Quelle: Peter Biermayr

Energetische Rückzahlzeit und CO_2-Vermeidungskosten von thermischen Solaranlagen

Von Peter Biermayr und Marko Arezina *

Die energetische Rückzahlzeit und die CO_2-Vermeidungskosten sind wichtige Kennwerte einer Technologie und sorgen oftmals für eine kontroversielle Diskussion. Eine empirische Studie zeigt, dass diese Kennwerte für thermische Solaranlagen keine Konstanten sind, sondern in hohem Maße von zahlreichen Einflussfaktoren bzw. von den gewählten Berechnungsmethoden abhängen.

Im Zuge des Projektes RIOSOLAR[1] wurden nachhaltigkeitsrelevante Merkmale der Technologien zur direkten Nutzung der Solarenergie – Solarthermie und Photovoltaik – untersucht. In diesem Beitrag werden die Ergebnisse für die energetische Rückzahlzeit und die CO_2-Vermeidungskosten von thermischen Solaranlagen für die Brauchwassererwärmung und von Kombianlagen für die Brauchwassererwärmung und teilsolare Raumheizung präsentiert.

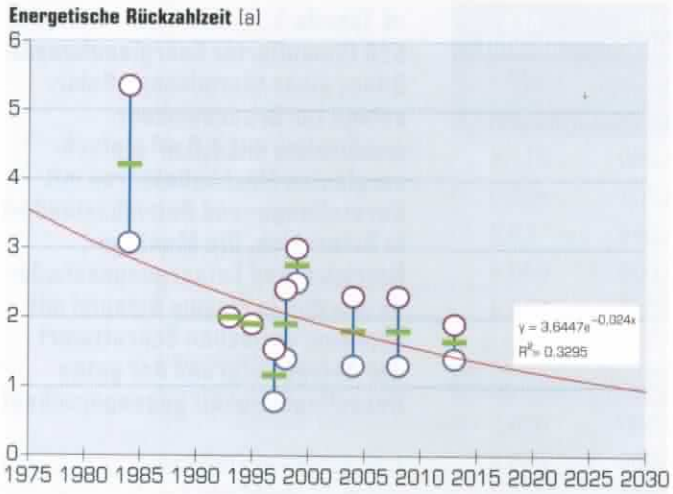
Die energetische Rückzahlzeit (ERZZ) ist dabei jene Betriebszeit, in der eine thermische Solaranlage soviel Nutzenergie bereitgestellt hat, wie ihrem eigenen kumulierten Energieaufwand (KEA[2]) zur Herstellung, Nutzung und Entsorgung entspricht. Eine exergetische Bewertung wird dabei nicht vorgenommen. Die CO_2-Vermeidungskosten geben an, welche Kosten ein noch zu definierender Betrachter für eine vermiedene Tonne CO_2-Äquivalent sieht.

* *Dipl.-Ing. Dr.* ***Peter Biermayr*** *ist Senior Researcher der Energy Economics Group (EEG) an der Technischen Universität Wien (biermayr@eeg.tuwien.ac.at).*

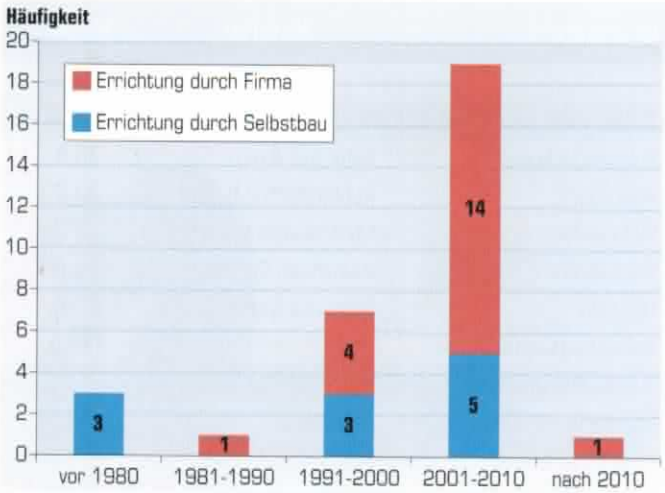
Marko Arezina *ist Diplomand der Energy Economics Group (EEG) an der Technischen Universität Wien.*

1 RIOSOLAR ist ein Forschungsprojekt im Rahmen des Forschungsprogramms "Sparkling Science", gefördert vom Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft.

