Alterungsbeständigkeit, chemische Beständigkeit, Formstabilität und thermische Stabilität durch Mineralwolle ersetzt werden kann.

6. Life Cycle Assessment (Ökobilanz) der Beschichtungsverfahren

6.1. Ziel und Grund der Ökobilanz

Um die Umweltauswirkungen der selektiven Beschichtungen belastbar und umfassend beurteilen zu können, wurden die gängigen Beschichtungsverfahren einer vergleichenden Ökobilanz gemäß DIN/EN/ISO-Normen 14040 bis ISO 14043 unterzogen. Die Analyse umfasste dabei auch die wesentlichen Vorketten der in den Beschichtungsverfahren eingesetzten besonders umweltwirksamen Materialien.

Im vorliegenden Vorhaben wurden die in der Ökobilanz verwendeten Daten aus der Datenbank ECOINVENT, Version 1.2 entnommen. Für die Modellierung (Festlegung des örtlichen und zeitlichen Bilanzraumes, berücksichtigte Prozessschritte, usw.) wurde die Software UMBERTO genutzt.

6.2. Methodik der produktbezogenen Ökobilanz

Die Methodik der produktbezogenen Ökobilanz wird auf internationaler Ebene durch die ISO/TC 207 „Umweltmanagement“ (International Standardization Organization, Technical Committee 207 „Environmental Management“) im Rahmen des Normenkomplexes ISO 14040-14043 festgelegt. In Deutschland erfolgt – in Anlehnung an die ISO-Normung – die Erarbeitung von deutschen Normen durch die DIN-NAGUS (DIN-Normungsausschuss NA 172 „Grundlagen des Umweltschutzes“).

Um eine vollständige produktbezogene Umweltbilanz zu erstellen, werden möglichst sämtliche Umweltauswirkungen eines Produktes erfasst. Dies kann die verschiedensten (Vor-) Stufen beinhalten, wie die Rohstoffförderung, -Aufbereitung und -Transport, die Be- und Verarbeitung zu Produkten, deren Distribution, die (Hauptphase) der Nutzung sowie die sich am Nutzungsende anschließende Entsorgung und ggf. Weiterverwertung.

6.3. Aufbau einer Ökobilanz

In Anlehnung an ISO 14040 lässt sich eine Ökobilanz in vier Hauptteile gliedern:

1. Festlegung des Zieles und des Untersuchungsrahmens,
2. Sachbilanz (Quantifizierung der Input- und Outputströme),
3. Wirkungsabschätzung (Quantifizierung der Umweltauswirkungen),
4. Auswertung (Bewertung der Umweltauswirkungen).

Hinzukommt die im eigentlichen Sinne nicht zur Ökobilanz gehörenden, jedoch unmittelbare Anwendung bzw. Umsetzung der Ergebnisse. Die Abbildung 6-1 zeigt die einzelnen Bestandteile und ihr Wirkungsgefüge bzw. deren Interdependenzen.

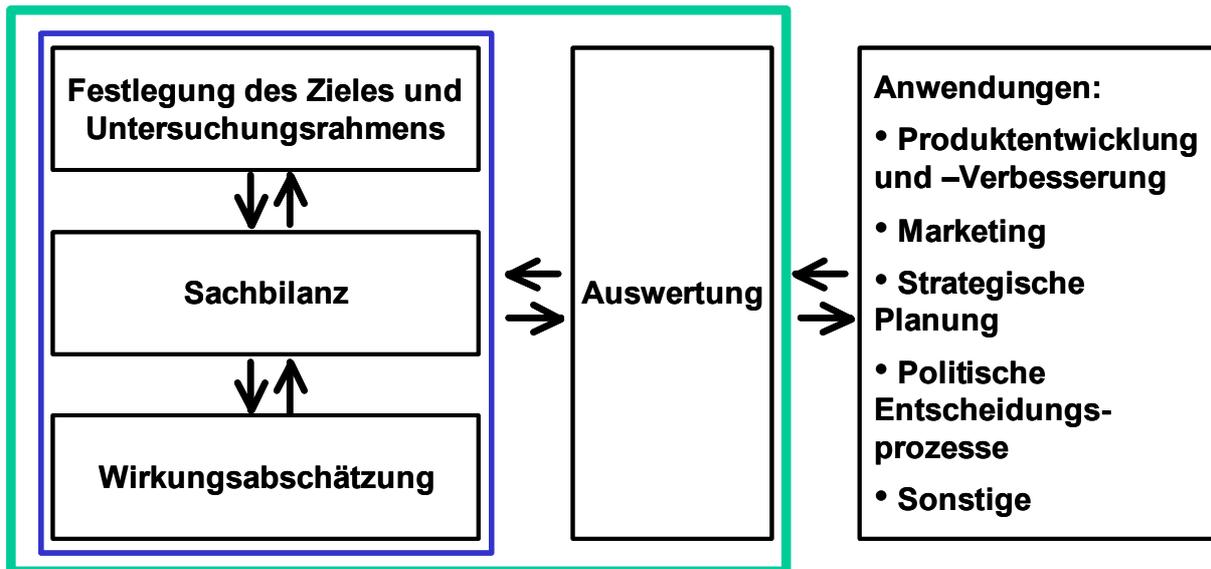


Abbildung 6-1: Wirkungsgefüge und Bestandteile einer produktbezogenen Ökobilanz

6.3.1. Festlegung des Zieles und des Untersuchungsrahmens

In diesem ersten Schritt der Ökobilanz werden Gründe, Adressaten und erste mögliche Anwendungen benannt. Es werden zudem die räumlichen und zeitlichen Grenzen, die funktionale Einheit sowie vorangestellte Annahmen und Ausschluss- bzw. Abschneidekriterien der Bilanz definiert.

Der durch die räumlichen und zeitlichen Grenzen definierte Bilanzraum soll nach Möglichkeit den gesamten Lebensweg des bilanzierten Produktes umfassen. Dies macht es auch erforderlich, sinnvolle Kriterien für eine Begrenzung des Gesamtsystems „Produkt-Lebenszyklus“ aufzustellen, beispielsweise auch aufgrund vorhandener oder nichtvorhandener Daten und Informationen. Besonderer Beachtung bedarf der Festlegung der funktionalen Einheit. Sie dient als nutzen- und leistungsbezogene Vergleichseinheit in der Bilanz (in der vorliegenden Studie ist dies 1 m² beschichtete Absorberfläche). Bei der Untersuchung verschiedener Produkte und insbesondere bei vergleichenden Ökobilanzen ist stets dieselbe funktionale Einheit zu wählen.

6.3.2. Sachbilanz

Der zentrale Teil einer Ökobilanz ist die Sachbilanz, in welcher die Input- und Outputgrößen, in d.R. alle umweltrelevanten Energie- und Stoffströme, quantitativ erfasst werden.

Inputgrößen sind alle Roh- bzw. Ausgangsstoffe, Hilfs- und Betriebsstoffe, alle eingesetzten Energiearten (thermische und elektrische) sowie regenerative, fossile und nukleare Primärenergieträger. Outputgrößen sind, neben dem Produkt selbst, weitere Kuppelprodukte sowie die verschiedenen festen, flüssigen und gasförmigen Emissionen in Luft, Böden und Gewässer. Daneben fließen energetisch oder stofflich verwertbare Abfall- und Kuppelprodukte, wenn sie im Produktionsprozess wieder eingesetzt werden, ebenfalls in die Bilanz ein. Insbesondere die Emissionen können einerseits aus der (mit fossilen Brennstoffen erfolgenden) Energieerzeugung, -Bereitstellung und -Verwendung bedingt sein (bspw. CO₂, NO_x, SO₂, N₂O u.a.), andererseits verfahrensbedingt aus den Produktionsprozessen resultieren, z.B. Abwässer, Abwärme, Lärm, Öle usw. Besondere Schwierigkeiten bereitet die Bilanzierung bzw. Erfassung von nicht-materiellen und nicht-energetischen Größen, wie Flächenverbrauch (Depotraum, Gewerbeflächen, Transportwegenetz), Lärm oder auch radioaktive Strahlung.

Bei der Aufstellung der Sachbilanz muss darauf geachtet werden, dass sämtliche Daten genau beschrieben werden, um so ihre unterschiedliche Güte (Vollständigkeit, Überprüfbarkeit, Relevanz, Herkunft, etc.) zu dokumentieren. Des Weiteren müssen bei Produktionsprozessen, bei denen neben dem Haupt- auch Nebenprodukte anfallen, die umweltrelevanten Größen (Stoff- und Energieströme) auf die einzelnen Produkte bezogen werden.

Da Produktionsprozess und Lebensweg eines Produktes aufgegliedert in verschiedene Stadien und Vorstufen betrachtet werden können, werden die Daten auch nach diesen „Modulen“, die den Lebenszyklus eines Produktes unterteilen, erhoben. Die Sachbilanz quantifiziert alle Input- und Outputgrößen für das jeweilige Modul.

6.3.3. Wirkungsabschätzung

Die in der Sachbilanz gesammelten Daten werden in der Wirkungsabschätzung (auch Wirkungsbilanz) klassifiziert, gruppiert und charakterisiert. Grundsätzlich hängt die Wirkungsabschätzung von der Qualität, also von der Detailliertheit und Genauigkeit der Sachbilanz ab. Die Umwelteinflüsse können lokale, regionale oder globale Auswirkungen haben und grob in drei Wirkungskategorien aufgeteilt werden:

- Ressourcenbeanspruchung: endliche und regenerative/ nachwachsende Energieressourcen und Rohstoffe, Wasser, Luft, Böden;
- Umweltauswirkungen: Treibhauseffekt, Ozonabbau, Eutrophierung und Versauerung von Böden und Gewässern, Biodiversität;
- und Wirkungen auf die menschliche Gesundheit: Gesundheitsschäden, Humantoxizität, Lärm.

Die genaue Festlegung der Wirkungskategorien hängt dabei von Zielsetzung und Umfang der jeweiligen Ökobilanz ab. Die Zielsetzung bedingt die Auswahl der Wirkungskategorien anhand der zugrundeliegenden Umweltprozesse und –Mechanismen. In diesen Wirkungskategorien fließen die aus der Sachbilanz stammenden Input- und Outputgrößen. Abschließend werden die Wirkungskategorien quantifiziert und in Relation zur funktionalen Einheit gesetzt.

6.3.4. Auswertung

Abgeschlossen wird die Ökobilanz mit der Auswertung, die einerseits Daten aus der Sachbilanz (wie Energieverbräuche oder CO₂-Emissionen) und andererseits die in Wirkungskategorien zusammengefassten Daten der Wirkungsabschätzung betrachtet. Grundsätzlich können die Umwelteinflüsse eines einzelnen Produktes ausgewertet werden oder mehrere unterschiedliche, jedoch gebrauchsgleiche Produkte miteinander verglichen werden, jedoch stets auf Basis der gleichen funktionalen Einheit. Die Auswertung bildet die Grundlage für Handlungsempfehlungen und –Entscheidungen, also für die Anwendung der Ergebnisse. Dies ist jedoch kein Bestandteil der Ökobilanz, da weitere technische, ökonomische, und soziale Faktoren für die Anwendung der Ergebnisse eine Rolle spielen.

Eine Hauptschwierigkeit im Verlauf der Auswertung stellt die vergleichende Bewertung der unterschiedlichen Wirkungskategorien dar, speziell in ihrer Tragweite und Wichtigkeit: sind Treibhausef-

fekte, Lärmemissionen oder Gewässerversauerungen schwerwiegender? Hier können aktuelle gesellschafts-, wirtschafts-, forschungs- und umweltpolitische Einstellungen die Auswertung beeinflussen.

6.3.5. Anwendung

Obwohl sie kein eigentlicher Bestandteil der Ökobilanz ist, kann die Anwendung der Bilanzergebnisse nicht von der Ökobilanz getrennt werden, da erst damit die Ergebnisse auch umgesetzt werden (eine Anwendung kann auch eine rein prospektive Bilanzierung sein, mit dem Ziel, den Wissensstand zu einem oder mehrerer Produkte zu erweitern). Mögliche Anwendungen können sein:

- politische Richtlinien, Verordnungen, Gesetze usw.;
- wirtschaftsstrategische Planungen, z.B. aufgrund veränderter Marktbedingungen;
- F&E-Prozesse, die zu umwelt- aber auch innovationsrelevanten Produkt- und Verfahrensverbesserungen führen;
- Öffentlichkeitsarbeit und –Kommunikation als Instrument der Kunden- oder Verbraucherinformation, auch hinsichtlich ökologisch motivierter Kaufentscheidungen.

6.4. Ökobilanz im vorliegenden Vorhaben

Im Rahmen des vorliegenden Vorhabens wurde für vier verschiedene Beschichtungsverfahren solarthermischer Absorber eine vergleichende Ökobilanz durchgeführt. Als Datenquelle diente die Datenbank „Ecoinvent“²⁴, welche Sach- und Wirkungsbilanzen zu einer Vielzahl von Produkten, Prozessen und Werkstoffen enthält. Diese Datenbank baut auf bereits vorhandene Ökobilanzen auf, welche teilweise exklusiv für Ecoinvent erhoben wurden. U.a. sind Daten zu verschiedenen selektiven Absorberbeschichtungen für solarthermische Kollektoren enthalten.

Um die in diesem Forschungsvorhaben enthaltene Frage nach den Umweltauswirkungen von Absorberbeschichtungen zu beantworten, wurden vier Beschichtungen ausgewählt, welche den solarthermische Markt zum größten Teil abdecken (vgl. [Koldehoff 2004]):

1. Nickelpigmentiertes Aluminiumoxid auf Aluminiumblech (Ecoinvent-Datenbank-ID 1184),
2. Schwarzchrom auf Kupferblech (Ecoinvent-Datenbank-ID 1185),
3. Vakuumbeschichtungsverfahren auf Kupferblech (Ecoinvent-Datenbank-ID 1187),
4. Sputtern auf Kupferblech (Ecoinvent-Datenbank-ID 1188).

Das erstgenannte Verfahren wurde ausgewählt, obwohl es nach Aussagen der Branchenvertreter²⁵ nicht mehr am Markt ist, um neben Beschichtungsverfahren für Kupfersubstrate auch ein Verfahren zur Aluminiumsubstratbeschichtung bilanzieren zu können. Des Weiteren kann an den Ergebnissen die technologische Entwicklung der Solarbeschichtungen in den vergangenen 10 bis 15 Jahren (siehe folgendes Kapitel 4.1.1. Sachbilanz – Geografischer und zeitlicher Bezug sowie Umfang) auch in Hinblick auf ihre Umweltauswirkungen nachgezeichnet und hervorgehoben werden.

Das zweite Verfahren zielt auf einen der Hauptschwerpunkte des Vorhabens, nämlich die Umweltauswirkung der galvanisch hergestellten Beschichtungen mit denjenigen der nicht-galvanisch hergestellten Beschichtungen zu vergleichen.

Die Verfahren drei und vier stellen die am Markt am stärksten vertretenen nicht-galvanischen Schichten dar.

Insgesamt bilden die drei letztgenannten Verfahren die bei den Marktführern eingesetzten Verfahren zur selektiven Beschichtung ab. Einige der Datensätze wurden direkt bei diesen Marktführern erhoben. Andere Verfahren (Schwarzchrom auf Kupferblech) enthalten Daten von verschiedenen Herstellern, so dass von einer hohen Belastbarkeit und Qualität der Daten ausgegangen werden kann.

²⁴ Datenstand v1.2 (2005)

²⁵ Im Rahmen des Branchenworkshops am 12.10.06 in Berlin

6.4.1. Sachbilanz – Geografischer und zeitlicher Bezug sowie Umfang

Die zeitlichen und geografischen Rahmenbedingungen sowie die berücksichtigten (Teil-) Prozesse der einzelnen Beschichtungsverfahren werden durch die s.g. Metadaten zu den einzelnen Ecoinvent-Datensätzen festgelegt.

Die Daten zum Verfahren „Nickelpigmentiertes Aluminiumoxid auf Aluminiumblech“ wurden im Jahr 1993 in einer Produktionsanlage in der Slowakischen Republik erhoben. Es handelt sich (auch bei den anderen Verfahren) um ein s.g. „Gate-to-gate inventory“, welches alle Prozesse innerhalb der Produktionsstätte bzw. des Betriebes abbildet. Betrachtet wurden alle relevanten Materialien/ Ressourcen und Emissionen sowie die benötigte Infrastruktur. Verpackungen, Abfälle und Abfallbehandlung bzw. -entsorgung des Beschichtungsprozess wurden nicht berücksichtigt.

Das Verfahren „Schwarzchrom auf Kupferblech“ wurde in den Jahren 2000 bis 2001 bilanziert. Es flossen Daten von Produktionsstätten in den USA und Dänemark ein. Basierend auf den Marktkenntnissen des IZT, handelt es sich hierbei um die beiden größten und marktführenden Unternehmen für solarthermische Schwarzchrom-Beschichtungen²⁶, so dass hier von einer guten Datenlage und -qualität ausgegangen werden kann. Nicht einbezogen wurden benötigte bzw. anfallende Verpackungen.

Das dritte Verfahren „Vakuumbeschichtungsverfahren auf Kupferblech“ bezieht sich auf einen deutschen Hersteller (mit Produktionsstandort Deutschland), die Daten wurden im Zeitraum 1997 bis 2000 erhoben. In die Bilanz flossen nicht Prozess-spezifische Emissionen, Verpackungen, Abfälle und eventuelle Vorbehandlungen des zu beschichtenden Kupferbleches durch Lieferanten ein.

Die Daten für das Verfahren „Sputtern auf Kupferblech“ wurden an einem deutschen Produktionsstandort im Jahr 2001 erhoben. Das Produktionsvolumen in diesem Unternehmen wird für 2000 mit 229.000 m² und für 2001 mit 460.000 m² angegeben.

Die ausführliche Sachbilanz ist in Anhang 10.4 aufgelistet.

6.4.2. Wirkungsabschätzung

Die hier verwendete Ecoinvent-Datenbank bietet neben unbewertete auch bewertete Wirkungsabschätzungen zu den einzelnen Produkten, Prozessen und Werkstoffen.

Unbewertete Wirkungsabschätzung

Die unbewertete Abschätzung bietet Informationen zu den in den verschiedenen Medien (Grund- und Oberflächenwasser, Luft/ Atmosphäre, Böden, biologische Ressourcen) eingebrachten Stoffen sowie die in Anspruch genommenen Ressourcen. Insgesamt werden ca. 1000 Stoff-Medien-Kombinationen bilanziert. Für das vorliegende Forschungsvorhaben ist aus der unbewerteten Wirkungsabschätzung insbesondere die Chrom-VI-Frage von Bedeutung.

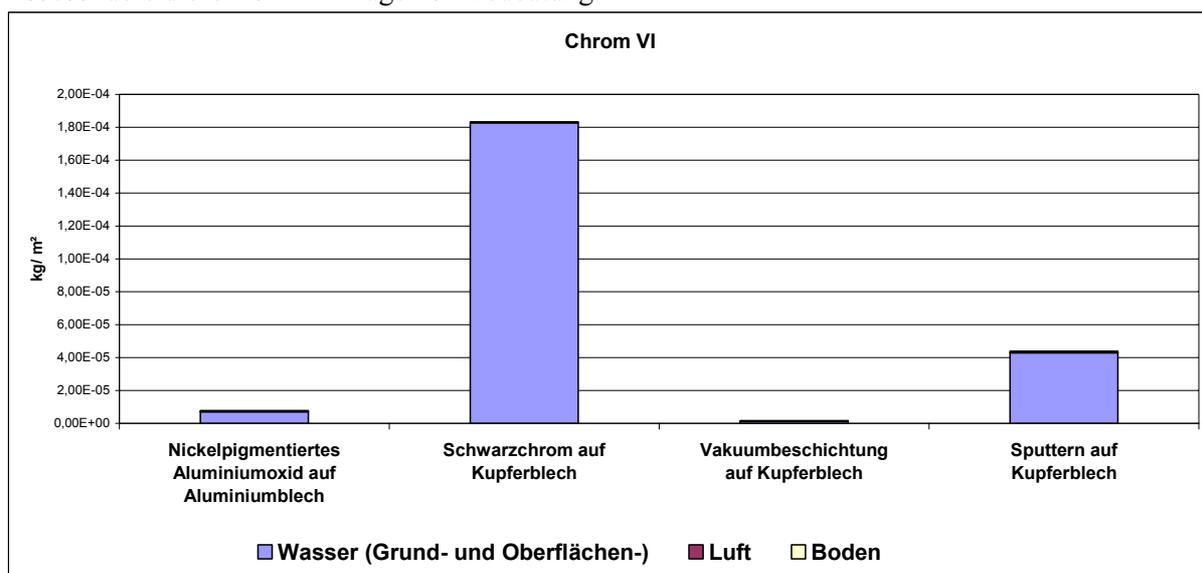


Abbildung 6-2: Chrom-VI-Mengen aus der Absorberbeschichtungen

²⁶ in Ecoinvent enthaltene Metadaten: 500.000 m² p.a. bei einem der Hersteller

Verfahrensbedingt entstehen bei der Schwarzchrom-Beschichtung die größten Chrom-VI-Mengen, nämlich ca. 0,18 g pro m² Absorberfläche. Demgegenüber steht die Vakuumbeschichtung, welche die geringsten Chrom-VI-Mengen im Herstellungsprozess aufweist (ca. um den Faktor 100 geringer). Nur unwesentlich mehr Chrom VI entsteht bei der Herstellung von nickelpigmentierten Aluminiumoxid-Beschichtungen auf Aluminiumblech. Auch das bilanzierte Sputterverfahren weist deutlich geringere Mengen Chrom VI im Herstellungsprozess auf als die Schwarzchrombeschichtung.

Bewertete Wirkungsabschätzung

Die bewertete Wirkungsabschätzung „übersetzt“ die Ergebnisse der unbewerteten Wirkungsabschätzung in verschiedene Kategorien und fasst die Umweltauswirkung quantitativ in Form unterschiedlicher Indikatoren zusammen. In diesem Sinne entspricht sie gemäß ISO14040ff dem sogenannten Auswertungsschritt.

Indikatoren der bewerteten Wirkungsabschätzung können abstrakte Kategorien wie menschliche Gesundheit oder Ressourcenpunkte (bspw. Eco-Indicator 99) sein, oder auch quantitative Größen wie Energieverbräuche (bspw. KEA – Kumulierter Energie-Aufwand) oder Treibhausgasemissionen bzw. Treibhausgas-Äquivalente. Anhang 10.5 stellt die in diesem Forschungsvorhaben ausgewählten bewerteten Wirkungsabschätzungen dar²⁷. Die Ecoinvent-Datenbank selbst gibt ca. 180 Wirkungskategorien zu verschiedenen Aspekten an, wie bspw. Ressourcen- und Landverbrauch, Ozonschicht-Abbau, Klimaänderung/ -Erwärmung, Versauerung und Eutrophierung von Böden und Gewässern etc. Die vorgenommene Auswahl an Kategorien beinhaltet neben „KEA“ auch die Kategorien „Globales Klimaerwärmungs-Potential“, „menschliche Gesundheit“ und „Gewässer-Versauerung und – Eutrophierung“ (als Indikatoren für die Ökosystem-Qualität).

Betrachtet man die Energieaufwendungen für die einzelnen Verfahren, so ist die nickelpigmentierte Aluminiumoxid-Beschichtung auf Aluminiumblech die mit Abstand energieintensivste Variante, welche einen fast doppelt so hohen Energieaufwand benötigt wie das Schwarzchrom- und das Sputterverfahren. Die Vakuumbeschichtung auf Kupferblech fällt mit seinem sehr niedrigen kumulierten Energieaufwand auf.

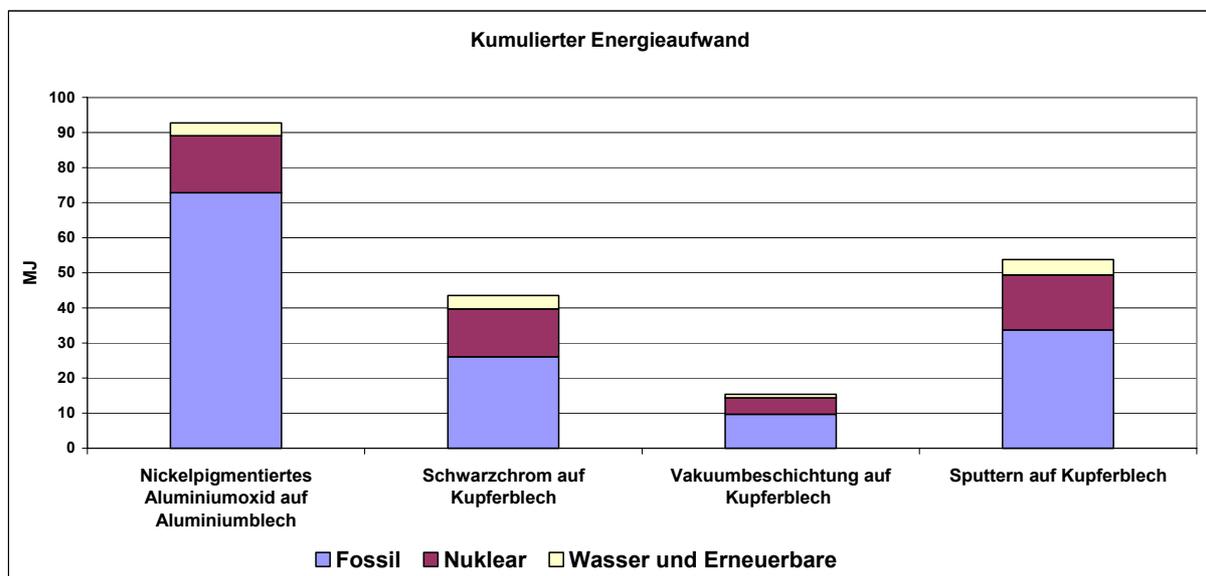


Abbildung 6-3: Kumulierter Energieaufwand (KEA) der vier Beschichtungsverfahren pro m² Absorberfläche

Ein ähnliches Bild stellt sich bei der Betrachtung des Klimaerwärmungs-Potentials (Global Warming Potential) dar. Da die Treibhausgasemissionen (als CO₂-Äquivalente dargestellt) größtenteils aus Energieerzeugungs-, Energienutzungs- und Energieumwandlungsprozessen stammen, demnach mit dem Kumulierten Energieaufwand zusammenhängen, hat die Aluminiumoxid-Beschichtung das höchste

²⁷ Anmerkung: Hier fließt jedoch nicht nur das Chrom VI aus der unbewerteten Wirkungsabschätzung ein, sondern alle bilanzierten Stoffe

Klimaerwärmungs-Potential (korrespondierend zum KEA), während die Werte der Vakuumbeschichtung auf Kupferblech wiederum deutlich unterhalb der Werte der anderen Beschichtungsverfahren liegt. Neben den dargestellten Auswirkungen für einen Zeitraum von 20 Jahren, liefert die Datenbank auch Werte mit Zeithorizonten von 100 und 500 Jahren, die den Verbleib der klimawirksamen Gase in der Atmosphäre abbilden. Die entsprechenden Werte unterscheiden sich jedoch nur unwesentlich von den hier dargestellten.

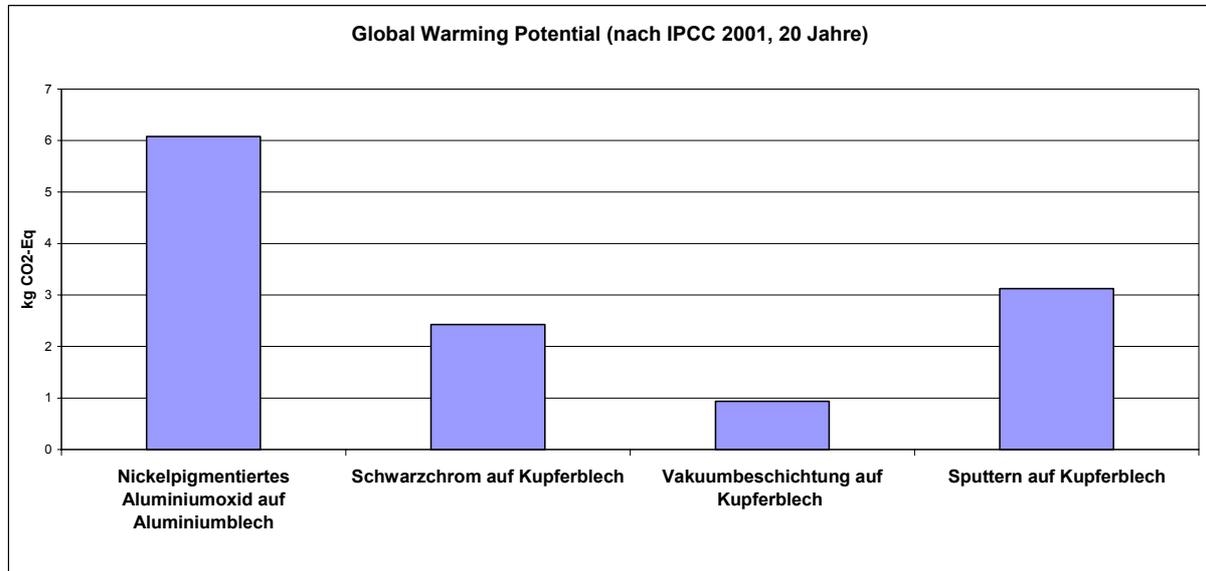


Abbildung 6-4: Globales Klimaerwärmungspotential (nach IPCC 2001, mit einem Wirkungshorizont von 20 Jahren) der vier Beschichtungsverfahren

Betrachtet man die nicht hauptsächlich mit Energieprozessen verknüpften Auswirkungen, so ändert sich das Bild. Die Auswirkung „Human Health“ (nach dem Bewertungsverfahren IMPACT 2002+ Endpoint) stellt das Risiko für die menschliche Gesundheit in Form von Punkten als abstrakte Größe dar. Hier hat wiederum das Aluminiumoxid-Verfahren den höchsten Wert und somit die höchste Auswirkung auf die menschliche Gesundheit, das Schwarzchrom- und das Sputterverfahren haben vergleichbar hohe Auswirkungen. Das Vakuumverfahren weist den niedrigsten Wert auf.

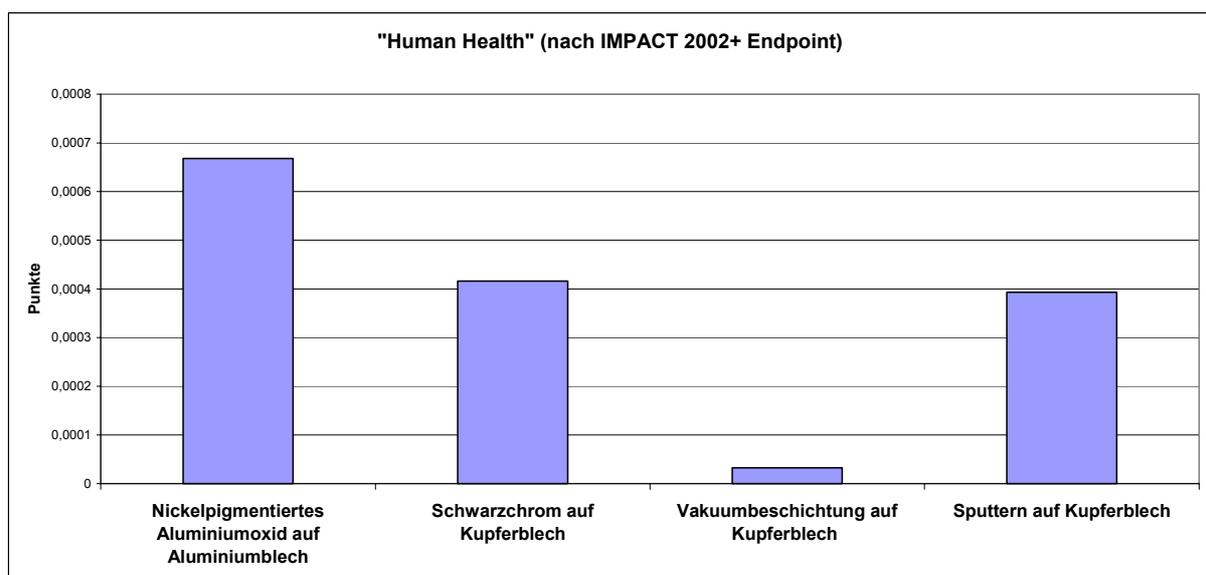


Abbildung 6-5: Menschliche Gesundheit – „Human Health“ (nach IMPACT 2002+ (Endpoint) der Beschichtungsverfahren

Die Auswirkungen zu Gewässerversauerung (in SO₂-Äquivalente) und –Eutrophierung (in PO₄-Äquivalente) zeigen, dass das Aluminiumoxid-Verfahren für beide Kategorien die größte Auswirkung besitzt, gefolgt von dem Schwarzchromverfahren und dem Sputterverfahren. Speziell die für die Gewässerversauerung verantwortlichen SO₂- und NO_x-Emissionen dürften auch aus der fossilen Energieerzeugung resultieren, was die höchste Belastung durch das Aluminiumoxid-Verfahren (mit seinem im Vergleich höheren KEA-Wert) erklärt. Ähnliches gilt für das Eutrophierungspotential, welches in PO₄-Äquivalente angegeben wird, aber durch die NO_x-Emissionen aus fossiler Energieerzeugung getrieben wird.

