

**Ganzheitliche Bewertung  
von Sonnenkollektoren unter besonderer  
Berücksichtigung des Alterungsverhaltens**

Von der Fakultät Energie-, Verfahrens- und Biotechnik  
der Universität Stuttgart  
zur Erlangung der Würde  
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von  
**Elke Streicher**  
aus Kempten/Allgäu

Hauptberichter: Prof. Dr. Dr.-Ing. habil. H. Müller-Steinhagen  
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. V. Wittwer

Tag der mündlichen Prüfung: 19. Mai 2011

Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW)  
der Universität Stuttgart

2011

## Kurzfassung

Der Einsatz von Solartechnik ist mittlerweile weit verbreitet und thermische Sonnenkollektoren werden auf der ganzen Welt mit unterschiedlichem Qualitätsniveau hergestellt. Die prognostizierte Lebensdauer von thermischen Solaranlagen beträgt in gemäßigtem mitteleuropäischen Klima zwischen 25 und 30 Jahren. Dabei wird aber keine Aussage getroffen, wie die thermische Leistung über den Betriebszeitraum aufgrund von Alterungsvorgängen abnimmt. Zur Sicherung eines allgemeinen Qualitätsstandards ist es nötig, neben den bereits in der europäischen Normung etablierten Prüfverfahren zur Bestimmung der Zuverlässigkeit und der thermischen Leistung im Neuzustand, auch ganzheitliche Bewertungen durchzuführen, die die Leistungsabnahme im Laufe der Betriebsdauer berücksichtigen.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, Alterungsvorgänge an Sonnenkollektoren und deren Auswirkungen auf die thermische Leistungsdegradation zu quantifizieren sowie deren Folge auf die ganzheitliche Bewertung von Sonnenkollektoren zu untersuchen. Die Untersuchungen sollen als Basis zur Entwicklung eines beschleunigten Alterungsprüfverfahrens für Sonnenkollektoren dienen.

Im ersten Teil der Arbeit erfolgt zunächst eine Quantifizierung des Alterungsverhaltens. Dazu werden beschleunigte Alterungsprüfungen an Sonnenkollektoren durchgeführt und die Auswirkungen einer erhöhten Temperaturbelastung sowie einer Belastung in salzhaltiger Atmosphäre mit und ohne Kombination von Kondenswasser untersucht. Zusätzlich wird die Alterung infolge von UV-Strahlung näher betrachtet. Die beschleunigten Prüfungen infolge erhöhter Temperaturbelastung werden sowohl durch Exposition im Freien als auch mit Laborprüfungen durchgeführt. Weiterhin erfolgen Untersuchungen des Alterungsverhaltens aufgrund korrosiver salzhaltiger Atmosphäre anhand unterschiedlicher Prüfsequenzen in einer Klimakammer. Aus den gewonnenen Erkenntnissen wird eine Methodik für die Salzsprühnebelprüfung für Sonnenkollektoren vorgeschlagen. Für die Untersuchung der UV-strahlungsinduzierten Alterung wird ein Prüfstand konzipiert und die Wirkung der Alterungsvorgänge auf einen Flachkollektor mit Kunststofffolienabdeckung analysiert.

Die Quantifizierung des Alterungsverhaltens erfolgt durch Bestimmung der Änderung der charakteristischen Kollektorkennwerte, die mit thermischen Leistungsprüfungen vor und nach den einzelnen Sequenzen der beschleunigten Prüfungen ermittelt werden. Mit anschließenden Simulationsrechnungen wird die Auswirkung der Alterung auf die anteilige Energieeinsparung von thermischen Solaranlagen ermittelt.