2 Definition gemäß VDI 4600



▲ Abbildung 1
Zeitliche Entwicklung der energetischen Rückzahlzeiten von solarthermischen Anlagen auf Basis einfach verglaster Flachkollektoren.
Quellen: TU Wien Energy Economics Group (EEG), [1-9]



▲ Abbildung 2
Verteilung der erhobenen solarthermischen Anlagen auf Altersklassen mit der Unterscheidung nach Art der Anlagenerrichtung (n=31)
Quelle: EEG

Energetische Rückzahlzeit thermischer Solaranlagen

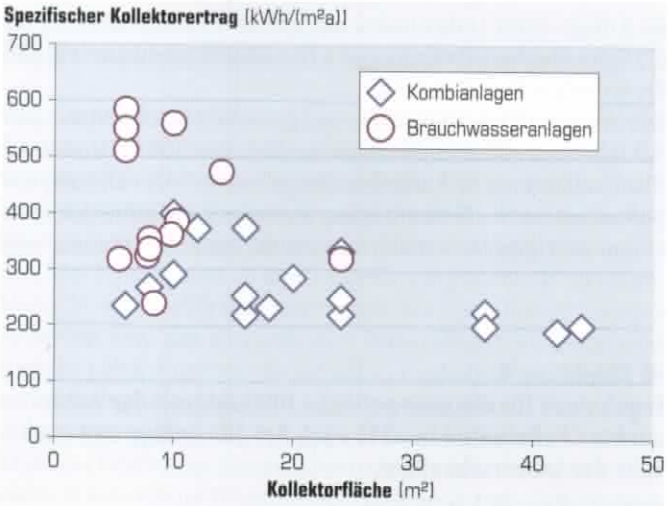
Methodisch wurde im Projekt RIOSOLAR Fachliteratur analysiert, und 31 konkrete Anlagen-Fallstudien im südöstlichen Niederösterreich und im Burgenland wurden durchgeführt. Die Ergebnisse aus der Literaturanalyse für Anlagen auf Basis einfach verglaster Flachkollektoren sind in **Abbildung 1** zusammengefasst.

Das jeweilige Publikationsdatum wurde in der Darstellung der Zeitachse zugeordnet und die Schwankungsbandbreite der Angaben zur energetischen Rückzahlzeit wurde gemeinsam mit dem jeweiligen Mittelwert eingetragen. Die durch die Datenpunkte gelegte Schätzfunktion weist ein Bestimmtheitsmaß von 0,33 auf. Versuche einer Verlaufsschätzung ohne die Daten von 1984 brachten keinen signifikanten Trend. Es liegt damit die Vermutung nahe, dass durch die fortschreitende Optimierung der industriellen Kollektorfertigung ca. ab dem Jahr 1990 keine wesentliche Reduktion des kumulierten Energieaufwandes mehr erfolgte. Daraus kann jedoch auch geschlossen werden, dass ohne systemische Innovation wie z. B. gänzlich neue Materialien oder ein gänzlich neues Systemdesign auch bis 2030 keine weiteren Reduktionen der energetischen Rückzahlzeiten mehr zu erwarten sind.

Wurde aufgrund der Literaturanalyse ein Überblick über Größenordnungen und Trends verfügbar, so eröffnete die Analyse der Fallstudien ein differenzierteres Bild und ermöglichte die empirische Verifizierung von Einflussfaktoren. In der nicht repräsentativen zufällig gezogenen Stichprobe (n=31) konnten 13 Anlagen zur Brauchwassererwärmung und 18 Kombianlagen erfasst werden. Die Häufigkeit nach Altersklassen entspricht weitestgehend der Marktentwicklung des österreichischen Solarthermie-Inlandsmarktes, siehe **Abbildung 2**.