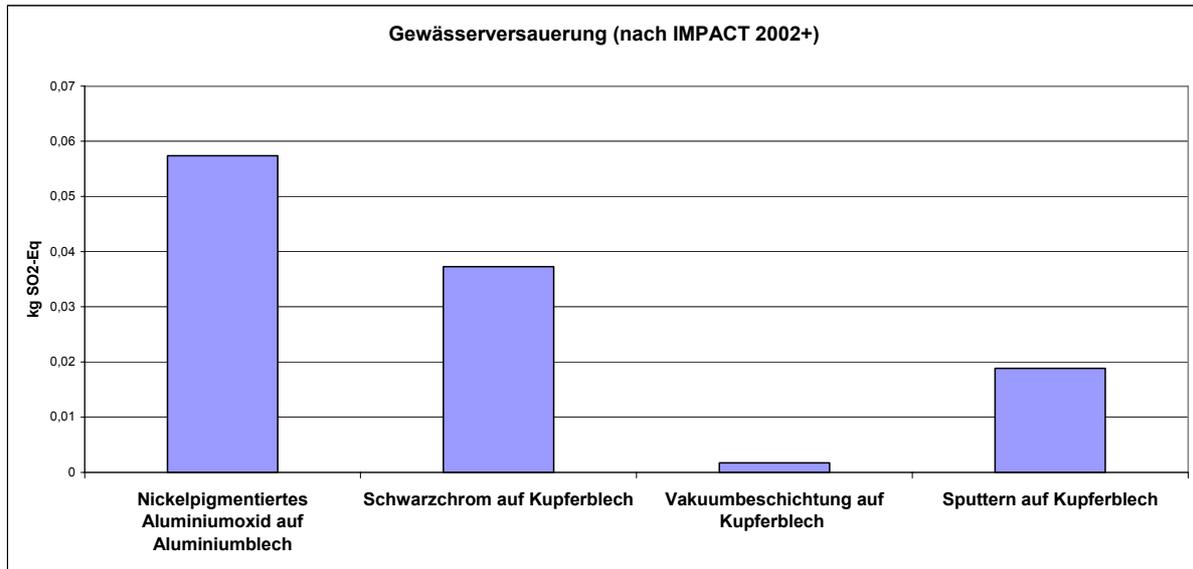


Abbildung 6-6: Gewässerversauerung (nach IMPACT 2002+ (Midpoint)) in kg SO₂-Äquivalente

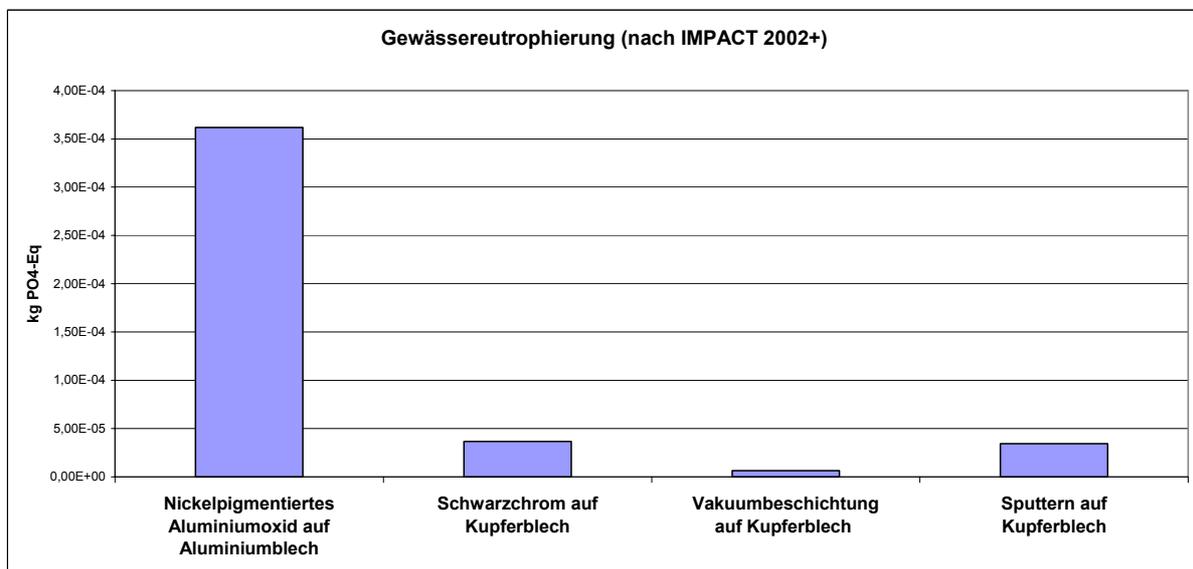


Abbildung 6-7: Gewässereutrophierung (nach IMPACT 2002+ (Midpoint)) in kg PO₄-Äquivalente

Die hier dargestellten IMPACT-2002+ Indikatoren unterscheiden sich hinsichtlich des Zeitpunktes der Wirkungs-Definition (Midpoint – Endpoint). Bei „Midpoint“ werden die Wirkungen in der Mitte der Wirkungskette definiert und stellen direkt messbare Indikatoren dar, welche durch (natur-) wissenschaftliche Modelle abgesichert werden, in diesem Fall SO₂- und PO₄-Äquivalente. Endpoint-Indikatoren stellen die Wirkung als tatsächlichen Schaden dar, hier als menschliche Gesundheit. Sie stützen sich dabei auf das Konzept der s.g. Schutzobjekte (Safeguards), wie beispielsweise die bereits erwähnte menschliche Gesundheit, Ressourcen oder Ökosysteme. Während Midpoint-Indikatoren eine

gute Messbarkeit mit geringen Unsicherheiten gewährleisten, bilden sie nicht die tatsächlichen Schäden ab. Dies wiederum liefern die Endpoint-Indikatoren, jedoch verbunden mit erhöhten Unsicherheiten aufgrund von zusätzlichen Modellannahmen, wie beispielsweise Klima- und Ausbreitungsmodelle oder Dosis-Wirkungsbeziehungen.

Eine weitere Bewertung erfolgt auf Basis des „Eco-Indicator 99“. Auch dieser Indikator liefert hochaggregierte, abstrakte Werte (points), welche verschiedene Auswirkungen beleuchten: Humantoxizität, ionisierende Strahlung, photochemische Oxidation, Ozonschichtabbau und Atemwegsauswirkungen. An dieser Stelle werden die aufsummierten/ zusammengefassten Auswirkungen betrachtet. Hier liegen das Aluminiumoxid-Verfahren und das Sputterverfahren, bewertet nach dem Eco-Indicator 99, hinsichtlich ihrer Auswirkungen (in Punkten), dicht beieinander. Die beiden anderen Beschichtungsverfahren haben deutlich niedrigere Werte bzw. geringere Auswirkungen, bezogen auf die oben genannten fünf Kategorien.

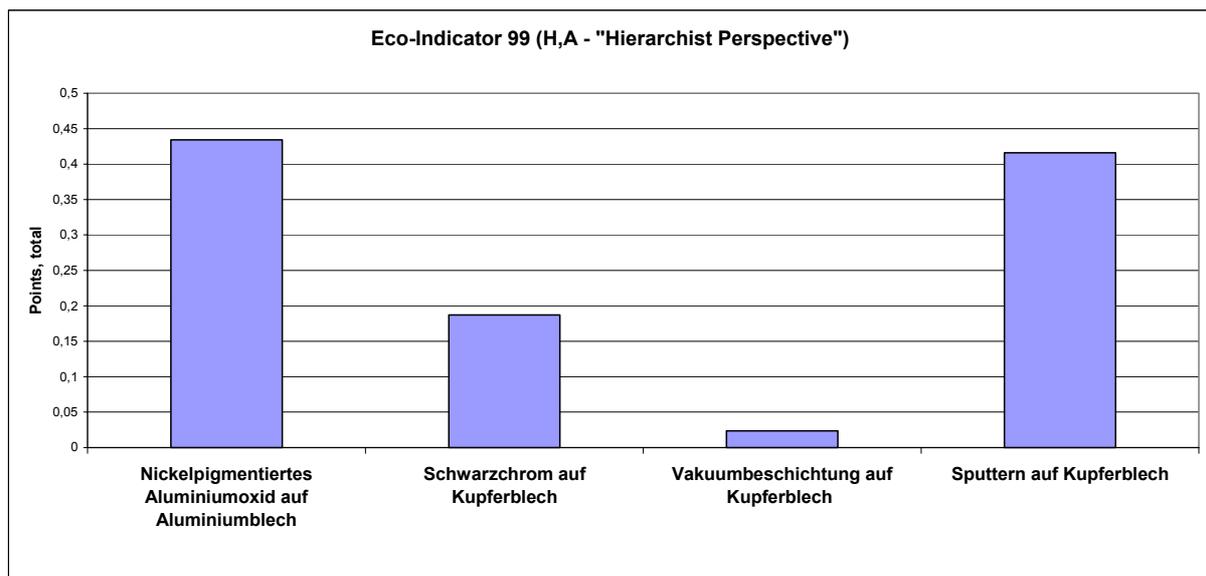


Abbildung 6-8: Eco-Indicator 99 (H,A – Hierarchist Perspective)

„Eco-Indicator 99“ beinhaltet drei „Perspektiven“ der Auswirkungsbetrachtung. Diese drei Modelle werden erstellt, um Unsicherheiten, resultierend aus Datenunsicherheiten und aufgrund von Unsicherheiten in der Modellgenauigkeit und –Richtigkeit, zu begegnen. In diesem Vorhaben wird die s.g. „Hierarchist Perspective“ (H,A) verwendet, daneben enthält die Ecoinvent-Datenbank die „Eco-Indicator 99“-Modelle „Individualist“ (I,I) und „Egalitarian“ (E,E). Diese Modelle unterscheiden sich im Wesentlichen in ihrem zeitlichen Betrachtungshorizont. Während das „Individualist“-Modell einen kurzen und das „Egalitarian“-Modell einen sehr langfristigen Zeithorizont besitzen, bildet das „Hierarchist“-Modell eine Balance zwischen kurz- und langfristigen Auswirkungen.

Auswertung und Zusammenfassung

Die Zusammenfassung der Wirkungsabschätzung zeigt, dass vor allem das Verfahren „Nickelpigmentiertes Aluminiumoxid auf Aluminiumblech“ in den gewählten Auswertungskategorien (KEA, Klimaerwärmungspotential, menschliche Gesundheit, Gewässereutrophierung und –Versauerung) hinsichtlich seiner Umwelteigenschaften die (mit Abstand) größten Umweltauswirkungen besitzt. Allein bei den verfahrensbedingten Chrom-VI-Emissionen besitzt das Schwarzchromverfahren die höchsten Emissionen. Zieht man den („Hierarchist“-) „Eco-Indikator 99“ heran, so haben Aluminiumoxid-Verfahren und Sputterverfahren vergleichbare Auswirkungen.

6.5. Vergleich der Chrom VI Emissionen in den Vorketten

Eine Fragestellung im Vorhaben war die nach den Chrom VI Emissionen in den Vorketten. Dabei war zu prüfen, inwieweit auch bei denjenigen nicht-galvanischen Beschichtungsverfahren, welche metallisches Chrom als Targetmaterial verwenden, ebenfalls Chrom VI Emissionen, insbesondere in den Vorketten anfielen.

Um diese Frage zu beantworten, wurden die entsprechenden Einsatzstoffe der Beschichtungsverfahren mit einander verglichen.

Bei der Schwarzverchromung war dies Chromsäure und beim Sputtern auf Kupferblech war dies metallisches Chrom.

Beide Einsatzstoffe sind in der vergleichenden Ökobilanz der Beschichtungsverfahren bereits unter der Bezeichnung

- Chromsäureanhydrid, Plättchen, ab Werk (Ecoinvent-Datenbank-ID 270)
- Chrom, ab Regionallager (Ecoinvent-Datenbank-ID 1073)

eingeflossen.

Ein direkter ökobilanzieller Vergleich dieser Einsatzstoffe gibt Aufschluss darüber, inwieweit ihre jeweiligen Vorketten Chrom VI Emissionen verursachen. Beide Einsatzstoffe liegen hinsichtlich ihrer Verwendung in derselben Größenordnung. So wird pro m² Substrat 0,00972 kg Chromsäure bzw. 0,0074 kg metallisches Chrom verbraucht.

6.5.1. Modellierung

Die beiden Datensätzen aus der Ecoinvent Datenbank unterliegen folgenden Rahmenbedingungen:

Chromsäureanhydrid, Plättchen, ab Werk

Berücksichtigt sind Rohmaterial und Chemikalieneinsatz für die Produktion, der Transport des Materials zur Produktionsstätte, die geschätzten Emissionen in Wasser und Luft aus der Produktion, die Schätzung des Energieverbrauchs der Produktionsstätte selber sowie seiner Infrastruktur und die bei der Produktion entstehenden festen Abfälle.

Die Daten haben keinen spezifischen geografischen Bezug, sondern sind eine europäische Mittelung für Rohmaterial, Transport und den elektrischen Strommix.

Die Prozessdaten basieren auf stöchiometrischen Berechnungen zahlreicher Literaturquellen. Die Schätzung des Energieverbrauchs basiert auf demjenigen einer großen chemischen Produktionsstätte. Die Emissionen sind Schätzungen. Zeitlich beziehen sich die Angaben auf das Jahr 2000.

Chrom, ab Regionallager

Berücksichtigt wurden zu 75% aluminothermische und zu 25% elektrolytische Produktion. Berücksichtigt wurde ferner die Produktion von Cr₂O₃ als Zwischenprodukt, der aluminothermische Prozess, der Transport des Rohmaterials nach Europa und die Elektrolyse. Sekundärproduktionen (z.B. den Einsatz von Chromschrott in Umschmelzwerken oder Gießereien) wurden nicht berücksichtigt.

Die Angaben beziehen sich auf den weltweiten Produktionsmix, bezogen auf den Verbrauch von metallischem Chrom in Europa im Jahr 1994. Zielrichtung ist die Erfassung des Chromeinsatzes als Legierungsbestandteil in Superlegierungen (z.B. NiCr). Üblicherweise wird für die Verwendung von Chrom in Stahlliegierung kein metallisches Chrom verwendet sondern Ferrochrom. Der Einsatz von Sekundärchrom in der Chromherstellung wurde nicht berücksichtigt.

Zeitlich beziehen sich die Angaben auf die Jahre 1994-2003.

6.5.2. Ergebnisse

Folgende Abbildung stellt die Gesamtemissionen an Chrom VI für beider Einsatzstoffe grafisch dar.

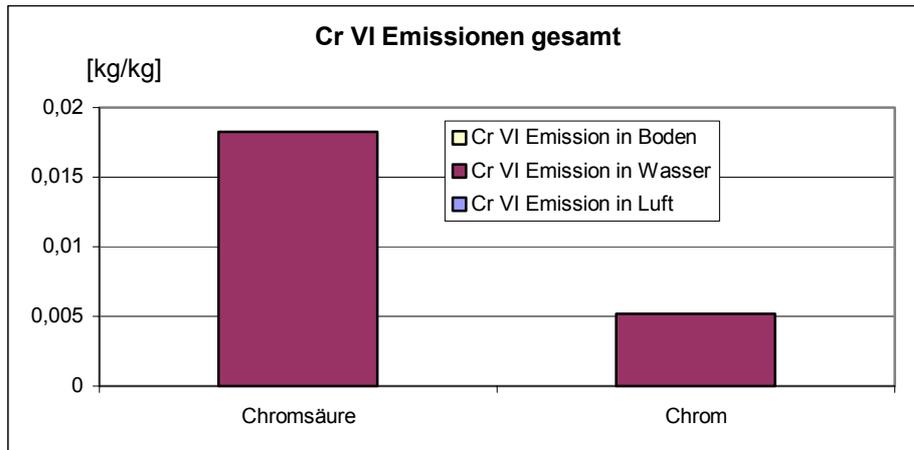


Abbildung 6-9: Gesamtemission von Cr VI bei der Produktion von Chrom und Chromsäure

Aus der Abbildung wird ersichtlich, dass die Produktion von Chromsäure ca. dreimal soviel Chrom VI Emissionen verursacht wie die Produktion von metallischem Chrom. Gleichzeitig wird deutlich, dass sich die Emissionen sehr unterschiedlich auf die Umweltmedien verteilen. So überwiegt die Emission in Wasser ganz deutlich.

Aus diesem Grund wird im weiteren die Verteilung in die Umweltmedien differenziert betrachtet. Folgende Abbildung stellt die Chrom VI Emissionen in das Umweltmedium Wasser dar.

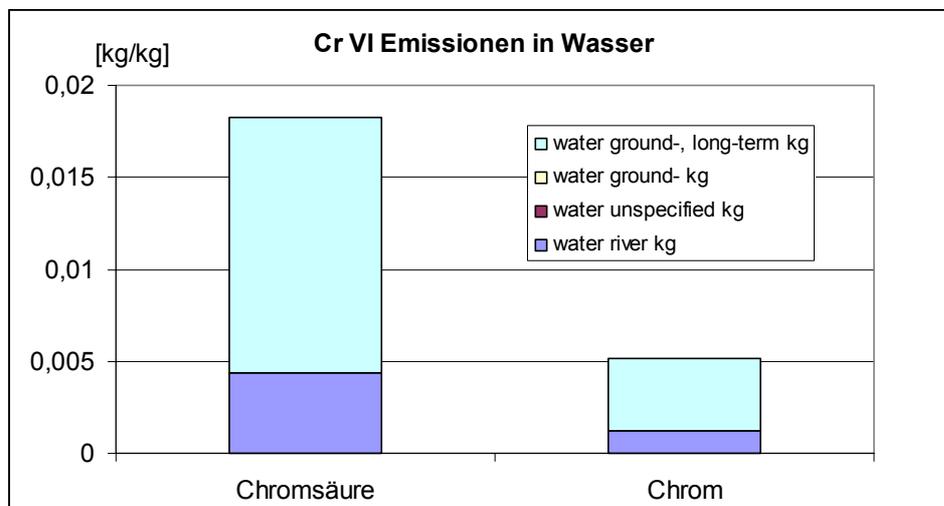


Abbildung 6-10: Cr VI Emission in Wasser

Die obige Abbildung verdeutlicht, dass die Chrom VI Emissionen in Wasser vor allem dominiert werden von den langfristigen Emission in das Grundwasser, also unter Berücksichtigung von Anreicherungsprozessen im Grundwasser von der Emission in Flusswasser. Hier schlägt sich die unterschiedliche Technologie bei der Herstellung von Chrom und Chromsäure nieder. Die nassen Produktionsschritte bei der Chromsäureproduktion scheinen auch die wesentlichen emissionsverursachenden Prozessschritte zu sein.

Bei einer Betrachtung der Emissionen in die Luft ergibt sich folgendes Bild.

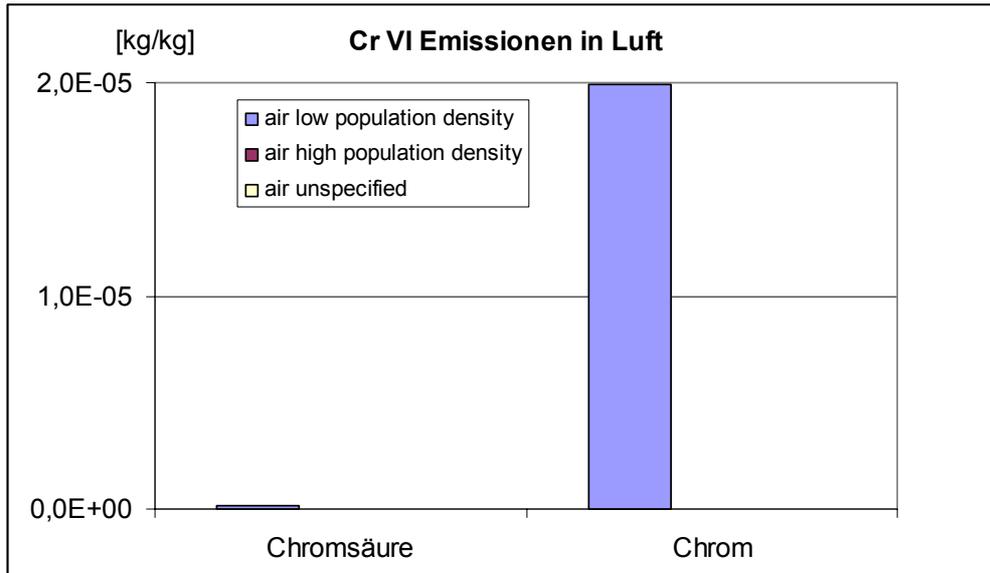


Abbildung 6-11: Cr VI Emissionen in die Luft

Die obige Darstellung verdeutlicht, dass es sich bei den Chrom VI Emissionen durch die Produktion von metallischen Chrom um luftförmige Emissionen handelt, die zudem um ein Vielfaches über den luftförmigen Emissionen aus der Chromsäureproduktion liegen. Dessen ungeachtet liegt die Cr VI Emission in die Luft um drei bis vier Größenordnungen unterhalb der Cr VI in das Umweltmedium Wasser. Die Ursache für die Dominanz der Chromherstellung bei den Luftemissionen dürfte in den zugrundeliegenden metallurgischen Prozessen liegen, die sich hier insbesondere durch hohen Luftverbrauch und den damit einhergehenden luftförmigen Emissionen auszeichnen. Vollständigkeitshalber sei auch die Cr VI Emission in den Boden dargestellt.

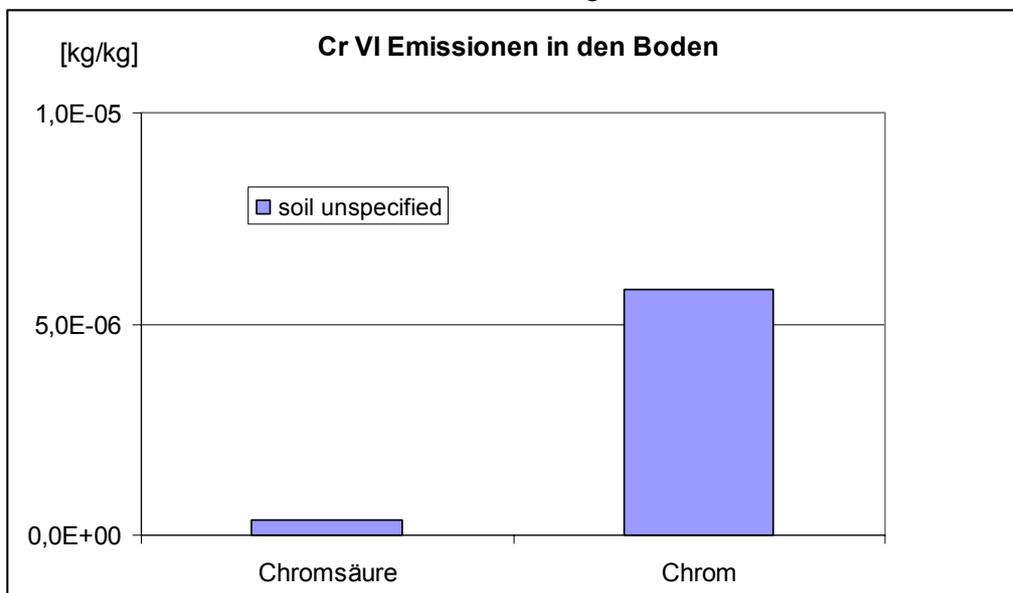


Abbildung 6-12: Cr VI Emissionen in den Boden

Aus der obigen Darstellung wird deutlich, dass die Cr VI Emissionen in den Boden knapp eine Größenordnung niedriger liegen als die luftförmigen Cr VI Emissionen. Die Abbildung verdeutlicht auch, dass die Herstellung von metallischem Chrom erheblich mehr Cr VI in den Boden emittiert als die Herstellung von Chromsäure.

Aber auch hier sei angemerkt, dass die Cr VI Emission in den Boden um ca. vier bis fünf Größenordnungen unterhalb der Cr VI Emissionen in das Umweltmedium Wasser liegt.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Herstellung von Chromsäure mit mehr als dreimal soviel Cr VI Emissionen verbunden ist und dass die damit verbundenen Cr VI Frachten weit überwiegend in das Umweltmedium Wasser emittiert werden. Die Cr VI Emissionen in Luft und Boden liegen einige Größenordnung darunter. Bei einer isolierten Betrachtung dieser Umweltmedien verursacht die Herstellung von metallischem Chrom deutlich mehr Cr VI Emissionen in die Medien Luft und Boden als die Herstellung von Chromsäure.

Bezogen auf die Beschichtungsverfahren Schwarzverchromung und Sputtern mit Chromtarget kann damit festgestellt werden, dass auch bei einer Betrachtung der Vorketten die Schwarzverchromung mit wesentlich mehr Chrom VI Emissionen verbunden ist als die nicht-galvanischen Beschichtungsverfahren.

Abschließend sei noch erwähnt, dass von den Herstellern von chromhaltigen Sputtertargets schriftlich erklärt wurde, dass bei dem Produktionsprozess kein Chrom VI emittiert wird.

7. Beständigkeitsprüfung der Beschichtungen

Für die ökologische Beurteilung der verschiedenen Beschichtungsverfahren ist deren Langzeitbeständigkeit von wesentlicher Relevanz. Dabei steht die Frage im Vordergrund, ob und wie sich das Absorptions- und Emissionsverhalten der beschichteten Absorber während der Nutzungszeit verändert.

Für die Ermittlung der Langzeitbeständigkeit wurde im Rahmen des Vorhabens eine Prüfung gemäß der Task 10 der IEA durchgeführt. Dabei handelt es sich um die Simulation einer beschleunigten Lebensdauerprüfung, welche den Zeitpunkt bestimmt, an dem das Absorptions- und das Emissionsvermögen der Absorberbeschichtungen während einer simulierten Schichtbeanspruchung unterhalb eines festgelegten Wertes fällt.

Aus diesem Zeitraum lässt sich anschließend die vermutliche Lebensdauer, innerhalb derer der Absorber seine vorgesehene Funktion erfüllt, bestimmen.

7.1. Hintergrund des Prüfverfahrens

Das Prüfverfahren wurde im Rahmen der Standardisierungsarbeit der Arbeitsgruppe MSTC (Materials in Solar Thermal Collectors) der IEA-SHCP (International Energy Agency – Solar Heating and Cooling Programme) entwickelt und als Entwurf für die ISO/CD 12592.2: „Solar Materials for plate collectors – Qualification test procedure for solar surface durability“, vorgelegt.

Das Prüfverfahren wurde maßgeblich an den drei Instituten FHG ISE in Freiburg, SPF in Rapperswil (Schweiz) sowie dem SP Institute in Borås (Schweden) entwickelt [Brunold 2000, Carlsson 1994, 2000a, 2000b, 2000c, Köhl 2005, Morren 1972].

Im vorliegenden Vorhaben wurde das SP Institut in Borås (Schweden) mit der Durchführung der Task 10 Prüfung beauftragt.

Die Durchführung der Task 10 erfolgte gemäß dem aktualisierten Testverfahren vom 05.09.2005 [IEA-SHCP 2005].

Das Testverfahren simuliert die Alterung der Beschichtung durch drei unterschiedliche Beanspruchung: Temperatur, Feuchte und Korrosion. Dabei wird

- die thermische Stabilität
- der Widerstand gegen Kondenswasser und
- die Korrosion unter SO₂-haltiger Atmosphäre

bestimmt.

Darüber hinaus erfolgt eine Adhäsionsprüfung gemäß ISO 4624 bei welcher die Schichtadhäsion 0,15 MPa nicht unterschreiten darf.

Die Simulation der Alterung mittels **Temperatur** wird in vielen technischen Anwendungsbereichen benutzt, um Aussagen über die thermische Belastbarkeit eines Materials zu erhalten, denn üblicherweise hat eine thermische Belastung eine erhöhte Degradation des Materials zu Folge. Bei einer Absorberbeschichtung, welche aus kleinen Metallpartikeln besteht, führt die Temperaturerhöhung zu einer Zunahme der Oxidation des Metalls und so meist zu einer Abnahme des Absorptionsvermögens der Schicht.

Hohe **Luftfeuchte** und die Kondensation von Wasser auf einem Material führt zu vielfältigen Reaktionen der Degradation. Absorberbeschichtungen mit anorganischen Oxiden unterliegen dabei Hydrationsreaktionen, welche meist zu einem Anstieg der thermischen Emissionen der Schicht führen. Eine hohe Feuchte ist ferner Bedingung für eine elektrochemische Korrosion. In deren Folge in der Regel eine Abnahme des Absorptionsvermögens der Schicht zu beobachten ist.

Da Flachkollektoren in der Regel belüftet sind, kommt die Absorberoberfläche mit der Umgebungsluft in Kontakt. Unterschreitet die Absorberoberfläche den Taupunkt der Umgebungsluft, kommt es zur Kondensation. Die Kondensation von Wasser aus der Umgebungsluft ist heute bei den meisten Kollektoren üblich. Dadurch müssen Absorberoberfläche Perioden von sehr hoher Feuchte widerstehen können. Aus diesem Grunde sollte eine Absorberoberfläche, insbesondere in einem Kollektor mit unkontrollierter Belüftung, in der Lage sein, bei derartigen Beanspruchungen durch Feuchte seine optischen Eigenschaften während der vorgesehenen Betriebsdauer (design service life time) zu behalten.

Von zahlreichen **Luftschadstoffen** ist bekannt, dass sie insbesondere bei hoher Luftfeuchte die elektrochemische Korrosion der meisten Metalle beschleunigen. Da die Absorberoberfläche mit der Umgebungsluft in Kontakt kommt, ist sie auch den jeweiligen Luftschadstoffen am Kollektorstandort ausgesetzt. Luftschadstoffe beeinflussen daher insbesondere auf lange Sicht die optische Leistungsfähigkeit der Absorberoberfläche. Aufgrund der Komplexität von Degradationsprozessen durch Luftschadstoffe, wird die atmosphärische Korrosion, wie sie in der ISO 9224 definiert und beschrieben ist, benutzt. Bei der Simulation der Alterung durch korrosive Luftinhaltsstoffe wird als Bezugsgröße die Korrosionsrate von Zink sowie SO_2 als Luftschadstoff benutzt.

Der Ablauf der Prüfung sieht vor, zunächst die solare Absorption (α_s) sowie die thermische Emission (ε) des beschichteten Absorbers vor der Beanspruchung zu bestimmen. Diese Werte dienen als referenzielle Bezugsgrößen, deren Veränderungen im weiteren Testverlauf den wesentlichen Prüfparameter darstellen. Um allzu große Schwankungen dieser Bezugsgrößen zu vermeiden, wird zudem die Standardabweichung ermittelt, welche für α_s geringer als 0,01 und für ε geringer als 0,04 sein muss.

Aus der solaren Absorption (α_s) sowie der thermischen Emission (ε) wird die sogenannte Performance Criterion Function (PC-Function) der Beschichtungen gemäß:

$$\text{PC} = -\Delta\alpha_s + 0,5\Delta\varepsilon$$

Gleichung 1: Performance Criterion Function (PC-Function)

bestimmt, welche ein zusammengefasster Ausdruck der Veränderung der optischen Leistungsfähigkeit der Absorberbeschichtung darstellt.

Dabei gilt $\Delta\alpha_s = \alpha_{s,t} - \alpha_{s,i}$ sowie $\Delta\varepsilon = \varepsilon_t - \varepsilon_i$. Der Index i entspricht dabei dem Zeitpunkt zum Beginn der Beanspruchung und der Index t einem Zeitpunkt während der Beanspruchung. Im Testverlauf wird zu definierten Zeitpunkten während der Beanspruchung die solare Absorption sowie die thermische Emission gemessen und mit ihrer Hilfe der Wert der zum jeweiligem Zeitpunkt zugehörigen PC-Funktion bestimmt.

Die optische Funktionsfähigkeit einer Absorberbeschichtung gilt solange als gewährleistet, wie die PC-Funktion 0,05 nicht überschreitet.

Der Zeitpunkt der Überschreitung ist als sogenannte Failure time definiert. Mit Hilfe der time-transformation-function lässt sich aus ihr der zu erwartende Zeitraum der Beständigkeit ermitteln. Eine Dauerbeständigkeit gilt als gewährleistet, wenn dieser Zeitraum der sogenannten „design service life“ von mindestens 25 Jahre entspricht.

7.2. Prüfung der Temperaturbeständigkeit

Wesentliche Rahmenbedingungen der Beständigkeitsprüfung, insbesondere bei der Prüfung der Temperaturbeständigkeit, sind die Dauer der Beanspruchung und die Höhe der dabei herrschenden Temperatur.

Daher erfolgt die Festlegung, welcher Prüfzeitraum (exposure time) und welche Prüftemperatur (exposure temperature) zu wählen ist, bei der Prüfung der Temperaturbeständigkeit in der Task 10 differenziert.

Angenommen wird, dass der Kollektor in 11 Monaten des Jahres unter Betriebsbedingungen tagsüber Warmwasser produziert. Während eines wolkenlosen Monates im Sommer wird angenommen, dass im Kollektor Stagnationsbedingungen herrschen. Die Temperaturbelastungen des Absorbers hängen aber – neben diesen Annahmen über den Jahresgang der Betriebsbedingungen insbesondere im Stagnationsfall - auch von den optischen Eigenschaften seiner Oberfläche ab. Daher nutzt die Task 10 eine Funktion über die Aktivierungsenergie für die thermische Degradation, in welcher die maximal mögliche Temperatur der Absorberoberfläche aufgrund der optischen Eigenschaften ihrer Beschichtung einfließt.

Für die Durchführung der Prüfung der Temperaturbeständigkeit ergibt sich somit, dass zunächst aus den Werten für die Absorption (α_s) sowie für die thermische Emission (ε) gemäß Tabelle B1 der Task 10 die Maximaltemperatur (T_{\max}) bestimmt wird. (vgl.: Tabelle 10-1) Aus T_{\max} wird dann gemäß Tabelle B2 der Task 10 die Prüftemperatur T_1 (vgl.: Tabelle 10-2) bestimmt. Die Prüfdauer ist zunächst

auf 600 Stunden festgelegt. Jeweils nach 36, 75, 150, 300 und schließlich 600 Stunden wird die Absorption (α_s) sowie die thermische Emission (ϵ) gemessen und der Wert der PC-Funktion bestimmt.

Zum Nachweis der Temperaturbeständigkeit gibt es die drei Optionen a, b oder c. Zunächst wird in allen Fällen der Zeitpunkt t_1 bestimmt. Dies stellt denjenigen Messzeitpunkt dar, an dem die PC-Funktion letztmalig einen Wert kleiner als 0,05 eingenommen hatte.

7.2.1. Option a)

Wenn die PC-Funktion nach 600 Stunden kleiner als 0,01 ist, gilt die Temperaturbeständigkeit der Beschichtung als gewährleistet, sofern die Adhäsion den Wert von 0,15 MPa weiterhin nicht unterschreitet.

7.2.2. Option b)

Falls gilt $PC > 0,05$ zum Zeitpunkt $t_1 = 300$ h oder $PC > 0,01$ zum Zeitpunkt $t_1 = 600$ h, wird mit Hilfe der Tabelle B3 der Task 10 (vgl.: Tabelle 10-2) die Temperatur T_3 sowie die Zeit t_3 bestimmt und die Prüfung der Temperaturbeständigkeit mit dieser Temperatur und für diese Zeitdauer wiederholt und anschließend der Wert der PC Funktion bestimmt.

Wenn dann gilt $PC(T_3, t_3) > PC(T_1, t_1)$ gilt die Temperaturbeständigkeit der Beschichtung als gewährleistet, sofern die Adhäsion den Wert von 0,15 MP weiterhin nicht unterschreitet.