Eine Problematik von beschleunigten Alterungsuntersuchungen stellt die Korrelation der Prüfergebnisse zum realen Betrieb dar, da bei Laborprüfungen meistens nur ausgewählte Einflüsse und nicht alle Umgebungsparameter gleichzeitig simuliert werden können. In der Arbeit werden unterschiedliche Korrelationsmöglichkeiten auf experimenteller (Standardproben) und theoretischer Basis (time transformation functions) diskutiert. Die Korrelation infolge einer beschleunigten Prüfung mit erhöhter Temperaturbelastung wird mit Hilfe der Arrhenius-Beziehung in ein Kollektormodell implementiert, das es nun ermöglicht, mit den Ergebnissen aus beschleunigten Alterungsuntersuchungen die Leistungsabnahme über einen beliebigen Zeitraum vorherzusagen.

Im zweiten Teil der Arbeit werden verschiedene ökologische Bewertungsmethoden für thermische Solaranlagen vorgestellt. Anschließend erfolgt eine ganzheitliche Bewertung von solaren Kombianlagen, bei der sowohl energetische Betrachtungen durch Ermittlung der energetischen Amortisationszeit und der Energieeinsparung über die Lebensdauer als auch Emissionsbetrachtungen durchgeführt werden. Abschließend wird eine Kennzahl für die ökologische Bewertung von Sonnenkollektoren eingeführt und der Einfluss der alterungsbedingten Leistungsdegradation auf die ökologische Bewertung erläutert.

## Abstract

Today the use of solar thermal technology is widely distributed and solar thermal collectors are produced all over the world with different levels of quality. The predicted lifetime for solar thermal systems in moderate central European climate lies between 25 and 30 years. However, no statement is made to what extent the thermal efficiency during the lifetime of a collector will be reduced due to ageing effects. Besides the well-established test standards for solar thermal collectors concerning the determination of reliability and thermal efficiency in factory-new state it is necessary to introduce integral assessment methods, which consider the reduction in efficiency during the time of operation in order to secure a high quality level.

The aim of this thesis is to quantify the ageing behaviour of solar thermal collectors and to investigate the impact of ageing on an integral assessment of solar thermal collectors. The investigations shall provide a basis for the development of an accelerated ageing test procedure for solar thermal collectors.

The first part of this thesis consists of a quantification of the ageing behaviour of solar thermal collectors. Accelerated ageing tests of solar thermal collectors are carried out and the impact of high temperature as well as the impact of saline atmosphere with and without condensing water on ageing of solar thermal collectors are investigated. In addition, the ageing due to ultraviolet radiation is considered. The high temperature accelerated ageing tests are carried out with laboratory and outdoor experiments. Furthermore, numerous investigations of the ageing behaviour due to corrosive and saline atmosphere are made with different test sequences in a climate chamber. With the experiences and results gained from the tests a suitable methodology for salt mist spray tests for solar thermal collectors is proposed. In order to investigate ageing induced by ultraviolet radiation a test facility has been designed and the impact of degradation on a flat plate collector with plastic film cover is analysed.

The quantification of the ageing behaviour is done with an investigation of the modification of the characteristic collector parameters, which are determined with thermal efficiency tests before and after the individual accelerated test sequences. Subsequently, calculations with a simulation programme are carried out to determine the impact of ageing on the fractional energy savings of solar thermal systems.

As laboratory tests often simulate only some selected influences and not all environmental parameters simultaneously, a problem of accelerated ageing tests is to find the correlation of the test results with real-time operation. Therefore the thesis discusses different possibilities for correlation methods on experimental (standard specimen) and theoretical basis (time transformation functions). The correlation of the results of an accelerated high temperature test is numerically implemented in a collector model with the Arrhenius equation. With this model it is possible to predict the reduction of thermal efficiency over any desired period of time.

In the second part of this thesis different ecological assessment methods for solar thermal systems are discussed. Afterwards an integral assessment is made for solar combisystems, comprising energy dependend considerations like energy payback time and energy savings during lifetime as well as the influence of emissions. Finally a classification figure for the ecological assessment of solar thermal collectors is introduced and possible effects of efficiency degradation on the ecological assessment methods are illustrated.

## Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung</b> .....	<b>V</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>VII</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>IX</b>
<b>Nomenklatur</b> .....	<b>XV</b>
<b>Lateinische Buchstaben</b> .....	<b>XV</b>
<b>Griechische Buchstaben</b> .....	<b>XVII</b>
<b>Indizes</b> .....	<b>XVII</b>
<b>Chemische Formelzeichen</b> .....	<b>XVIII</b>
<b>Abkürzungen</b> .....	<b>XIX</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 Allgemeines</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2 Literaturübersicht</b> .....	<b>3</b>
1.2.1 Alterungsuntersuchungen .....	3
1.2.2 Ökologische Bewertung .....	4
<b>1.3 Ziele der Arbeit</b> .....	<b>5</b>
<b>2 Theoretische Grundlagen des Alterungsverhaltens</b> .....	<b>9</b>
<b>2.1 Degradationsursachen</b> .....	<b>9</b>
2.1.1 Hohe Temperaturbelastung .....	9
2.1.2 Salzhaltige Atmosphäre .....	9
2.1.3 Feuchte .....	10
2.1.4 UV-Strahlung .....	10
<b>2.2 Degradationsmechanismen</b> .....	<b>11</b>
2.2.1 Thermische Oxidation .....	11
2.2.1.1 Metallische Kollektorkomponenten .....	11
2.2.1.2 Absorberbeschichtungen .....	11
2.2.1.3 Verbindung Absorberblech mit Wärmeübertragungsrohr .....	13
2.2.1.4 Transparente Abdeckungen .....	13
2.2.2 Ausgasung .....	14
2.2.3 Salzkorrosion .....	14
2.2.3.1 Metallische Kollektorkomponenten .....	16
2.2.3.2 Absorberbeschichtungen .....	18
2.2.3.3 Verbindung Absorberblech mit Wärmeübertragungsrohr .....	19
2.2.3.4 Transparente Abdeckungen .....	21
2.2.4 Photooxidation .....	22
2.2.4.1 Transparente Abdeckungen .....	23
2.2.4.2 Absorberbeschichtungen .....	23

<b>3 Exemplarische Untersuchung des Alterungsverhaltens .....</b>	<b>25</b>
<b>3.1 Grundlegende Vorgehensweise.....</b>	<b>25</b>
3.1.1 Alterungsuntersuchungen am gesamten Sonnenkollektor .....	25
3.1.2 Quantifizierung des Alterungsverhaltens.....	26
3.1.2.1 Charakteristische Kollektorkennwerte.....	26
3.1.2.2 Leistungskennlinie.....	27
3.1.2.3 Quantifizierung der Leistungsdegradation .....	27
3.1.2.4 Bestimmung der Messunsicherheiten .....	28
<b>3.2 Exposition von Sonnenkollektoren im Freien .....</b>	<b>31</b>
3.2.1 Untersuchungsmethodik .....	32
3.2.2 Optische Begutachtung.....	33
3.2.3 Änderung der Kollektorkennwerte .....	33
3.2.3.1 Konversionsfaktor.....	33
3.2.3.2 Effektiver Wärmedurchgangskoeffizient.....	34
3.2.3.3 Leistungskennlinien.....	35
3.2.4 Quantifizierung der Leistungsdegradation .....	38
3.2.5 Interpretation der Untersuchungsergebnisse .....	39
<b>3.3 Alterungsverhalten infolge hoher Temperaturbelastung .....</b>	<b>41</b>
3.3.1 Untersuchungsmethodik .....	41
3.3.2 Optische Begutachtung.....	41
3.3.3 Änderung der Kollektorkennwerte .....	43
3.3.3.1 C781 - Belastungstemperatur 340 °C .....	43
3.3.3.2 C782 - Belastungstemperatur 280 °C .....	45
3.3.3.3 C783 - Belastungstemperatur 300 °C .....	46
3.3.3.4 Vergleich der Degradationsverläufe .....	48
3.3.4 Quantifizierung der Leistungsdegradation .....	49
3.3.5 Interpretation der Untersuchungsergebnisse .....	50
<b>3.4 Alterungsverhalten infolge salzhaltiger Atmosphäre .....</b>	<b>52</b>
3.4.1 Untersuchungsmethodik .....	52
3.4.2 Kontinuierlicher Salzsprühnebeltest .....	53
3.4.2.1 Optische Begutachtung.....	53
3.4.2.2 Änderung der Kollektorkennwerte .....	53
3.4.2.3 Quantifizierung der Leistungsdegradation .....	54
3.4.2.4 Interpretation der Untersuchungsergebnisse.....	54
3.4.3 Zyklischer Salzsprühnebeltest .....	55
3.4.3.1 Optische Begutachtung.....	55
3.4.3.2 Interpretation der Untersuchungsergebnisse.....	56
3.4.4 Kontinuierlicher Salzsprühnebeltest bei Durchströmung des Kollektors .....	56
3.4.4.1 Optische Begutachtung.....	56
3.4.4.2 Änderung der Kollektorkennwerte .....	57
3.4.4.3 Quantifizierung der Leistungsdegradation .....	58
3.4.4.4 Interpretation der Untersuchungsergebnisse.....	58