11 der 31 untersuchten Anlagen wurden von den Anlagenbetreibern selbst montiert. In der Altersklasse der von 2001 bis 2010 errichteten Anlagen waren dies 5 von 19 Anlagen (= 26%). Dies kann als Indiz gewertet werden, dass auch in aktueller Zeit zahlreiche Solarthermie-Anwender technikaffine Menschen sind. Die älteste erfasste Anlage wurde 1974 errichtet und war zum Zeitpunkt der Erhebung bereits 39 Jahre in Betrieb. 27 Anlagen waren mit einfachverglasten Flachkollektoren ausgestattet, weitere 4 Anlagen mit Vakuumröhrenkollektoren. Das Absorbermaterial war in 27 Fällen Kupfer und in 4 Fällen Aluminium. 16 Anlagen waren Aufdachanlagen, 13 Anlagen waren Indachmontagen, eine Anlage war fassadenintegriert und eine weitere Anlage war eine Freiflächenanlage.

Von jeder Anlage wurde eine bottom-up-KEA-Bilanz erstellt, vgl. **Tabelle 1**.



◀ Abbildung 3
Spezifischer Kollektorertrag der Anlagen über der Kollektorfläche (n=30). Eine Anlage mit 280 m² Kollektorfläche und einem spezifischen Ertrag von 350 kWh/(m²a) wurde aus grafischen Gründen nicht dargestellt.
Quelle: TU Wien EEG

Bestandteile	Material	Masse	KEA spezifisch	KEA absolut
		[kg]	[kWh_{prim}/kg]	[kWh]
3 Stk. Kollektor Euro C20 AR (je 2,6 m² Bruttofläche = 7,8 m² Brutto-Gesamtfläche)				
Frontabdeckung	Solarglas 4 mm	78,6	3,960	311,4
Absorber	Kupferblech 0,5 mm	33,8	13,701	463,0
Wärmedämmung	Mineralwolle 50 mm	4,7	4,084	19,2
Rückwand	Aluminium 0,7 mm	14,9	43,054	640,4
Rahmen	Aluminiumprofil	12,0	43,054	518,4
Kollektor (Summe)		**144,0**		**1.952,3**
1 Stk. Warmwasserspeicher SK 300-3Z (300 Liter)				
Stahltank	Stahlblech	115,3	5,503	634,5
Wärmedämmung	PU-Weichschaum	7,7	27,208	209,6
Wärmetauscher	Edelstahl Cr/Ni	10,0	15,697	157,0
Opferanode	Magnesium	2,0	11,341	22,7
Speicher (Summe)		**135,0**		**1.023,7**
Weitere Komponenten				
Umwälzpumpe Primärkreis	Fe-Rohguss	2,0	9,967	19,9
Verrohrung Primärkreis	Cu, D16*1 mm, 30 m	13,5	13,701	184,6
Isolierung Primärkreis	PU-Hartschaum 30 mm	2,0	26,122	52,2
Ausdehnungsgefäß 25 Liter	Stahlblech	5,0	5,503	27,5
Frostschutzmittel	Propylenglykol	5,0	15,000	75,0
Ventile etc.	Cu/Messing	3,0	13,701	41,1
Speicher (Summe)		**30,5**		**400,4**
Anlage total		**309,5**		**3.376,4**

Ergebnis der Berechnung der ERZZ für Standort Wr. Neustadt, 0° Südabweichung, 30°Kollektorneigung, Nutzung durch 3-Personen-Haushalt:

Spezifischer Kollektorertrag: 348 kWh/(m²a), ERZZ: 1,2 a

◀ Tabelle 1

KEA (kumulierter Energieaufwand)-Bilanz einer thermischen Solaranlage zur Brauchwassererwärmung mit 7,8 m² einfachverglasten Flachkollektoren mit Herstellungs- und Betriebsstandort in Österreich. Die Montage-, Betriebs- und Entsorgungsaufwände wurden in diesem Beispiel mit dem energetischen Schrottwert der Anlage aufgrund der guten Recyclingfähigkeit gegengerechnet.