7.2.3. Option c)

Falls gilt $PC > 0,05$ zum Zeitpunkt $t_1 < 150$ h wird aus der Tabelle B3 der Task 10 die Temperatur T_2 sowie die Zeit t_2 entnommen und die Prüfung der Temperaturbeständigkeit mit dieser Temperatur und für diese Zeitdauer wiederholt und anschließend der Wert der PC Funktion bestimmt.

Wenn gilt $PC(T_2, t_2) < PC(T_1, t_1)$, gilt die Temperaturbeständigkeit der Beschichtung als gewährleistet, sofern die Adhäsion den Wert von 0,15 MP weiterhin nicht unterschreitet.

Zusätzlich sind eine Reihe weiterer Rahmenbedingungen bei der Durchführung der Prüfung einzuhalten (Art der Temperaturmessung, Ofenrandtemperatur, Temperatur der Probe vor der Erhitzung usw.).

7.3. Prüfung der Feuchtebeständigkeit

Die Überprüfung der Feuchtebeständigkeit erfolgt bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 95 %. Zunächst wird ein Initialtest (i_1) bei 40°C durchgeführt und nach 80, 150, 300 und 600 Stunden der Wert der PC-Funktion bestimmt.

Der weitere Prüfablauf sieht zwei Varianten vor (vgl.: Abbildung 10-2).

7.3.1. Variante 1

Falls gilt $PC > 0,05$ wird ein weiterer Initialtest (i_2) bei 40°C durchgeführt. Dabei wird allerdings der Zeitraum verkürzt. Je nach dem wann die PC-Funktion aus dem ersten Initialtest den Wert von 0,05 überschritten hat, ergibt sich die Prüfdauer des zweiten Initialtests. Allerdings wird der zweite Initialtest ohne Unterbrechung durchgeführt und nur zum Ende der Prüfdauer der Wert der PC-Funktion bestimmt.

Der im zweiten Initialtest gemessenen Werte der PC-Funktion bestimmen dann die Testbedingungen des Finaltests f_2 (vgl.: Abbildung 10-2, Fußnote 4).

Die Feuchtebeständigkeit gilt als gewährleistet, wenn der Wert der PC-Funktion nach dem Finaltest f_2 kleiner als 0,05 ist und die Adhäsion den Grenzwert von 0,15 MPa weiterhin nicht unterschreitet.

Ist die PC Funktion $< 0,05$ und die Adhäsion unterschreitet nicht den Grenzwert, gilt die Feuchtebeständigkeit als gewährleistet

7.3.2. Variante 2

Falls die PC-Funktion aus dem ersten Initialtest Werte zwischen 0,05 und 0,015 annimmt, wird ein Finaltest (f_i) bei einer Temperatur von 60°C und über einem Zeitraum von 85 Stunden durchgeführt. Falls gilt $PC(f_i) > PC(i1)$ und die Adhäsion den Grenzwert von 0,15 MPa nicht unterschreitet, gilt die Feuchtebeständigkeit als gewährleistet.

Falls gilt $PC(f1) < PC(i1)$, kann keine abschließende Entscheidung über die Feuchtebeständigkeit gezogen werden, sondern es sind weitere Untersuchung zur Klärung des Schichtverhaltens unter Feuchte nötig. (vgl.: Abbildung 10-2).

7.4. Prüfung der SO₂-Beständigkeit

Die Prüfung wird bei 20°C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 95% sowie einem SO₂-Gehalt von 1 ppm und einer Luftstromrate zwischen 1 und 5 mm/s durchgeführt. Der Ablauf der Prüfung orientiert sich an der ISO 10062. Gemessen wird der Zeitpunkt, an dem der Wert der PC-Funktion 0,05 übersteigt (Failure time).

Entscheidungskriterium ist die kürzeste zulässige Failure time. Unterschieden wird dabei zwischen:

- luftdichten Kollektoren mit kontrollierter Belüftung (Kollektor Typ A) und
- luftdurchlässigen Kollektoren mit unkontrollierter Belüftung (Kollektor Typ B).

Gemäß Anlehnung an ISO 10062 wird die Korrosionsrate von Zink, ausgedrückt als Massenverlust von Zink (r_{Zn} in mg/m²), als referentielle Bezugsgröße herangezogen. Als kürzeste zulässige Ausfallzeiten (Shortest acceptable failure time) sind folgende Werte einzuhalten:

- Für Solarkollektoren vom Typ A: $t_f, A = 2,5/r_{Zn}$
- Für Solarkollektoren vom Typ B: $t_f, A = 7,5/r_{Zn}$

Soweit nicht vorher bekannt, wird bei der Testdurchführung zunächst die Zeit der Testapparatur unter den Prüfbedingungen gemessen, in der diese Korrosionsraten von Zink erreicht werden. Im vorliegenden Fall des SP-Instituts in Boras beträgt diese Zeit 230 Stunden für eine Korrosionsrate von 2,5 g/m² Zink und 660 Stunden für eine Korrosionsrate von 7,5 g/m² Zink. Entsprechend wird die PC Funktion der Proben nach 120, 230 und 660 Stunden gemessen.

Eine Beschichtung gilt als beständig gegen Korrosion in SO₂-Atmosphäre, wenn nach der kürzesten zulässigen Ausfallzeit gilt $PC < 0,05$ und die Adhäsion den Grenzwert von 0,15 MPa nicht unterschreitet.

7.5. Zweck der Task 10 Prüfung im Vorhaben

Im vorliegenden Vorhaben erfolgte die Durchführung der Task 10 Prüfung zur Beantwortung der Frage, inwieweit fortschrittliche Umweltstandards möglicherweise mit der Langlebigkeit von Kollektoren korrespondieren oder aber negativ beeinflussen. Insbesondere von Interesse ist dabei die Frage, inwieweit die galvanisch hergestellten selektiven Oberflächen, welche sechswertiges Chrom einsetzen, eine längere Haltbarkeit aufweisen bzw. die nicht-galvanischen und Chrom-VI-freien selektiven Absorberbeschichtungen eine kürzere Haltbarkeit aufweisen.

7.6. Durchführung der Task 10 Prüfung im Vorhaben

Um das Vorgehen bei der Task 10 Prüfung möglichst nachvollziehbar zu gestalten und möglichst belastbare Prüfergebnisse zu erhalten, erfolgte der gesamte Prüfprozess in enger Kooperation mit den Beschichtungsherstellern. So wurden die Beschichtungshersteller zunächst von der Absicht der Prüfung in Kenntnis gesetzt und um die Zusendung von Proben gebeten. Die jeweiligen vorläufigen Testresultate wurden den jeweiligen Beschichtungsherstellern zur Kenntnis gegeben und die Möglichkeit der Stellungnahme eingeräumt. Ferner wurde um die Freigabe der vorläufigen Testresultate an die an-

deren Schichthersteller ersucht. Drei Schichthersteller (Nr. 1, 2 und 5) haben von dieser Möglichkeit Gebrauch gemacht.

7.6.1. Identifizierung der zu beprobenden Schichten

Für folgende Beschichtungen wurde die Task 10 Prüfung durchgeführt.

Technologie	Anbieter	Produktname	Charge bzw. Coil-Bündel-Nr.	Proben Nr.
Schwarzverchromung mit Nickel Unterlage auf Kupferblech	Anonymisiert			1
Cermet PVD-Sputtern auf Kupferblech			F 60162	2
Cermet PVD-Sputtern auf Aluminiumband			298870	3
Cermet PVD-Sputtern auf Kupferblech			A 7405	4
Titan-Nitritoxid PVD-Sputtern auf Kupferblech			P 299-11	5

Tabelle 7-1: Geprüfte Beschichtungen

Für das Jahr 2004 verfügten diese Beschichtungen zusammen über einen Marktanteil von ca. 85%.(Vgl.: Abbildung 3-16)

7.6.2. Probennahme

Zunächst wurden die Beschichtungshersteller um die Zusendungen von Proben gebeten. Zwischen dem 27.2.06 und dem 3.3.06 wurden die Proben der Hersteller entgegengenommen. Um Proben von Absorberbeschichtungen zu erhalten, wie sie auch auf dem Markt angeboten werden, wurden die Proben Nr. 2 bis Nr. 5 in der Zeit vom 3.3.06 bis zum 22.3.06 direkt aus der Kollektorproduktion der Firma Kollektorbau Berlin (KBB) entnommen. Da die Beschichtung Nr. 1 dort jedoch nicht verbaut wird, wurde die Herstellerprobe verwendet.

Am 22.3.06 wurden die so gezogenen Proben an das SP Institut in Borås Schweden versandt, wo sie am 29. 3.06 eintrafen.

Am 7. Juli 2006 war die Durchführung der Task 10 Prüfungen beendet und die vorläufigen Ergebnisse lagen vor.

7.7. Testergebnisse

7.7.1. Ergebnisse der Vorprüfung

Folgende Tabelle zeigt die solare Absorption (α_s) und die thermische Emission (ε), deren Standardabweichung sowie die gemessene Adhäsion der Proben vor Beginn der Prüfungen:

Proben Nr.	1	2	3	4	5
Solare Absorption α_s	0,956	0,948	0,945	0,939	0,945
Standardabweichung α_s	0,001	0,001	0,002	0,002	0,002
Thermische Emission ε	0,148	0,085	0,075	0,088	0,076
Standardabweichung ε	0,011	0,007	0,006	0,010	0,005
Adhäsion in MPa	6,100	5,100	5,500	11,700	7,900
Standardabweichung Adhäsion	1,100	1,800	0,200	2,400	0,500

Tabelle 7-2: Absorption, Emission und Adhäsion vor Beginn der Prüfung

Hinsichtlich Standardabweichung und Adhäsion erfüllten alle Beschichtungen die Eingangsanforderungen der Task 10.

Hinsichtlich der Emissionen wurden von den Beschichtungsherstellern durchweg geringere Werte bei Eigenmessungen oder bei von ihnen in der Vergangenheit in Auftrag gegebenen Messungen ermittelt. Typische Werte mit denen die nicht-galvanischen Beschichtungen beworben werden, liegen bei einem solaren Absorptionsgrad von $= 0.95 \pm 0.02$ und einem thermischen Emissionsgrad von $= 0.05 \pm 0.02$.

Für die Schicht Nr. 1 liegt die Aussage des Anbieters vor, dass zum Zeitpunkt der Probennahme Probleme mit der Messeinrichtung zur Überprüfung des Emissionsverhaltens vorgelegen hätten, so dass eine Nachjustierung der Badparameter nicht wie üblich vorgenommen werden konnte. Normalerweise läge die Emission bei einem Wert von 0,10 bis 0,12.

Die folgende Abbildung stellt die an den Proben gemessene solare Absorption (α_s) mit der Standardabweichung vor Beginn der Prüfung dar.

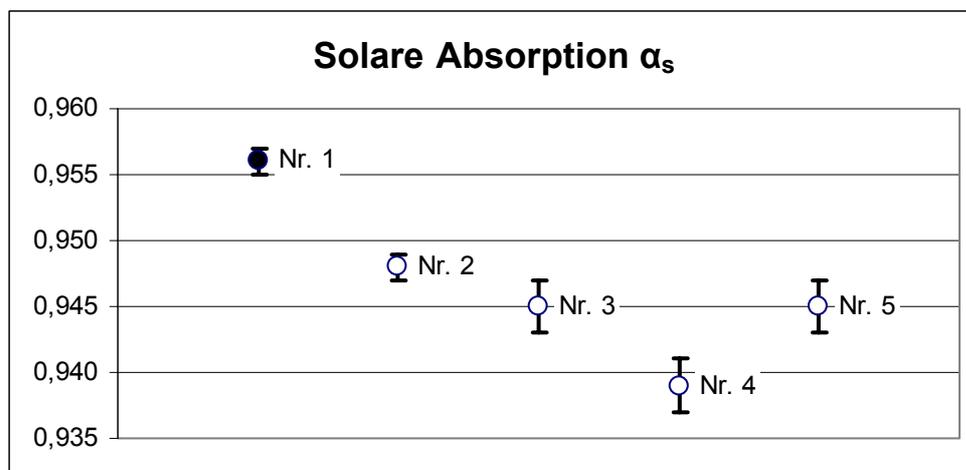


Abbildung 7-1: Gemessene solare Absorption der geprüften Proben

Die an den Proben gemessenen Werte für die **Absorption** wiesen mit einem maximalen Wert von 0,956 bei Probe Nr. 1 und einem minimalen Wert von 0,939 bei der Probe Nr. 4 relativ geringe Schwankungen auf. Die Standardabweichung der gemessenen mittleren Absorptionswerte betrug lediglich 0,003. Einen signifikanten Unterschied zwischen der galvanisch und den nicht-galvanisch hergestellten Beschichtungen lässt sich aus den Ergebnissen nur bedingt ableiten. So lagen die Schwankungen innerhalb der nicht-galvanischen Schichten mit ca. 0,01 in der selben Größenordnung wie der Unterschied zwischen der absorptiv besten nicht-galvanischen Schicht (Nr. 2) und der galvanischen Schicht.

Gleichwohl ist festzuhalten, dass die galvanische Schicht mit diesem Abstand von 0,01 die beste solare Absorption von allen Proben aufweist und die Standardabweichung mit 0,01 nur die Hälfte der mittleren Standardabweichung der nicht galvanischen Schicht in Höhe von 0,02 beträgt

Die folgende Abbildung veranschaulicht die an den Proben gemessenen thermische Emissionswerte (ϵ) vor Beginn der Prüfung.

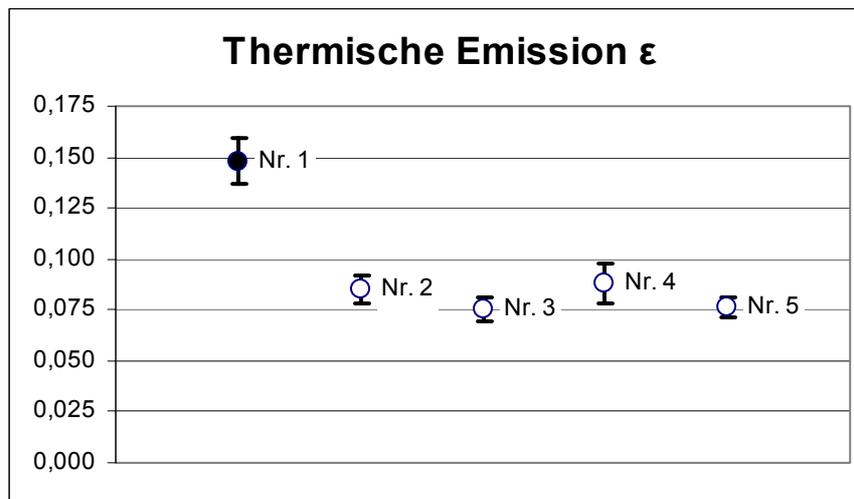


Abbildung 7-2: Gemessene thermische Emission der geprüften Proben

Die an den Proben gemessenen Werte für die **thermischen Emission** schwankten mit einem maximalen Wert von 0,148 (Probe Nr. 1) und einem minimalen Wert von 0,075 (Probe Nr. 3) wesentlich stärker als die solare Absorption. Aus dieser Schwankung ergab sich eine Standardabweichung der mittleren Emissionswerte aller Proben in Höhe von 0,008, die mehr als doppelt so hoch war wie die Standardabweichung der mittleren Absorptionswerte aller Proben in Höhe von 0,003.

Im Gegensatz zur Absorption, ließen sich bei der Emission signifikante Unterschiede zwischen galvanisch und nicht-galvanisch hergestellte Schichten feststellen. So lag die Emission der galvanischen Schicht mit 0,148 deutlich über dem durchschnittlich mittleren Emissionswert aller nicht-galvanischen Schicht von 0,081. Diese höhere Emission der galvanischen Schicht wurde zudem gestützt von den geringen Schwankungen bei den mittleren Emissionswerten der nicht-galvanischen Schichten. Allerdings wurde diese höhere Emission der galvanischen Schicht relativiert durch ihre hohe Standardabweichung, die bei der galvanischen Schicht mit 0,011 deutlich über der mittleren Standardabweichung der nicht-galvanischen Schichten in Höhe von 0,07 lag.

Insgesamt sei nochmals darauf hingewiesen, dass alle Emissionswerte deutlich über den Herstellerangaben lagen.

Die folgende Abbildung stellt die an den Proben gemessene Adhäsion vor Beginn der Prüfung dar:

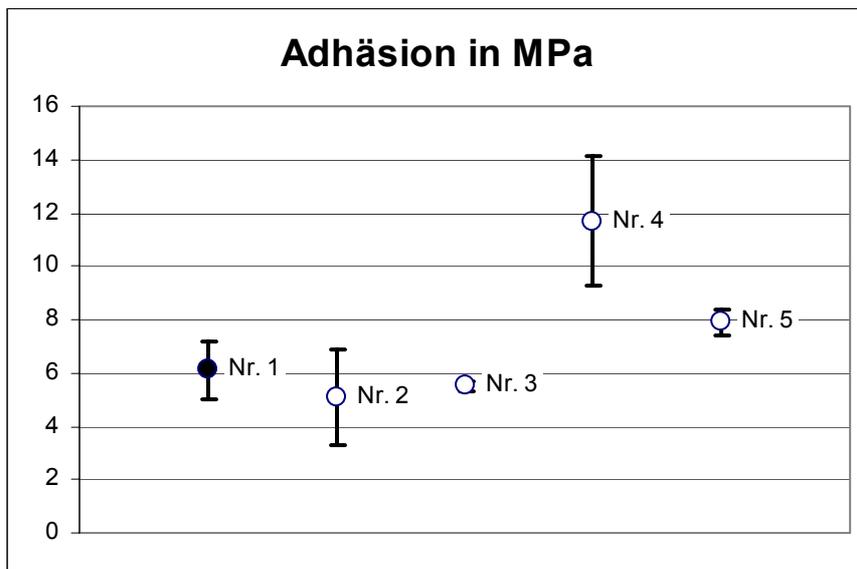


Abbildung 7-3: Gemessene Adhäsion vor Beginn der Prüfung

Die Adhäsion lag für alle Beschichtungen weit über den nicht zu unterschreitenden Grenzwert der Task 10 von 0,15 MPa. Die Bandbreite der Messwerte war mit einem Maximalwert von 11,7 MPa bei Probe Nr. 4 und einem Minimalwert von 5,1 MPa bei der Probe Nr. 2 beträchtlich. Dies wird auch durch die Schwankung der Standardabweichung deutlich, die zwischen 0,2 bei Probe Nr. 3 und 2,4 bei Probe Nr. 4 liegt. Ein signifikanter Unterschied zwischen galvanisch und nicht-galvanisch hergestellten Beschichtungen ist jedoch nicht festzustellen. Im Gegenteil: Der Median aller Proben liegt für die gemessene Adhäsion aller Proben mit 6,1 exakt auf der gemessenen Adhäsion der galvanisch hergestellten Beschichtung.

7.8. Prüfung der Temperaturbeständigkeit

Folgende Tabelle zeigt die Ergebnisse der ersten Messreihe bei der Prüfung der Temperaturbeständigkeit.

Proben Nr.	1	2	3	4	5
Exposure Temperature	259°C	265°C	265°C	265°C	265°C
PC_{18h}	-0,008	0,013	0,064	0,005	0,004
$\Delta\alpha_{s18h}$	0	-0,006	-0,01	-0,004	0,006
$\Delta\varepsilon_{18h}$	-0,016	0,015	0,109	0,001	0,021
PC_{36h}	-0,013	0,03	0,07	0,009	0,009
$\Delta\alpha_{s36h}$	0	-0,011	-0,013	-0,008	0,012
$\Delta\varepsilon_{36h}$	-0,018	0,03	0,114	0,002	0,041
PC_{75h}	-0,011	0,041	0,076	0,038	0,025
$\Delta\alpha_{s75h}$	0	-0,016	-0,015	-0,015	0,003
$\Delta\varepsilon_{75h}$	-0,021	0,049	0,119	0,006	0,056
PC_{150h}	-0,011	0,06	0,078	0,039	0,057
$\Delta\alpha_{s150h}$	0,001	-0,021	-0,016	-0,019	-0,015
$\Delta\varepsilon_{150h}$	-0,021	0,078	0,121	0,016	0,085
PC_{300h}	-0,011	0,071	0,078	0,039	0,121
$\Delta\alpha_{s300h}$	0	-0,026	-0,016	-0,021	-0,053
$\Delta\varepsilon_{300h}$	-0,023	0,091	0,125	0,035	0,136
PC_{600h}	-0,013	0,101	0,08	0,068	0,23
$\Delta\alpha_{s600h}$	-0,001	-0,029	-0,015	-0,019	-0,011
$\Delta\varepsilon_{600h}$	-0,027	0,143	0,13	0,09	0,240
Adhäsion	7,0 MPa nach 600h bei 259°C	8,1 MPa nach 600h bei 265°C		8,9 MPa nach 600h bei 265°C	1,8 MPa nach 600h bei 265°C
Messzeitpunkt, an dem die PC-Funktion letztmalig einen Wert kleiner 0,05 hatte (t_1)	-	75 h		300h	75 h
Exposure Temperature		$t_2 = 235^\circ\text{C}$		$t_3: 295^\circ\text{C}$	$t_2 = 235^\circ\text{C}$
Exposure Time		$T_2 = 289 \text{ h}$		$T_3: 136 \text{ h}$	$T_2 = 289 \text{ h}$
PC		$\text{PC}_{235^\circ\text{C}, 289\text{h}} = 0,029$		$\text{PC}_{295\text{h}, 136\text{h}^\circ\text{C}} = 0,047$	$\text{PC}_{235^\circ\text{C}, 289\text{h}} = 0,013$
Adhäsion		9,3 MPa nach 289h bei 235°C		8,6 MPa nach 136h bei 295°C	2,3 MPa nach 289h bei 235°C

Tabelle 7-3: Ergebnisse der Temperaturmessung

Die Tabelle zeigt die probenspezifische Temperatur T_1 und die gemessenen Werte der PC-Funktion nach 18, 75, 150, 300 und 600 Stunden sowie die zugehörigen Werte für $\Delta\alpha_s$ und $\Delta\varepsilon$. Die spezifische Temperatur T_1 ergibt sich, wie in Kap 7.2 beschrieben, aus dem spezifischen Wert für T_{\max} , welcher sich wiederum aus den α_s und ε ergeben, die vor Beginn der Prüfung gemessen wurden.

7.8.1. Probe Nr. 1

Probe Nr. 1 wies als einzige der Probe zu jedem Messzeitpunkt Werte der PC Funktion auf, die geringer als 0,05 waren. Da zudem die Bedingung $PC_{600h} < 0,01$ (vgl.

Abbildung 10-1, Figure B2 Option (a)) erfüllt war und die Adhäsion nach 600 Stunden mit 7,0 MPa ebenfalls weit über dem Mindestwert von 0,15 MPa lag, erfüllt die Probe Nr. 1 die Anforderung der Task 10 hinsichtlich der Temperaturstabilität.

Erstaunlicherweise waren die Werte der PC-Funktion negativ. Das liegt insbesondere an der Abnahme der thermischen Emission. Dies bedeutet, dass die optische Leistung der geprüften galvanischen bei höheren Temperaturen zunimmt.

Die folgende Abbildung stellt der Verlauf von $\Delta\alpha_s$ und $\Delta\varepsilon$ sowie die sich daraus ergebenden Werte der PC-Funktion von Probe Nr. 1 dar:

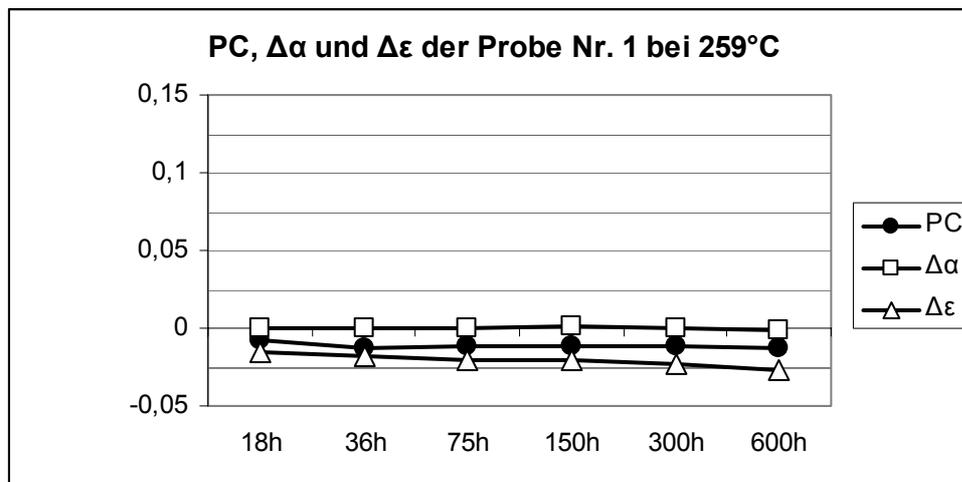


Abbildung 7-4: $\Delta\alpha_s$ und $\Delta\varepsilon$ und die Werte der PC-Funktion von Probe Nr. 1

7.8.2. Probe Nr. 2

Bei Probe Nr. 2 wies die PC-Funktion nach 150h bei 265°C einen Wert von 0,06 auf und überschritt damit zu diesem Zeitpunkt den Grenzwert von 0,05.

Der Messzeitpunkt, an dem die PC-Funktion letztmalig einen Wert kleiner als 0,05 eingenommen hatte (t_1) lag bei 75 Stunden. Die PC Funktion betrug zu diesem Zeitpunkt 0,025.

Damit war die Bedingung $PC > 0,05$ bei $t_1 \leq 150h$ erfüllt (vgl. Abbildung 10-1, Figure B2 Option (c)) und eine weitere Messung für 289 Stunden bei 235°C war durchzuführen. Die danach gemessene Emission und Absorption ergab einen Wert für die PC Funktion in Höhe von 0,029. Damit war die Bedingung $PC_{T_2, t_2} \leq PC_{T_1, t_1}$ erfüllt, denn es gilt: $PC_{235^\circ C, 289h} = 0,029 \leq PC_{265^\circ C, 75h} = 0,041$. Da ferner die Adhäsion nach 289 Stunden bei 235°C mit 2,1 MPa ebenfalls weit über dem Mindestwert von 0,15 MPa lag, erfüllt auch die Probe Nr. 2 die Anforderung der Task 10 hinsichtlich der Temperaturstabilität.

Die folgende Abbildung stellt der Verlauf von $\Delta\alpha_s$ und $\Delta\varepsilon$ sowie die sich daraus ergebenden Werte der PC-Funktion von Probe Nr. 2 dar:

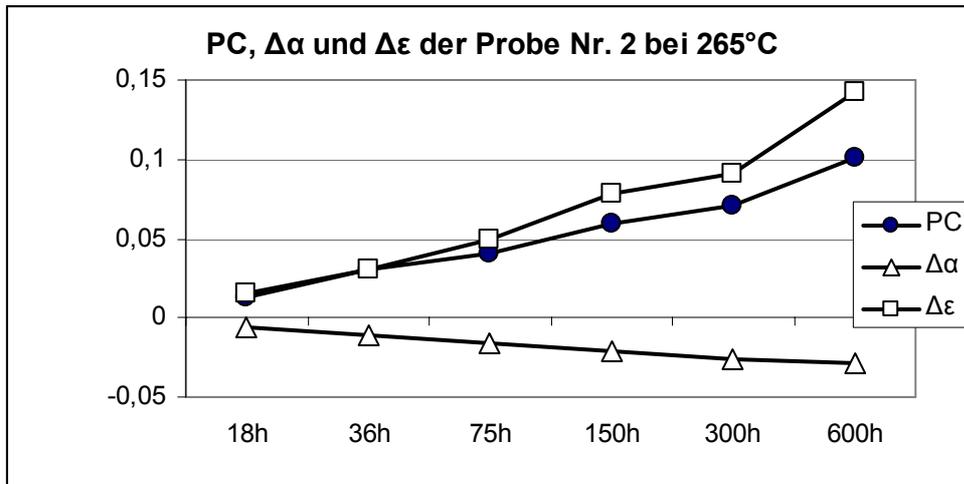


Abbildung 7-5: $\Delta\alpha_s$ und $\Delta\varepsilon$ und die Werte der PC-Funktion von Probe Nr. 2

7.8.3. Probe Nr. 3

Für Probe Nr. 3 wurde ein Exposure Temperature in Höhe von 265°C ermittelt. Der Wert für PC_{18h} lag mit 0,064 bereits über dem Grenzwert von 0,05. Bereits nach 6 Stunden bei 265°C wurde der Wert von 0,05 überschritten. Damit erfüllte die Beschichtung dieser Probe die Anforderung der Task 10 hinsichtlich der Temperaturstabilität nicht.

Die hohen Werte für die PC Funktion waren insbesondere auf die hohe Zunahme der thermischen Emission zu einem sehr frühen Zeitpunkt zurückzuführen. Bereits nach 18 Stunden war die thermische Emission um über 10% angestiegen. Erstaunlicherweise war das Emissionsverhalten danach relativ stabil. Es lag nach 600 h bei 0,13. Dies entspricht einer Zunahme um 19%. Im Vergleich dazu lag die thermische Emission der Probe Nr. 2 nach 18 h bei 0,015 und nach 600 h bei 0,143. Dies entspricht einer Zunahme von über 800%.

Die folgende Abbildung stellt der Verlauf von $\Delta\alpha_s$ und $\Delta\varepsilon$ sowie die sich daraus ergebenden Werte der PC-Funktion von Probe Nr. 3 dar:

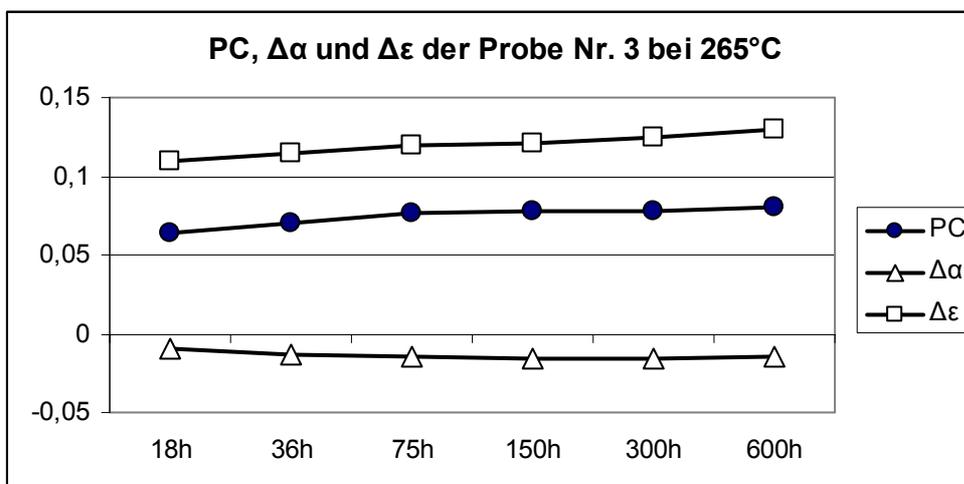


Abbildung 7-6: $\Delta\alpha_s$ und $\Delta\varepsilon$ und die Werte der PC-Funktion von Probe Nr. 3

Nach Kenntnisnahme des Prüfergebnisses teilte der Beschichtungshersteller am 19.7.06 mit, dass bei Prüfungen in der Vergangenheit die Beschichtung sehr wohl die Anforderungen der Task 10 an die Temperaturbeständigkeit eingehalten hätte. Als Beleg für diese Aussage wurde das Ergebnis einer Task 10 Prüfung vorgelegt, die vom Fraunhofer ISE am 17.10.05 durchgeführt wurde. Diesem Prüfbericht zu Folge wurde bei derselben Beschichtung ein Wert für die PC-Funktion von 0,059 nach 75 Stunden (t_1) bei 252° C (T1) und von 0,04 nach 193 Stunden (t_2) bei 222° C (T2) gemessen. Damit war die Bedingung PC T2, $t_2 \leq$ PC T1, t_1 erfüllt und der Beschichtung wird laut Testzertifikat eine Temperaturbeständigkeit für Flachkollektoren unterhalb einer maximalen Stagnationstemperatur von 185° C bescheinigt. Angaben über die Adhäsion finden sich nicht. Die berechneten Standardabweichungen für die vor Beginn der Prüfung gemessenen lagen jedoch mit 0,0122 für die solare Absorption sowie mit 0,0043 für die thermische Emission über den maximal zulässigen Werten ($\alpha < 0,01$ sowie $\epsilon < 0,04$).

7.8.4. Probe Nr. 4

Für **Probe Nr. 4** wurde eine Exposure Temperature in Höhe von 265° C ermittelt. Die Adhäsion betrug nach 600 Stunden 8,9 MPa. Nach 600 Stunden bei 265° C wurde ein Wert für die PC-Funktion in Höhe von 0,068 gemessen. Der Messzeitpunkt, an dem die PC-Funktion letztmalig einen Wert kleiner als 0,05 eingenommen hatte (t_1) lag bei 300 Stunden. Die PC Funktion betrug zu diesem Zeitpunkt 0,039. Damit war die Bedingung $PC_{600h} > 0,05$ erfüllt (vgl.:

Abbildung 10-1, Figure B2 und B3) und gemäß Tabelle 2 der Task 10 (vgl.: Tabelle 10-2) wurde T_3 auf 295° C und t_3 auf 136 Stunden festgelegt. Der Wert der PC-Funktion nach 136 Stunden bei 295° C betrug 0,047. Damit war die Bedingung $PC_{T_1, t_1} \leq PC_{T_3, t_3}$ erfüllt, denn es gilt: $PC_{265^\circ C, 300h} = 0,039 < PC_{295^\circ C, 136h} = 0,047$. Da ferner die Adhäsion nach 136 Stunden bei 295° C mit 8,6 MPa ebenfalls weit über dem Mindestwert von 0,15 MPa lag, erfüllte die Probe Nr. 4 die Anforderung der Task 10 hinsichtlich der Temperaturstabilität.