3.4.5 Zyklischer Salzsprühnebeltest bei Durchströmung des Kollektors .....	58
3.4.5.1 Optische Begutachtung .....	59
3.4.5.2 Änderung der Kollektorkennwerte .....	60
3.4.5.3 Quantifizierung der Leistungsdegradation .....	60
3.4.5.4 Interpretation der Untersuchungsergebnisse .....	60
3.4.6 Vorschlag für eine Salzsprühnebelprüfung an Sonnenkollektoren .....	61
3.4.6.1 Prüfmethodik .....	61
3.4.6.2 Bewertung der Untersuchungsergebnisse .....	63
3.4.6.3 Möglichkeiten zur Anpassung der Prüfung .....	63
<b>3.5 Alterungsverhalten infolge UV-Strahlung .....</b>	<b>65</b>
3.5.1 Untersuchungsmethodik .....	65
3.5.2 Optische Begutachtung .....	67
3.5.3 Änderung der Kollektorkennwerte .....	68
3.5.4 Quantifizierung der Leistungsdegradation .....	68
3.5.5 Interpretation der Untersuchungsergebnisse .....	68
3.5.6 Lösungsansätze für die Verbesserung des Versuchsstandes .....	70
<b>4 Korrelation zwischen beschleunigter Prüfung und realem Betrieb .....</b>	<b>73</b>
<b>4.1 Zeittransformationfunktionen .....</b>	<b>73</b>
4.1.1 Temperaturbelastung (Arrhenius Gleichung) .....	73
4.1.1.1 Typische Aktivierungsenergien .....	73
4.1.1.2 Ermittlung der Aktivierungsenergie .....	73
4.1.1.3 Ermittlung der effektiven Mitteltemperatur .....	74
4.1.2 Feuchtigkeitsbelastung .....	76
4.1.3 Korrosive Belastung .....	77
4.1.4 Photoaktive Strahlung .....	77
4.1.5 Berücksichtigung mehrerer gleichzeitig auftretender Einflussfaktoren .....	78
4.1.5.1 Berücksichtigung von Feuchte und Temperatur .....	78
4.1.5.2 Berücksichtigung von Feuchte, Temperatur und Chloridgehalt .....	79
4.1.5.3 Berücksichtigung von UV-Strahlung und Temperatur .....	80
4.1.6 Anwendbarkeit .....	80
4.1.7 Weitere Ansätze .....	81
<b>4.2 Exposition im Freien .....</b>	<b>81</b>
4.2.1 Beschleunigungsfaktor .....	82
4.2.2 Diskussion der Ergebnisse .....	82
<b>4.3 Beschleunigte Alterung infolge hoher Temperaturbelastung .....</b>	<b>83</b>
4.3.1 Ermittlung der Gesamt-Aktivierungsenergie für den Kollektor .....	83
4.3.2 Diskussion der Ergebnisse .....	85
<b>4.4 Beschleunigte Alterung infolge salzhaltiger Atmosphäre .....</b>	<b>86</b>
4.4.1 Problematik Korrelation mit realem Betrieb .....	87
4.4.2 Experimentelle Ermittlung der Korrosivität mit Standardproben .....	87
4.4.2.1 Kontinuierliche Salzsprühnebelbelastung .....	88
4.4.2.2 Zyklische Salzsprühnebelbelastung bei Durchströmung .....	89