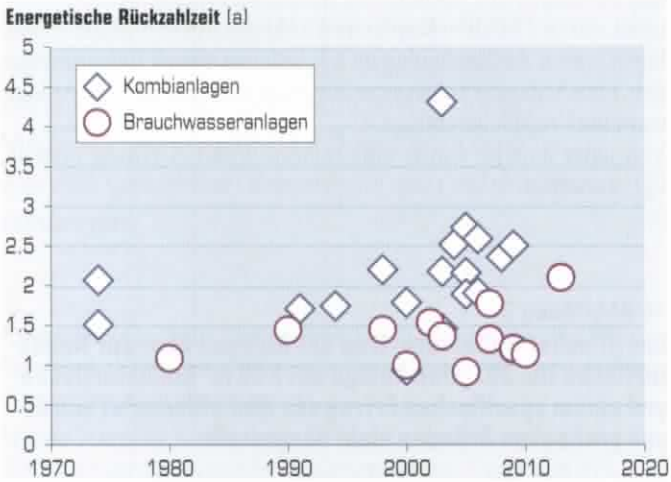
Datenquellen: TU Wien EEG; KEA spezifisch: Forschungsstelle für Energiewirtschaft München.

Die Wärmeerträge der Anlagen wurden ausnahmslos simuliert, da keine einzige der 31 Anlagen über einen Wärmemengenzähler verfügte. Dieser Umstand stellt gleichsam auch den zentralen methodischen Kritikpunkt der gegenständlichen Analyse dar. In der dynamischen Simulation wurden die Standortparameter inkl. Ausrichtung der Anlage, Gebäudeparameter und nutzerrelevante Parameter berücksichtigt. Die sich für die Stichprobe ergebenden spezifischen Kollektorerträge sind in **Abbildung 3** dargestellt. Wie zu erwarten war, weisen die kleineren Brauchwasseranlagen durch höhere Nutzungsgrade auch höhere spezifische Erträge auf. Die beachtliche Streubreite resultiert hauptsächlich aus der jeweiligen Systemkonfiguration, der Art der Nutzung und der Ausrichtung der Kollektoren.

Die Ergebnisse für die energetischen Rückzahlzeiten sind in **Abbildung 4** zusammengefasst.

Der Wertebereich für Brauchwasseranlagen erstreckt sich dabei von 0,9 bis 2,1 Jahren und jener für Kombianlagen von 0,9 bis 2,7 Jahren. In einem Fall wurde für eine Kombianlage eine energetische Rückzahlzeit von 4,3 Jahren ermittelt. Bei einer technischen Lebensdauer von 25 Jahren resultieren daraus typische Erntefaktoren von 9 bis 28. Ein signifikanter zeitlicher Trend lässt sich aufgrund der verfügbaren Daten nicht ableiten. Bei der besten Brauchwasseranlage handelt es sich um eine Vakuumrohrkollektor-Aufdachanlage an einem Einfamilienhaus mit 6 m² Kollektorfläche in optimaler Ausrichtung und einem 300-Liter-Boiler, welche von 4 Personen genutzt wird. Bei der besten Kombianlage handelt es sich um eine gewerblich betriebene Anlage eines Hallenbades mit 280 m² Flachkollektoren für die Schwimmbaderwärmung, die Brauchwassererwärmung und die teilsolare Raumheizung.

Die Anlage mit der höchsten energetischen Rückzahlzeit von 4,3 Jahren ist eine Kombianlage aus dem Jahr 2003 mit nur 6 m² Flachkollektoren in Aufdachmontage mit 80° Abweichung aus Süden und 60° Kollektorneigung an einem Einfamilienhaus mit einem einzigen Bewohner und einem Speichervolumen von



◀ Abbildung 4

Ergebnisse für die energetische Rückzahlzeit der untersuchten Fallstudien (n=31) nach Art der Anlage und nach Jahr der Inbetriebnahme.

Quelle: TU Wien EEG

DIE VORTEILE DES SONNENHAUSES:

- **kostenlose Sonnenenergie** – geringste Betriebskosten für Heizung und Warmwasser
- **zukunftssicher** – größtmögliche Unabhängigkeit von Energiekrisen und Preissteigerungen
- **umweltschonend** – geringe CO_2-Emissionen und Schonung der Ressourcen fossiler Energien
- **bewährte Bauweise, unkomplizierte Technologie** – individuelle Anpassung möglich

Eine Initiative, die Sie **auf dem Weg zum SONNENHAUS** in Form von Informationen und Hinweisen unterstützt, ein Sonnenhaus zu planen bzw. umzusetzen.