Die folgende Abbildung stellt der Verlauf von $\Delta\alpha_s$ und $\Delta\epsilon$ sowie die sich daraus ergebenden Werte der PC-Funktion von Probe Nr. 4 dar:

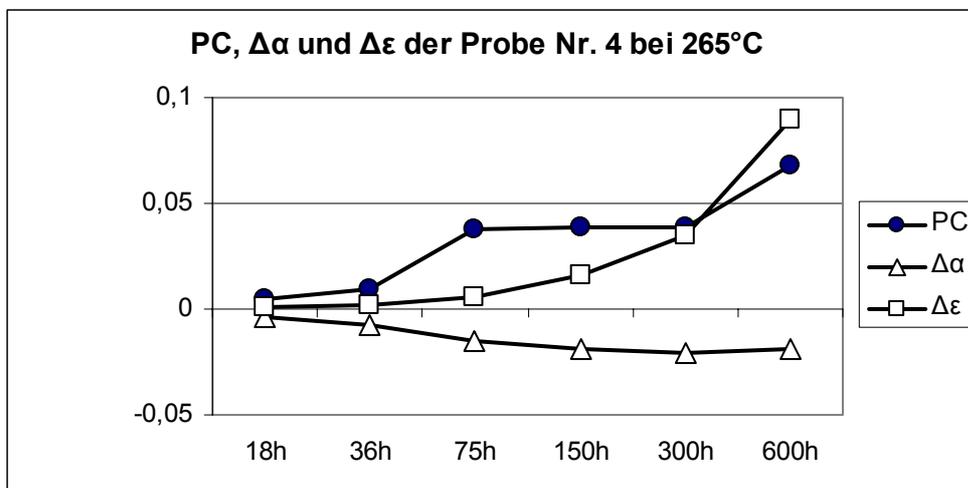


Abbildung 7-7: $\Delta\alpha_s$ und $\Delta\epsilon$ und die Werte der PC-Funktion von Probe Nr. 4

7.8.5. Probe Nr. 5

Für **Probe Nr. 5** wurde eine Exposure Temperature von 265° C ermittelt. Die Adhäsion betrug nach 600 Stunden 1,8 MPa und unterschritt damit nicht den zulässigen Grenzwert. Nach 600 Stunden bei 265° C betrug der Wert der PC-Funktion 0,23. Der Messzeitpunkt, an dem die PC-Funktion letztmalig einen Wert kleiner als 0,05 eingenommen hatte (t_1) lag bei 75 Stunden. Die PC Funktion betrug zu diesem Zeitpunkt 0,025

Da die PC-Funktion nach 150 Stunden den Wert von 0,05 überstieg, wurde gemäß Tabelle B 2 der Task 10 als 235° C als T_2 und 289 Stunden als t_2 ermittelt (vgl. Abbildung 10-1, Figure B2 und B4).

Nach 289 Stunden bei 235°C betrug der Wert der PC-Funktion 0,013 und die entsprechende Adhäsion 2,3 MPa. Damit war die Bedingung $PC_{T_2, t_2} \leq PC_{T_1, t_1}$ erfüllt denn es gilt: $PC_{255^\circ C, 289h} = 0,013 < PC_{265^\circ C, 75h} = 0,013$. Da ferner die Adhäsion nach 289 Stunden bei 235°C mit 2,3 MPa ebenfalls weit über dem Mindestwert von 0,15 MPa lag, erfüllt die Probe Nr. 5 die Anforderung der Task 10 hinsichtlich der Temperaturstabilität.

Die folgende Abbildung stellt der Verlauf von $\Delta\alpha_s$ und $\Delta\varepsilon$ sowie die sich daraus ergebenden Werte der PC-Funktion von Probe Nr. 5 dar:

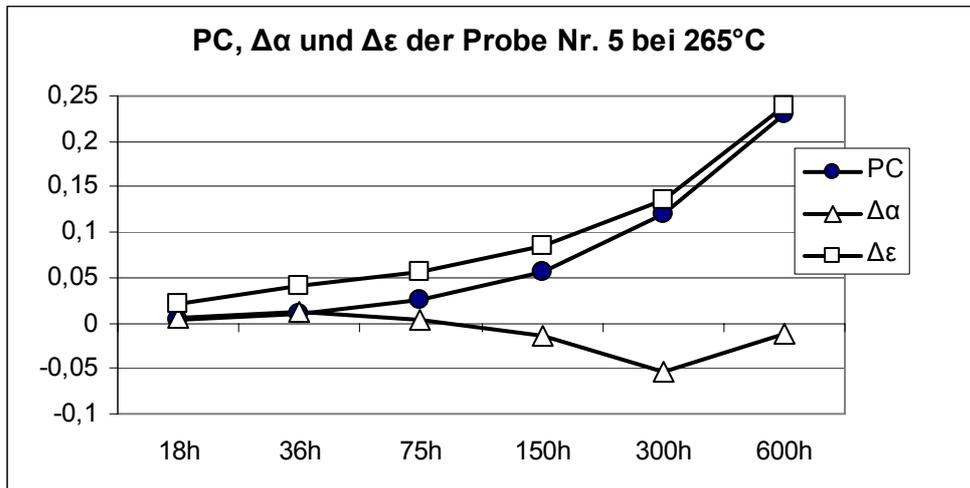


Abbildung 7-8: $\Delta\alpha_s$ und $\Delta\varepsilon$ und die Werte der PC-Funktion von Probe Nr. 5

7.8.6. Zusammenfassung der Ergebnisse der Temperaturprüfung

Die folgende Abbildung stellt den Verlauf der PC-Funktion aller Proben während der Prüfung der Temperaturbeständigkeit graphisch dar:

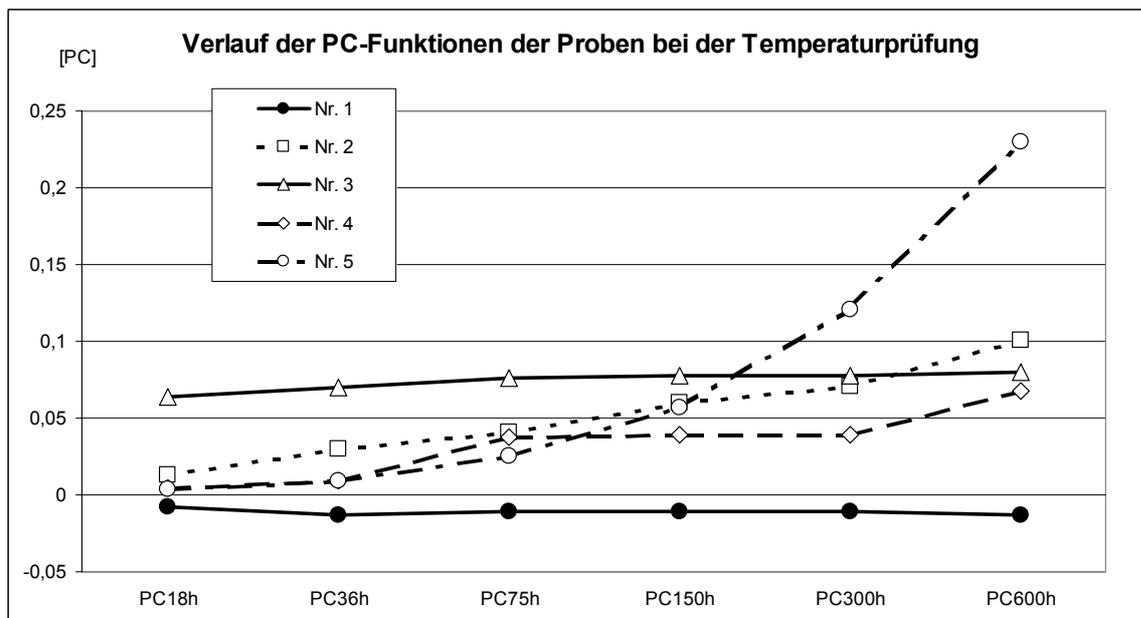


Abbildung 7-9: Verlauf der PC-Funktion während der Prüfung der Temperaturstabilität

Erkennbar ist, dass die PC-Funktion der galvanisch hergestellten Beschichtung (Probe Nr. 1) aufgrund der Abnahme der thermischen Emission bei gleichbleibender Absorption über alle Messpunkte kleiner als Null ist. Bei der Beschichtung auf Aluminium-Substrat (Probe Nr. 3) nimmt die PC-Funktion vom

ersten Messzeitpunkt (PC18h) an Werte größer als 0,05 an, verläuft dann aber auf gleichem Niveau mit sehr geringer Steigung.

Die PC-Funktion der Proben Nr. 2 und Nr. 4 starten unterhalb der 0,05-Marke und weisen eine moderate, annähernd lineare Steigung auf. Zwischen den Messzeitpunkten PC_{18h} und PC_{600h} nehmen die Werte der PC-Funktionen um den Faktor 8 (Proben Nr. 4) bzw. den Faktor 14 (Probe Nr. 2) zu. Ursächlich für diese Steigung der PC-Funktionen war in beiden Fällen die Abnahme der Absorption und die Zunahme der Emission. Während die Absorptionsabnahme in beiden Fällen um den Faktor 5 erfolgte und somit in der gleichen Größenordnung lag, sind bei der Zunahme der thermischen Emissionen signifikante Unterschiede festzustellen. So nahm bei der Probe Nr. 2 die Emission um den Faktor 10 zu, während bei der Probe Nr. 4 dieser Faktor mit einem Wert von 90 ein Vielfaches beträgt. Diese starke Zunahme der Emission ist wesentlich verantwortlich für die stärkere Steigung der PC-Funktion von Probe Nr. 4. Allerdings ist dabei einzuschränken, dass die Probe Nr. 4 mit einem $\Delta\varepsilon$ von 0,001 nach 18 Stunden eine wesentlich geringere Änderung der Emission aufweist als Probe Nr. 2 die zum selben Zeitpunkt ein $\Delta\varepsilon$ von immerhin 0,015 aufweist. Zudem weist die Probe Nr. 4 bei der Änderung der Absorption Besonderheit auf. So nimmt die Absorption zunächst ähnlich ab wie die Emission zunimmt. Zum Zeitpunkt PC_{300h} weist sie dann die größte Reduktion auf um sich dann Zeitpunkt PC_{600h} wieder zu stabilisieren.

Der Anstieg der PC-Funktion ist daher zwischen diesen beiden Zeitpunkten hauptsächlich durch die starke Zunahme der Emission verursacht.

Probe Nr. 5 beginnt ebenfalls unterhalb der 0,05 Marke, weist allerdings eine annähernd exponentielle Zunahme auf. Zwischen den Messzeitpunkten PC_{18h} und PC_{600h} nehmen die Werte der PC-Funktionen um den Faktor 58 zu. Dies ist die stärkste Zunahme der PC-Funktion aller Proben. Diese Zunahme ist hauptsächlich durch die Zunahme der Emission verursacht und zu einem geringeren Teil der abnehmenden Absorption geschuldet.

7.9. Prüfung der Feuchtebeständigkeit

Alle Proben wurden bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 95% und bei einer Temperatur von 40° C mit einer um 5°C höheren Temperatur in der Klimakammer gemessen. Die Messung der Emission und der Absorption erfolgte nach 80, 150, 300 und nach 600 Stunden. Nach 600 Stunden wurde die Adhäsion gemessen. Folgende Tabelle zeigt die Ergebnisse der Prüfung der Feuchtebeständigkeit:

Proben Nr.	1	2	3	4	5
PC80_h	-0,008	0,008	0	0,001	0,002
$\Delta\alpha_{s80h}$	0	-0,002	0,001	0,001	-0,001
$\Delta\varepsilon_{80h}$	-0,017	0,012	0,001	0,003	0,002
PC150_h	-0,001	0,014	0	0,001	0,004
$\Delta\alpha_{s150h}$	0,001	-0,003	0	0,001	-0,001
$\Delta\varepsilon_{150h}$	-0,018	-0,018	0,001	0,004	0,006
PC300_h	0	0,017	0,001	0,004	0,007
$\Delta\alpha_{s300h}$	-0,001	-0,003	0	-0,001	-0,001
$\Delta\varepsilon_{300h}$	-0,002	0,027	0,003	0,006	0,012
PC600_h	0	0,021	0,001	0,006	0,011
$\Delta\alpha_{s600h}$	-0,002	-0,005	0	-0,003	-0,003
$\Delta\varepsilon_{600h}$	-0,004	0,033	0,001	0,007	0,016
Adhäsion nach 600h	4 MPa	1 MPa	5,5 MPa	10,4 MPa	5,6 MPa
PC_{85h, 60°C}		0,023			0,013
Adhäsion		7,2 MPa nach 85 h bei 60°C			3,2 MPa nach 85 h bei 60°C

Tabelle 7-4: Ergebnisse der Kondensationsmessung

Probe Nr. 1 wies hinsichtlich Emission während der gesamten Prüfung negative Werte auf. Das bedeutet, dass sich die optische Eigenschaft hinsichtlich der Emission verbessert. Die Absorption nimmt ebenfalls ab, mit Ausnahme des ersten Messzeitpunktes nach 80 Stunden. Zu diesem Zeitpunkt war keine Veränderung der Absorption festzustellen. (vgl.: Abbildung 10-3).

Die Werte der PC-Funktion, die sich aus diesen Änderungen der optischen Eigenschaften ergeben, sind als einzige von allen Proben durchweg sehr klein bzw. gleich null. (vgl.: Abbildung 7-10: Verlauf der PC-Funktionen während der Feuchteprüfung). Damit erzielt die galvanisch hergestellte Schicht von allen Proben die beste Beständigkeit gegenüber Feuchte.

Da die PC-Funktion kleiner als 0,01 und die Adhäsion größer als 0,15 MPa war, gilt diese Beschichtung gemäß Task 10 als kondensationsbeständig.

Probe Nr. 2 wies überwiegend eine erhebliche Zunahme der thermischen Emission auf während die Absorption durchweg abnimmt. Damit nimmt die PC-Funktion durchweg positive Werte an, was insgesamt einer Verschlechterung der optischen Eigenschaften bedeutet. (vgl.: Abbildung 10-4) Zu allen Messzeitpunkten nimmt die PC-Funktion die höchsten Werte aller Proben ein. (vgl.: Abbildung 7-10: Verlauf der PC-Funktionen während der Feuchteprüfung) Damit weist die Beschichtung die größte Abnahme der optischen Leistungsfähigkeit bzw. die schlechteste Beständigkeit gegenüber Feuchte von allen Proben auf.

Da die PC-Funktion zwischen 0,015 und 0,05 lag wurden die optischen Eigenschaften der Probe unter den gleichen Bedingungen nach 85 Stunden bei 60°C erneut gemessen.

Der gemessene Wert der PC-Funktion betrug 0,23. Damit war die Bedingung $PC_{60^\circ\text{C}, 85\text{h}} = 0,23 > PC_{40^\circ\text{C}, 660\text{h}} = 0,021$ erfüllt. Da auch die Adhäsion mit einem Wert von 7,2 MPa oberhalb des Grenzwertes lag, gilt diese Beschichtung gemäß Task 10 als kondensationsbeständig.

Probe Nr. 3 wies eine geringe Zunahme der Emission und hinsichtlich der Absorption keinerlei Veränderungen auf. Damit nimmt die PC-Funktion Werte zwischen null und 0,001 an. (Vgl.: Abbildung 10-5). Dies stellt eine sehr geringe Veränderung der optischen Eigenschaften unter Kondensationsbedingungen dar. Damit weist diese Beschichtung die geringste Veränderung ihrer optischen Eigenschaften unter Kondensationsbedingungen von allen nicht-galvanischen Schichten auf. (vgl.: Abbildung 7-10: Verlauf der PC-Funktionen während der Feuchteprüfung).

Da die PC-Funktion kleiner als 0,01 und die Adhäsion größer als 0,15 MPa war, gilt diese Beschichtung gemäß Task 10 als kondensationsbeständig.

Probe Nr. 4 wies durchweg eine Zunahme der Emission auf. Hinsichtlich der Absorption ist nach 80 sowie nach 150 Stunden zunächst eine geringe Zunahme zu verzeichnen. Nach 300 sowie nach 600 Stunden nahm die Absorption jedoch geringfügig ab. (vgl.: Abbildung 10-6).

Damit entspricht der Verlauf der PC-Funktion dieser Beschichtung einen fast stetigen Verlust der optischen Leistungsfähigkeit durch Kondensationsdegradation. (vgl.: Abbildung 7-10: Verlauf der PC-Funktionen während der Feuchteprüfung).

Da die PC-Funktion kleiner als 0,01 und die Adhäsion größer als 0,15 MPa war, gilt diese Beschichtung gemäß Task 10 als kondensationsbeständig.

Probe Nr. 5 wies durchweg eine Zunahme der Emission bei gleichzeitiger Abnahme der Absorption auf. (vgl.: Abbildung 10-7). Der Verlauf der PC-Funktion ist entsprechend stetig steigend. Dies entspricht einem kontinuierlichen Verlust der optischen Leistungsfähigkeit dieser Beschichtung unter Kondensationsbedingungen. (vgl.: Abbildung 7-10: Verlauf der PC-Funktionen während der Feuchteprüfung)

Da die PC-Funktion zwischen 0,010 und 0,05 lag wurden die optischen Eigenschaften der Probe unter den gleichen Bedingungen nach 85 Stunden bei 60°C erneut gemessen.

Der gemessene Wert der PC-Funktion betrug 0,013. Damit war die Bedingung $PC_{60^\circ\text{C}, 85\text{h}} = 0,013 > PC_{40^\circ\text{C}, 660\text{h}} = 0,011$ erfüllt. Da auch die Adhäsion mit einem Wert von 3,2 MPa oberhalb des Grenzwertes lag, gilt diese Beschichtung gemäß Task 10 als kondensationsbeständig.

Die folgende Abbildung stellt die Verläufe der PC-Funktionen aller Proben während der Prüfung der Feuchtbeständigkeit zusammenfassend dar:

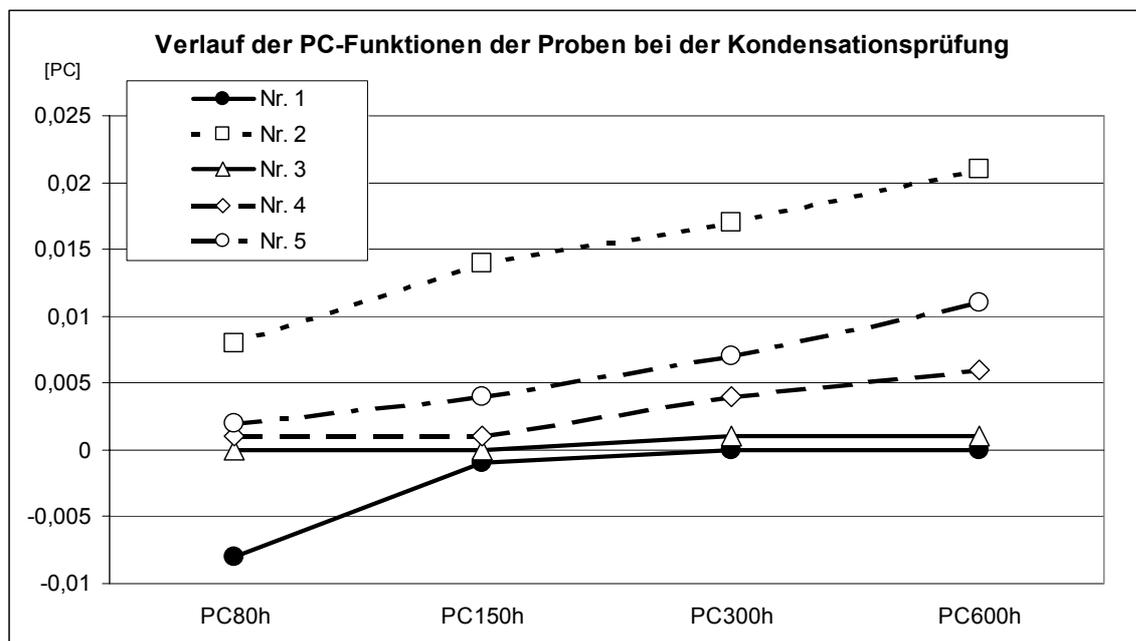


Abbildung 7-10: Verlauf der PC-Funktionen während der Feuchteprüfung

7.10. Prüfung der Beständigkeit gegen atmosphärische Korrosion

Die Prüfung der Beständigkeit gegen atmosphärische Korrosion erfolgte bei 20°C, einer relativen Luftfeuchtigkeit von 95% sowie einer Konzentration von SO₂ in Höhe von 1 ppm. Unter diesen Bedingungen wird bei der benutzten Klimakammer die Korrosionsrate von Zink in Höhe von 2,7 g/m² nach 230 Stunden und eine Korrosionsrate 7,5 g/m² nach 660 Stunden erreicht. Entsprechend erfolgte die Messung der Emission und der Absorption nach 120, 230 sowie nach 660 Stunden. Nach 660 Stunden wurde ebenfalls die Adhäsion gemessen.

Folgende Tabelle zeigt die Ergebnisse der Prüfung der Beständigkeit gegen atmosphärische Korrosion:

Proben Nr.	1	2	3	4	5
PC_{120h}	-0,006	0,005	0	0,003	0,007
$\Delta\alpha_{S_{120h}}$	0	-0,004	-0,001	0	-0,005
$\Delta\varepsilon_{120h}$	-0,013	0,002	-0,002	0,006	0,005
PC_{230h}	-0,006	0,005	0	0,009	0,025
$\Delta\alpha_{S_{230h}}$	0	-0,006	-0,001	-0,003	-0,012
$\Delta\varepsilon_{230h}$	-0,018	-0,018	-0,001	0,012	0,026
PC_{660h}	0	0,023	0	0,02	0,047
$\Delta\alpha_{S_{660h}}$	0	-0,007	0	-0,006	-0,017
$\Delta\varepsilon_{660h}$	-0,009	0,032	-0,001	0,028	0,059
Adhäsion nach 660 h	6,2 MPa	3,5 MPa	4,1 MPa	3,5 MPa	2,3 MPa

Tabelle 7-5: Ergebnisse der SO₂ Prüfung

Probe Nr. 1 wies über alle Messzeitpunkte eine Abnahme der Emission auf. Die Absorption blieb hingegen über alle Zeitpunkte unverändert. Entsprechend verläuft die PC-Funktion im negativen Be-

reich, was einer Verbesserung der optischen Leistungsfähigkeit entspricht und nimmt nach 660 Stunden den Wert Null ein. (vgl.: Abbildung 10-8). Damit besitzt die galvanische Schicht die höchste Beständigkeit gegenüber atmosphärischer Korrosion von allen Proben (vgl.: Abbildung 7-11).

Da die PC-Funktion kleiner als 0,01 ist und die Adhäsion größer als 0,15 MPa, gilt diese Beschichtung gemäß Task 10 als beständig gegen atmosphärische Korrosion sowohl als Typ A als auch als Typ B Kollektor.

Probe Nr. 2 wies überwiegend eine Zunahme der Emission und durchweg eine Abnahme der Absorption auf. Damit nimmt die PC-Funktion zu allen Messzeitpunkten positive Werte an (vgl.: Abbildung 10-9). Mit einem Wert der PC-Funktion in Höhe von 0,23 weist diese Beschichtung den zweithöchsten Verlust der optischen Leistungsfähigkeit unter atmosphärischer Korrosion auf. (vgl.: Abbildung 7-11). Da die PC-Funktion nach 660 Stunden kleiner als 0,05 und die Adhäsion größer als 0,15 MPa war, gilt diese Beschichtung gemäß Task 10 als beständig gegen atmosphärische Korrosion sowohl als Typ A als auch als Typ B Kollektor.

Probe Nr. 3 wies über alle Messzeitpunkte eine Abnahme der Emission auf. Dies entspricht hinsichtlich der thermischen Emission einer Verbesserung der optischen Leistungsfähigkeit.

Die Absorption nahm geringfügig ab bzw. blieb nach 600 Stunden konstant (vgl.: Abbildung 10-10). Die Werte der PC-Funktion sind damit über alle Messzeitpunkte null. Damit weist diese Beschichtung die höchste Beständigkeit gegenüber atmosphärischer Korrosion von allen nicht-galvanischen Proben auf (vgl.: Abbildung 7-11).

Da die PC-Funktion nach 660 Stunden kleiner als 0,05 und die Adhäsion größer als 0,15 MPa war, gilt diese Beschichtung gemäß Task 10 als beständig gegen atmosphärische Korrosion sowohl als Typ A als auch als Typ B Kollektor.

Probe Nr. 4 wies eine konstante Zunahme der Emission auf. Die Absorption blieb zunächst unverändert und nahm dann geringfügig ab (vgl.: Abbildung 10-11). Die Werte der PC-Funktion sind damit durchweg positiv (vgl.: Abbildung 7-11).

Da die PC-Funktion nach 660 Stunden kleiner als 0,05 und die Adhäsion größer als 0,15 MPa war, gilt diese Beschichtung gemäß Task 10 als beständig gegen atmosphärische Korrosion sowohl als Typ A als auch als Typ B Kollektor.

Probe Nr. 5 wies für alle Messzeitpunkte eine beträchtliche Zunahme der Emission sowie eine Abnahme der Absorption auf (vgl.: Abbildung 10-12). Damit nimmt die PC-Funktion in allen Messzeitpunkten positive Werte an. Zu allen Messzeitpunkten weist die Beschichtung den höchsten Verlust der optischen Leistungsfähigkeit unter atmosphärischer Korrosion von allen Proben auf. Nach 660 Stunden ist die PC-Funktion mit einem Wert von 0,47 mehr als doppelt so hoch wie bei Probe Nr. 2 und Nr. 4. Damit weist diese Beschichtung mit deutlichem Abstand die geringste Beständigkeit gegenüber der atmosphärischen Korrosion von allen Proben auf. (vgl.: Abbildung 7-11).

Da die PC-Funktion nach 660 Stunden kleiner als 0,05 und die Adhäsion größer als 0,15 MPa war, gilt diese Beschichtung gemäß Task 10 als beständig gegen atmosphärische Korrosion sowohl als Typ A als auch als Typ B Kollektor.

Die folgende Abbildung stellt die Verläufe der PC-Funktionen aller Proben während der Prüfung der Beständigkeit gegen atmosphärische Korrosion dar:

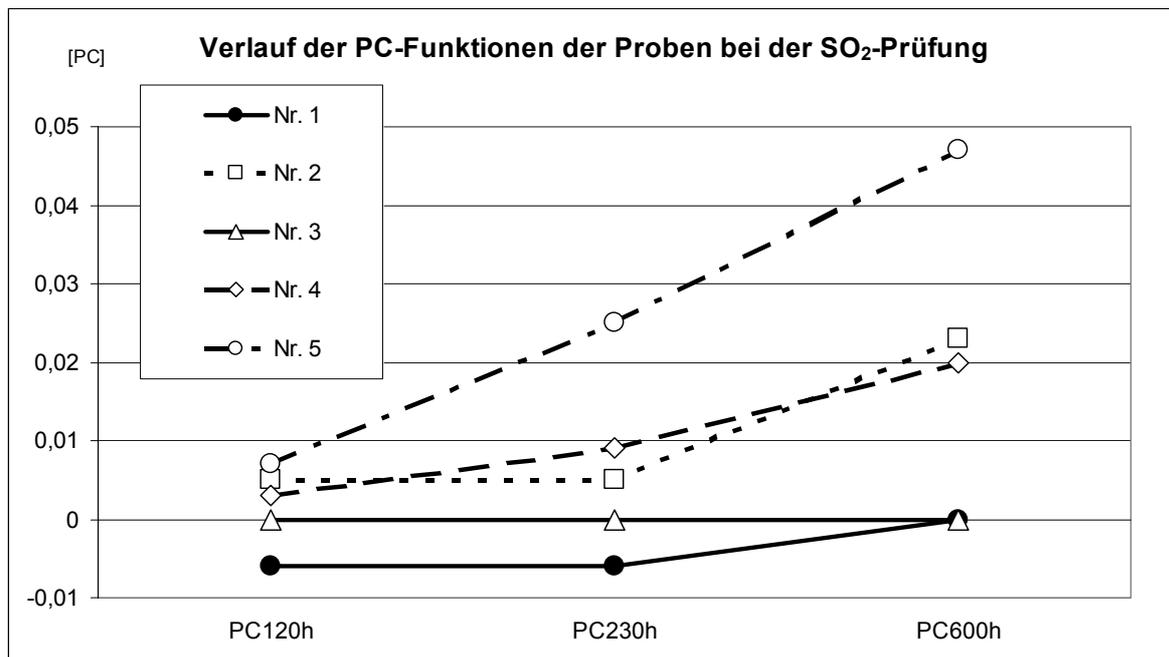


Abbildung 7-11: Verlauf der PC-Funktionen während der SO₂-Prüfung

7.11. Zusammenfassung der Ergebnisse der Task 10 Prüfung

Bei den geprüften Beschichtungen handelte es sich um Proben, wie sie im März 2006 auf dem Markt angeboten und in Kollektoren verbaut wurden. Insofern treffen die Ergebnisse der Task 10 Prüfungen Aussagen über das jeweilige Produkt, wie es zu diesem Zeitpunkt auf dem Markt vorhanden war. Aussagen über zurückliegende bzw. zukünftige Zeitpunkte können ohne weitere Annahmen nicht getroffen werden. So müsste für derartige Aussagen insbesondere angenommen werden, dass die für die Produkteigenschaften wesentlichen Produktionsbedingungen in der Vergangenheit bzw. in der Zukunft vollständig identische waren bzw. sein werden. Gegen eine derartige Annahmen sprechen eine Reihe von möglichen Änderungen im Produktionsprozess. So wurde vom Hersteller der galvanisch hergestellten Beschichtung explizit darauf hingewiesen, dass im März 2006 die Messapparatur zur Prüfung der optischen Schichteigenschaften nicht wie vorgesehen funktionierte und daher möglicherweise die sonst üblichen Parameteranpassungen der galvanischen Bäder nicht erfolgte. Weitere diesbezügliche Hinweise wurden vom Hersteller der Beschichtung auf Aluminium-Substrat geäußert. Dabei wurde darauf verwiesen, dass es sich bei den beprobten Beschichtungen um zurückgerufene Produktionsergebnisse handeln könnte, welche die interne Qualitätskontrolle nicht bestanden hätten. Allerdings liegen keine Hinweise über mögliche Rückrufaktionen in dem besagten Zeitraum vor.

Vor diesem Hintergrund beziehen sich die folgenden Aussagen auf Beschichtungen, wie sie im besagten Zeitraum auf dem Markt vorgefunden wurden.

Hinsichtlich der Unterscheidung zwischen galvanisch hergestellten Schichten auf der einen Seite und nicht-galvanisch hergestellten Schichten auf der anderen Seite, haben die Task 10 Prüfungen ergeben, dass die galvanisch hergestellten Beschichtungen sowohl hinsichtlich Temperatur als auch hinsichtlich Kondensation und atmosphärischen Korrosion mit Abstand die größte Beständigkeit aufweisen. Statt einer Verschlechterung der optischen Eigenschaften, war zumindest in der Anfangszeit der Schichtbeanspruchung sogar eine Verbesserung der optischen Eigenschaften festzustellen. Bei der galvanisch hergestellte Beschichtung wurde als einzige Probe zu keinem Zeitpunkt die zulässige Veränderung der optischen Eigenschaft überschritten. Allerdings ist festzustellen, dass ihre optischen Eigenschaften hinsichtlich der thermischen Emission, im unbeanspruchten Zustand deutlich schlechter sind als die der nicht-galvanisch hergestellten Beschichtungen. Ihre Absorption wiederum ist – wenn auch mit relativ hoher Schwankung – deutlich höher als die der nicht-galvanischen Beschichtungen.

Die Beschichtung auf Aluminiumsubstrat hat als einzige Beschichtung die Task 10 Prüfung nicht bestanden. Bei der Schichtbeanspruchung mittels Temperatur wurde die zulässige Änderung der optischen Eigenschaften bereits zu einem sehr frühen Zeitpunkt überschritten. Allerdings ist festzuhalten, dass sowohl im weiteren Verlauf der Temperaturbeanspruchung, als auch bei der Beanspruchung durch Kondensation und atmosphärischer Korrosion, diese Schicht nur geringe Änderung der optischen Eigenschaften festgestellt wurden.

Die anderen nicht-galvanisch hergestellten Beschichtungen weisen unterschiedliche Testergebnisse auf. Die Proben 2 und 4 weisen bei der Temperatur und der Kondensationsbeanspruchung sehr ähnliche Veränderungen ihrer optischen Eigenschaften auf. Wobei die Probe Nr. 2 am Ende höhere Änderungen der optischen Eigenschaften aufweist. Die Ähnlichkeit zwischen diesen beiden Beschichtungen war insoweit zu erwarten, als es sich um dasselbe Beschichtungsverfahren handelt. Allerdings wurde bei Beschichtung Nr. 2 eine erhebliche Änderung der optischen Eigenschaft während der Kondensation festgestellt. Dies kann gedeutet werden als mögliche Varianz der Produkteigenschaft, die auch innerhalb derselben Beschichtungstechnologie zur Verfügung steht.

Die Beschichtung Nr. 5 weist bei Temperatur und atmosphärische Korrosion zum Ende der Beanspruchung die größte Veränderung der optischen Eigenschaft auf.

7.12. Lebensdauerbestimmung

Üblicherweise zielt die Task 10 Prüfung auf eine Beständigkeit der Beschichtung gegenüber Temperatur, Kondensation und atmosphärischer Korrosion während einer Lebensdauer von 25 Jahren. Damit soll sichergestellt werden, dass die Beschichtung und damit der Absorber seine Funktion 25 Jahre hinreichend erfüllt.

Das Ergebnis der Task 10 lautet daher üblicherweise lediglich, ob ein Beschichtung ihre optische Funktion über diesen Zeitraum gewährleisten kann oder nicht.

Im vorliegenden Vorhaben interessierte aber insbesondere die Frage, inwieweit die höhere Umweltbelastung durch die galvanische Beschichtung durch eine längere Lebensdauer kompensiert wird. Daher wurden die Verläufe der PC-Funktion der geprüften Beschichtungen benutzt, um diejenige Zeitspanne in Jahren zu berechnen, innerhalb derer die Veränderung der optischen Eigenschaften den Grenzwert nicht überschreiten. Allerdings konnte diese Vorhersage der Lebensdauer (Prediction of service life) nur für die Proben Nr. 2, 3, 4 und 5 durchgeführt werden, da die PC-Funktion der Probe Nr. 1 den zulässigen Grenzwert auch nach dem letzten Zeitpunkt der Messung nicht überschritt. Damit war für diese Beschichtung eine Modellierung zur Vorhersage ihrer Lebensdauer nicht möglich. Es kann lediglich festgestellt werden, dass die Probe Nr.1 eine Lebensdauer größer als alle anderen besitzt. Diese Aussage kann nach erfolgter Vorhersage der Lebensdauer der anderen Beschichtungen noch präzisiert werden.