4.4.3 Theoretische Ermittlung des Beschleunigungsfaktors .....	91
4.5 Beschleunigte Alterung infolge UV-Strahlung .....	91
<b>5 Entwicklung eines Rechenmodells zur Berücksichtigung des Alterungsverhaltens .....</b>	<b>93</b>
5.1 Kollektormodell .....	83
5.2 Implementierung der Temperaturbelastung in das 2-Knoten-Modell .....	94
5.3 Beispiel zur Anwendung .....	95
5.4 Validierung des Modells .....	98
5.5 Implementierung weiterer Degradationsursachen .....	99
5.6 Zusammenfassende Erkenntnisse aus den durchgeführten Alterungsuntersuchungen .....	99
<b>6 Exemplarische Untersuchung ökologischer Aspekte .....</b>	<b>101</b>
6.1 Grundsätze zur Ökobilanzierung .....	101
6.2 Energetische Bewertungsmethoden .....	102
6.2.1 Kumulierter Energieaufwand (KEA) .....	102
6.2.2 Energetische Amortisationszeit (EAZ) .....	103
6.2.3 Energieeinsparung über die Lebensdauer ( $E_{sav}$ ) .....	105
6.2.4 Erntefaktor (EF) .....	106
6.3 Bewertungsmethoden mit Berücksichtigung der Emissionen .....	107
6.3.1 CO <sub>2</sub> -Emissionen .....	107
6.3.2 Global Warming Potential .....	107
6.3.2.1 GWP-Emissions-Amortisationszeit (GWP AZ) .....	108
6.3.2.2 GWP-Vermeidung über die Lebensdauer (GWP <sub>verm</sub> ) .....	108
6.3.2.3 GWP-Vermeidungsfaktor (GWP VF) .....	108
6.3.3 Sonstige Bewertungsmethoden .....	109
6.3.3.1 Versauerung von Gewässern und Böden .....	109
6.3.3.2 Ökologischer Fußabdruck .....	109
6.3.3.3 Eco Indikator 99 .....	110
6.4 Umweltverträglichkeit (HVBRT-Methode) .....	110
<b>7 Exemplarische Untersuchung ökologischer Aspekte .....</b>	<b>113</b>
7.1 Datenbasis .....	113
7.2 Bilanzierungsgrenzen .....	113
7.3 Eingangsgrößen .....	114
7.4 Energetische Bewertungsmethoden .....	116
7.4.1 Kumulierter Energieaufwand (KEA) .....	116
7.4.1.1 Zusammenhang zwischen KEA und Kosten der Solaranlage .....	117
7.4.2 Energetische Amortisationszeit (EAZ) .....	118
7.4.3 Energieeinsparung über die Lebensdauer ( $E_{sav}$ ) .....	119
7.4.4 Erntefaktor (EF) .....	120
7.4.5 Vergleich der Rangordnungen .....	120