Besuchen Sie uns im Web unter www.sonnenhaus.co.at

Initiative Sonnenhaus Österreich | Anastasius-Grün-Straße 20, 4020 Linz
Ansprechperson: Peter Stockreiter | peter.stockreiter@sonnenhaus.co.at | Mobil: +43 (0) 664 1261647

1.400 Liter. Die gesamte Systemkonfiguration inklusive der Standortbedingungen sind in diesem Fall ungünstig.

Die Fallstudien zeigen die Einflussfaktoren auf die energetischen Rückzahlzeiten von thermischen Solaranlagen: Maßgeblich sind die Systemkonfiguration und die Art der Nutzung. Besonderen Einfluss haben die Abstimmung von Kollektorfläche, Speichervolumen, Gesamt-Nutzenergiebedarf und Nachfragecharakteristik der NutzerInnen sowie die Ausrichtung der Kollektoren. Ein signifikanter Einfluss des Kollektortyps (Flachkollektor oder Vakuumrohrkollektor) und der Montageart (Indach, Aufdach, Freifläche, ...) konnte aufgrund der vorliegenden Daten nicht nachgewiesen werden.

CO_2-Vermeidungskosten thermischer Solaranlagen

CO_2-Vermeidungskosten stellen ein kontroversiell diskutiertes Thema dar. Für ein und dieselbe, durch den Einsatz einer bestimmten Technologie vermiedene Tonne $CO_{2\,liqu}$, finden sich in der Literatur oftmals sehr unterschiedliche Kosten. Die Zahlen können sich dabei um mehrere Größenordnungen unterscheiden. Der Hintergrund ist in der Berechnungsmethode zu sehen. Herrscht im Bereich der Berechnung des kumulierten Energieaufwands bzw. der energetischen Rückzahlzeit weitestgehend Einigkeit über einen zweckdienlichen methodischen Ansatz, so sind die Freiheitsgrade bei der Berechnung von CO_2-Vermeidungskosten sehr groß.

Matthes (1998) zeigt aus einer neutralen Position heraus die Konzepte, Potenziale und Grenzen der Berechnung von CO_2-Vermeidungskosten auf [10]. Wesentlich ist zunächst die Definition der Rolle des Betrachters, wobei grob eine betriebswirtschaftliche Sicht und eine (umwelt)politische Sicht zu unterscheiden sind:

Die **betriebswirtschaftliche Sicht** berücksichtigt eine Kosten-Nutzen Analyse mit jeweils aktuellen Marktpreisen, Definition von Preisszenarien für Technologien und Energieträger (z. B. über ökonomische Lernkurven). Steuern, Subventionen etc. können berücksichtigt werden. Als Kalkulationsverfahren kommen statische oder dynamische Methoden zum Einsatz. Bei der Wahl von dynamischen Methoden erfolgt die Wahl eines Kalkulationszinssatzes.

Bei der **(umwelt-)politischen Sicht** handelt es sich um einen volkswirtschaftlichen Ansatz inkl. Bewertung inländischer Wertschöpfung, Arbeitsplätze, Substitution von Energieimporten etc. Der gesellschaftliche Ansatz berücksichtigt externe Kosten bzw. Sekundäreffekte. Außerdem handelt es sich hier um einen Budgetansatz inkl. zusätzlicher oder verminderter Steuerleistungen.

Eine Bezifferung von CO_2-Vermeidungskosten ohne eine Deklaration aller getroffenen Annahmen ist also weder seriös noch zweckdienlich. Beispielhaft werden in **Tabelle 2** Werte für die CO_2-Vermeidungskosten einer typischen thermischen Solaranlage für die Brauchwassererwärmung bei unterschiedlichen methodischen Zugängen dokumentiert. Im Beispiel wird jene Solaranlage betrachtet, die bereits in **Tabelle 1** thematisiert wurde.