Die mathematische Modellierung zur Vorhersage der Lebensdauer erfolgt im wesentlichen mit Hilfe der sogenannten Arrhenius-Funktion. Dabei wird davon ausgegangen, dass es eine Korrelation zwischen dem Verlauf der PC-Funktion und der Lebensdauer gibt. Dies ist allerdings nicht für alle Zeitpunkte richtig, vielmehr wird die PC-Funktion zu einem beliebigen Zeitpunkt eine stabile Höhe erreichen, denn die optischen Eigenschaften können sich nicht immer weiter ändern (vgl.: Anhang 10.3).

Die folgende Abbildung zeigt die so modellierten Werte der PC Funktion über die Zeit.

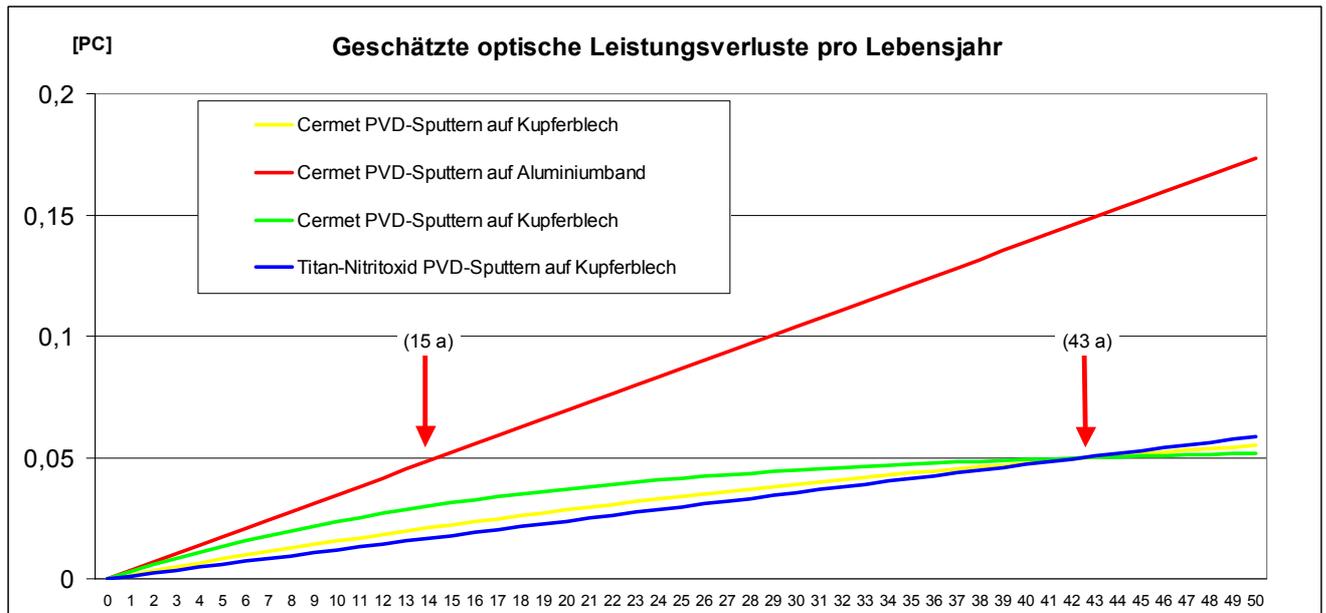


Abbildung 7-12: Verlauf der PC-Funktion über die Zeit (Referenzjahre)²⁸

Der obigen Abbildung ist zu entnehmen, dass die zu erwartende Lebensdauer der Beschichtungen Nr. 2, 4 und 5 zwischen 42 und 43 Jahren liegt während für die Beschichtung Nr. 3 die geschätzte Lebensdauer bei 15 Jahren liegt.

Damit können hinsichtlich der galvanisch hergestellte Beschichtung Nr. 1 die Aussagen insoweit präzisiert werden, als dass ihre zu erwartende Lebensdauer größer 43 Jahre ist.

Bei der Vorhersage der zu erwartenden Lebensdauer müssen folgende Einschränkungen gemacht werden.

- Die hier berechnete Vorhersage bezieht lediglich Degradation aufgrund von Temperatur und Kondensation ein. Andere Effekte z. B. unterschiedliche korrosive Bestandteile der Atmosphäre werden nicht berücksichtigt. Sie können die ausgerechnete zu erwartende Lebensdauer verringern.
- Absorber und ihre Beschichtungen sind häufig sehr empfindlich gegenüber einer Kondensation. In der hier berechneten Vorhersage wird Kondensation definiert als ein Vorgang der bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von über 95% eintritt. Eventuell ist die Zeit, während der Kondensation eintritt, überschätzt. In diesem Fall wäre die ausgerechnete zu erwartende Lebensdauer zu gering.
- In der Verteilungsfunktion der Temperaturfrequenz wird die Stagnation mit einem Monat veranschlagt. In dieser Zeit wird von hohen Temperaturen ausgegangen. Die erreichten Temperaturen während der Stagnation ergeben sich durch die Höhe der solaren Absorption und der thermischen Emission. Das wiederum bedeutet, dass die Verteilungsfunktion der Temperaturfrequenzen über die Jahre sich verändert, da sich die Absorption und die Emission durch Schichtdegradation ändern. Daher dürften sich die Stillstandtemperaturen durch die Schichtdegradation verringern. In diesem Fall wäre die ausgerechnete zu erwartende Lebensdauer zu gering.

²⁸ vgl.: Figure 3-III auf Seite 33 in Anhang 8.8

8. Umweltstandards

8.1. Grundsätzlich Anforderungen an Umweltstandards

Vor dem Hintergrund der im vorliegenden Vorhaben behandelten Fragestellungen sind bei der Entwicklung von fortschrittlichen technischen Umweltstandards für solarthermischer Kollektoren einige grundsätzliche Rahmenbedingungen wirksam. Zusammenfassend stellen sich diese Rahmenbedingungen folgendermaßen dar:

Die den Umweltstandards zugrundeliegten Umweltindikatoren und deren Beurteilungssysteme sollten einer Reihe von Anforderungen genügen. Zu diesen zählen: Aussagekraft, Richtungssicherheit, Ganzheitlichkeit, Einfachheit, Vergleichbarkeit, Transparenz, Kommunizierbarkeit und Quantifizierbarkeit. Aufgrund der europäischen Anforderungen an Umweltbeihilfen, sollten Umweltstandards, die, wie im vorliegenden Vorhaben, für Förderprogramme verwendet werden sollen, insbesondere über den Stand der Technik hinausgehen und damit marktdifferenzierend wirken.

Ferner sollen die Umweltstandards genutzt werden, um den Ausbau der Solarthermie zu befördern. Dabei ist zu beachten, dass die Förderung lediglich die Mehrkosten gegenüber traditionellen und hier insbesondere fossiler Energietechnologien kompensieren. Daraus ergibt sich auch die Zielsetzung die Umweltstandards zu einer technologiedifferenzierten Förderung zu nutzen. Dabei sind diejenigen solarthermischen Anwendungen und Technologien, die über bisher wenig erschlossene Marktpotentiale verfügen und sich daher auch meist noch durch eine größere Wettbewerbsferne auszeichnen, besonders zu fördern.

8.2. Substituierte fossile Primärenergie

Im wesentlichen entspricht die Umweltleistung einer solarthermischen Anlage ihrem Vermögen, fossile Primärenergie zu substituieren.

Daher ist es eine wesentliche Rahmenbedingung bei der Entwicklung von Umweltstandards, die Höhe während der gesamten Betriebsdauer einer Anlage eingesparten Primärenergie zu berücksichtigen. Diese Berücksichtigung ist auch im Hinblick auf die Ergebnisse des wissenschaftlichen Workshops vom 08.11.2005 anzustreben.

Die tatsächlich eingesparte Primärenergie entspricht in zweifacher Hinsicht der Umweltleistung einer Solaranlage. Zum einen als Vermeidung der mit der substituierten Primärenergie einhergehenden Umweltauswirkungen. Zum anderen muss bei der Bestimmung der tatsächlich eingesparten Primärenergie jene kumulierte Energiemenge in Abzug gestellt werden, welche für Herstellung und Betrieb der Solaranlage aufgewandt wird (z.B. anhand der Maßzahl KEA – Kumulierter Energieaufwand). Zwar wurde während der Analyse der Umweltauswirkungen festgestellt, dass sich, mit Ausnahme der toxischen Substanzen, die wesentlichen Umweltauswirkungen eines Kollektor mit Hilfe des KEAs sehr gut abbilden lassen, gleichwohl beträgt die Höhe des KEAs nur ein Bruchteil der von der Anlage während ihrer Lebensdauer erbrachten energetischen Leistung. So lag in einer Stichprobe von 16 Kollektoren der KEA für Herstellung, Wartung und Betrieb zwischen 174-448 kWh pro m² Kollektorfläche, während der Kollektorertrag zwischen 421 bis 609 kWh/m² Kollektorfläche in einem einzigen Jahr betrug. Bezogen auf eine 25jährige Lebensdauer, entspricht dies selbst bei einer alterungsbedingten Ertragsminderung von 5% pro Jahr lediglich 3-5% des solaren Gesamtertrages während der Lebensdauer.

Eine weitere Schwierigkeit liegt in der Bestimmung des KEAs. Zwar existieren diesbezüglich technische Richtlinien (vgl.: VDI 4600), allerdings setzt die Berechnung des Kumulierten Energieaufwands die Kenntnis der verbauten Materialarten, Materialmengen und ihrer spezifischen KEA-Werte voraus. Diesbezüglich existiert in Gestalt der Vergabegrundlage RAL UZ 73 vom Februar 2005 bereits eine praktische Anleitung zur Durchführung der KEA-Berechnung für Solarkollektoren, diese ist aber vorrangig vom Kollektorhersteller (Zeichennehmer) anzuwenden. Angesicht der geringen Bedeutung des kumulierten Energieaufwandes im Verhältnis zum Energieertrag, den eine Solaranlage über ihre Lebensdauer erbringt, scheint dieser Aufwand bei der Bestimmung des KEAs nicht gerechtfertigt.

Daher wird empfohlen, die substituierten fossilen Energiemengen ohne Berücksichtigung des KEAs für die Herstellung zu bestimmen.

Die Höhe der tatsächlichen Energieeinsparung einer Anlage hängt zwar auch von der Höhe des KEAs für die Herstellung, die Wartung und den Betrieb ab, wesentlicher aber von der Leistungsfähigkeit der Anlage, die wiederum maßgeblich vom Kollektorsertrag und dem solaren Deckungsgrad abhängt.

Die genaue Höhe der tatsächlich eingesparten Primärenergie ist jedoch nicht exakt bestimmbar. Dies gilt um so mehr, soll die tatsächlich eingesparte Primärenergie vor Inbetriebnahme der Anlage bestimmt werden. Denn neben Kollektorsertrag und solarem Deckungsanteil, entscheiden auch die tatsächlichen Standortbedingungen, die Installation und ihre Systemanbindung über die Leistungsfähigkeit der Anlage. Ferner sind die Betriebsführung sowie die Alterung und die Lebensdauer der Anlage relevant.

Schließlich entscheidet auch das Nutzungsverhalten sowie die Annahmen über die Art und Weise, wie die substituierte fossile Primärenergie erzeugt und genutzt worden wäre, über die Höhe der tatsächlich eingesparten Energie. Zudem ist die Frage, wie diese Menge an eingesparter Primärenergie prospektiv berechnet und im Rahmen eines Investitionszuschusses berücksichtigt werden soll, umstritten.

Die einfachste Möglichkeit wäre, eine Nutzung der Kollektorserträge unter definierten Standardbedingungen zu Grunde zu legen (z.B.: ITW-Standardbedingungen, die auch in der Vergabegrundlage zum Blauen Engel RAL UZ 73 zugrundegelegt werden). Dort werden standardisierte Annahmen über den solaren Deckungsgrad (allerdings lediglich 40%, was inzwischen meist übertroffen wird), das Nutzungsprofil und weiteren Standortbedingungen getroffen. Dieses Verfahren ist jedoch insoweit fehlerbehaftet, als es aufgrund der angenommenen standardisierten Rahmenbedingungen die realen ertragwirksamen Bedingungen nur eingeschränkt wiedergibt.

Eine andere Möglichkeit besteht darin, zumindest den tatsächlichen solaren Deckungsgrad zu berücksichtigen und nur die anderen ertragwirksamen Rahmenbedingungen standardisiert zu halten. Dies würde es jedoch erforderlich machen, dass der solare Deckungsgrad vor der Antragstellung bekannt ist und der Kollektorsertrag auf dieser Basis errechnet werden müsste. Um die Nutzung einer dafür eigentlich nötigen Simulationssoftware zu umgehen, wäre auch ein Stufenmodell denkbar, welches zu definierten solaren Deckungsraten und ansonsten gleichbleibenden Standardrahmenbedingungen die jeweiligen Kollektorserträge festlegt.

Abschließend wird insbesondere aus Gründen der Vereinfachung empfohlen, bei der Bestimmung der solaren Erträge anerkannte Standardbedingungen ohne Berücksichtigung der tatsächlichen solaren Deckungsraten zu benutzen.

Grundsätzlich sollte eine Förderung auf Grundlage der spezifischen solaren Anlagenleistung erfolgen. Eine derartige Förderung in Euro pro kWh ist nicht nur transparent und leicht kommunizierbar, sondern würde auch als ökonomisches Instrument dem Antragsteller weitgehende Freiheiten lassen, wie er die Anlagenleistung technisch realisiert. Zudem würde ein derartiger Förderung pro kWh im Sinne eines Wärme-EEGs von der auf beiden Workshops einhellig kritisierten Förderung pro m² Kollektorfläche wegführen.

Zusammenfassend wird empfohlen, die Menge an fossiler Primärenergie, welche durch die Solaranlage substituiert wird ohne Berechnung des KEAs und unter aktuellen Standardbedingungen, als Umweltstandard in einer zukünftigen umweltorientierten Förderung zu berücksichtigen.

8.3. Selektive Beschichtungen

Die Ergebnisse aus der Beständigkeitsprüfung der Absorberbeschichtungen haben für die galvanisch hergestellte Beschichtung, sowohl hinsichtlich der Belastung durch Temperatur, als auch durch Kondensation und atmosphärischer Korrosion, mit Abstand die höchsten Beständigkeiten ergeben. Auch hinsichtlich der Vorhersage der Lebensdauer wies die galvanisch hergestellte Beschichtung die höchste Langlebigkeit auf.

Diesem umweltrelevanten Vorteil der längeren Langlebigkeit, ist jedoch die geringere optische Leistungsfähigkeit und insbesondere die Verwendung des krebserregenden sechswertigen Chroms während der Herstellung entgegen zu halten. Bei der vergleichenden Ökobilanz der Beschichtungsverfahren konnte gezeigt werden, dass die galvanischen Verfahren signifikant höhere Chrom VI Emissionen als die nicht-galvanischen Beschichtungsverfahren besitzen. Dies gilt auch für diejenigen Vakuumverfahren, welche metallisches Chrom als Targetmaterial verwenden.

Ein direkter Vergleich von metallischem Chrom und Chromsäure ergibt, dass bei der Herstellung von Chromsäure mehr als dreimal so viel Chrom VI emittiert wird wie bei der Produktion von metallischem Chrom, wie es in der Targetherstellung eingesetzt wird.

Es erscheint jedoch plausibel, dass im Zuge des weiteren Ausbaus sowie der Anwendungsdiversifizierung der Solarthermie die galvanischen Beschichtungen für besondere Anlagenstandorte besser geeignet sind. Dies dürfte insbesondere bei Standorten mit hoher korrosiven Beanspruchung durch die Atmosphäre der Fall sein. In Frage kämen dabei insbesondere maritime Standorte mit hohen atmosphärischen Salzkonzentrationen. Aber auch bei der angestrebten zukünftigen Verwendung der Solarthermie im Bereich der Prozesswärme, dürften die galvanischen Beschichtungen aufgrund ihrer höheren Temperaturbeständigkeit Vorteile besitzen. Diese Vorteile manifestieren sich in einer längeren Lebensdauer dieser Beschichtungen und geringeren Leistungseinbußen während der Alterung. Abschließend wird dieser auch aus Umweltperspektive wesentliche Vorteil als höher erwogen als die Verwendung und die Emission von Chrom VI.

Diese abwägende Schlussfolgerung erscheint insbesondere daher gerechtfertigt, da sowohl bei der Herstellung von Chromsäure als auch bei der Schwarzverchromung davon ausgegangen werden kann, dass der Stand der Technik in der Luftreinhaltung und dem Gewässerschutz sowie die nationalen und internationalen emissionsrechtlichen Vorschriften zu Chrom VI eingehalten werden.

Vor diesem Hintergrund wird davon abgeraten, bei einer zukünftigen umweltorientierten Förderung zwischen galvanisch und nicht-galvanisch hergestellten Absorberbeschichtungen zu unterscheiden.

Ein weiteres Ergebnis der Beständigkeitsprüfung war die geringe Temperaturbeständigkeit und die daraus im wesentlichen resultierende geringere Lebensdauer der Beschichtung auf Aluminium-Substrat. Dieses Ergebnis wird aber relativiert durch die gute Beständigkeit bei Kondensation und atmosphärischer Korrosion. Es muss jedoch angemerkt werden, dass eine Übertragung auf das Produktionsergebnis anderer Zeiten und Chargen vom Hersteller bestritten wird. Ferner ist zu berücksichtigen, dass Aluminium als Absorbermaterial ein klassisches Substitut für Kupfer ist. Aufgrund der sehr dynamischen Preisentwicklung bei Kupfer, steigt der Substitutionsdruck zudem erheblich. Daher würden normative Materialpräferenzen einen schwerwiegenden und sehr tiefgreifenden Eingriff darstellen.

Vor diesem Hintergrund wird davon abgeraten, bei einer zukünftigen umweltorientierten Förderung zwischen den Absorbermaterialien zu differenzieren.

Das Resultat der Beständigkeitsprüfung zeigt jedoch das die Beständigkeiten bei den einzelnen Beanspruchungen und zwischen den verschiedenen Beschichtungen variieren und sich dies auch in der zu erwartenden Lebensdauer niederschlägt.

Es wird daher empfohlen, die erfolgreiche Einhaltung der Beständigkeitsprüfung nach Task 10 als Umweltstandard in einer zukünftigen umweltorientierten Förderung zu berücksichtigen.

8.4. Schwermetallhaltige Lote

Das gängige Weichlot für Kupferfittings ist das Blei-Zinn-Lot L-Sn50Pb. Es besteht zu gleichen Teilen aus Zinn und Blei. Damit ist der Bleianteil nicht zu vernachlässigen. Diese Aussage relativiert sich allerdings insoweit, als es keine Weichlote mit einer Temperaturbeständigkeit über 110°C gibt. Daher werden in der Praxis thermisch belastete Teile hartgelötet. Somit dürfte im Kollektor kein bleihaltiges Weichlot zu finden sein, sondern lediglich in den Rohrverbindungen der hydraulischen Anbindung an Speicher bzw. Heizsystem. Damit jedoch sind bei den Bemühungen, bleifreie Lote zu verwenden, eher die Installationsbetriebe zu adressieren und weniger die Kollektorhersteller.

Hinsichtlich der Substitutionsmöglichkeiten von bleihaltigen Weichloten liegen bislang wenig Erfahrungen vor. Mit Zinn-Silber-Loten L-SnAg5 und dem Zinn-Kupfer-Loten L-SnCu3 und S-Sn67Cu3 existieren zwar bleifreie Substitute, Erfahrungen mit diesen Substituten hinsichtlich ihrer Verwendung im solarthermischen Bereich liegen jedoch nicht vor.

Grundsätzlich gibt es zwar aufgrund der aktuellen Normensetzung, insbesondere in der EU (u.a. WEEE: 2002/96/EG, RoHS: 2002/95/EG), weltweit starke Bemühungen, die bleihaltigen Weichlote durch bleifreie zu ersetzen, diese fokussieren jedoch überwiegend auf den elektrotechnischen und elektronischen Bereich. Es steht jedoch zu vermuten, dass in absehbarer Zeit die Vermeidung von Blei

auch die Verlötung von Kupferfittings und damit das hydraulische System (außerhalb des Kollektors) betreffen wird.

Die Verwendung von bleifreien Weichloten würde einen sehr fortschrittlichen Umweltstandard darstellen. Allerdings fallen diese Lote überwiegend in den Bereich der Installation an und können daher von der Herstellerseite nicht gewährleistet werden.

Es wird daher abgeraten, die Verwendung bleifreier Weichlote als Umweltstandard in einer zukünftigen umweltorientierten Förderung zu berücksichtigen.

Anders verhält es sich bei Hartloten. Sie werden von den Herstellern direkt im Kollektor verwendet. Allerdings ist hier insbesondere Cadmium von Belang (z.B. L-Ag40Cd, L-Ag30Cd). Ihre Anwendung im Trinkwasserbereich ist bereits verboten. Cadmium-freie Hartlote sind zwar auf dem Markt bereits vorhanden (z.B.: L-Ag34Sn, L-Ag44 oder L-Ag55), über ihre Verwendung im Kollektorbereich liegen allerdings nur Einzelerfahrungen vor. Dabei kommen nicht gänzlich Cadmium-freie, sondern lediglich Cadmium-arme Lote zum Einsatz. Es kann zum jetzigen Zeitpunkt keine maximal zulässige Restcadmiummenge festgelegt werden. Eine Anlehnung an die Regelwerke anderer Anwendungsbereiche zur Begrenzung des Cadmumeinsatzes, wie z.B. der europäischen RoHS-Richtlinie, erscheint wegen mangelnder Übertragbarkeit nicht möglich.

Es wird daher empfohlen, die Verwendung cadmiumfreier oder cadmiumarmer Hartloten nicht als Umweltstandard in einer zukünftigen umweltorientierten Förderung zu berücksichtigen

8.5. Altkollektoren

Der Umgang mit Solaranlagen und den Kollektoren nach ihrer Nutzung ist bisher weitgehend ungeklärt. Die installierten Kollektoren stellen ein erhebliches Bestandslager an metallischen und mineralischen Stoffen dar. Dieses für die Sekundärrohstoffwirtschaft zu erschließen, sollte aus Gründen des Ressourcenschutzes und der Ressourceneffizienz ein wichtiges umweltpolitisches Ziel sein. Angesichts der zurückliegenden Dynamik bei der Installation von Solaranlagen, dürften ca. ab dem Jahr 2017 die ersten 100.000 m² Altkollektoren ihre geplante Lebensdauer von 25 Jahren erreicht haben. Es steht zu vermuten, dass die ersten Kollektoren bereits früher aus dem Betrieb gehen, da es sich anfänglich um noch nicht vollausgereifte Pionierprodukte handelte.

Angesichts dieser Situation ist die Entwicklung eines Rücknahmesystems, das die Elemente selektiver Rückbau, getrennte Erfassung, Demontage und Einschleusung in die bestehenden stofflichen Wirtschaftskreisläufe umfasst, dringend geboten.

Vor diesem Hintergrund sind bezüglich fortschrittlicher Umweltstandards zwei Aspekte von Bedeutung: Die recyclinggerechte Konstruktion und die Rücknahmeverpflichtung. Die Rücknahmeverpflichtung ist bereits seit langem Bestandteil der Vergabegrundlage RAL UZ 73 zum Blauen Engel. Zudem weist die RAL UZ 73 eine Reihe weiterer umweltbezogene Anforderungen hinsichtlich Dämmmaterialien, Wärmeträgerfluid und Produktinformationen auf und ist ferner eine marktdifferenzierende Produktkennzeichnung mit deren Hilfe den Anforderungen des europäischen Umweltbeihilferahmens entsprochen werden kann, nur dann Investitionsbeihilfen zu gewähren, wenn der Stand der Technik übertroffen wird. (vgl.: Kap.: 8.7)

Es wird daher empfohlen, die Einhaltung der Vergabegrundlage RAL UZ 73 als Umweltstandard in einer zukünftigen umweltorientierten Förderung zu berücksichtigen.

Hinsichtlich der recyclinggerechten Konstruktion könnte prinzipiell auf die einschlägige VDI-Richtlinie 2243²⁹ zurückgegriffen werden. Allerdings besitzen solarthermische Kollektoren als technische Produkte eine eher geringe Komplexität und eine geringe Materialvielfalt. Zudem werden überwiegend hochpreisige Materialien eingesetzt. Daher erscheint die Nutzung der VDI Richtlinie 2243 nicht geeignet, zumal es sich bei dieser Richtlinie lediglich um eine Handlungsempfehlung handelt

Es wird daher empfohlen, die Einhaltung der VDI Richtlinie 2243 nicht als Umweltstandard in einer zukünftigen umweltorientierten Förderung zu berücksichtigen.

²⁹ VDI Richtlinie 2243: „Konstruieren recyclinggerechter technischer Produkte“

8.6. Technische Normen

Für den Bereich Solarthermie existieren mit der DIN EN 12975 -1 und -2³⁰, DIN EN 12976 -1 und 2³¹ sowie DIN EN 12977-1 bis -3³² technische Normen für Sonnenkollektoren, vorgefertigte Anlagen sowie kundenspezifisch gefertigte Anlagen und Warmwasserspeichern (vgl.: DRÜCK 2001).

Sie definieren Mindestanforderungen hinsichtlich Sicherheit und Qualität an die Produkte, Testmethoden zu ihrer Überprüfung und Methoden zur Ermittlung der thermischen Leistungsfähigkeit. Damit wirken sie auch auf die Langlebigkeit. In geringem Umfang behandeln sie ferner Anforderungen an den Umweltschutz. So sind in der EN 12975-1 im informativen, also nicht normativen Anhang C, Empfehlungen zum Wärmeträgerfluid (nicht toxisch, keine Haut- und Augenreizung, nicht wasserunreinigend und biologische vollkommen abbaubar), zu den Dämmstoffen (keine FCKW-Verwendung bei der Herstellung, keine Ausgasung von toxischen und haut- oder augenreizenden Gasen) und zum Recycling der Kollektorwerkstoffe (Vermeidung oder Verringerung der Verwendung nicht-recyclingfähiger Materialien) enthalten.

Aufbauend auf den europäischen Normen 12975 für Sonnenkollektoren und 12976 für vorgefertigte Solaranlagen, wurde vom europäischen Verband der solarthermischen Industrie ESTIF das Kennzeichnungssystem Solar Keymark entwickelt. An einigen Punkten geht das Solar Keymark jedoch über die Anforderungen der europäischen Normen hinaus. So muss das Prüfmuster aus der laufenden Produktion stammen, die Hersteller müssen ihre Kollektoren alle zwei Jahre einem Produkttest unterziehen und ihre Fertigungsstätten werden jährlich überprüft. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, dass Verbraucher oder Mitbewerber bereits zertifizierte Produkte durch Sonderprüfungen nachträglich überprüfen lassen.

Ziel des Solar Keymarks ist es, europaweit einheitliche Qualitätsstandards und ihre Prüfungen zu etablieren, um nationale Unterschiede – insbesondere hinsichtlich der Anforderungen und Voraussetzungen zum Erhalt von nationalen Fördermitteln - auszugleichen und so europaweit einheitliche Marktbedingungen sicherzustellen.

Es wird daher empfohlen, die Einhaltung der europäischen Normen und als Äquivalentregelung die Kennzeichnung mit dem SolarKeymark als Umweltstandard in einer zukünftigen umweltorientierten Förderung zu berücksichtigen.

8.7. Blauer Engel

Der Blaue Engel ist ein Umweltkennzeichnungssystem und dient als marktdifferenzierende Orientierungshilfe für den Endkonsumenten hinsichtlich der Umwelteigenschaften eines Produktes. Die neue Vergabegrundlage RAL UZ 73 für die Produktgruppe solarthermische Kollektoren vom Februar 2005 schreibt als zentrale Anforderung die so genannte „energetische Amortisationszeit“ vor. Sie gibt an, wie viele Monate es dauert, bis der Solarkollektor diejenige Energiemenge erzeugt hat, welche zu seiner Herstellung und zum Transport verbraucht wurde. Daneben werden Anforderungen an die Dämmung, das empfohlene Wärmeträgermedium, die Herstellung der selektiven Beschichtungen, die recyclinggerechte Konstruktion, die Rücknahme sowie die Produktinformations- und -kennzeichnung gestellt.

Allerdings ist die Vergabegrundlage vom Februar 2005 aufgrund mangelnder Zeichennehmer zurückgezogen worden. Daher wurde auf Beschluss der Jury Umweltzeichen vom 16.05.2006 die Laufzeit der Vergabegrundlage von November 2003 bis zum 31.12.2008 verlängert.

In der Vergabegrundlage von November 2003 ist als Anforderung u.a. ein Kollektorertrag von 525 kWh/m²/a festgeschrieben. Daneben gibt es eine Reihe von weiteren umweltbezogenen Anforderungen (z.B. hinsichtlich des Wärmeträgermittels, der Ausdampfung aus der Dämmung, der Produkt-

³⁰ EN 12975-1: Thermische Solaranlagen und ihre Bauteile – Kollektoren – Teil 1: Allgemeine Anforderungen, EN 12975-2: Teil 2: Prüfverfahren

³¹ EN 12976-1: Thermische Solaranlagen u. ihre Bauteile – Vorgefertigte Anlagen– Teil 1: Allg. Anforderungen, EN 12976-2: Teil 2: Prüfverfahren

³² ENV 12977-1: Thermische Solaranlagen u. ihre Bauteile – kundenspezifisch gefertigte Anlagen – Teil 1: Allgemeine Anforderungen, ENV 12977-2: Teil 2: Prüfverfahren, ENV 12977-3: Teil 3: Leistungsprüfung von Warmwasserspeichern für Solaranlagen

kennzeichnung, der Rücknahmeverpflichtung u.a.). Unabhängig von der Weiterentwicklung der Vergabegrundlage der RAL UZ 73, besitzt das Umweltkennzeichnungssystem „Blauer Engel“ eine marktdifferenzierende Logik, welche grundsätzlich darauf abzielt, nur Produkte mit überdurchschnittlicher Umweltleistung zu kennzeichnen. Dies sollte für die Fortschreibung von fortschrittlichen und über den Stand der Technik hinausgehenden Umweltstandards genutzt werden.

Daher wird empfohlen, die Einhaltung der Anforderungen der Vergabegrundlage RAL UZ 73 als Umweltstandard in einer zukünftigen umweltorientierten Förderung zu berücksichtigen.

8.8. Zusammenfassung der vorgeschlagenen Umweltstandards

Die hier aufgeführten Umweltstandards sind in ganz unterschiedlichen Wirkungsdimensionen und Abstraktionsebenen verortet. Sie lassen sich gliedern in die Bereiche

- Energie,
- Toxizität,
- Recycling,
- Langlebigkeit und
- bestehende normative Systeme.

Dem **Bereich Energie** sind insbesondere die Überlegungen zur Nutzung der tatsächlich substituierten fossilen Primärenergie sowie dem damit verwobenen kumulierten Energieaufwand zur Herstellung, Betrieb und Wartung der Anlage zuzuordnen.

Im **Bereich Toxizität** ist insbesondere die Frage von Chrom VI und die Anwendung in den Beschichtungsverfahren virulent. Darüber hinaus ist der Aspekt der schwermetallhaltigen Lote diesem Themenkomplex zuzuordnen.

Zu den **bestehenden normativen Systemen** zählen die technischen Normen, das Solar Keymark sowie das Umweltkennzeichnungssystem Blauer Engel.

Im **Bereich Recycling** werden die recyclinggerechte Konstruktion sowie die Rücknahmeverpflichtung erörtert.

Dem **Bereich Langlebigkeit** lassen sich die Ausführungen zu den Ergebnisse aus der Task 10 Prüfung zuordnen.

Einige Argumentationslinien werden jedoch quer zu diesen Bereichen geführt.

So wird das hohe toxische Gefährdungspotential von Chrom VI mit der deutlich höheren Dauerbeständigkeit der mittels Schwarzverchromung hergestellten Schichten in Verbindung gebracht und letztendlich entschieden, aufgrund der geringeren Leistungsverluste der Beschichtung während ihrer Alterung sowie aufgrund ihrer längeren Lebensdauer, eine Chrom VI freie Beschichtung nicht als Umweltstandard vorzuschlagen.

Ein weiterer Querbezug liegt vor, bei dem Vorschlag, die technischen Normen zu benutzen, um ein Mindestmaß an Produktqualität und damit an Haltbarkeit und Dauerbeständigkeit als Umweltstandard einzufordern.

Ähnlich verhält es sich mit dem Blauen Engel. Dessen Nutzung als Umweltstandard garantiert einerseits eine marktdifferenzierende und beinhaltet ferner eine Rücknahmeverpflichtung.

8.9. Entwicklung eines umweltorientierten Förderkonzeptes

Es wird vorgeschlagen, die Förderung in eine Grundförderung und in eine Leistungsförderung zu unterteilen.

Um die Grundförderung zu erhalten, muss sichergestellt sein, dass die Solaranlage ein Minimum an Umweltstandards einhält und den Stand der Technik sicher nicht unterschreitet.

Dazu zählt

- Die Einhaltung der einschlägigen EN-Normen oder als Äquivalenz die Kennzeichnung mit dem Solar Keymark.
- Die Verwendung einer Absorberbeschichtung, welche die Task 10 Prüfung erfolgreich bestanden hat.
- Die Kennzeichnung mit dem Blauen Engel.
- Ein Mindestertrag von deutlich über 525 kWh pro m² und Jahr bei einem solaren Deckungsgrad von deutlich über 40%.

Die **Grundförderung** sollte ferner technologie- bzw. anwendungsspezifisch differenziert ausgestaltet werden. Sie sollte genutzt werden, um die Ausdehnung der solaren Wärmeerzeugung auf bisher noch wenig erschlossene Marktsegmente wie Heizungsunterstützung, solare Klimatisierung, Prozesswärme und Mehrfamilienhäuser zu unterstützen. Maßgeblich sollte dabei die Wirtschaftlichkeit sein. Grundsätzlich sollte die Grundförderung die Entwicklung wünschenswerter Technologie- und Anwendungsdiversifizierung unterstützen und noch bestehende mangelnde Wirtschaftlichkeit ausgleichen. Die Grundförderung sollte auch als Instrument genutzt werden, um im Laufe der Zeit Systeme, die aufgrund der gestiegenen fossilen Energiepreise sowie aufgrund bereits realisierter Kostensenkungen über eine derartige Wirtschaftlichkeit verfügen, so dass sie im Vergleich zu fossilen Energiesystemen keine Investitions-Mehrkosten mehr benötigen, aus der Förderung zu entlassen.

Die **Leistungsförderung** sollte sich am solaren Gesamtertrag der Anlage orientieren. Der Gesamtertrag sollte ohne Berücksichtigung des KEAs und mit Hilfe anerkannter, aktueller Standardbedingungen bestimmt werden.