7.5	<b>Bewertungsmethoden mit Berücksichtigung der Emissionen</b> .....	122
7.5.1	Global Warming Potential (GWP).....	122
7.6	<b>HVBRT-Methode</b> .....	125
7.7	<b>Ergebnis</b> .....	126
<b>8</b>	<b>Auswirkung der Alterung auf die ökologische Bewertung</b> .....	<b>127</b>
8.1	Berechnungsmethodik .....	127
8.2	Abnahme der eingesparten Energiemenge infolge Alterung.....	128
8.3	Abnahme der vermiedenen Emissionsmenge infolge Alterung.....	129
8.4	Diskussion der Ergebnisse.....	130
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>131</b>
9.1	Diskussion der Ergebnisse .....	132
9.2	Schlussfolgerungen und Ausblick .....	133
<b>10</b>	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>135</b>
<b>11</b>	<b>Anhang</b> .....	<b>145</b>
11.1	<b>Anhang A: Eingesetzte Materialien in Flachkollektoren</b> .....	<b>145</b>
A.1	Selektive Absorberbeschichtungen.....	145
A.2	Verbindung Absorberblech mit Wärmetübertragungsrohr.....	149
11.2	<b>Anhang B: Randbedingungen für die Simulation</b> .....	<b>151</b>
11.3	<b>Anhang C: Versuchsergebnisse der Exposition</b> .....	<b>153</b>
C.1	Ergebnisse der optischen Begutachtung .....	153
C.2	Übersicht Änderung der Kollektorkennwerte und der anteiligen Energieeinsparung durch Exposition.....	156
C.3	Aufbau der exponierten Kollektoren .....	158
11.4	<b>Anhang D: Zusätzliche Informationen über die Versuche zur beschleunigten Alterung infolge hoher Temperaturbelastung</b> .....	<b>173</b>
D.1	Aufbau der untersuchten Kollektoren.....	173
D.2	Versuchsaufbau.....	174
D.3	Ergebnisse der optischen Begutachtung.....	175
11.5	<b>Anhang E: Zusätzliche Informationen über die Versuche zur beschleunigten Alterung infolge salzhaltiger Atmosphäre</b> .....	<b>187</b>
E.1	Korrosionskammer .....	187
E.2	Aufbau der untersuchten Kollektoren.....	188
11.6	<b>Anhang F: Zusätzliche Informationen über die Versuche zur beschleunigten Alterung infolge UV-Strahlung</b> .....	<b>191</b>
F.1	Versuchsstand .....	191
F.2	Aufbau des untersuchten Kollektors.....	192

<b>11.7 Anhang G: Erläuterungen zum Bilanzierungsrahmen.....</b>	<b>193</b>
G.1 Kumulierter Energieaufwand zur Herstellung $KEA_h$ .....	193
G.1.1 Materialien.....	193
G.1.2 Bilanzierungsgrenzen .....	198
G.1.3 Standardisierte Komponenten .....	198
G.1.4 Transport .....	199
G.1.5 Zusammenbau und Installation .....	199
G.2 Kumulierter Energieaufwand für Wartung und Instandhaltung $KEA_w$ .....	199
G.3 Kumulierter Energieaufwand für den Betrieb $KEA_b$ .....	200
G.4 Substituiertes Primärenergieäquivalent $PEA_{sub}$ .....	200
G.4.1 Wahl des Bezugssystems zur Ermittlung der durch die Solaranlage eingesparten Energie $Q_{conv}$ .....	200
G.4.2 Ermittlung des Energieaufwandes für die Nachheizung $Q_{NH}$ .....	201
<b>11.8 Anhang H: Bewertung der Umweltverträglichkeit.....</b>	<b>203</b>
H.1 Vorgehen bei der qualitativen Bewertung .....	203
H.2 Detaillierte Auflistung der Beurteilungskriterien .....	203
H.3 Bewertung.....	214
H.3.1 Bewertung Umweltverträglichkeit hinsichtlich Materialauswahl .....	214
H.3.2 Bewertung Umweltverträglichkeit hinsichtlich „Verpackung und Entsorgung“ .....	214
H.3.3 Gesamtergebnis der Beurteilung .....	215
H.4 Definition der best-case und worst-case Solaranlage .....	215