Für die Berechnung wurden 2 Substitutionsszenarien angenommen (österreichischer Wärmemix aus dem Jahr 2013 bzw. ein konventioneller Ölkessel). Die spezifischen Investitionskosten

ST-Anlage auf Basis Flachkollektoren Standort Wr. Neustadt, Orientierung: 5° aus Süd und 90° Neigung	
Anlagenleistung	5,5 kW_{th}
Spezifischer Endkunden-Systempreis 2013 exkl. Ust.	971 €/kW_{th}
Absoluter Endkunden-Systempreis 2013 exkl. Ust.	5.322 €
Technische Anlagenlebensdauer	25 a
Jährlicher Nutzwärmeertrag lt. Simulation	2.727 kWh_{th}/a
$CO_{2\,äqu}$ Emissionskoeffizient Wärme Österreich 2013	0,1989 kg $CO_{2\,äqu}$/kWh
$CO_{2\,äqu}$ Emissionskoeffizient Ölheizung (η_N=0,9)	0,3456 kg $CO_{2\,äqu}$/kWh
CO_2-Vermeidungskosten (Ergebnisse unterschiedlicher Berechnungsmethoden):	
betriebswirtschaftlich, statisch, aus der Sicht des Staates bei 30% nicht rückzahlbarem Investitionszuschuss, substituiert Wärmemix AT 2013	118 €/t $CO_{2\,äqu}$
betriebswirtschaftlich, statisch, aus der Sicht des Staates bei 30% nicht rückzahlbarem Investitionszuschuss, substituiert Ölheizung	68 €/t $CO_{2\,äqu}$
betriebswirtschaftlich, statisch, aus der Sicht des Staates inkl. Berücksichtigung des USt-Effektes bei 30% nicht rückzahlbarem Investitionszuschuss, substituiert Wärmemix AT 2013	39 €/t $CO_{2äqu}$
betriebswirtschaftlich, statisch, aus der Sicht des Staates inkl. Berücksichtigung des USt-Effektes bei 30% nicht rückzahlbarem Investitionszuschuss, substituiert Ölheizung	23 €/t $CO_{2\,äqu}$
betriebswirtschaftlich, dynamisch, aus der Sicht des Betreibers, substituiert Wärme zu 10 ct/kWh_{th}, Z=4 %, Investitionszuschuss 30%, kein Vorsteuerabzug, substituiert Wärmemix AT 2013	32 €/t $CO_{2\,äqu}$
betriebswirtschaftlich, dynamisch, aus Sicht des Betreibers, substituiert Wärme zu 10 ct/kWh_{th}, Z=2 %, Investitionszuschuss 30 %, kein Vorsteuerabzug, substituiert Wärmemix AT 2013	–45 €/t $CO_{2\,äqu}$

▲ **Tabelle 2: Ergebnisse von Modellrechnungen für die CO_2-Vermeidungskosten für die thermische Solaranlage aus Tabelle 1**

Quelle: TU Wien EEG

wurden nach [11] mit 971 €/kW_{th} angenommen und die kurzfristigen Grenzkosten des Heizsystems wurden gemäß [12] mit einem hier relevanten Wert von 10 ct/kWh_{th} festgelegt.

Je nach Betrachterposition, Substitutionsvarianten und Methode der Kalkulation (statisch oder dynamisch) ergeben sich unterschiedliche CO_2-Vermeidungskosten von maximal 118 €/t CO_2 und minimal –45 €/t CO_2. Der negative Zahlenwert entsteht dabei durch einen negativen Barwert der Wärmekosten. Bei dieser Variante erhält der Anlagenbetreiber zusätzlich zu den eingesparten Wärmekosten gratis die CO_2-Einsparung.

Eine zusätzliche Berücksichtigung volkswirtschaftlicher Effekte welche durch die Reduktion des Zahlungsabflusses für Energieimporte, die Erhöhung der Versorgungssicherheit, die Schaffung von Arbeitsplätzen durch den Einsatz von in Österreich produzierten Anlagen u. v. a. m. entstehen, verringert die CO_2-Vermeidungskosten im Vergleich zu den Ergebnissen der dargestellten Modellrechnungen weiter. Diese zusätzlichen Aspekte waren jedoch nicht Gegenstand der vorliegenden Untersuchungen.