Die Leistungsförderung sollte sich unabhängig von allen Systemen und Technologien lediglich an der erzeugten Wärmemenge orientieren und für alle mit einem identischen Fördersatz in € pro kWh gewährleistet werden.

Die Leistungsförderung sollte allerdings nur dann möglich sein, wenn die Anforderungen der Grundförderung eingehalten werden.

9. Literatur

- [Althaus 99] H.-J. Althaus: „Wenig bekannte Tatsachen –ökologische Optimierung von Sonnenkollektoren ist möglich“ in HausTech 3/99
- [BAFA 2005] Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle. Persönliche Mitteilung von Dris Ourdani. Auswerttabellen zu den ausgezahlten Förderungen nach Marktanzreizprogramm im Jahr 2004. Eschborn 2005
- [BINE 2001] BINE projektinfo 13/01, "Stromsparende Pumpen für Heizungen und Solaranlagen", Fachinformationszentrum Karlsruhe (Hrsg.) Gesellschaft für wissenschaftlich-technische Information Eggersheim-Leopoldshafen 2001
- [BINE 2002] F.A. Peuser: „Große Solaranlagen zur Trinkwassererwärmung“ BINE Informationsdienst Themeninfo III/02. Fachinformationszentrum Karlsruhe (Hrsg.) Gesellschaft für wissenschaftlich-technische Information Eggersheim-Leopoldshafen 2002
- [bkwk 2005] Bundesverband Kraft-Wärme-Kopplung: „Kraft-Wärme-Kopplung Chance für Wirtschaft und Umwelt“. Heizkostenvergleich Nahwärmeversorgung Neubaugebiet Weinberg II. Berlin 2005
- [BMU 2005] F. Straiß, u.a. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: “Umweltpolitik –Erneuerbare Energien in Zahlen - Nationale und internationale Entwicklungen” BMU Berlin Juni 2005
- [Bräutigam 1991] A. Bräutigam, B. Lackmann u.a.: „Produktlinieanalyse von Solaranlagen zur Brauchwassererwärmung“ TU-Berlin, FB 21, Energieseminar, Berlin1991
- [Brunold 2000] Brunold, S.; Frei, U.; Carlsson, B.; Möller, K.; Köhl, M.; Accelerated Life Testing of Solar Absorber Coatings: Testing Procedure and Results. (2000). Solar Energy 68, 313-323.
- [BSW 2006] Bundesverband Solarwirtschaft e.V. (BSW) i.G. Statistische Zahlen der deutschen Solarwirtschaft. Stand Juni 2006
- [Carlsson 1994]B. Carlsson, U. Frei, M. Köhl, K. Möller: Accelerated Life Testing of Solar Energy Materials - Case study of some selective solar absorber for DHW systems; A Technical report of Task X Solar Materials Research and Development of the International Energy Agency Solar Heating and Cooling Program;; SP-Report 1994:13, ISBN 91-7848-472-3.
- [Carlsson 2000a] Carlsson, B.; Möller, K.; Köhl, M.; Frei, U.; Brunold, S.: Qualification Test Procedure for Solar Absorber Surface Durability, (2000). Solar Energy Materials and Solar Cells 61, 225-275.
- [Carlsson 2000b] Carlsson, B. Möller, K. Frei, U. Brunold, S. Köhl: Comparison between Predicted and Actually Observed In-Service Degredation of a Nickel Pigmented Anodized Aluminium Absorber for Solar DHW Systems M.; (2000). Solar Energy Materials and Solar Cells 61, 223-238.
- [Carlsson 2000c] Carlsson, B.; Möller, K.; Köhl, M.; Round Robin on Accelerated Life Testing of Solar Absorber Surface Durability. Brunold, S.; Frei, U.; (2000). Solar Energy Materials and Solar Cells 61, 239-253.
- [DGS 1997] R. Christmann, H. Fütterer, U. Hartmann, u.a.: „Bestandsaufnahme größerer thermischer Solaranlagen (Kollektorflächen > 20m2) in Berlin“. Deutsche Gesellschaft für Sonnenergie LV Berlin Brandenburg e.V.. Herausgegeben von der Senatverwaltung für Bauen, Wohnen und Verkehr in Berlin. Abschlussbericht Kurzfassung. Dezember 1997.
- [DRÜCK 2001] H. Drück, u.a.; „Endlich sind sie da! Die europäischen Normen für thermische Solaranlagen“. Universität Stuttgart Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW) Stuttgart. 2001.
- [DB-Research 2005] Josef Auer, Deutsche Bank Research: “Energie Spezial” Themen International Economics. Nr. 320, 21.4.2005.
- [DBU 2005] Deutsche Umwelt Stiftung: „Solarenergie: Flüssige Salze sorgen für mehr Wärme“ Pressemitteilung 3.8.2005
- [Ecoinvent 2005] Ecoinvent Datenbank. Datenstand in der Version v1.2 (2005). www.ecoinvent.ch
- [ECOSTAR 2005] R. Pitz-Paal u. a.: „European Solar Concentrated Solar Thermal Road-Mapping ECOSTAR“ Coordinates Action, Sustainable Energy System. 6. Forschungsrahmenprogramm der europäischen Gemeinschaft. SES6-CT-2003-502578. Deliverable No. 7 Roadmap Document

- [**EREC 2004**] European Renewable Energy Council (EREC) Renewable Target for Europe, 20% by 2020, January 2004
- [**ESTIF 2003**] European Solar Thermal Industry Federation (ESTIF) Uwe Brechlin, Ole Pilgaard, Raffaele Piria: "Sun in Action – A Solar Thermal Strategy for Europe Volume 2 The Solar Thermal Sector Country by Country 21 National Report" ESTIF, Brüssel April 2003
- [**ESTIF 2005**] European Solar Thermal Industry Federation (ESTIF): "Solar Thermal – Markets in Europe – Trends and Market Statistics 2004. ESTIF Brüssel Juni 2005
- [**ETH Zürich 97**] R. Frischknecht u.a.: „Ökoinventare für Energiesysteme“ Sonnenkollektoren: von H.-P. Grä-nicher. (ETH Zürich 1997) im Auftrag des Bundesamtes für Energiewirtschaft, Nationaler Energie-Forschungs-Fonds, Schweiz, Zürich, 4. Auflage 1997
- [**EU 2001/C 37/03**] Gemeinschaftsrahmen für europäische Umweltschutzbeihilfen. Amtsblatt der europäischen Gemeinschaft C 37/3 vom 3.2.2001
- [**EUREC 2005**] European Renewable Energy Centres Agency (EUREC Agency): "FP7 Research Priorities for the Renewable Energy Sector". Consolidated Input from European Renewable Energy Research and Industry to the European Commission Stakeholder Consultation on Research Themes of the 7th Research and Development Framework Programme. March 2005
- [**Handke 2004a**] Volker Handke, u.a. Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung: „Machbarkeits-studien für neue Umweltzeichen in Anlehnung an ISO 14024 für die Produktgruppe: Thermische Solaran-lagen“ Abschlussbericht unveröffentlicht. Im Auftrag des UBA. Berlin 2004
- [**Handke 2004b**] Volker Handke, u.a.: „Nachhaltige Bestandsbewirtschaftung nicht erneuerbarer knapper Res-sourcen - Handlungsoptionen und Steuerungsinstrumente am Beispiel von Kupfer und Blei- IZT Werk-stattbericht Nr. 67, Berlin, Oktober 2004, ISBN 3-929173-67-0, Gefördert von der Volkswagen-Stiftung
- [**IEA-SHC 2005**] Werner Weiss, u. a. "International Energy Agency – Solar Heating and Cooling: " Solar Heating Worldwide – Markets and Contribution to the Energy Supply". AEE – Institute for Sustainable Technologies Geisdorf, Austria Mai 2005
- [**IER 2001**] B. Leven, J. Neubarth, C. Weber: „Ökonomische und ökologische Bewertung der elektrischen Wärmepumpe im Vergleich zu anderen Heizungssystemen“ Forschungsbericht der Universität Stuttgart, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Band 80, Stuttgart Mai 2001 ISSN 0938-1228
- [**IWU 1990**] Institut Wohnen und Umwelt: Energiesparpotentiale im Gebäudebestand. Hrsg.: Hessisches Minis-terium für Wirtschaft und Technik, Darmstadt 1990.
- [**Klingenberger 2005**] Klingenberger: „Energetische Amortisation der großen Solaranlagen aus Solarthermie 2000 in Singen und Baden-Baden“ FH Offenburg. Vortrag auf dem 15. Symposium Thermischer Solar-energie Kloster Banz April 2005.
- [**Köhl 2005**] M. Köhl, M. Heck, S. Brunold, U. Frei, B. Carlsson and K. Möller Advanced procedure for the assessment of the lifetime of solar absorber coatings, , Solar Energy Materials and Solar Cells (in press)
- [**Koldehoff 2004**] Management Beratung W.B. Koldehoff: "The Solar Thermal Markets –Today-Tomorrows To Do´s" Präsentation auf dem German-Singapore Environmental Technology Agency-Joint Seminar on Renewable Energy and Energy Efficiency. Berlin April 2004
- [**Morren 1972**] L. Morren, G. Vandermeersch, and P. Antoine A study of the reflection factor of usual photometric standards in the near infrared;; Lighting Res. and Techn. 4 (1972), 243
- [**Öko-Institut 1999**] W. Jenseits u.a.: „Der kumulierte Energieaufwand (KEA) im Baubereich“ Arbeitspapier im Rahmen des UBA FuE Vorhaben Nr.104 01 123:“ Erarbeitung von Basisdaten zum Energieaufwand und der Umweltbelastung von energieintensiven Produkten und Dienstleistungen für Ökobilanzen und Öko-Audits“, Darmstadt/Karlsruhe/Weimar, Juni 1999
- [**PRE´ 2000**] M. Goedkoop u. a.: PRE´ (product ecology consultants) B.V. : The Eco-Indicator 99- A Damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment- A Manual for Designer. Amersford, www.pre.nl, 2000

- [ProBas 2002]** Datenbank zum UBA IT-Vorhaben: „Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagement-Instrumente“
- [Quaschnig 2003]** Volker Quaschnig: „Regenerative Energiesysteme Technologie-Berechnung-Simulation 3. bearbeitete Auflage 2003, ISBN 3-446-21983-8 Carl Hanser Verlag München 2003
- [Remmers 98]** K.-H. Remmers: “Forum Solarpraxis: Die richtige Verbindung” in: Sonnenenergie und Wärmetechnik, Heft 5/98
- [SARAZIN 2004]** Matthias Fawer-Wasser: Solarenergie – ungetrübter Sonnenschein? Aktuelle und zukünftige Aussichten für Photovoltaik und Solarthermie. Sarasin Studie Sarasin Sustainable Investment November 2004.
- [Solarpraxis 2001]** Felix A. Peuser, u.a.: „Langzeiterfahrung Solarthermie – Wegweise für das erfolgreiche Planen und Bauen von Solaranlagen“ Herausgeber.: Solarpraxis Supernova AG, Berlin 2001, ISBN 3-934595-01-4
- [Solarthemen 208]** Solarthemen Der Infodienst für Regenerative Energie Nr. 208 vom 17. Mai 2005. Verlag G. Bröer & A. Witt Löhne. ISSN 1434-1530
- [STIWA 2002]** H. Müller-Steinhagen: “Untersuchung von 16 Solaranlagen zur Trinkwassererwärmung” Forschungs- und Testzentrum für Solaranlagen, Universität Stuttgart. Gutachten im Auftrag der Stiftung Warentest, Stuttgart. 27.1.2002
- [STIWA 2003]** H. Müller-Steinhagen: “Untersuchung von 11 solaren Kombianlagen” Forschungs- und Testzentrum für Solaranlagen, Universität Stuttgart. Gutachten im Auftrag der Stiftung Warentest, Stuttgart. 5.2.2003
- [Strategie 2004]** D. Mangold, F.A. Peuser, P. Donat, u.a.: „Zukünftiger Forschungsbedarf im Bereich Solarthermie – Strategiepapier der Solarthermiebranche“ Mai 2004
- [Streicher 2002]** E. Streicher, u.a.: „Methodik zur Ermittlung der energetischen Amortisationszeit von thermischen Solaranlagen“, Universität Stuttgart, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik
- [SWW 7/2004]** Sonne Wind & Wärme. Das Branchenmagazin für alle erneuerbaren Energien. 28. Jahrgang Heft 7/2004. BVA-Bielefelder Verlag, Bielefeld ISSN 0944-8772 H2607
- [SWW 6/2005]** Sonne Wind & Wärme. Das Branchenmagazin für alle erneuerbaren Energien. „Joachim Zeitner: „Glasklare Vorteile“. 29. Jahrgang Heft 7/2004. BVA-Bielefelder Verlag, Bielefeld ISSN 0944-8772 H2607
- [SWW 2/2005]** Sonne Wind & Wärme. Das Branchenmagazin für alle erneuerbaren Energien. „Kollektormarkt 2004“ Seite 6 Heft 2/2005. 29. Jahrgang. BVA-Bielefelder Verlag, Bielefeld ISSN 0944-8772 H2607
- [test 4/02]** Stiftung Warentest Heft 4/2002, S. 56-61, Berlin 2002
- [UBA-KEA 1999]** „KEA: mehr als eine Zahl - Basisdaten und Methoden zum kumulierten Energieaufwand (KEA)“ Broschüre zum F&E-Vorhaben: „Erarbeitung von Basisdaten zum Energieaufwand und der Umweltbelastung von energieintensiven Produkten und Dienstleistungen für Ökobilanzen und Öko-Audits“ UBA Eigendruck, Berlin 1999
- [VDI 4600]** VDI Richtlinie: Kumulierter Energieaufwand, Begriffe, Definitionen, Berechnungsmethoden, Juni 1997, Beuth Verlag, Berlin 1997
- [ZSW-ISI 2004]** Ole Langniß, Edelgard Gruber, u.a.: „Evaluierung von Einzelmaßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien (Marktanreizprogramm) im Zeitraum Januar 2002 bis August 2004“ Zentrum für Sonnenenergie und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg und Fraunhofer Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung. Forschungsvorhaben im Auftrag des BMU Stuttgart, Karlsruhe Dezember 2004
- [ZSW 2004]** F. Staiß, u.a.: Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoffforschung Baden-Württemberg: “Erneuerbare Energie International –Stand: Mai 2004-. Im Auftrag des BMU, Stuttgart Mai 2004.

T_{max} (°C)	T_1 (°C)	T_2 (°C)	t_2 (h) ($t_1=18$ h)	t_2 (h) ($t_1=36$ h)	t_2 (h) ($t_1=75$ h)	t_2 (h) ($t_1=150$ h)	T_3 (°C)	t_3 (h) ($t_1=300$ h)	t_3 (h) ($t_1=600$ h)
<90	137	107	361	493	689	953	167	83	221
91-100	149	119	321	443	627	877	179	88	233
101-110	160	130	283	397	570	808	190	93	244
111-120	172	142	251	356	519	746	202	98	256
121-130	184	154	222	320	474	690	214	103	267
131-140	196	166	198	289	434	641	226	108	278
141-150	208	178	177	262	400	598	238	114	289
151-155	215	185	168	250	384	578	245	116	294
156-160	221	191	159	239	369	559	251	119	299
161-165	227	197	151	229	355	542	257	121	304
166-170	233	203	144	219	342	525	263	124	309
171-175	240	210	137	210	330	510	270	127	314
176-180	246	216	131	201	319	495	276	129	319
181-185	252	222	125	193	308	481	282	132	323
186-190	259	229	120	186	298	468	289	134	328
191-195	265	235	114	179	289	456	295	136	333
196-200	272	242	110	173	280	444	302	139	337
201-205	278	248	105	166	272	433	308	141	342
206-210	285	255	101	161	264	423	315	144	346
211-215	291	261	97	155	256	413	321	146	350
216-220	298	268	94	150	249	403	328	148	355
221-225	304	274	90	146	243	394	334	151	359
226-230	311	281	87	141	236	386	341	153	363

Tabelle 10-2: Table B2 der Task 10 zur Bestimmung von T_1 , T_2 , T_3 sowie t_1 , t_2 , t_3 aus T_{max}

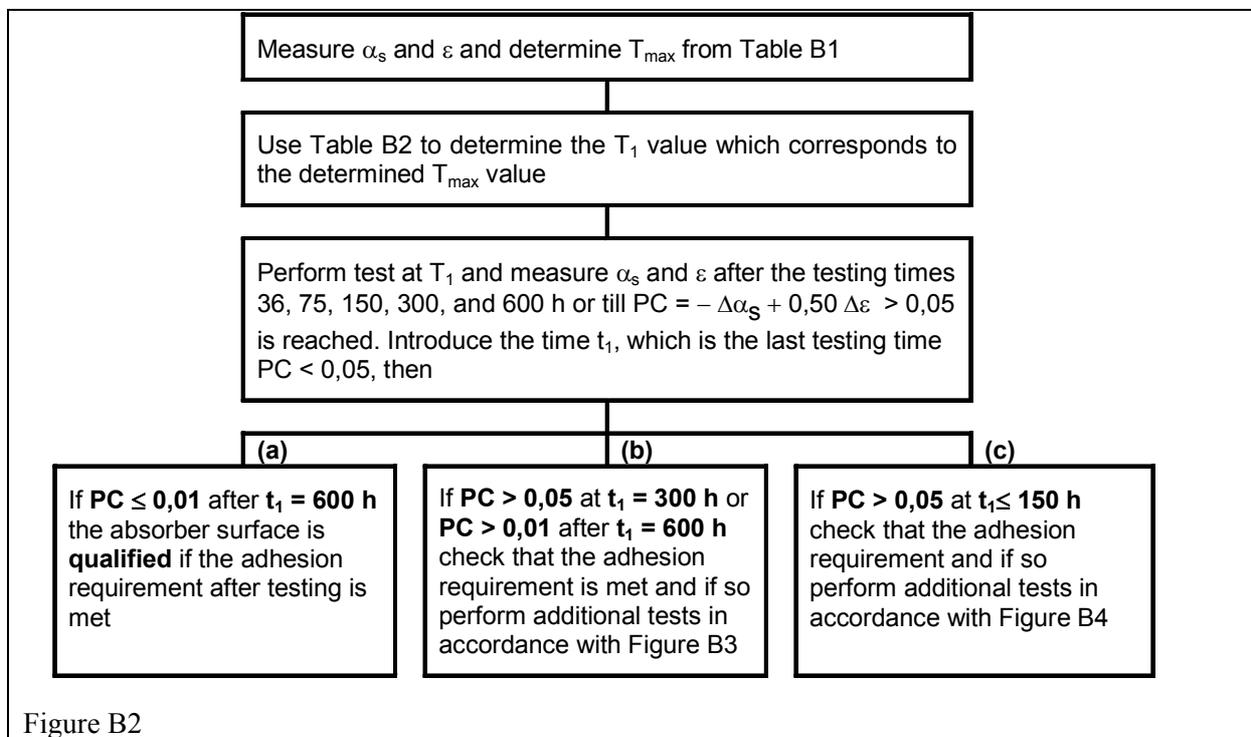


Figure B2

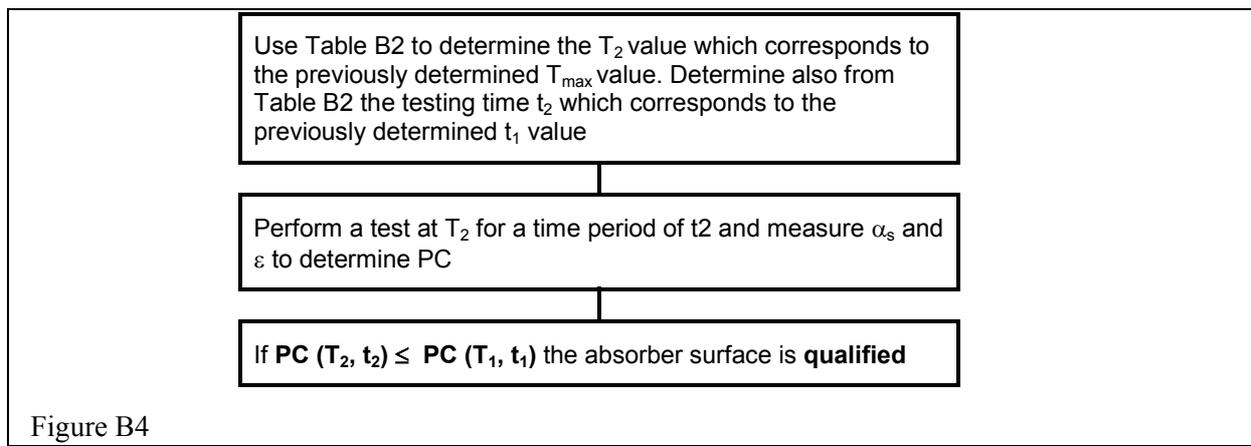
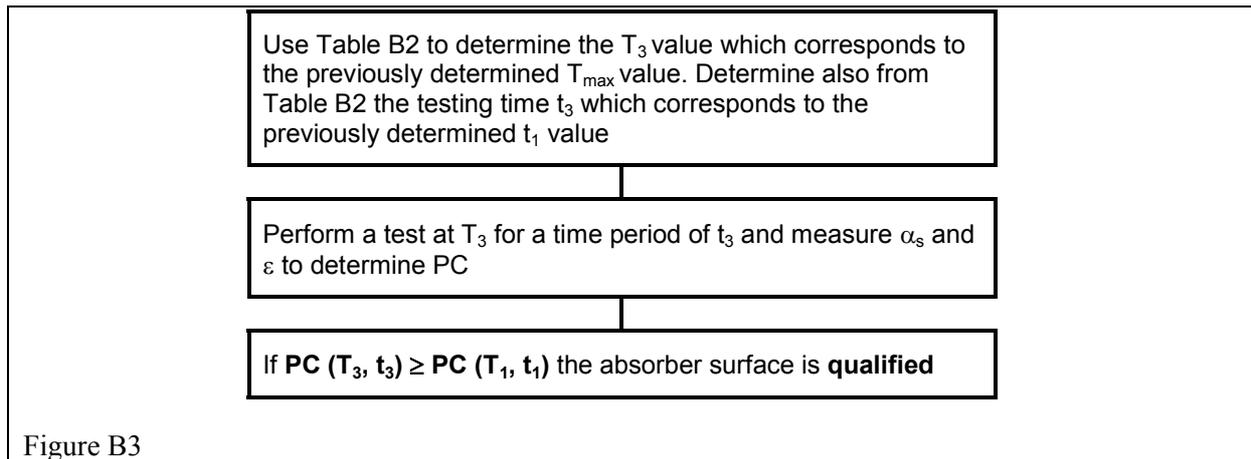


Abbildung 10-1: Entscheidungsweg Task 10 bei der Temperaturprüfung

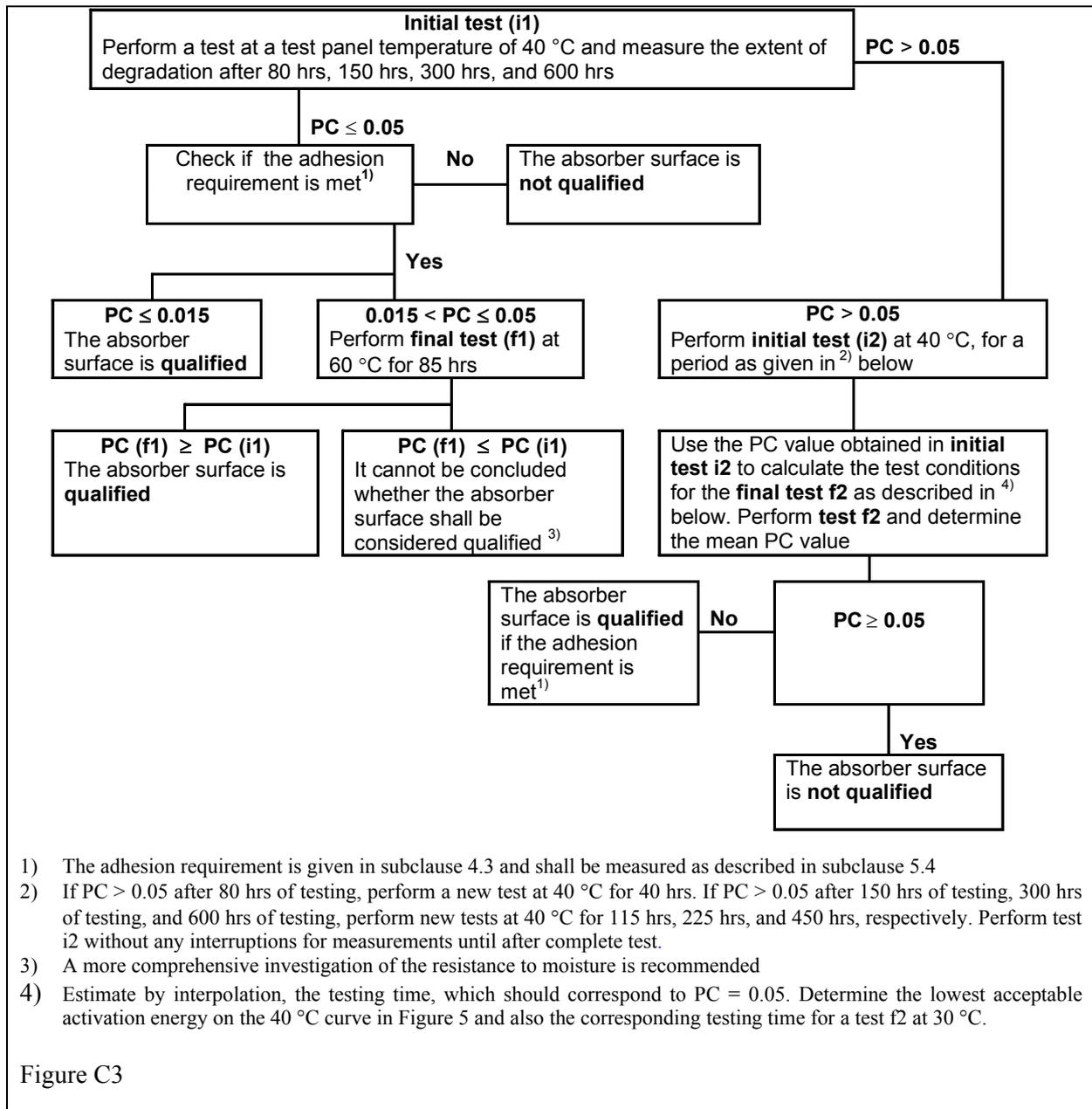


Abbildung 10-2: Entscheidungsweg Task 10 bei der Kondensationsprüfung

10.2. Ergebnisse der Task 10 Prüfung

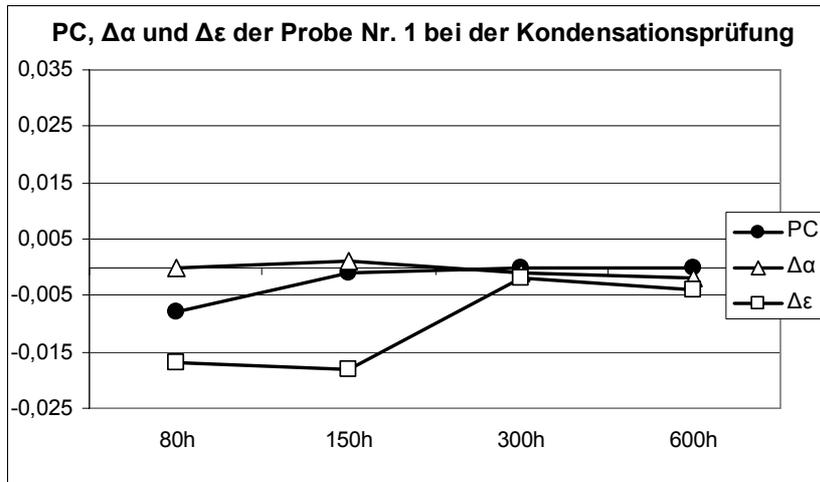


Abbildung 10-3: Ergebnisse der Kondensationsprüfung bei Probe Nr. 1

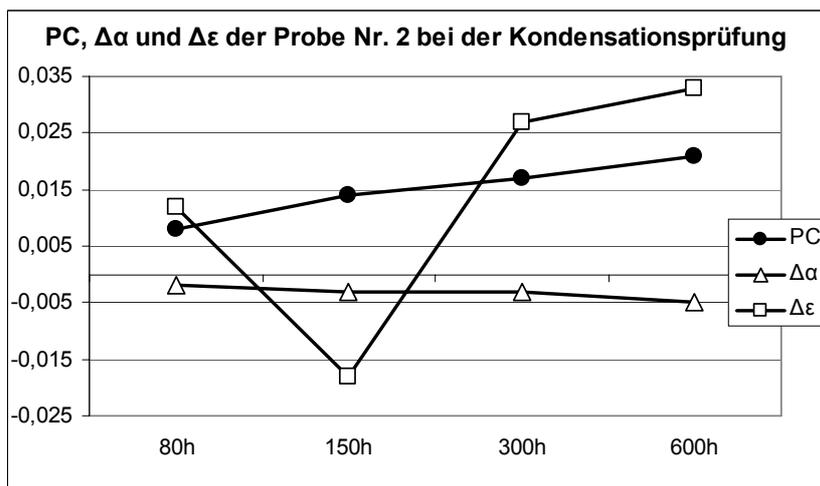


Abbildung 10-4. Ergebnisse der Kondensationsprüfung bei Probe Nr. 2

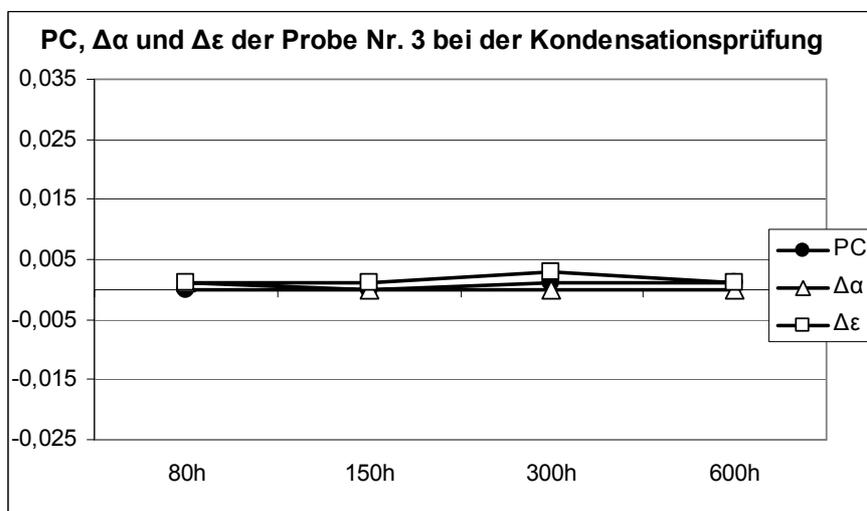


Abbildung 10-5: Ergebnisse der Kondensationsprüfung bei Probe Nr. 3

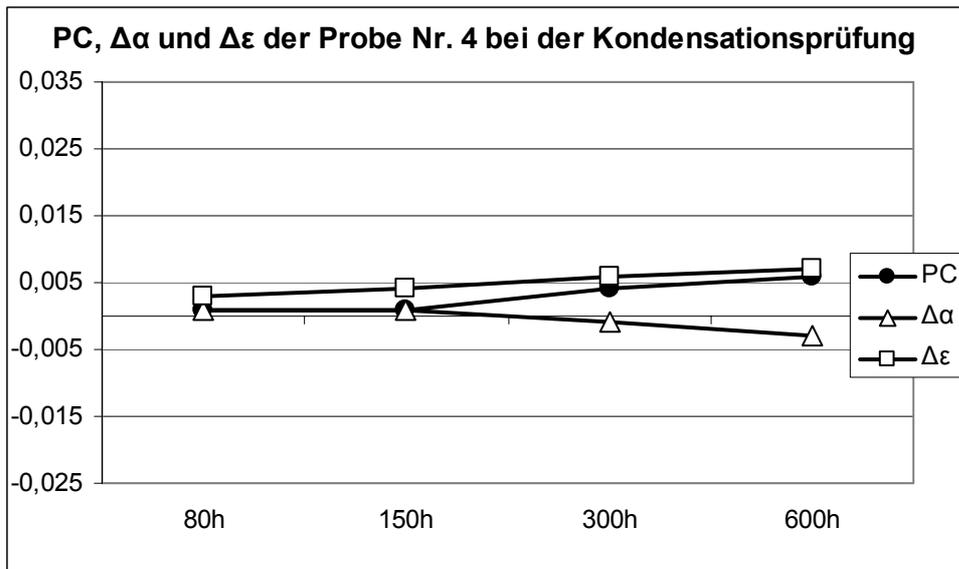


Abbildung 10-6: Ergebnisse der Kondensationsprüfung bei Probe Nr. 4

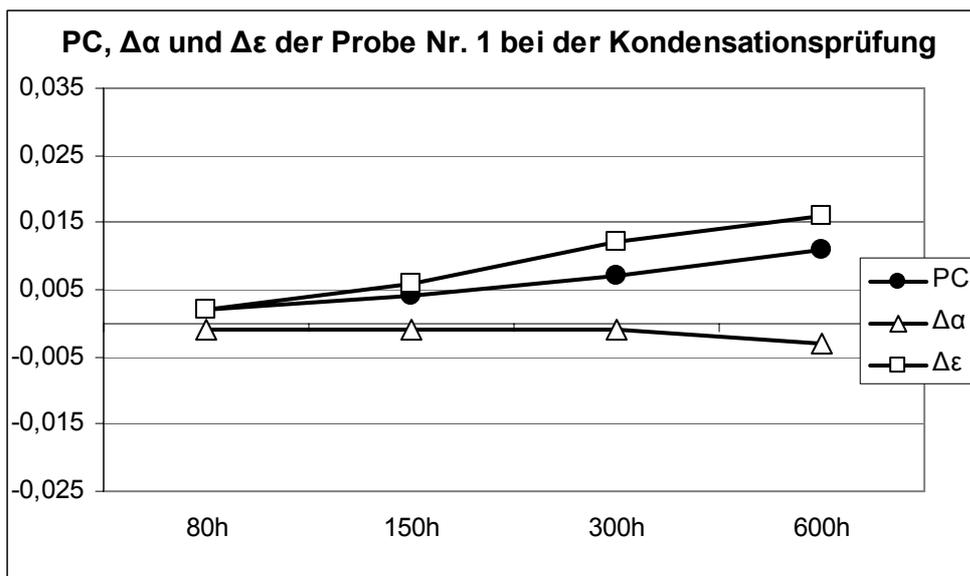


Abbildung 10-7: Ergebnisse der Kondensationsprüfung bei Probe Nr. 5

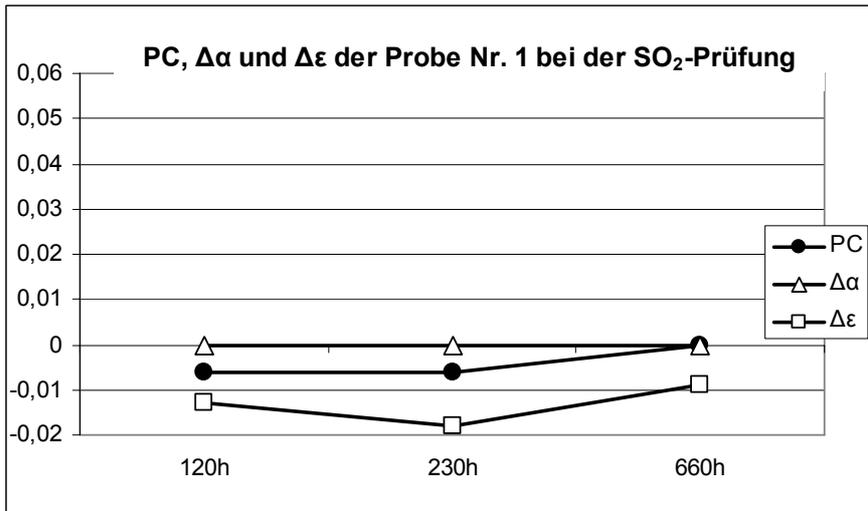


Abbildung 10-8: Ergebnisse der SO_2 -Prüfung bei Probe Nr. 1

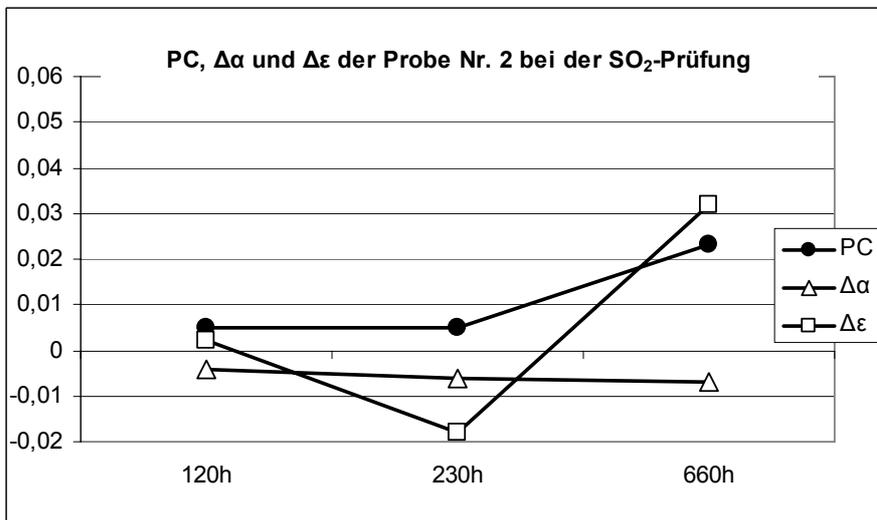


Abbildung 10-9: Ergebnisse der SO_2 -Prüfung bei Probe Nr. 2

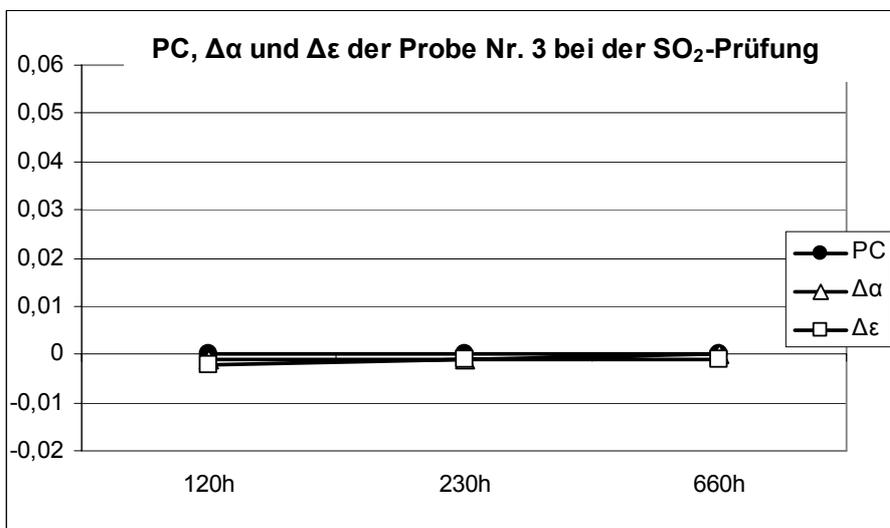
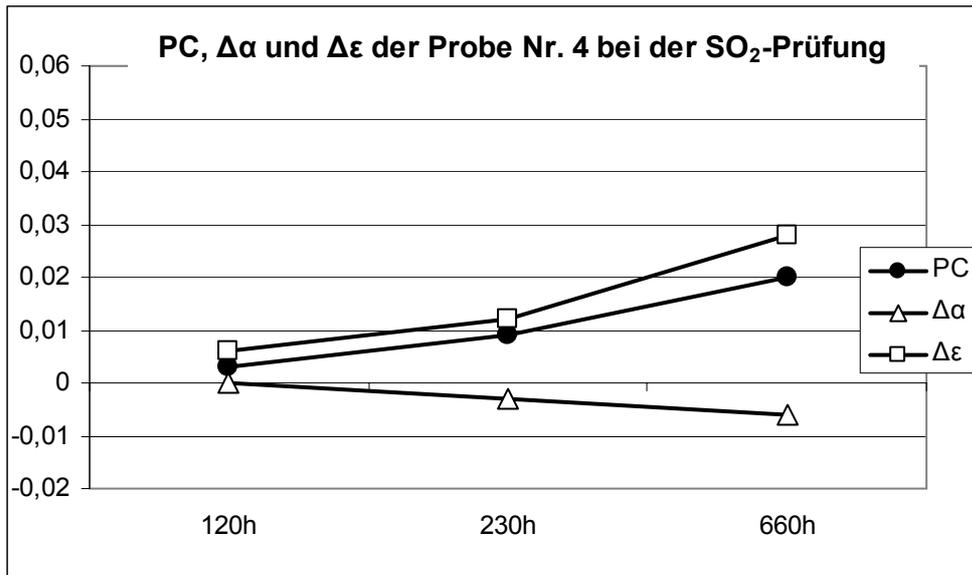
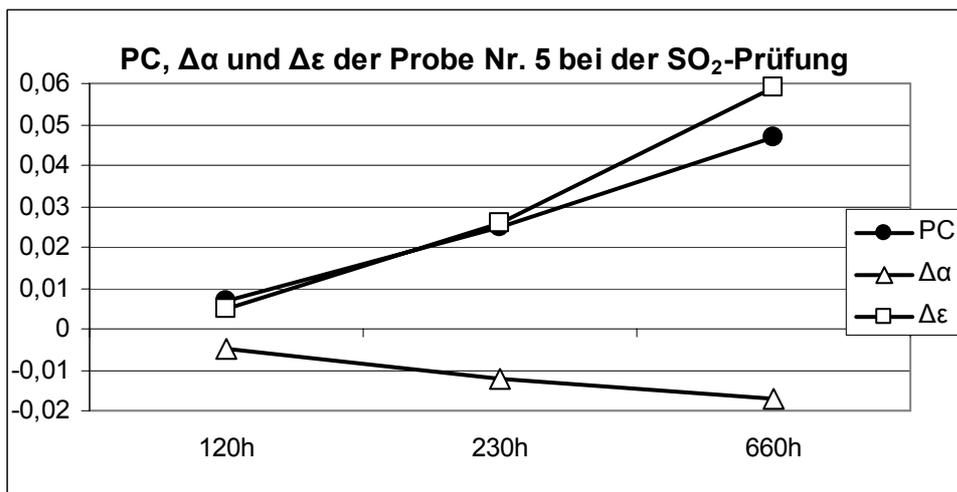


Abbildung 10-10: Ergebnisse der SO_2 -Prüfung bei Probe Nr. 3

Abbildung 10-11: Ergebnisse der SO_2 -Prüfung bei Probe Nr. 4Abbildung 10-12: Ergebnisse der SO_2 -Prüfung bei Probe Nr. 5

10.3. Modellierung der Lebensdauervorhersage.

Da die PC-Funktion nicht unendlich steigen kann, sondern zu einer bestimmten Höhe hin konvergiert, kann die PC-Funktion in der generellen Form dargestellt werden:

$$y = y_0(1 - \exp(-kt))$$

Gleichung 2: Generelle Form der PC-Funktion

Mit:

y_0 ist die Höhe, zu welcher die PC-Funktion konvergiert

k ist eine Zeitkonstante

t ist die Beanspruchungszeit.

Nimmt kt kleine Werte an mit ($kt \ll 1$) folgt

$\exp(-kt)$ ist ungefähr $1 - kt$.

Wird dieser Ausdruck in Gleichung 1 eingesetzt ergibt sich:

$$y = y_0 kt = k' t$$

Gleichung 3: Generelle Form der PC-Funktion bei $kt \ll 1$

Mit $k' = y_0 k$

k ergibt sich aus den experimentellen Daten, welche in die Gleichung 1 eingesetzt werden.

Da der Degradationsprozess, welcher die Lebensdauer limitiert, als abhängig von der thermischen Aktivierung aufgefasst werden kann, kann er als Funktion der Temperatur gemäß $k = k(T)$ beschrieben werden.

Damit lässt sich die Arrhenius-Gleichung, welche die Temperaturabhängigkeit der Reaktionsgeschwindigkeit (hier des Degradationsprozesses) quantitativ beschreibt, anwenden.

Gemäß Arrhenius gilt dann

$$k(T) = A \exp(-E/RT)$$

Gleichung 4: Arrhenius Gleichung für die Temperaturabhängigkeit der Degradation

Dabei ist A ein sogenannter Präexponential-Faktor (oder auch Frequenzfaktor)

E ist die Aktivierungsenergie

R ist die allgemein Gaskonstante und

T ist die absolute (thermodynamische) Temperatur

Wenn $k(T)$ durch zwei unterschiedliche Temperaturen bestimmt wird, kann der Präexponential-Faktor und die Aktivierungsenergie berechnet werden.

Da die Verteilungsfunktionen der Temperaturfrequenz (Betriebszustand, Stillstand, Kondensation) über eine bestimmte Zeitperiode, z.B. über ein Jahr, bekannt ist, kann eine Referenz-PC-Funktion für diese Zeitperiode berechnet werden.

Die folgende Abbildung stellt derartige Verteilungsfunktionen der Temperaturfrequenz dar.

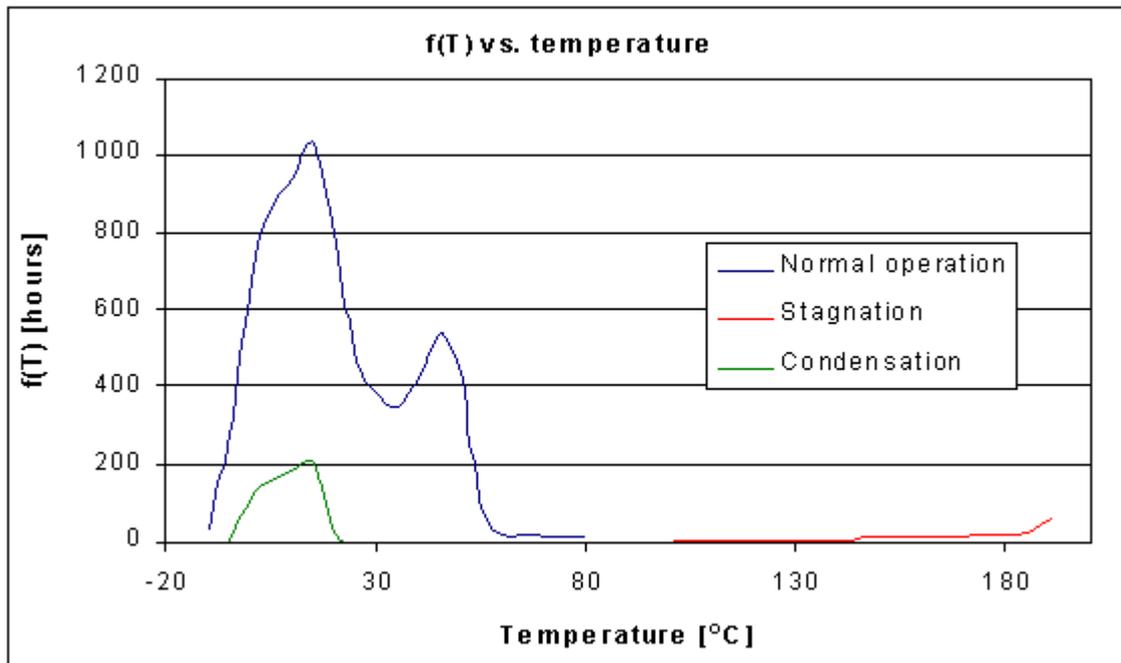


Abbildung 10-13: Verteilungsfunktionen der Temperaturfrequenz für ein Referenzjahr

Die zugehörige PC-Funktion für das Referenzjahr ergibt sich dann gemäß

$$PC(\text{ref}) = \sum_{1-\text{Referenzjahr}} f(T) A \exp(-E_{PC}/RT)$$

Gleichung 5: PC-Funktion für ein Referenzjahr

Die PC-Funktion als Funktion einer bestimmten Anzahl von Referenzjahren (Betriebsjahren) lässt sich darstellen mit:

$$PC = PC(\text{ref}) * \text{Anzahl der Referenzjahre (Betriebsjahre)}$$

Gleichung 6: PC Funktion als Funktion einer bestimmten Anzahl von Referenzjahren

Die Gleichung 5 suggeriert, es gäbe eine lineare Korrelation zwischen der PC-Funktion und der Lebensdauer. Dies ist nicht unbedingt richtig, denn in der Regel wird die PC-Funktion irgendwann nicht weiter steigen, sondern gegen eine stabile Höhe konvergieren.

In den Fällen, in denen die durchgeführten Task 10 Tests einen mehr oder weniger ausgeprägten Verlauf der PC-Funktion über die Zeit ergeben haben, kann die Gleichung 5 mit einem Faktor aufgelöst werden, der sich aus der abgeleiteten Steigung der PC-Funktion über die Zeit berechnen lässt.

Damit lässt sich der Verlauf der PC-Funktion über die Zeit (Anzahl der Referenzjahre) abbilden (vgl.: Abbildung 7-12).

10.4. Sachbilanz der selektiven Absorberbeschichtungen (Input)

Material	Geografischer Bezug	Einheit	Nickelpigmentiertes Aluminiumoxid auf Aluminiumblech	Schwarzchrom auf Kupferblech	auf Vakuumbeschichtung auf Kupferblech	Sputtern auf Kupferblech
Borsäure, Pulver, wasserfrei, ab Werk	RER	kg	0,018	0,000188		
Salpetersäure, 50% in H ₂ O, ab Werk	RER	kg	0,106			
Phosphorsäure, Düngerqualität, 70% in H ₂ O, ab Werk	GLO	kg	0,269			
Natriumhydroxid, 50% in H ₂ O, Produktionsmix, ab Werk	RER	kg	0,164			
Strom, Mittelspannung, ab Netz	SK	kWh	1,81			
Nickel, 99,5%, ab Werk	GLO	kg	0,0218	0,0202		
Metall-Beschichtungswerk	RER	unit	3,33E-07	3,33E-07	3,33E-07	3,33E-07
Heizöl EL, in Industriefernung 1MW, nicht-modulierend	RER	MJ	41			
Transport, Lkw 32t	RER	tkm	0,0579	0,00368	0,000463	0,0123
Transport, Fracht, Schiene	RER	tkm	0,347	0,0221	0,00278	0,209
Trinkwasser, ab Hausanschluss	RER	kg	520	10,9		2,95
Chemikalien anorganisch, ab Werk	GLO	kg		0,000685		
Chromsäureanhydrid, Plättchen, ab Werk	RER	kg		0,00972		
Hexafluorkieselsäure, 22% in H ₂ O, ab Werk	RER	kg		0,000312		
Schwefelsäure, flüssig, ab Werk	RER	kg		0,00367		
m, Mittelspannung, Produktion UC/TE, ab Netz	UCTE	kWh		2,66		
Erdgas, in Industriefernung >100kW	RER	MJ		5,44		
Seife, ab Werk	RER	kg		0,00204		
Entsorgung, Sonderabfall, 0% Wasser, in Untertagedeponie	DE	kg		0,2		
Behandlung, Abwasser Schwarzchrombeschichtung, in Abwasserreinigung, Gr.Kl. 2	CH	m ³		0,00849		
Stickstoff, flüssig, ab Werk	RER	kg			0,00182	0,00182
Sauerstoff, flüssig, ab Werk	RER	kg			0,000909	0,000909

Fortsetzung von vorheriger Seite

Material	Geografischer Bezug	Einheit	Nickelpigmentiertes Aluminiumoxid auf Aluminiumblech	Schwarzchrom auf Kupferblech	Vakuumbeschichtung auf Kupferblech	Sputtern auf Kupferblech
Titandioxid, Produktionsmix, ab Werk	RER	kg			0,001	
Schmieröl, ab Werk	RER	kg			1,68E-05	0,000773
Quarzsand, ab Werk	DE	kg			0,00089	
Strom, Mittelspannung, ab Netz	DE	kWh			1,2	3,47
Argon, flüssig, ab Werk	RER	kg				0,00328
Diesel, in Baumaschine	GLO	MJ				0,225
Chrom, ab Regionallager	RER	kg				0,0074
Kupfer, ab Regionallager	RER	kg				0,0818
Zinn, ab Regionallager	RER	kg				0,00862
Heizöl EL, ab Regionallager	RER	kg				0,0062
Wellkarton, gemisch. Fasern, einwellig, ab Werk	RER	kg				0,0177
Kraftpapier gebleicht, ab Werk	RER	kg				0,000555
Polyethylen-Granulat, LDPE, ab Werk	RER	kg				0,000518
Entsorgung, Altöl, 10% Wasser, in SAV	CH	kg				0,000773
Entsorgung, Siedlungsabfall, 22.9% Wasser, in Kehrichtverbrennung	CH	kg				0,00341
Behandlung, Abwasser, ab Grundstück, in Abwasserreinigung, Gr.Kl. 2	CH	m3				0,000227

Tabelle 10-3: Sachbilanz der selektiven Absorberbeschichtungen

Funktionale Einheit ist 1 m² Absorberfläche. Abkürzungen: RER = Europa, GLO = global, SK = Slowakische Republik, UCTE = Union for the Co-ordination of Transmission of Electricity (Union für die Koordinierung der Erzeugung und des Transports elektrischer Energie/ Europäisches Verbundnetz), DE = Deutschland, CH = Schweiz

10.5. Unbewertete Wirkungsabschätzung der Absorberbeschichtungen

Material	Kategorie	Sub-Kategorie	Einheit	Nickelpigmentiertes Aluminiumoxid auf Aluminiumblech	Schwarzchrom auf Kupferblech	Vakuumbeschichtung auf Kupferblech	Sputtern auf Kupferblech
Chrom VI	Wasser	Flüsse	kg	1,57E-06	4,49E-05	2,70E-07	1,01E-05
Chrom VI	Wasser	nicht spezifiziert	kg	1,99E-07	2,33E-07	3,93E-08	9,22E-08
Chrom VI	Luft	niedrige Bevölkerungsdichte	kg	3,63E-08	1,04E-08	2,34E-09	2,22E-07
Chrom VI	Luft	hohe Bevölkerungsdichte	kg	1,43E-09	1,14E-09	1,41E-10	1,13E-09
Chrom VI	Luft	nicht spezifiziert	kg	5,48E-11	3,70E-11	7,37E-12	1,13E-11
Chrom VI	Boden	nicht spezifiziert	kg	5,85E-07	5,29E-07	2,30E-07	7,47E-07
Chrom VI	Wasser	Grund	kg	3,89E-07	3,04E-07	1,43E-07	4,62E-07
Chrom VI	Wasser	Grund-, Langzeit	kg	5,00E-06	1,37E-04	9,42E-07	3,22E-05
		Summe	kg	7,7830E-06	1,8328E-04	1,6262E-06	4,3885E-05

Tabelle 10-4: Auszug (Chrom VI) aus der unbewerteten Wirkungsabschätzung.

Funktionale Einheit ist 1 m² Absorberfläche. Aufgeführt sind die für dieses Forschungsvorhaben relevanten ChromVI-Mengen aus dem Herstellungsprozess der Absorberschichtungen.

Medium	Name	Einheit	Nickelpigmentiertes Aluminiumoxid auf Aluminiumblech	Schwarzchrom auf Kupferblech	Vakuumbeschichtung auf Kupferblech	Sputtern auf Kupferblech
air, high population density	Radioactive species, other beta emitters	kBq	0,00021228	0,00010718	4,56E-05	0,00014742
air, high population density	Carbon dioxide, fossil	kg	3,8465	0,9206	0,13112	0,56999
air, high population density	Carbon dioxide, biogenic	kg	0,045426	0,042133	0,023944	0,061103
air, high population density	Sulfur dioxide	kg	0,011192	0,001781	0,00014071	0,00083437
air, high population density	Chromium VI	kg	1,43E-09	1,14E-09	1,41E-10	1,13E-09
air, high population density	Heat, waste	MJ	63,072	22,617	5,8884	20,747
air, low population density	Noble gases, radioactive, unspecified	kBq	488,99	423,15	82,19	304,24
air, low population density	Radon-222	kBq	22,769	18,467	6,3486	21,247
air, low population density	Hydrogen-3, Tritium	kBq	0,3024	0,25053	0,050466	0,18556
air, low population density	Carbon-14	kBq	0,049578	0,043517	0,008621	0,031694
air, low population density	Xenon-133	kBq	0,0235	0,052397	0,048341	0,14625
air, low population density	Carbon dioxide, fossil	kg	1,1444	0,87472	0,65628	2,0613
air, low population density	Sulfur dioxide	kg	0,038154	0,031742	0,00063595	0,01288
air, low population density	Chromium VI	kg	3,63E-08	1,04E-08	2,34E-09	2,22E-07
air, low population density	Heat, waste	MJ	19,909	14,71	7,0414	23,903
air, low population density, long-term	Radon-222	kBq	921,29	774,09	266,1	890,54
air, lower stratosphere + upper troposphere	Heat, waste	MJ	1,80E-07	1,44E-08	2,51E-09	1,33E-08
air, unspecified	Carbon dioxide, fossil	kg	0,49772	0,40937	0,027982	0,10414
air, unspecified	Chromium VI	kg	5,48E-11	3,70E-11	7,37E-12	1,13E-11
air, unspecified	Heat, waste	MJ	2,5785	1,3672	0,40056	1,9272
resource, biotic	Energy, gross calorific value, in biomass	MJ	0,63858	0,6128	0,25894	0,72254
resource, in air	Carbon dioxide, in air	kg	0,053666	0,049376	0,023228	0,064784
resource, in air	Energy, kinetic, flow, in wind	MJ	0,1347	0,34351	0,3075	0,94217
resource, in air	Energy, solar	MJ	0,001845	0,0045742	0,0042822	0,013057
resource, in ground	Gravel, in ground	kg	1,3581	1,0086	0,1514	0,28113

Fortsetzung von vorheriger Seite

Medium	Name	Einheit	Nickelpigmentiertes Aluminiumoxid auf Aluminiumblech	Schwarzchrom auf Kupferblech	Vakuumbeschichtung auf Kupferblech	Sputtern auf Kupferblech
resource, in ground	Oil, crude, in ground	kg	1,1651	0,094281	0,015497	0,085873
resource, in ground	Coal, brown, in ground	kg	0,53479	0,46984	0,38375	1,1857
resource, in ground	Coal, hard, unspecified, in ground	kg	0,27327	0,28394	0,19522	0,62107
resource, in ground	Calcite, in ground	kg	0,22159	0,1564	0,028487	0,084051
resource, in ground	Sodium chloride, in ground	kg	0,14242	0,0084787	0,0010604	0,00404
resource, in ground	Clay, unspecified, in ground	kg	0,082583	0,057274	0,023867	0,035324
resource, in ground	Phosphorus, 18% in apatite, 4% in crude ore, in ground	kg	0,07928	0,00012546	7,27E-07	4,13E-05
resource, in ground	Colemanite, in ground	kg	0,044328	0,00046552	3,80E-07	1,36E-06
resource, in ground	Phosphorus, 18% in apatite, 12% in crude ore, in ground	kg	0,034638	5,59E-05	3,52E-07	1,95E-05
resource, in ground	Iron, 46% in ore, 25% in crude ore, in ground	kg	0,028567	0,033499	0,0056926	0,013246
resource, in ground	Nickel, 1.13% in sulfide, Ni 0.76% and Cu 0.76% in crude ore, in ground	kg	0,027481	0,025454	2,94E-07	1,44E-06
resource, in ground	Fluorine, 4.5% in apatite, 1% in crude ore, in ground	kg	0,01982	3,14E-05	1,82E-07	1,03E-05
resource, in ground	Gas, natural, in ground	Nm3	0,23057	0,30163	0,035851	0,15225
resource, in water	Water, turbine use, unspecified natural origin	m3	24,016	21,989	3,2944	23,532
resource, in water	Water, river	m3	0,28034	0,016511	0,0047415	0,020549
resource, in water	Water, well, in ground	m3	0,22684	0,013421	0,0022655	0,0082725
resource, in water	Water, lake	m3	0,10676	0,0022745	1,86E-05	0,00065937
resource, in water	Water, cooling, unspecified natural origin	m3	0,064173	0,048925	0,024703	0,079407

Fortsetzung von vorheriger Seite

Medium	Name	Einheit	Nickelpigmentiertes Aluminiumoxid auf Aluminiumblech	Schwarzchrom auf Kupferblech	Vakuumbeschichtung auf Kupferblech	Sputtern auf Kupferblech
resource, in water	Water, unspecified natural origin	m3	0,037872	0,0065081	0,0031729	0,013081
resource, in water	Volume occupied, reservoir	m3a	0,024862	0,030356	0,0048463	0,019122
resource, in water	Energy, potential, stock, in barrage water	MJ	2,8857	2,8633	0,41729	2,6976
resource, land	Occupation, forest, intensive, normal	m2a	0,091047	0,081066	0,037086	0,082196
resource, land	Occupation, construction site	m2a	0,084687	0,00027572	2,18E-05	0,00013608
resource, land	Occupation, industrial area, built up	m2a	0,012981	0,012108	0,011365	0,012688
resource, land	Occupation, industrial area, mineral extraction site	m2a	0,011931	0,0021144	0,00057331	0,0025729
resource, land	Occupation, site	m2a	0,011719	0,0040264	0,0013144	0,013937
resource, land	Occupation, dump site	m2a	0,010783	0,0099252	0,0011164	0,060297
soil, industrial	Heat, waste	MJ	0,001098	0,00017694	0,00011359	0,00040039
soil, unspecified	Chromium VI	kg	5,85E-07	5,29E-07	2,30E-07	7,47E-07
water, unspecified	Heat, waste	MJ	0,065794	0,051756	0,015887	0,054287
water, ground-	Chromium VI	kg	3,89E-07	3,04E-07	1,43E-07	4,62E-07
water, ground-, long-term	Silicon	kg	0,044475	0,042129	0,0066246	0,0301
water, ground-, long-term	Calcium, ion	kg	0,018439	0,0063135	0,0041275	0,012062
water, ground-, long-term	Potassium, ion	kg	0,00015132	0,00013251	6,01E-05	0,00021072
water, ground-, long-term	Chromium VI	kg	5,00E-06	0,00013727	9,42E-07	3,22E-05
water, ground-, long-term	Heat, waste	MJ	0,012201	0,0026205	0,0015763	0,0054823
water, ocean	Hydrogen-3, Tritium	kBq	19,673	17,029	3,3109	12,253
water, ocean	Polonium-210	kBq	0,34323	0,00054432	3,24E-06	0,00018513
water, ocean	Radium-226	kBq	0,25524	0,00055168	2,52E-05	0,00027507
water, ocean	Lead-210	kBq	0,22491	0,00035667	2,12E-06	0,00012131
water, ocean	Uranium-238	kBq	0,11539	0,00018299	1,09E-06	6,22E-05

Fortsetzung von vorheriger Seite

Medium	Name	Einheit	Nickelpigmentiertes Aluminiumoxid auf Aluminiumblech	Schwarzchrom auf Kupferblech	Vakuumbeschichtung auf Kupferblech	Sputtern auf Kupferblech
water, ocean	Radioactive species, Nuclides, unspecified	kBq	0,049402	0,042763	0,0083144	0,03077
water, ocean	Potassium-40	kBq	0,027184	4,31E-05	2,57E-07	1,47E-05
water, ocean	Sulfate	kg	0,17125	0,00029555	8,06E-05	0,00011775
water, ocean	Calcium, ion	kg	0,087114	0,00019521	9,67E-06	0,00010028
water, ocean	Chloride	kg	0,012415	0,00094146	0,0001432	0,00086856
water, river	Hydrogen-3, Tritium	kBq	2,2725	1,8071	0,49224	1,7088
water, river	Radium-226	kBq	0,08584	0,069146	0,023747	0,079575
water, river	Strontium-90	kBq	0,027808	0,070707	0,10022	0,30062
water, river	Thorium-230	kBq	0,017957	0,015088	0,0051867	0,017358
water, river	Chloride	kg	0,03044	0,0037634	0,0008434	0,0037553
water, river	Suspended solids, unspecified	kg	0,016706	6,66E-05	1,31E-05	5,88E-05
water, river	Sodium, ion	kg	0,015562	0,0020541	0,00024394	0,0015226
water, river	COD, Chemical Oxygen Demand	kg	0,013772	0,0011637	0,00018695	0,0011993
water, river	BOD5, Biological Oxygen Demand	kg	0,013606	0,0010994	0,00017063	0,0010507
water, river	Sulfate	kg	0,010726	0,0088726	0,00032274	0,0077905
water, river	Chromium VI	kg	1,57E-06	4,49E-05	2,70E-07	1,01E-05
water, river	Heat, waste	MJ	1,2725	0,58071	0,099955	0,36967
water, unspecified	Chromium VI	kg	1,99E-07	2,33E-07	3,93E-08	9,22E-08
water, unspecified	Heat, waste	MJ	0,00084137	0,00037915	0,00016169	0,00038197

Tabelle 10-5: Unbewerteten Wirkungsabschätzung (gekürzt – größte Werte).

Funktionale Einheit ist 1 m² Absorberfläche.

10.6. Bewertete Wirkungsabschätzung der Absorberbeschichtungen

Auswirkung	Geografischer Bezug	Kategorie	Sub-Kategorie	Einheit	Nickelpigmentiertes Aluminiumoxid auf Aluminiumblech	Schwarzchrom auf Kupferblech	Vakuumbeschichtung auf Kupferblech	Sputtern auf Kupferblech
photochemical ozone formation, high NOx POCP	RER	EDIP	environmental impact	kg ethylene-Eq	0,0010623	0,00039256	0,00011186	0,000535
photochemical ozone formation, low NOx POCP	RER	EDIP	environmental impact	kg ethylene-Eq	0,0010854	0,00040507	0,00011072	0,000548
human toxicity	RER	IMPACT 2002+ (Endpoint)	human health	points	1,35E-05	7,07E-06	1,71E-06	5,22E-05
aquatic acidification	RER	IMPACT 2002+ (Midpoint)	ecosystem quality	kg SO2-Eq	0,057369	0,037251	0,001742	0,018851
aquatic eutrophication	RER	IMPACT 2002+ (Midpoint)	ecosystem quality	kg PO4-Eq	0,00036168	3,67E-05	6,25E-06	3,43E-05
GWP 100a	GLO	IPCC 2001	climate change	kg CO2-Eq	5,9057	2,3025	0,86887	2,9158
GWP 20a	GLO	IPCC 2001	climate change	kg CO2-Eq	6,0804	2,4282	0,93408	3,1249
GWP 500a	GLO	IPCC 2001	climate change	kg CO2-Eq	5,6914	2,2438	0,83888	2,8187
non-renewable resources, fossil	GLO	cumulative energy demand	fossil	MJ-Eq	72,813	26,056	9,71	33,674
non-renewable resources, nuclear	GLO	cumulative energy demand	nuclear	MJ-Eq	16,264	13,666	4,6963	15,718

Fortsetzung von vorheriger Seite

Auswirkung	Geografischer Bezug	Kategorie	Sub-Kategorie	Einheit	Nickelpigmentiertes Aluminiumoxid auf Aluminiumblech	Schwarzchrom auf Kupferblech	Vakuumbeschichtung auf Kupferblech	Sputtern auf Kupferblech
renewable energy resources, biomass	GLO	cumulative energy demand	biomass	MJ-Eq	0,63858	0,6128	0,25894	0,72254
renewable energy resources, wind, solar, geothermal	GLO	cumulative energy demand	wind, solar, geothermal	MJ-Eq	0,13654	0,34808	0,31178	0,95522
renewable energy resources, water	GLO	cumulative energy demand	water	MJ-Eq	2,8857	2,8633	0,41729	2,6976

Tabelle 10-6: Auszug aus der bewerteten Wirkungsabschätzung

Funktionale Einheit ist 1 m² Absorberfläche. Aufgeführt sind die für dieses Forschungsvorhaben relevanten ChromVI-Mengen aus dem Herstellungsprozess der Absorberbeschichtungen.