Schlussfolgerungen

Mit einer energetischen Rückzahlzeit von 1 bis 3 Jahren und Erntefaktoren von 9 bis 28 entsprechen thermische Solaranlagen mit einem ausgewogenen Systemdesign und einem Standort in Mitteleuropa den Anforderungen eines nachhaltigen Energiesystems. Für eine weitere Verbesserung dieser Kennwerte sind jedoch Systeminnovationen erforderlich, welche gänzlich neue Materialien oder gänzlich neue Anlagenkonzepte etablieren. Die CO_2-Vermeidungskosten nehmen bei den aktuellen Rahmenbedingungen für den Anlagenbetreiber im Allgemeinen negative Zahlenwerte an. Aus der Sicht des Staates ergeben sich bei der Vergabe angemessener Investitonszuschüsse äußerst geringe CO_2-Vermeidungskosten, welche unter der Berücksichtigung weitreichender volkswirtschaftlicher Effekte jedenfalls argumentiert werden können.

Anmerkung

Ein umfassender wissenschaftlicher Endbericht zum Forschungsprojekt RIOSOLAR wird Mitte 2015 zur Verfügung stehen.

Literatur:

[1] **Hohenwarter et al. (1984)** „Kumulierter Energieaufwand von Sonnenkollektoranlagen" Deutsche Gesellsch. f. Sonnenenergie, in Proceedings, 5. Internationales Sonnenforum - Band 1

[2] **Ladener (1993)** „Solaranlagen" Ökobuch Verlag, ISBN 3-922964-54-0

[3] **Schüle und Ufheil (1995)** „Thermische Solaranlagen - Marktübersicht 1994/95", Publikation des Öko-Institut e.V. Freiburg

[4] **Wagner und Peuser (1997)** „Emmisionen von Luftschadstoffen und CO_2 bei Herstellung und Betrieb von ausgewählten thermischen Solaranlagen" VDI Verlag 1997, VDI Berichte, Reihe 6, Energietechnik, ISBN 3-18-336606-1

[5] **Hahne und Pauschinger (1998)** „Vergleichstest von Solaranlagen zur Brauchwassererwärmung und Raumheizung", OTTI 8. Symposium thermische Solarenergie, Mai 1998

[6] **Drake und Bode (1999)** „Energie- und CO_2-Bilanzen von Solarkollektoranlagen" Forschung im Ingenieurwesen 64, 317-324, Springer Verlag 1999

[7] **Streicher, Heidemann, Müller-Steinhagen (2004)** "Energy Payback Time - A Key Number for the Assessment of Thermal Solar Systems" Proceedings of EuroSun2004, 20 – 23 June 2004, Freiburg, Germany

[8] **Oberzig (2008)** „Solare Wärme - Vom Kollektor zur Hausanlage" Solarpraxis bei Beuth, ISBN 9783934595736

[9] **Klingenberger, Bollin, Himmelsbach (2013)** „Energetische Amortisationszeiten bei solarthermischen Großanlagen" Hochschule Offenburg, Bericht zum Förderkonzept Solarthermie2000 plus, Download unter http://fgnet.hs-offenburg.de/publikationen/

[10] **Matthes Felix Christian (1998)** „CO_2-Vermeidungskosten – Konzept, Potenziale und Grenzen", Öko-Institut, Berlin Dezember 1998, Download unter http://opus.kobv.de/zlb/volltexte/2007/1495/pdf/endberic.pdf

[11] **Biermayr et al. (2014)** „Innovative Energietechnologien in Österreich – Marktentwicklung 2013" BMVIT - Berichte aus Energie- und Umweltforschung 26/2014, Download unter http://www.nachhaltigwirtschaften.at/iea/results.html/id7668

[12] **Simader (2013)** „Heizsysteme im Vollkostenvergleich" erschienen im Mai 2013 in der Broschüre „Erneuerbare Wärme" des Österreichischen Biomasseverbandes, Download unter http://www.biomasseverband.at/publikationen/