Auswirkung	Geografischer Bezug	Kategorie	Sub-Kategorie	Einheit	Nickelpigmentiertes Aluminiumoxid auf Aluminiumblech	Schwarz-chrom auf Kupferblech	Vakuumbeschichtung auf Kupferblech	Sputtern auf Kupferblech
MAETP infinite	GLO	CML 2001	marine aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DCB-Eq	3932,3	1685,2	398,02	1758,2
MSETP infinite	GLO	CML 2001	marine sediment ecotoxicity	kg 1,4-DCB-Eq	2696,4	1015,8	161,95	887,36
MAETP 500a	GLO	CML 2001	marine aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DCB-Eq	53,006	17,205	0,78655	12,904
MSETP 500a	GLO	CML 2001	marine sediment ecotoxicity	kg 1,4-DCB-Eq	52,987	16,053	0,6864	12,63
MSETP 100a	GLO	CML 2001	marine sediment ecotoxicity	kg 1,4-DCB-Eq	11,968	3,5913	0,15922	2,8426
MAETP 100a	GLO	CML 2001	marine aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DCB-Eq	9,9539	3,2235	0,15225	2,4447
FSETP infinite	GLO	CML 2001	freshwater sediment ecotoxicity	kg 1,4-DCB-Eq	6,0953	1,7691	0,079154	0,81414
FSETP 500a	GLO	CML 2001	freshwater sediment ecotoxicity	kg 1,4-DCB-Eq	6,0301	1,7358	0,077789	0,7559
FSETP 100a	GLO	CML 2001	freshwater sediment ecotoxicity	kg 1,4-DCB-Eq	5,9984	1,7145	0,077327	0,73392
FSETP 20a	GLO	CML 2001	freshwater sediment ecotoxicity	kg 1,4-DCB-Eq	5,6062	1,6019	0,073746	0,68805
MSETP 20a	GLO	CML 2001	marine sediment ecotoxicity	kg 1,4-DCB-Eq	2,8598	0,86926	0,044262	0,71361
FAETP infinite	GLO	CML 2001	freshwater aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DCB-Eq	2,4611	0,75977	0,037383	0,35416
FAETP 500a	GLO	CML 2001	freshwater aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DCB-Eq	2,4278	0,74359	0,036669	0,32991
FAETP 100a	GLO	CML 2001	freshwater aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DCB-Eq	2,4124	0,73269	0,036475	0,32105
FAETP 20a	GLO	CML 2001	freshwater aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DCB-Eq	2,264	0,68803	0,035135	0,30347
HTP infinite	GLO	CML 2001	human toxicity	kg 1,4-DCB-Eq	2,1941	36,608	0,15	8,4248

Fortsetzung von vorheriger Seite

Auswirkung	Geografischer Bezug	Kategorie	Sub-Kategorie	Einheit	Nickelpigmentiertes Aluminiumblech	Schwarz-chrom auf Kupferblech	Vakuumbeschichtung auf Kupferblech	Spattern auf Kupferblech
HTP 500a	GLO	CML 2001	human toxicity	kg 1,4-DCB-Eq	1,5782	36,376	0,093633	8,103
HTP 100a	GLO	CML 2001	human toxicity	kg 1,4-DCB-Eq	1,5659	36,37	0,093265	8,0984
HTP 20a	GLO	CML 2001	human toxicity	kg 1,4-DCB-Eq	1,5574	36,365	0,093095	8,0956
MAETP 20a	GLO	CML 2001	marine aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DCB-Eq	1,4901	0,49804	0,027029	0,41566
TAETP infinite	GLO	CML 2001	terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DCB-Eq	0,021804	0,046956	0,0029964	0,038755
depletion of abiotic resources	GLO	CML 2001	resources	kg antimony-Eq	0,035061	0,014561	0,006222	0,021483
GWP 20a	GLO	CML 2001	climate change	kg CO2-Eq	6,0801	2,428	0,93396	3,1238
upper limit of net GWP	GLO	CML 2001	climate change	kg CO2-Eq	5,9561	2,3256	0,87395	2,9456
lower limit of net GWP	GLO	CML 2001	climate change	kg CO2-Eq	5,9471	2,3214	0,87291	2,9406
GWP 100a	GLO	CML 2001	climate change	kg CO2-Eq	5,9053	2,3022	0,86871	2,9142
GWP 500a	GLO	CML 2001	climate change	kg CO2-Eq	5,6908	2,2433	0,83865	2,8163
average European	RER	CML 2001	eutrophication potential	kg NOx-Eq	0,013828	0,0063072	0,0016223	0,0089156
average European	RER	CML 2001	acidification potential	kg SO2-Eq	0,064989	0,042899	0,0016114	0,020186
generic	GLO	CML 2001	acidification potential	kg SO2-Eq	0,057369	0,037251	0,001742	0,018851
competition	GLO	CML 2001	land use	m2a	0,23778	0,1231	0,058159	0,19083
malodours air	GLO	CML 2001	malodours air	m3 air	19837	19766	2622	12592
non-renewable resources, fossil	GLO	cumulative energy demand	fossil	MJ-Eq	72,813	26,056	9,71	33,674
non-renewable resources, nuclear	GLO	cumulative energy demand	nuclear	MJ-Eq	16,264	13,666	4,6963	15,718
renewable energy resources, water	GLO	cumulative energy demand	water	MJ-Eq	2,8857	2,8633	0,41729	2,6976
renewable energy resources, biomass	GLO	cumulative energy demand	biomass	MJ-Eq	0,63858	0,6128	0,25894	0,72254
renewable energy resources, wind, solar, geothermal	GLO	cumulative energy demand	wind, solar, geothermal	MJ-Eq	0,13654	0,34808	0,31178	0,95522

Fortsetzung von vorheriger Seite

Auswirkung	Geografischer Bezug	Kategorie	Sub-Kategorie	Einheit	Nickelpigmentiertes Aluminiumblech	Schwarz-chrom auf Kupferblech	Vakuumbeschichtung auf Kupferblech	Sputtern auf Kupferblech
total	RER	eco-indicator 99, (E,E)	total	points	0,39634	0,18663	0,035089	0,51982
total	RER	eco-indicator 99, (E,E)	resources	points	0,2109	0,085674	0,021938	0,35466
fossil fuels	RER	eco-indicator 99, (E,E)	resources	points	0,18673	0,063926	0,021488	0,07606
total	RER	eco-indicator 99, (E,E)	human health	points	0,12392	0,071755	0,0090988	0,097017
respiratory effects	RER	eco-indicator 99, (E,E)	human health	points	0,094667	0,057371	0,0044454	0,061202
total	RER	eco-indicator 99, (E,E)	ecosystem quality	points	0,061517	0,029206	0,0040528	0,068145
ecotoxicity	RER	eco-indicator 99, (E,E)	ecosystem quality	points	0,033634	0,018131	0,0008045	0,053351
mineral extraction	RER	eco-indicator 99, (E,E)	resources	points	0,024171	0,021748	0,00044999	0,2786
climate change	RER	eco-indicator 99, (E,E)	human health	points	0,024089	0,0093419	0,0035228	0,011828
land occupation	RER	eco-indicator 99, (E,E)	ecosystem quality	points	0,01648	0,0048714	0,0024725	0,0094951
acidification & eutrophication	RER	eco-indicator 99, (E,E)	ecosystem quality	points	0,011403	0,0062033	0,00077581	0,0052987
total	RER	eco-indicator 99, (H,A)	total	points	0,4343	0,18726	0,023513	0,41613
total	RER	eco-indicator 99, (H,A)	resources	points	0,21894	0,067676	0,0080789	0,23152
fossil fuels	RER	eco-indicator 99, (H,A)	resources	points	0,20187	0,052315	0,007761	0,034748
total	RER	eco-indicator 99, (H,A)	human health	points	0,16615	0,096216	0,012192	0,13009

Fortsetzung von vorheriger Seite

Auswirkung	Geografischer Bezug	Kategorie	Sub-Kategorie	Einheit	Nickelpigmentiertes Aluminiumoxid auf Aluminiumblech	Schwarz-chrom auf Kupferblech	Vakuumbeschichtung auf Kupferblech	Sputtern auf Kupferblech
respiratory effects	RER	eco-indicator 99, (H,A)	human health	points	0,12689	0,076913	0,0059472	0,08203
total	RER	eco-indicator 99, (H,A)	ecosystem quality	points	0,049214	0,023365	0,0032422	0,054516
climate change	RER	eco-indicator 99, (H,A)	human health	points	0,032327	0,012537	0,0047276	0,015873
ecotoxicity	RER	eco-indicator 99, (H,A)	ecosystem quality	points	0,026907	0,014505	0,0006436	0,042681
mineral extraction	RER	eco-indicator 99, (H,A)	resources	points	0,017072	0,015361	0,00031783	0,19678
land occupation	RER	eco-indicator 99, (H,A)	ecosystem quality	points	0,013184	0,0038971	0,001978	0,0075961
total	RER	eco-indicator 99, (I,I)	total	points	1,258	1,0308	0,040012	11,223
mineral extraction	RER	eco-indicator 99, (I,I)	resources	points	0,9572	0,86125	0,01782	11,032
total	RER	eco-indicator 99, (I,I)	resources	points	0,9572	0,86125	0,01782	11,032
total	RER	eco-indicator 99, (I,I)	human health	points	0,27943	0,16212	0,020279	0,17818
respiratory effects	RER	eco-indicator 99, (I,I)	human health	points	0,19439	0,12425	0,0071441	0,12867
climate change	RER	eco-indicator 99, (I,I)	human health	points	0,079179	0,030699	0,011584	0,038898
total	RER	eco-indicator 99, (I,I)	ecosystem quality	points	0,021373	0,0074105	0,0019125	0,012157
total	CH	ecological scarcity 1997	total	UBP	6460	8817,6	666	4000,6
emission into air	CH	ecological scarcity 1997	total	UBP	4865,8	2742,7	323,34	2916

Fortsetzung von vorheriger Seite

Auswirkung	Geografischer Bezug	Kategorie	Sub-Kategorie	Einheit	Nickelpigmentiertes Aluminiumblech	Schwarzchrom auf Kupferblech	Vakuumbeschichtung auf Kupferblech	Sputtern auf Kupferblech
Radioactive waste	CH	ecological scarcity 1997	total	UBP	882,24	750,7	221,32	757,68
deposited waste	CH	ecological scarcity 1997	total	UBP	284,03	5024,2	84,078	147,91
emission into water	CH	ecological scarcity 1997	total	UBP	244,48	79,946	5,9769	33,387
use of energy resources	CH	ecological scarcity 1997	total	UBP	91,854	42,475	14,724	51,781
emission into top-soil/groundwater	CH	ecological scarcity 1997	total	UBP	91,598	177,55	16,564	93,88
non-renewable resources, oil	GLO	EDIP	resource consumption	kg	1,1651	0,094281	0,015497	0,085873
non-renewable resources, brown coal	GLO	EDIP	resource consumption	kg	0,53479	0,46984	0,38375	1,1857
non-renewable resources, coal	GLO	EDIP	resource consumption	kg	0,27327	0,28394	0,19522	0,62107
non-renewable resources, natural gas	GLO	EDIP	resource consumption	kg	0,18667	0,24357	0,030684	0,12803
non-renewable resources, nickel	GLO	EDIP	resource consumption	kg	0,028658	0,026002	0,0001084	0,0021154
non-renewable resources, iron	GLO	EDIP	resource consumption	kg	0,028567	0,033499	0,0056926	0,013246
global warming, GWP 20a	GLO	EDIP	environmental impact	kg CO2-Eq	6,0994	2,429	0,93357	3,1253
global warming, GWP 100a	GLO	EDIP	environmental impact	kg CO2-Eq	5,9419	2,309	0,87127	2,9262
global warming, GWP 500a	GLO	EDIP	environmental impact	kg CO2-Eq	5,7201	2,2448	0,8384	2,8201
nutrient enrichment, combined potential	GLO	EDIP	environmental impact	kg NO3-	0,058726	0,0080488	0,0019926	0,010999
acidification	GLO	EDIP	environmental impact	kg SO2-Eq	0,057369	0,037251	0,001742	0,01885
land filling, bulk waste	GLO	EDIP	environmental impact	kg waste	0,56151	0,44312	0,16413	0,28673
human toxicity, via air	GLO	EDIP	environmental impact	m3 air	1,15E+06	4,54E+05	1,58E+05	5,05E+06

Fortsetzung von vorheriger Seite

Auswirkung	Geografischer Bezug	Kategorie	Sub-Kategorie	Einheit	Nickelpigmentiertes Aluminiumblech	Schwarz-chrom auf Kupferblech	Vakuumbeschichtung auf Kupferblech	Sputtern auf Kupferblech
Ecotoxicity, chronic, in soil	GLO	EDIP	environmental impact	m3 soil	96,329	94,423	12,382	140,71
human toxicity, via soil	GLO	EDIP	environmental impact	m3 soil	0,51963	0,26403	0,11853	1,8729
Ecotoxicity, in sewage treatment plants	GLO	EDIP	environmental impact	m3 waste water	8520,9	1786,6	224,89	2255,1
Ecotoxicity, chronic, in water	GLO	EDIP	environmental impact	m3 water	6366,9	1410,9	383,96	1795,4
Ecotoxicity, acute, in water	GLO	EDIP	environmental impact	m3 water	714,18	157,7	39,378	180,87
human toxicity, via surface water	GLO	EDIP	environmental impact	m3 water	49,192	17,438	7,3231	27,961
Total	GLO	EPS 2000	total	ELU	7,6089	5,8972	0,31504	28,142
abiotic stock resources	GLO	EPS 2000	total	ELU	6,6264	5,428	0,19619	27,41
emissions into air	GLO	EPS 2000	total	ELU	0,97622	0,46774	0,11815	0,72772
Total	RER	IMPACT 2002+ (Endpoint)	human health	points	0,00066801	0,00041591	3,22E-05	0,00039326
Total	RER	IMPACT 2002+ (Endpoint)	resources	points	0,00058893	0,00026425	9,49E-05	0,00037931
Total	RER	IMPACT 2002+ (Endpoint)	climate change	points	0,00057467	0,00022714	8,46E-05	0,00028486
Total	RER	IMPACT 2002+ (Endpoint)	ecosystem quality	points	0,00016174	6,90E-05	6,13E-06	0,00015181
aquatic eutrophication	RER	IMPACT 2002+ (Midpoint)	ecosystem quality	kg PO4-Eq	0,00036168	3,67E-05	6,25E-06	3,43E-05
aquatic acidification	RER	IMPACT 2002+ (Midpoint)	ecosystem quality	kg SO2-Eq	0,057369	0,037251	0,001742	0,018851
GWP 20°	GLO	IPCC 2001	climate change	kg CO2-Eq	6,0804	2,4282	0,93408	3,1249
GWP 100°	GLO	IPCC 2001	climate change	kg CO2-Eq	5,9057	2,3025	0,86887	2,9158
GWP 500°	GLO	IPCC 2001	climate change	kg CO2-Eq	5,6914	2,2438	0,83888	2,8187

Tabelle 10-7: Bewerteten Wirkungsabschätzung (gekürzt – größte Werte).

Funktionale Einheit ist 1 m² Absorberfläche.

10.7. Zusammenfassung der Ergebnisse des Branchen-Workshops

Am 16.10.06 wurde in Berlin ein Branchen-Workshop durchgeführt. Die folgende Dokumentation stellt die zentralen Ergebnisse dar.

Begrüßung

Frau Viertl vom BMU, Referat KI I 2, begrüßte alle Teilnehmer und führte den aktuellen Stand zum Marktanreizprogramm (MAP) aus. Dabei wies sie auf den Förderstopp (Oktober 2006) aufgrund der großen Antragszahlen hin und betonte die Notwendigkeit eines einfachen, pauschalisierten und zügigen Antragsverfahrens, um die Antragsbearbeitung beim BAFA möglichst aufwandsarm zu halten. Ferner verwies sie darauf, dass mit einem Kompromiss zum regenerativen Wärmegesetz zu rechnen wäre. Dies könne z.B. eine Erhöhung der Mittel für das MAP beinhalten. Falls diese Erhöhung erfolgt, wird seitens des BMU versucht werden, eine gute Breitenwirkung, die Erschließung neuer Marktsegmente und die Förderung innovativer Technologien zu erzielen.

Herr Bruchmann vom BMU, Referat KI I 5, unterstrich die europäische Dimension des Marktanreizprogramms und verwies auf den Grundgedanken des Vorhabens, nämlich die besondere Umweltleistung zu nutzen, um der Bedingung des EU-Beihilferechts zu entsprechen, Investitionshilfen nur zu gewähren, falls der Stand der Technik überschritten wird und nicht wenn sie lediglich darauf abzielen, bestehende oder neue technische Gemeinschaftsnormen zu erfüllen. Ausgangspunkt für das vorliegende Projekt war es, diese Bedingungen mit Hilfe von fortschrittlichen Umweltstandards einzuhalten.

1. Einleitung

Herr Handke referierte über die Zielstellung, das Projektdesign und die Ergebnisse der Arbeitspakete

1. Marktanalyse
2. Umweltauswirkungen
3. Ansätze für Umweltstandards

aus dem Bearbeitungszeitraum 2005 sowie des wissenschaftlichen Workshops vom 8.11.2005. Als Aktualisierung unterstrich er die steigende Bedeutung des Exports sowie der Zunahme eines Marktes außerhalb der BAFA Förderung hin. Ferner wies er auf die Inkonsistenz zwischen den Zahlen des BAFA und der vom BSW veröffentlichten Daten hin. Dies betrifft insbesondere das Jahr 2005. Während die BAFA-Zahlen ein Rückgang hinsichtlich Kollektorfläche und Anlagenanzahl ausweisen, geht die BSW von einem 27%-igem Marktwachstum bei der insgesamt installierten Kollektorfläche aus.

Herr Kuhlmann vom BDH erklärte die Inkonsistenz zwischen den BAFA- und den BSW-Daten mit dem ausgeprägten Jahresgang der BAFA-Daten. Dies habe zur Folge, dass bei einer einzelnen Jahresbetrachtung die Auszahlungsspitzen mal in das eine und mal in das andere Jahr fielen. Bei einer mehrjährigen Betrachtungen würden sich die Daten von BAFA und BSW angleichen.

2. LCA der Beschichtungsverfahren.

Herr Kamburow stellte die Ergebnisse der ökobilanziellen Gate-to Gate Analyse der Beschichtungsverfahren vor. Bilanziert wurden vier Verfahren. Schwerpunkt der Betrachtung war ein Vergleich zwischen galvanisch hergestellten und nicht-galvanisch, im Vakuum aufgebrauchte selektive Beschichtungen. Als Datenbasis wurde die ECOINVENT Datenbank Version 1.2 genutzt. Die Modellierung und der Datenbankzugriff erfolgte mit Hilfe der UMBERTO Software. Als funktionale Einheit wurde 1m² beschichtete Absorberoberfläche verwandt. Als unbewerteter Wirkungsindikator wurden die Chrom VI Emissionen, als bewertete Indikatoren der Energieaufwand (KEA), Klimaerwärmung GWP 20, Menschliche Gesundheit, Gewässerversauerung und -eutrophierung nach IMPACT 2002+ und als aggregierter Indikator der Eco-Indicator 99 (H.A) vorgestellt. Erwartungsgemäß weist die Schwarzver-

chromung auf Kupferblech die höchsten Cr VI Emissionen auf. Nickelpigmentiertes Aluminiumoxid auf Aluminiumblech weist außer beim Eco-Indikator in allen bewerteten Wirkungskategorien die höchsten Belastungen auf. Allerdings wird dieses Beschichtungsverfahren nach Aussagen der Branchenvertretern nicht mehr am Markt vertreten. Zudem stammt die Datenbasis für dieses Verfahren aus dem Jahr 1993 und ist damit relativ alt. Daher kann der im Vergleich zu den anderen Verfahren hohe Energieaufwand auch als technischer Fortschritt bei der Kupferbeschichtungen aufgefasst werden. Bei den nicht-galvanischen Beschichtungen auf Kupferblech weist das Sputtern höhere Umweltauswirkungen auf als die Vakuumbeschichtung auf Kupferblech. Außer bei Cr VI, liegen die Umweltauswirkungen der Schwarzverchromung zwischen denen der anderen Kupferbeschichtungen. Eine Ausnahme stellt lediglich die Auswirkung auf die menschliche Gesundheit dar, wo die Schwarzverchromung gleichauf mit dem Sputtern auf Kupferblech liegt.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Schwarzverchromung, außer bei den Cr VI Emissionen, keine signifikant höhere Umweltbelastung verursacht als die anderen aktuell am Markt vertretenden Beschichtungsverfahren.

Es wurde kritisiert, dass die unterschiedliche Substratdicke von der funktionalen Einheit nicht angemessen abgebildet wurde.

3. Chrom VI Analyse der Vorketten

Herr Handke präsentierte die Ergebnisse der Vorkettenanalyse hinsichtlich der Cr VI Emissionen. Ausgangspunkt war die Frage, inwieweit die Herstellung von metallischem Chrom wie es in den Targets beim Cermet PVD-Sputtern auf Kupferblech Anwendung findet, ebenso Cr VI Emissionen verursacht, wie die Herstellung von Chromsäure, die in der Schwarzverchromung eingesetzt wird. Als Ansatz wurden die Cr VI Emissionen bei der Herstellung der entsprechenden Einsatzstoffe für die Schwarzverchromung (Chromsäureanhydrid) mit denen des Cermet PVD-Sputtern (Chrom ab Regio-nallager) miteinander verglichen.

Als Ergebnis konnte gezeigt werden, dass bei der Herstellung von Chromsäureanhydrid insgesamt die 3-fache Menge an Cr VI emittiert wird, verglichen mit der Herstellung von metallischem Chrom (17 g/kg bzw. 5 g/kg). Weit überwiegend handelt es sich dabei um Gewässeremissionen. Diese werden durch die nassen Produktionsverfahren zur Herstellung von Chromsäure verursacht. Hinsichtlich der Luft- und Bodenemissionen ergibt sich allerdings ein umgekehrtes Bild. Diese Cr VI Emissionen werden fast ausschließlich durch die Herstellung von metallischem Chrom verursacht, allerdings auf einem um zwei bzw. drei Größenordnung geringeren Niveau (0,02 g/kg bzw. 0,005 g/kg). Ursächlich für diesen Befund sind die metallurgischen Produktionsverfahren zur Herstellung von Chrom.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass bei einer ausschließlichen Betrachtung von Chrom VI die Schwarzverchromung auch unter Einbeziehung der Vorketten in signifikanter Weise größere Mengen an krebserregendes Chrom VI verursacht als die nicht-galvanischen Beschichtungsverfahren.

4. Ergebnisse der Task 10 Prüfung und Vorhersage der Lebenserwartung.

Herr Handke stellte die Ergebnisse aus dem Arbeitspaket 5 des Vorhabens vor. Einleitend wies er auf den aus Umweltsicht relevanten Aspekt der Langlebigkeit hin. Ziel im Vorhaben war es insbesondere die Langlebigkeit der galvanisch hergestellten Beschichtungsverfahren und der nicht-galvanisch hergestellten Verfahren miteinander zu vergleichen. Zunächst gab Herr Handke ein Überblick über die Vorgehensweise bei einer Task 10 Prüfung. Es handelt sich dabei um eine Alterungssimulation der Beschichtung durch eine Beanspruchung mittels Temperatur, Feuchte und atmosphärischer Korrosion. Wesentlicher Prüfparameter ist die durch die Beanspruchung veränderte optische Leistungsfähigkeit (solare Absorption und thermische Emission) der Beschichtung.

Dann wurde die Vorgehensweise bei der Durchführung der Task 10 Prüfung erläutert. Geprüft wurde eine galvanisch und vier nicht-galvanisch hergestellte Beschichtungen. Es handelte sich dabei um die Beschichtungen

- Schwarzverchromung mit Nickel Unterlage auf Kupferblech
- Cermet PVD-Sputtern auf Kupferblech (Hersteller A)
- Cermet PVD-Sputtern auf Aluminiumband

- Cermet PVD-Sputtern auf Kupferblech (Hersteller B)
- Titan-Nitritoxid PVD-Sputtern auf Kupferblech

Zusammen decken diese fünf Beschichtungen ca. 85% des europäischen Marktes ab. Die optische Leistungsfähigkeit vor Beginn der Beanspruchung ergab, dass die galvanische Beschichtung die höchsten Absorptionswerte aufwies, allerdings bei einer erheblichen Streuung der Absorptionswerte der nicht-galvanischen Beschichtungen. Für die Emission konnte dieses Verhältnis ebenfalls festgestellt werden, allerdings bei einer wesentlich geringeren Streuung.

Hinsichtlich der Emissionen wurden durchweg höhere Werte ermittelt als die Beschichtungshersteller in Eigenmessungen oder bei von ihnen in der Vergangenheit in Auftrag gegebenen Prüfungen. Allerdings hat dies keinen Einfluss auf die Messung der optischen Leistungsfähigkeit, da die Task 10 lediglich die Emissionsdifferenzen nutzt. Hinsichtlich der Prüftemperatur führen systematisch überhöhte Emissionen zu einer zu geringen Prüftemperatur.

Während der Temperaturbeanspruchung wies die galvanische Beschichtung erstaunlicherweise eine Verbesserung ihrer optischen Leistungsfähigkeit auf. Dabei verringerte sich die Emission, während die Absorption annähernd konstant blieb.

Die Beschichtung auf Aluminiumsubstrat wies nach kürzester Zeit eine Verringerung der optischen Leistungsfähigkeit auf, so dass diese Schicht den zulässigen Grenzwert überschritt und hinsichtlich der Temperaturbeschichtungen den Anforderungen der Task 10 daher nicht entsprach. Allerdings wies diese Schicht eine relative Stabilität der optischen Leistungsfähigkeit auf.

Die anderen drei Schichten wiesen Schichtdegradation mit einer typischen Verringerung der optischen Leistungsfähigkeit innerhalb der Anforderung der Task 10.

Während der Kondensationsprüfung war es wiederum die galvanische Schicht, welche ihre optische Leistungsfähigkeit sogar verbessern konnte, wenn auch in geringerem Ausmaß als bei der thermischen Beanspruchung. Für die Aluminiumbeschichtung wurde eine minimale Verringerung der optischen Leistungsfähigkeit festgestellt, während die übrigen Schichten wiederum typisches Degradationsverhalten aufwiesen mit einer entsprechenden Verschlechterung der optischen Eigenschaften innerhalb des zulässigen Wertebereichs. Allerdings war dabei eine ausgeprägte Streuung um den Faktor 3 festzustellen.

Auch bei der Beanspruchung durch atmosphärische Korrosion konnte die galvanische Schicht ihre optische Eigenschaft verbessern, während die Aluminiumbeschichtung eine annähernd konstante optische Leistungsfähigkeit aufwies und die übrigen Beschichtungen wiederum typisches Degradationsverhalten aufwiesen. Ergänzend kann noch gesagt werden, dass bei Temperatur und atmosphärischer Korrosion das Titan-Nitritoxid PVD-Sputtern auf Kupferblech die größte Verringerung der optischen Leistungsfähigkeit aufwies, während bei der Kondensation dieser Rang von Cermet PVD-Sputtern auf Kupferblech (Hersteller A) eingenommen wurde.

Zusammenfassend konnte gezeigt werden, dass die galvanische Beschichtungen bei allen Beanspruchungen die höchste Beständigkeit aufweist. Die Aluminiumbeschichtung entspricht nicht der Anforderung an die Temperaturbeständigkeit der Task 10, besitzt aber bei den anderen Beanspruchungen die zweitbeste Beständigkeit. Die anderen Beschichtungen erfüllen die Beständigkeitsanforderungen der Task 10, wenn auch mit erheblicher Streuung.

5. Quantifizierung der Lebensdauer

Die Prüfung der Task 10 sieht lediglich ein qualitatives Ergebnis vor. Prüfergebnis ist dabei die Antwort auf die Frage, ob eine Beschichtung die Anforderungen an die Beständigkeit erfüllt oder nicht. Daher wurde im Rahmen des Vorhabens aus den gemessenen Veränderungen der optischen Leistungsfähigkeit während der Temperatur- und der Kondensationsbeanspruchung der zeitliche Verlauf der Degradation mathematisch modelliert, um so die voraussichtliche Lebensdauer zu quantifizieren. Dabei wurde angenommen, dass die Lebensdauer beendet ist, wenn die optische Leistungsfähigkeit unter Standardbedingungen um mehr als 5% abnimmt.

Für die nicht-galvanischen Schichten auf Kupferblech wurden voraussichtliche Lebensdauern von 42 bis 43 Jahre ermittelt. Für die galvanische Beschichtung konnte lediglich eine Lebensdauer von über 43 und für die Aluminiumbeschichtung von weniger als 25 Jahren festgestellt werden.³³

³³ Eine Nachmessung hat für die Aluminiumbeschichtung eine Lebensdauer von 15 Jahren ergeben.

Abschließend wurde auf den Einschränkungen dieser Quantifizierungen hingewiesen. So führt bspw. die Abnahme der optischen Leistungsfähigkeit zu geringeren Stillstandtemperaturen, was die thermische Beanspruchung verringert und somit die Schichtdegradation verlangsamt.

Herr Köhl vom ISE merkte an, dass die Quantifizierung der zu erwartenden Lebensdauer mit erheblichen Unsicherheiten verbunden ist und zweifelte die Belastbarkeit derartiger Quantifizierungen an. Ferner wies er auf die Benutzung von SO₂ bei der Task 10 Prüfung der atmosphärischen Korrosion hin: Aufgrund der Erfolge in der Luftreinhaltepolitik, spielt dieser Schadstoff jedoch als korrosiver Bestandteil der Luft eine immer geringere Rolle.

Hinsichtlich der mangelnden Temperaturbeständigkeit der Aluminiumbeschichtungen merkte er an, dass eine derartig schnelle Schichtdegradation untypisch sei und daher die Gründe für dieses Verhalten in weiteren Untersuchungen ermittelt werden sollte.

6. Umweltstandards für thermische Solarkollektoren

Herr Handke stellte die Schlussfolgerungen aus allen zurückliegenden Arbeitspaketen für die Entwicklung von Umweltstandards vor.

Ausschlaggebend für die Umweltleistung eines Kollektors ist die tatsächlich substituierte fossile Energiemenge. Daher wurde vorgeschlagen, den Ertrag als wesentlichen Umweltstandard zu nutzen. Aus Gründen der Vereinfachung wurde vorgeschlagen, dabei auf die Nutzung des kumulierten Energieaufwands zu verzichten, zumal sein Einfluss gemessen an dem Gesamtertrag über die Lebensdauer eher marginal ist. Ferner wurde vorgeschlagen, aus Gründen der Vereinfachung, standardisierte Rahmenbedingungen bei der Ertragsbestimmung zu benutzen.

Aufgrund der signifikant höheren Beständigkeit und der längeren Lebensdauer der galvanischen Beschichtungen, wird von der Nutzung der Beschichtungsart als Umweltstandard abgeraten.

Aufgrund der unterschiedlichen Ergebnisse der Task 10 Prüfungen, wird die Einhaltung der Anforderungen der Task 10 als Umweltstandard empfohlen.

Aufgrund der geringen Komplexität, der geringen Materialvielfalt und der Verwendung hochpreisiger Materialien in Kollektoren, wird die Nutzung der VDI Richtlinie 2243 zur recyclinggerechten Konstruktion nicht empfohlen.

Aufgrund der marktdifferenzierenden Logik der RAL UZ 73, welche als Entsprechung der Anforderung des EU-Beihilferechts aufgefasst werden kann und aufgrund der in den Vergabegrundlagen umweltbezogenen Anforderungen insbesondere hinsichtlich der Rücknahmeverpflichtung, aber auch der Dämmung und des Wärmeträgerfluids, wird die Nutzung der RAL UZ 73 als Umweltstandard empfohlen.

Ferner wird die Einhaltung der europäischen Normen und als Äquivalentregelung die Zertifizierung nach Solar Keymark als Umweltstandard vorgeschlagen. Ausschlaggebend dafür sind die dort enthaltenen Umwelanforderungen hinsichtlich Wärmeträgerfluid, Ausgasung aus Dämmstoffen und insbesondere dem Recycling der Kollektorwerkstoffe. Ferner ausschlaggebend sind die dort enthaltenen Qualitätsstandards.

Als umweltorientiertes Förderkonzept wurde vorgeschlagen, zwischen einer Grund- und einer Leistungsförderung zu differenzieren.

Für die Grundförderung wäre die Einhaltung aller vorgeschlagenen Umweltstandards obligatorisch. Ferner sollte sie nach Technologie, Anwendung und Wettbewerbsfähigkeit differenziert ausgestaltet werden und so als Steuerungsinstrument nutzbar sein. Schließlich sollte sie als Voraussetzung für den Erhalt der Leistungsförderung gelten.

Die Leistungsförderung indes sollte sich nur an der tatsächlich produzierten Wärmemenge orientieren und in Euro pro kWh geleistet werden.

Die Nutzung des Solar Keymarks traf bei den Teilnehmenden auf breite Zustimmung. Ebenfalls begrüßt wurde, dass die Art der Beschichtungsherstellung und -art nicht in die Umweltstandards integriert wird. Die Nutzung der RAL UZ 73 als Umweltstandard wurde aufgrund ihrer marktdifferenzierenden Wirkung kritisiert.

Die Ausrichtung von Umweltstandards an der substituierten fossilen Energiemenge wurde im Grundsatz begrüßt. Unterschiedliche Auffassung gab es indes an der Standardisierung der Rahmenbedingungen und der konkreten Berechnungsmethode der bereitgestellten Energiemenge.

Herr Drück mahnte die Einbeziehung des gesamten Anlagensystems an, da dieses ausschlaggebend sei. Vorgeschlagen wurde eine Leistungsberechnung anzuwenden, wie sie auch im Solar Keymark zugrundegelegt wird.

Teilnehmer des Branchen-Workshops

Vorname	Name	Institution
Karsten	Fenske	ALANOD-SUNSELECT GmbH & Co. KG
Dimitrios	Peros	ALANOD-SUNSELECT GmbH & Co. KG
Reinhard	Dasbach	TiNOx
Davorin	Pavić	BlueTec GmbH & Co. KG
Jörg	Buschbeck	Buschbeck Solartechnik GmbH
Emmanuel	Brender	ChromCoat A/S
Kai	Bohn	ChromCoat A/S
Wolfgang	Eisenmann	Institut für Solarenergieforschung GmbH
Harald	Drück	ITW Uni Stuttgart
Elke	Streicher	ITW Uni Stuttgart
Norbert	Rohde	KBB Kollektorbau
Gunter	Rockendorf	KBB Kollektorbau
Stefan	Abrecht	Paradigma-Ritter Energie- und Umwelttechnik GmbH & Co. KG
Ralf	Köbbemann-Rengers	Solar Diamant Systemtechnik GmbH
Dirk	Mangold	Steinbeis-Forschungsinstitut Solare und zukunftsfähige thermische Energiesysteme
Carsten	Kuhlmann	Viessmann Werke GmbH & Co
Volker	Kallwellis	Wagner & Co. Solartechnik GmbH
Nadine	Hanke	Schüco International Solartechnik
Felix A.	Peuser	ZfS-Rationelle Energietechnik GmbH
Cornelia	Viertel	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit Referat KI I 2
Ullrich	Bruchmann	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit Referat KI I 5
Peter	Donat	Forschungszentrum PT J
Michael	Köhl	Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
Volker	Handke	Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung
Christian	Kamburow	Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung
Wolfram	Jörß	Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung