

Dynamische Leistungscharakterisierung und Modellierung von PVT-Kollektoren für einen Demonstrator mit einem innovativen LowEx-Temperierungssystem

Horst Altgeld, Thomas Bischoff, Manuel Eckert, Sebastian Palm, Christoph Schmidt

IZES gGmbH (Institut für ZukunftsEnergieSysteme)

Altenkesseler Straße 17, Gebäude A1, D-66115 Saarbrücken

Telefon: +49 681/844972-46, Fax: +49 681/7617999

E-Mail: schmidt@izes.de

Internet: www.izes.de

Einführung

In dem vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Forschungsvorhaben „Low Exergy Utilisation - Einsatz von außenliegender Wandtemperierung bei der Gebäudesanierung - Feldtest, CO₂-Wärmepumpe mit Eisspeicher“ (kurz „LEXU II“, FKZ 0327370Y) wird unter anderem die praktische Umsetzbarkeit der Forschungsergebnisse aus dem vorangegangenen Projekt LEXU (FKZ 0327370T) an einem Demonstrator-Gebäude bzw. im Feldtest untersucht. Darüber hinaus sollen potenzielle exergetische Vorteile der außenliegenden Wandtemperierung (kurz „aWT“) durch die Verbindung mit innovativen, niederexergetischen Systemkonzepten und Komponenten analysiert und bewertet werden.

Bei der aWT handelt es sich um eine Flächentemperierung, die in der Ebene zwischen Bestandswand und neuem Wärmedämm-Verbundsystem (WDVS) angebracht wird, siehe Abbildung 1. Durch die Lage im Wandquerschnitt ergeben sich einige Vorteile der aWT, wie zum Beispiel der Einsatz sehr niedriger Systemtemperaturen, die thermische Aktivierung der Bestandsstruktur und die Sanierungsmöglichkeit „von außen“, siehe Luther & Altgeld [14]. So wird mittels der aWT als minimalinvasive Sanierungsvariante „von außen“ die Installation einer Flächentemperierung für den Gebäudebestand ermöglicht und somit der Einsatz von niederexergetischer Wärme/Kälte (LowEx-Ansatz). Die aWT bietet sich somit insbesondere für den Einsatz mit Wärmepumpen und/oder Solarthermie an.

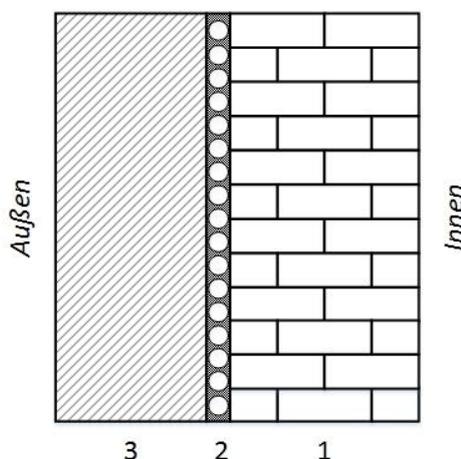


Abbildung 1: Vereinfachtes Schema der außenliegenden Wandtemperierung (aWT), bestehend aus Bestandswand (1), eingeputzte Kapillarrohrmatten (2) und Wärmedämm-Verbundsystem (3)

Umsetzung eines Demonstrator-Gebäudes

Derzeit wird ein Feldtest der aWT zusammen mit einem niederexergetischen Systemkonzept an einem Bürogebäude umgesetzt. Eine Skizze des gesamten Gebäudekomplexes mit den einzelnen Komponenten ist in Abbildung 2 dargestellt. Eine Fassade des Bürogebäudes aus den 60er Jahren wurde im Anschluss an eine anstehende Betonsanierung nahezu vollflächig mit ca. 140 m² der aWT belegt.

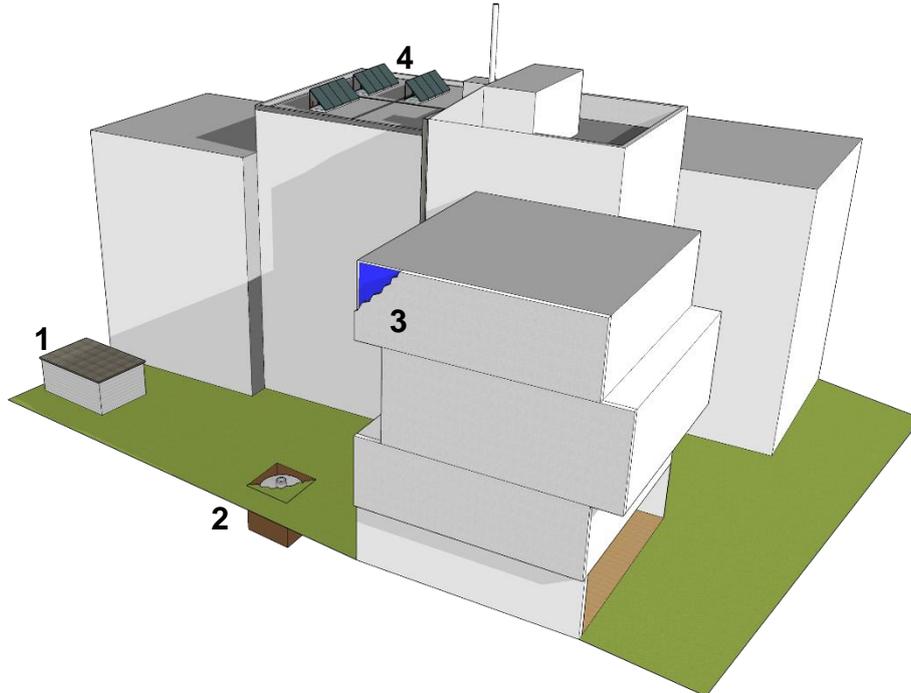


Abbildung 2: Skizze des Demonstrator-Gebäudes auf dem Campus der Universität des Saarlandes: Technikzentrale mit Wärmepumpe neben dem Gebäude (1), Eisspeicher im Erdreich (2), West-Fassade mit der aWT (3) und PVT-Kollektoren auf dem Dach des Gebäudes (4)

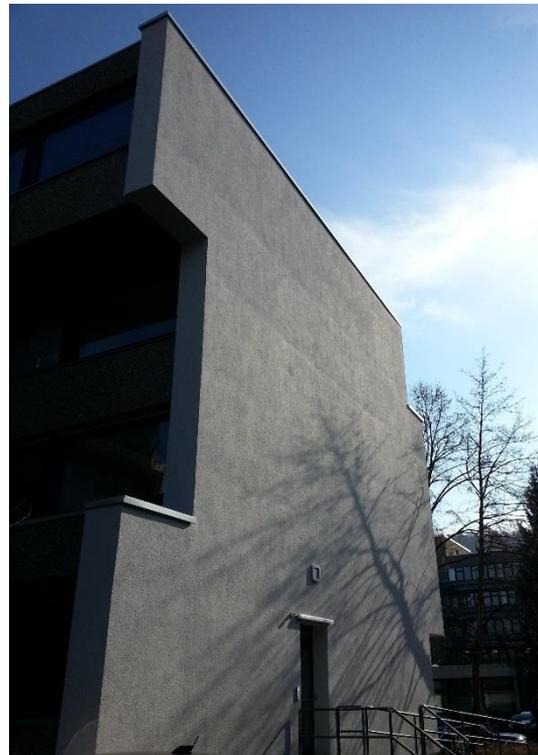


Abbildung 3: Demonstrator-Fassade vor der Sanierung (links) und nach der Sanierung (rechts)

Niederexergetisches Systemkonzept zur Versorgung der aWT

Das Systemkonzept zur Versorgung der Heizkreise der Wandtemperierung auf der West-Fassade besteht aus:

- Einer Wärmepumpe (WP) als primärem Wärmeerzeuger, aufgestellt in einer Technikzentrale neben dem Gebäude.
- Einem Eisspeicher als Niedertemperatur-Speicher auf der Wärmequellen-Seite der WP, eingebracht in das Erdreich neben dem Gebäude.
- Mehreren PVT-Kollektoren auf dem Dach des Gebäudes (Ausrichtung nach Süden).

Ein Schema des Systems ist in Abbildung 4 dargestellt. Das System ist generell für den Heiz- und Kühlbetrieb geeignet und soll auch in beiden übergeordneten Betriebsmodi innerhalb des Projektes untersucht werden. Der Fokus der Untersuchung liegt jedoch auf dem Heizbetrieb und hier insbesondere dem niederexergetischen Ansatz der Kombination von aWT und WP plus Solarthermie (hier PVT-Kollektoren).

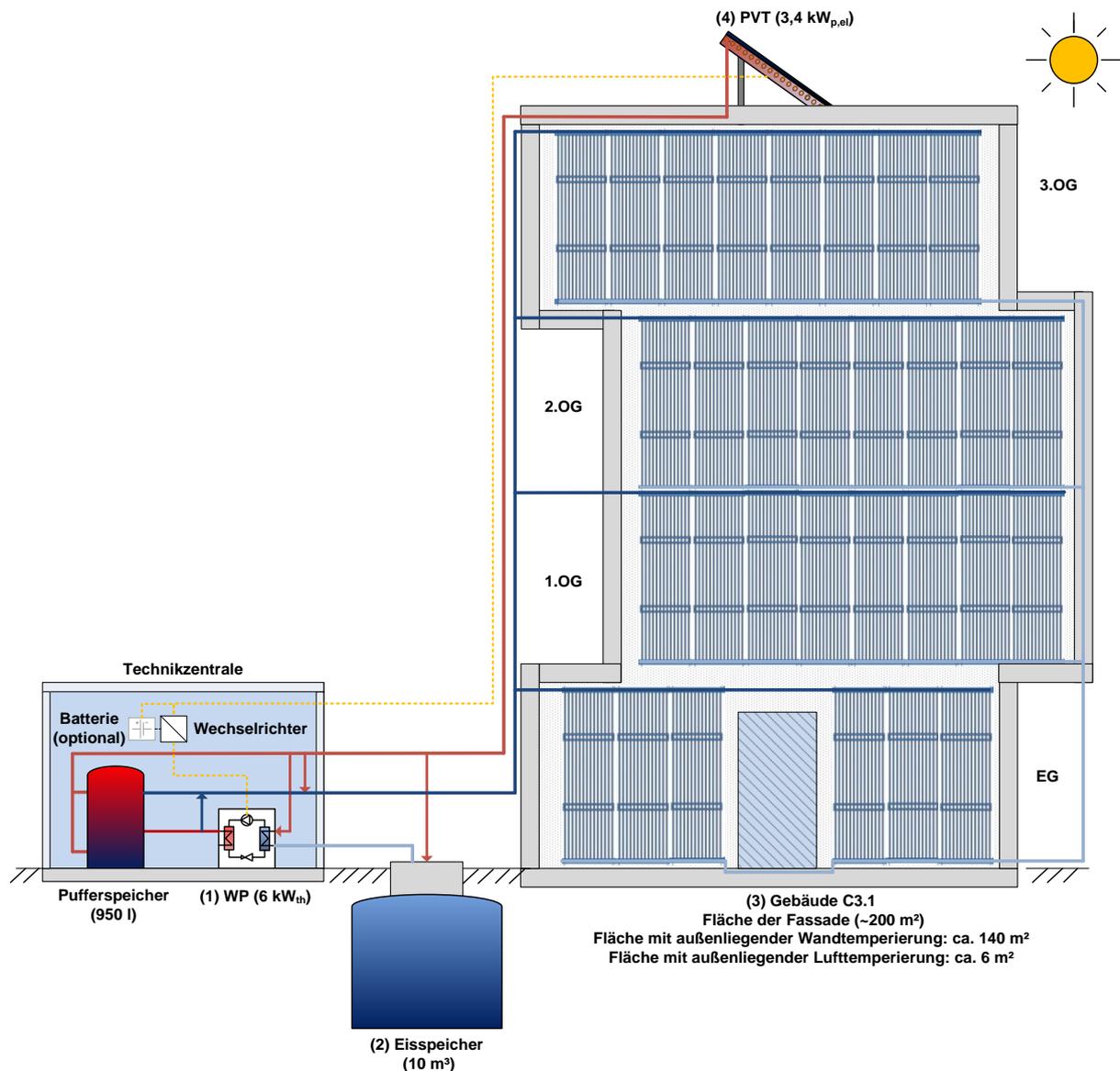


Abbildung 4: Schema des umgesetzten niederexergetischen Systemkonzeptes mit Wärmepumpe (1), Eisspeicher (2), aWT & aLT auf der Fassade (3) und PVT-Kollektoren (4)

Rolle der PVT-Kollektoren innerhalb des Systemkonzepts

Die PVT-Kollektoren als niederexergetische Wärmequelle nehmen neben der Wandtemperierung als niederexergetische Wärmesenke innerhalb des Systems eine zentrale Rolle ein. Die durch die PVT-Kollektoren gewandelte elektrische Energie soll primär für den Betrieb der Wärmepumpe und deren Peripherie im Sinne einer Eigenstromoptimierung genutzt werden. Parallel hierzu ist die Installation eines Batteriespeichers angedacht und vorbereitet.

Die Hydraulik des Systems wurde so konzipiert, dass die von den PVT-Kollektoren umgewandelte thermische Energie im Heizbetrieb anlagentechnisch folgendermaßen genutzt werden kann:

- 1: Nutzung als direkte Wärmequelle für die Wandtemperierung (aWT).
- 2: Nutzung zur Beladung des Pufferspeichers und damit indirekte Nutzung als Wärmequelle für die Wandtemperierung (aWT).
- 3: Nutzung als direkte Wärmequelle für die Wärmepumpe.
- 4: Nutzung zur Regenerierung des Eisspeichers und damit indirekte Nutzung als Wärmequelle für die Wärmepumpe.

Bei der dargestellten Reihenfolge handelt es sich auch um eine niederexergetische Rangfolge. Der „niederexergetischste“ Betriebsmodus ist die direkte Nutzung der thermischen Energie aus den Kollektoren in der Wandtemperierung (1), da die Zwischenspeicherung im Pufferspeicher mit Speicherverlusten behaftet ist (2). Alternativ können die Kollektoren als direkte Wärmequelle für die Wärmepumpe genutzt werden (3) oder zur Regenerierung des Eisspeichers im Erdreich (4). Die Zwischenspeicherung im Eisspeicher kann mit Verlusten behaftet sein, je nach Temperaturniveau des Eisspeichers und des umgebenden Erdreichs. Insgesamt ist somit, wenn möglich, eine direkte Nutzung anzustreben. Erste, vereinfachte Simulationsstudien haben ergeben, dass aus Regelungssicht die Regenerierung des Eisspeichers der primäre Betriebsmodus sein sollte. Für die Durchführung detaillierter, extrapolierender Simulationsstudien werden validierte Simulationsmodelle der einzelnen Komponenten benötigt, insbesondere um das Potential der einzelnen Betriebsmodi im Kontext des Gesamtsystems abschätzen zu können. Für den Demonstrator wurden hydraulisch alle oben gelisteten Schaltungsvarianten umgesetzt, für eine spätere Standard-Anwendung eines solchen Systems ist jedoch fragwürdig, ob alle Verbindungen sinnvoll sind, da diese die Hydraulik sehr aufwendig und damit auch kostenintensiv machen. Zudem wird eine entsprechend größere Anzahl an Sensoren und Aktoren zur Steuerung der Verschaltungen benötigt. Hier muss das energetische Potential im Kontext zum Mehraufwand für Material, Installation und MSR-Technik bewertet werden.

Über den Eisspeicher und die Wärmepumpe kann das System sowohl zur aktiven Kühlung (WP) als auch zur passiven Kühlung (Eisspeicher) eingesetzt werden. In beiden Fällen dienen die PVT-Kollektoren zur Rückkühlung des Eisspeichers. Entsprechend der umgesetzten Hydraulik ergeben sich die folgenden Betriebsmodi für die PVT-Kollektoren:

- 1: MPP-Betrieb (PV-Modul im MPP-Betrieb, Absorber durchströmt).
- 2: Leerlauf-Betrieb (PV-Modul im Leerlauf, Absorber durchströmt).
- 3: Stagnations-Betrieb (PV-Modul im MPP-Betrieb, Absorber nicht durchströmt).
- 4: Wärmeabgabe Nacht/Tag (PV-Modul im Leerlauf, Absorber durchströmt).
- 5: *Kondensations-Betrieb (Wärmegewinne durch Kondensation).*

Diese Betriebszustände können auch als Regelungsoptionen gewählt werden. Im Leerlauf des PV-Moduls z.B. wird die thermische Ausbeute des Absorbers maximiert. Diese Betriebssituationen müssen somit auch in der Simulation abgebildet werden können und dementsprechend mit Hilfe von Messdaten validiert werden. Der Kondensations-Betrieb ist in Klammern dargestellt, da dieser nicht zu jeder Zeit angefahren werden kann und somit für eine in-situ-Messung schwerer abbildbar ist.

Simulationsstudien

Parallel zur praktischen Umsetzung und der messtechnischen Untersuchung des Demonstrators wird das gesamte System auch in der Software TRNSYS [7] modelliert und simuliert. Auf der Basis von Messungen (am Demonstrator und im Labor) können die vorhandenen Simulationsmodelle validiert und bei Bedarf angepasst werden. Für die aWT wurde in dem Projekt ein validiertes Simulationsmodell in TRNSYS anhand von Laborexperimenten erarbeitet, siehe Schmidt et al. 2016 [9].

Wie oben beschrieben spielen jedoch auch die PVT-Kollektoren für den Demonstrator eine entscheidende Rolle innerhalb des Systemkonzeptes. Für die Simulation der PVT-Kollektoren wird auf das TRNSYS-Type 203 „Unverglaster PVT-Kollektor“ vom ISFH, siehe Stegmann et al [10] und [11] zurückgegriffen. Dieses Type wurde im Vorfeld des Projektes bereits mit einem PVT-Kollektor eines anderen Herstellers getestet und für generell geeignet befunden.

Zur Anpassung des Types an den eingesetzten PVT-Kollektor wird eine Vielzahl an Parametern benötigt. Die Liste aller benötigten Parameter für Type 203 ist in Tabelle 1 aufgeführt. Bei den Parametern 1 bis 4 handelt es sich um Parameter zur Einstellung verschiedener genereller Betriebsmodi des Types, eine detaillierte Beschreibung hierzu kann der Dokumentation des Types [11] entnommen werden. Die eingesetzten Kollektoren werden als PVT-Kollektoren nach dem Effektiven-Solarzellen-Kennlinien-Modell simuliert ($kmode = 3$). Sowohl der konvektive Wärmeübergang ($ukmode = 2$), als auch der interne thermische Leitwert ($uimode = 2$) sollen automatisch, intern berechnet werden. Die Parameter 5 bis 7 hängen von der Aufstellung der Kollektoren ab. Relevant für die Modellierung des PVT-Kollektors sind insbesondere die Parameter 8 bis 11 und 14 (entsprechen den thermischen Parametern des PVT-Kollektors als Absorber) und die Parameter 23 bis 28 (entsprechen den elektrischen Kennwerten des PV-Moduls). Alle anderen Parameter können nach Adam et al. [1] als Standardwerte betrachtet werden und aus entsprechenden Veröffentlichungen oder Tabellen entnommen werden. Als Parameter für Type 203 werden somit unter anderem die über das stationäre Verfahren nach DIN EN ISO 9806 [2] ermittelten, thermischen Kennwerte des eingesetzten PVT-Kollektors benötigt. Der in dem Projekt eingesetzte Kollektor ist ein Prototyp, dementsprechend liegt noch keine Solar KEYMARK-Zertifizierung vor und der Projektablauf ermöglichte zu dieser Zeit (auch jahreszeitlich bedingt) keine stationären Messungen im Labor. Daher sollte ein Verfahren erarbeitet werden, das die Ermittlung der notwendigen elektrischen und thermischen Parameter für die Simulation in situ, also im laufenden Betrieb des Demonstrators ermöglicht.

Mit Hilfe der ermittelten Parameter und der aufgenommenen Messdaten soll das eingesetzte Simulationsmodell (hier Type 203) anschließend insgesamt und für jeden der oben aufgeführten Betriebsmodi validiert werden.

Tabelle 1: Liste der Parameter für das TRNSYS-Type 203, entsprechend der Dokumentation [11]

Nr.	Parameter - Name	Einheit
1	kmode	[]
2	wenn kmode > 2: pvmode	[]
3	ukmode	[]
4	uimode	[]
5	Kollektorfläche	m ²
6	Kollektorneigungswinkel	°
7	Kollektorazimutwinkel	°
8	Konversionsfaktor (= η_0 , η_0)	[]
9	Windabhängigkeit des Konversionsfaktors (= bu)	s/m
10	Wärmeverlustkoeffizient (= b1)	W/m ² K
11	Windabhängigkeit des Wärmeverlustkoeffizienten (= b2)	J/m ³ K
12	Absorptionsgrad des Absorbers	[]
13	Quotient aus Emissions- und Absorptionsgrad des Absorbers	[]
14	effektive Wärmekapazität des Kollektors	kJ/m ² K
15	spezifische Wärmekapazität des Arbeitsmittels	kJ/kgK
16	Einfallswinkelkorrekturfaktor für Diffusstrahlung (Absorber)	[]
17	logical unit no. der Einfallwinkelkorrekturfaktor-Datei (Absorber)	[]
18	wenn kmode > 2: thermischer Leitwert der PV-Modulabdeckung (Glas + Folie)	W/m ² K
19	wenn kmode > 2: Emissionsgrad der PV-Modulabdeckung	[]
20	wenn kmode > 2: Transmissionsgrad der PV-Modulabdeckung	[]
21	wenn kmode > 2: Einfallswinkelkorrekturfaktor für Diffusstrahlung (PV-Modul)	[]
22	logical unit no. der Einfallwinkelkorrekturfaktor-Datei (PV-Modul)	[]
23	wenn kmode > 2: Modulwirkungsgrad bei Standard-Testbedingungen (STC)	[]
24	wenn kmode > 2: Kurzschlussstrom des PV-Moduls	A
25	wenn kmode > 2: MPP-Strom des PV-Moduls	A
26	wenn kmode > 2: Leerlaufspannung des PV-Moduls	V
27	wenn kmode > 2: MPP-Spannung des PV-Moduls	V
28	wenn kmode > 2: Leistungs-Temperaturkoeffizient des PV-Moduls	%/K
29	wenn kmode > 1: Relaxationsfaktor des Lösungsalgorithmus	[]

Vorgehensweise zur Ermittlung der benötigten Parameter

Ziel des Verfahrens ist es die thermischen und elektrischen Kennwerte des Kollektors gleichzeitig mittels des quasi-dynamischen Verfahrens zu ermitteln. Anschließend werden die quasi-dynamischen Kennwerte auf die stationären Kennwerte umgerechnet und in das Type 203 integriert. Letztlich sollen somit die Parameter ermittelt/berechnet werden, die für die Simulation des Kollektors mittels Type 203 benötigt werden. Dies jedoch nicht anhand einer stationären Leistungscharakterisierung, sondern mittels (quasi-)dynamischer Verfahren. Gleichzeitig soll die Frage geklärt werden, ob die Ermittlung der notwendigen Parameter auch im Betrieb der Anlage, also in situ möglich ist und welche Randbedingungen hierfür notwendig sind bzw. auch welche Einschränkungen gelten.

Mit Hilfe des zu erarbeitenden Verfahrens sollen somit mindestens die fünf Parameter für die thermische Charakterisierung (Nr. 8,9,10,11 & 14 aus Tabelle 1) ermittelt werden sowie die sechs Parameter für die elektrische Charakterisierung (Nr. 23 - 28 aus Tabelle 1), falls die vom Hersteller zur Verfügung gestellte Kennlinie hierfür nicht ausreichend ist. Derzeit gibt es noch keine Norm zur gleichzeitigen Vermessung des thermischen und elektrischen Verhaltens von PVT-Kollektoren und somit auch keine Norm für die gegenseitige Beeinflussung von elektrischem und thermischem Verhalten. DIN EN ISO 9806 [2] beschreibt die stationäre und quasi-dynamische Vermessung von solarthermischen Kollektoren. Für PV-Module werden nach DIN EN 60904-1 [4] stationäre Messungen zur Aufnahme der elektrischen Kennwerte durchgeführt, welche nach DIN EN 60891 [3] auf STC umgerechnet werden.

Thermische Leistungscharakterisierung des PVT-Kollektors

Für Type 203 sind die thermischen Kennwerte nach dem stationären Modell unabgedeckter Kollektoren erforderlich, entsprechend der Wirkungsgradgleichung:

$$\eta_{hem} = \eta_{0,hem} \cdot (1 - b_u \cdot u) - (b_1 + b_2 \cdot u) \cdot \frac{\vartheta_m - \vartheta_a}{G''} \quad (1)$$

Die Werte für $\eta_{0,hem}$, b_u , b_1 und b_2 müssen in dem Type als Parameter hinterlegt werden, siehe Tabelle 1. Die weiteren Größen entsprechen Wetterbedingungen und werden dem Type als Input (Messdaten) übergeben. Demzufolge wäre es naheliegend mittels stationärer Messungen die obigen Parameter zu bestimmen. Hierfür müssen jedoch über den Messzeitraum sowohl die Wetterbedingungen als auch die Betriebsbedingungen des Kollektors konstant bleiben. Stationäre Messungen können also nur bei entsprechenden Wetterbedingungen erfolgen und sind sehr zeitaufwendig.

Demgegenüber weisen quasi-dynamische Messungen eine höhere Güte des errechneten Kollektormodells auf, siehe Rodriguez-Hidalgo et al. [8] und sind bei einer größeren Bandbreite an Wetterbedingungen möglich. Daher wird die Leistungscharakterisierung in Anlehnung an DIN EN ISO 9806 mit dem quasi-dynamischen Verfahren durchgeführt. Abschließend werden die Parameter des quasi-dynamischen Modells auf die des stationären Modells unabgedeckter Kollektoren überführt bzw. umgerechnet. Die dynamische Leistungscharakterisierung bildet das Verhalten des Kollektors entsprechend der folgenden Gleichung zur Modellierung der momentanen Kollektorleistung ab:

$$\begin{aligned} \frac{\dot{Q}}{A} = & \eta_{0,b} \cdot K_b(\Theta_L, \Theta_T) \cdot G_b + \eta_{0,b} \cdot K_{\Theta d} \cdot G_d - c_1 \cdot (\vartheta_m - \vartheta_a) \\ & - c_2(\vartheta_m - \vartheta_a)^2 - c_3 \cdot u \cdot (\vartheta_m - \vartheta_a) + c_4 \cdot (E_L - \sigma \cdot T_a^4) \\ & - c_5 \cdot \frac{d\vartheta_m}{dt} - c_6 \cdot u \cdot G \end{aligned} \quad (2)$$

Die einzelnen Bestandteile der Gleichung können DIN EN ISO 9806 entnommen werden. Für die quasi-dynamische Prüfung muss der Kollektor nicht nachgeführt werden und es werden keine kontinuierlichen Wetterbedingungen benötigt. Die Messung erfolgt indem der Kollektor über mehrere Prüfperioden bei bestimmten mittleren Fluidtemperaturen betrieben und dabei messtechnisch überwacht wird. Die folgenden vier unabhängigen Prüfperioden sind gefordert:

1. Prüfperiode: Die erste Prüfperiode wird unter η_0 -Bedingungen durchgeführt und benötigt klaren Himmel. η_0 -Bedingungen liegen vor, wenn die Eintrittstemperatur des Arbeitsfluides weniger als ± 3 K von der Umgebungstemperatur abweicht. Zudem muss der Einfallswinkel der direkt einfallenden Strahlung Werte von 0° bis über 60° durchlaufen.
2. Prüfperiode: Die 2. Prüfperiode erfordert keine spezielle Betriebstemperatur und wird bei heiterem bis bewölktem Himmel durchgeführt.
3. Prüfperiode: Diese Messung wird bei mittlerer Betriebstemperatur des Kollektors durchgeführt und erfolgt bei klarem bis heiterem Himmel.
4. Prüfperiode: Bei der maximalen vom Hersteller angegebenen Betriebstemperatur oberhalb Umgebungstemperatur und klarem bis heiterem Himmel erfolgt die Messung der vierten Prüfperiode.

Eine solche Prüfperiode dauert zwischen drei Stunden und einem Tag. Dabei darf jede Prüfperiode aus mehreren Teilen mit Unterbrechungen bestehen. Diese Methode kann somit auch dynamisch durchgeführt werden, wobei nur die nach Norm erforderlichen Messwertintervalle - wie sie für die quasi-dynamische Prüfung beschrieben sind - später in die Auswertung einbezogen werden. Eine Anlage kann also im Betrieb längerfristig messtechnisch begleitet werden und bei der Analyse können die geeigneten Messintervalle herausgefiltert werden. Somit kann die thermische Leistungscharakterisierung theoretisch in situ, also ohne Eingriff in den Betrieb der Anlage erfolgen. Dafür muss die Anlage im Betrieb jedoch eine gewisse Temperatur-Bandbreite abdecken, entsprechend den Anforderungen in den Prüfperioden oben. Zumindest die Messgrößen entsprechend Tabelle 2 müssen für die Charakterisierung über die Prüfperioden aufgenommen werden.

Tabelle 2: Quasi-dynamischer Kollektortest – Messgrößen nach DIN EN ISO 9806

Nr.	Bezeichnung	Zeichen	Einheit
1	Zeit	t	s
2	Arbeitsmitteleintrittstemperatur	ϑ_{in}	$^\circ\text{C}$
3	Arbeitsmittelaustrittstemperatur	ϑ_{out}	$^\circ\text{C}$
4	mittlere Arbeitsmitteltemperatur	ϑ_m	$^\circ\text{C}$
5	Arbeitsmittelvolumenstrom	\dot{V}	m^3/s
6	Umgebungstemperatur	ϑ_{amb}	$^\circ\text{C}$
7	globale Bestrahlungsstärke in der Kollektorebene	G	W/m^2
8	direkte Bestrahlungsstärke in der Kollektorebene	G_b	W/m^2
9	diffuse Bestrahlungsstärke in der Kollektorebene	G_d	W/m^2
10	langwellige Strahlung	E_L	W/m^2
11	Einfallswinkel der Direktstrahlung	θ	$^\circ$
12	Windgeschwindigkeit in Kollektorebene (Vorderseite)	u_v	m/s
13	Windgeschwindigkeit in Kollektorebene (Rückseite)	u_r	m/s
14	spezifische Wärmekapazität des Arbeitsmittels	c_f	$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
15	Dichte des Arbeitsmittels	ρ	kg/m^3

Die in Tabelle 2 markierten Größen werden rechnerisch aus Messgrößen ermittelt. Die in situ Messperioden möglichst lang andauern und etwa symmetrisch um den solaren Mittag stattfinden, sodass ähnlich viele Daten vor- und nachmittags aufgenommen werden.

Elektrische Leistungscharakterisierung des PVT-Kollektors

Die elektrische Leistung des PVT-Kollektors wird durch Type 203 nach dem Wirkungsgradmodell oder dem effektiven Solarzellen-Kennlinien-Modell abgebildet. Unabhängig von dem ausgewählten Modell benötigt das Type die Strom- und Spannungswerte des PV-Moduls im MPP, im Leerlauf und im Kurzschlussfall. Zusätzlich wird der Modulwirkungsgrad und der Leistungs-Temperaturfaktor benötigt. Hier ist die Bezugsfläche des Wirkungsgrads zu beachten. Die Daten können normalerweise dem Datenblatt des Herstellers oder der Kennlinie eines PV-Moduls (vom Hersteller) entnommen werden.

Elektrisches Wirkungsgradmodell nach Durisch

Neben der Leistungscharakterisierung eines PV-Moduls nach DIN EN 60904-1 besteht laut Durisch et al. [5] auch die Möglichkeit ein PV-Modul unter dynamischen Bedingungen abzubilden. Deshalb wird der Betrieb des PV-Modules unter dynamischen Bedingungen gemeinsam mit den thermischen Daten (als PVT-Kollektor) gemessen und ausgewertet. Aus den gemessenen Daten sollen dann die Parameter der Modellgleichung nach Durisch [5] ermittelt werden. Diese Modellgleichung erlaubt die Berechnung des elektrischen Wirkungsgrades von PV-Modulen unter verschiedenen Klima- und Betriebsbedingungen. Hierfür beschreibt die Modellgleichung nach Durisch den momentanen Wirkungsgrad des PV-Modules als Funktion von Einstrahlung, der Modultemperatur und des AM-Wertes. Mithilfe des ermittelten Wirkungsgradmodells soll aus den dynamischen Messdaten auf den Wirkungsgrad unter STC, die maximale Modulleistung unter STC und den Leistungs-Temperaturkoeffizienten geschlossen werden. Bei diesem Ansatz handelt es sich jedoch nicht um ein genormtes Verfahren.

Messungen eines PVT-Kollektors auf dem Labordach

Da es zu Verzögerungen im Projektablauf kam, entstand die Möglichkeit das erarbeitete, quasi-dynamische Verfahren im Labor zu testen. Hierfür konnte einer der PVT-Kollektoren auf dem Dach des Solarenergielabors der htw saar (ehemals Testzentrum Saarbrücken der IZES gGmbH) installiert werden und im Rahmen einer Bachelor-Arbeit untersucht werden, siehe Eckert & Palm [13]. Bei dem untersuchten Kollektor handelt es sich um einen unabgedecktes PVT-Kollektor, bestehend aus einem PV-Modul und einem rückseitig angebrachten Harfenabsorber. Da es sich um einen Prototyp handelt sollen keine weiteren technischen Daten des Kollektors angeführt werden. In Abbildung 5 ist der Kollektor auf dem Labordach, zusammen mit der im direkten Umfeld installierten Messtechnik zu erkennen. Der Kollektor wurde vom Hersteller mit rückseitiger Wärmedämmung gefertigt. Für das Projekt soll der Kollektor jedoch ohne Wärmedämmung (zur besseren thermischen Kopplung an die Umgebung - entsprechend dem niederexergetischen Ansatz) untersucht und installiert werden. Auf dem Labordach konnten zuvor jedoch auch Daten des gedämmten Kollektors aufgenommen werden. Die Mehrzahl der Messungen wurden an dem ungedämmten Kollektor durchgeführt werden. Daher bezieht sich Auswertung primär auf den ungedämmten Kollektor. Da auch die Parameter für den gedämmten Kollektor ermittelt wurden, können die beiden Varianten mittels Simulationsstudien verglichen werden.

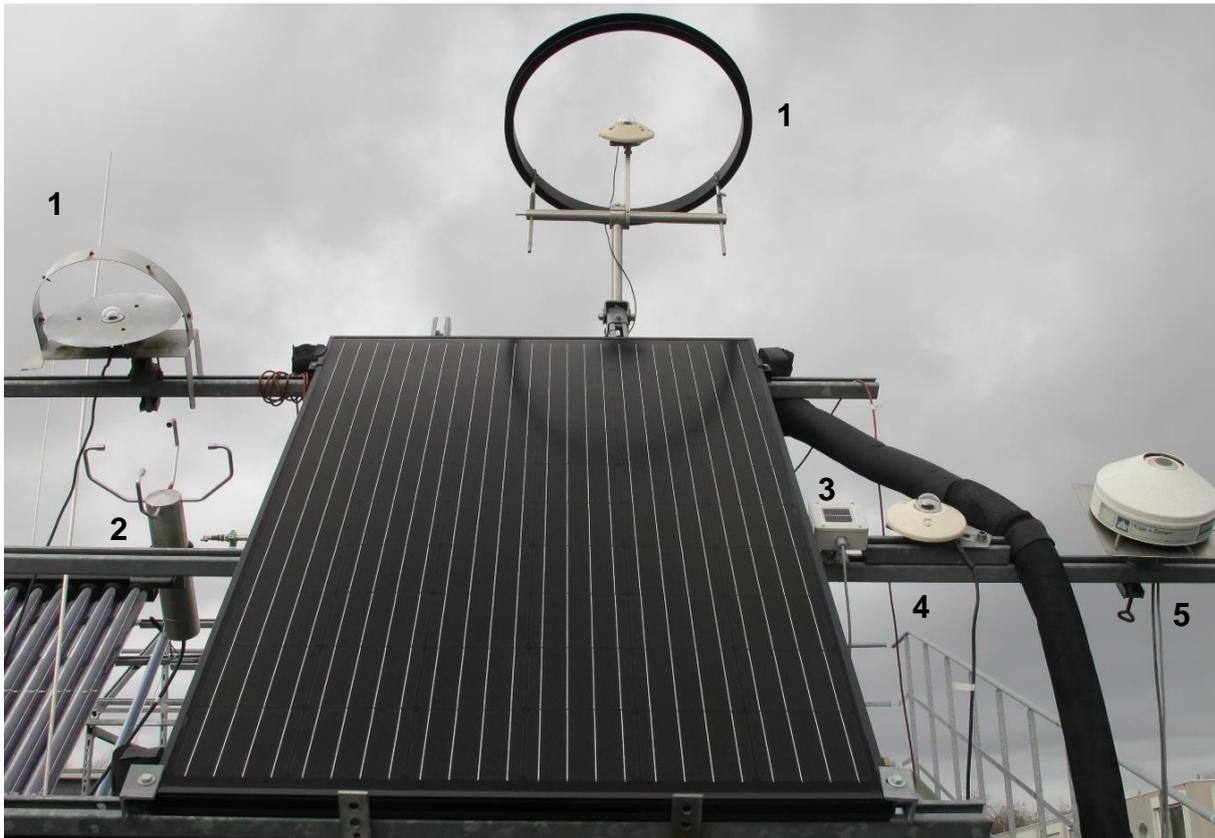


Abbildung 5: Messaufbau direkt am PVT-Kollektor auf dem Labordach mit Schattenring-Pyranometer (1), Ultraschall-Anemometer (2), Silizium-Referenzzelle (3), Pyranometer (4) und Pyrgeometer (5).

Der Kollektor wurde im MPP-Betrieb und im Leerlaufbetrieb entsprechend den oben aufgeführten Prüfperioden in Anlehnung an DIN EN ISO 9806 vermessen. Die MPP-Betriebsweise ist der primäre Betriebszustand der PVT-Kollektoren, wobei die gegenseitige Beeinflussung zwischen thermischer und elektrischer Seite des Kollektors hier wesentlich auftritt. Zusätzlich wurde der Leerlaufbetrieb (PV-Modul im Leerlauf, Absorber durchströmt) vermessen, da für das Type 203 die thermischen (stationären) Parameter im Leerlauf benötigt werden. Zusätzlich zur Bestimmung im Leerlaufbetrieb wurden die benötigten Parameter des PVT-Kollektors in Anlehnung an Zenhäusern et al. [12] anhand der Messdaten aus dem MPP-Betrieb rückgerechnet. Zeit- und Wetter bedingt konnten bis zur Erstellung dieses Beitrages nicht alle Betriebsmodi auf dem Labordach vermessen bzw. im Detail ausgewertet werden. Da der Demonstrator erst im September 2017 in den regulären Betrieb geht, soll die Zeit bis dahin genutzt werden, um Messdaten für den Kollektor auf dem Labordach über größere Zeiträume bei verschiedenen Betriebsmodi zu sammeln.

Ermittlung der quasi-dynamischen, thermischen Parameter des PVT-Kollektors

Ziel der quasi-dynamischen Prüfung ist es, die Parameter der Gleichung zur Modellierung der momentanen Kollektorleistung (nach DIN EN ISO 9806) zu ermitteln:

$$\begin{aligned} \frac{\dot{Q}}{A} = & \eta_{0,b} \cdot K_b(\Theta_L, \Theta_T) \cdot G_b + \eta_{0,b} \cdot K_{\Theta d} \cdot G_d - c_1 \cdot (\vartheta_m - \vartheta_a) \\ & - c_2(\vartheta_m - \vartheta_a)^2 - c_3 \cdot u \cdot (\vartheta_m - \vartheta_a) + c_4 \cdot (E_L - \sigma \cdot T_a^4) \\ & - c_5 \cdot \frac{d\vartheta_m}{dt} - c_6 \cdot u \cdot G \end{aligned} \quad (3)$$

Mit Hilfe dieser Parameter (c_1 bis c_6) lässt sich in Abhängigkeit von Wetter- und Betriebsbedingungen die Momentanleistung des Kollektors gemäß obiger Gleichung beschreiben. Da die Kollektorleistung abhängig vom Einfallswinkel der Direktstrahlung ist, muss dieser berücksichtigt werden.

Für punktsymmetrische Kollektoren darf der sogenannte b_0 -Ansatz verwendet werden. Unter Verwendung des resultierenden Einfallswinkels und dem b_0 -Ansatz

$$K_b(\Theta_L, \Theta_T) = 1 - b_0 \cdot \left(\frac{1}{\cos \Theta} - 1 \right) \quad (4)$$

ergibt sich Gleichung 3 zu:

$$\begin{aligned} \frac{\dot{Q}}{A} = & \eta_{0,b} \cdot \left[1 - b_0 \cdot \left(\frac{1}{\cos \Theta} - 1 \right) \right] \cdot G_b + \eta_{0,b} \cdot K_{\Theta d} \cdot G_d \\ & - c_1 \cdot (\vartheta_m - \vartheta_a) - c_2(\vartheta_m - \vartheta_a)^2 - c_3 \cdot u \cdot (\vartheta_m - \vartheta_a) \\ & + c_4 \cdot (E_L - \sigma \cdot T_a^4) - c_5 \cdot \frac{d\vartheta_m}{dt} - c_6 \cdot u \cdot G \end{aligned} \quad (5)$$

Auf Grundlage der Messdaten wurde mit Hilfe einer multiplen linearen Regression (MLR) die vollständige Kollektorgleichung ermittelt. Als Ergebnis der Regression werden die einzelnen Parameter der Kollektorgleichung bestimmt. Nach Fischer [6] handelt es sich dabei jedoch um reine Modellparameter, die nicht zwingend physikalisch interpretierbar sind.

Evaluation der Messdaten für die Ermittlung der quasi-dynamischen Parameter

Wie in DIN EN ISO 9806 gefordert erfolgt eine grafische Evaluation des Datensatzes zur Bestimmung der dynamischen Parameter. Für diese Evaluation werden mehrere Grafiken erstellt, siehe Abbildung 6. Mit Hilfe der Grafiken kann visuell abgeschätzt werden, ob eine ausreichende Menge an Messdaten über die geforderte Bandbreite aufgenommen wurde. In den Grafiken sind die Messwerte in schwarz dargestellt. Die grau hinterlegte Fläche in den einzelnen Grafiken soll möglichst vollflächig mit Messdaten abgedeckt werden. Hierfür werden die oben aufgeführten Messperioden definiert.

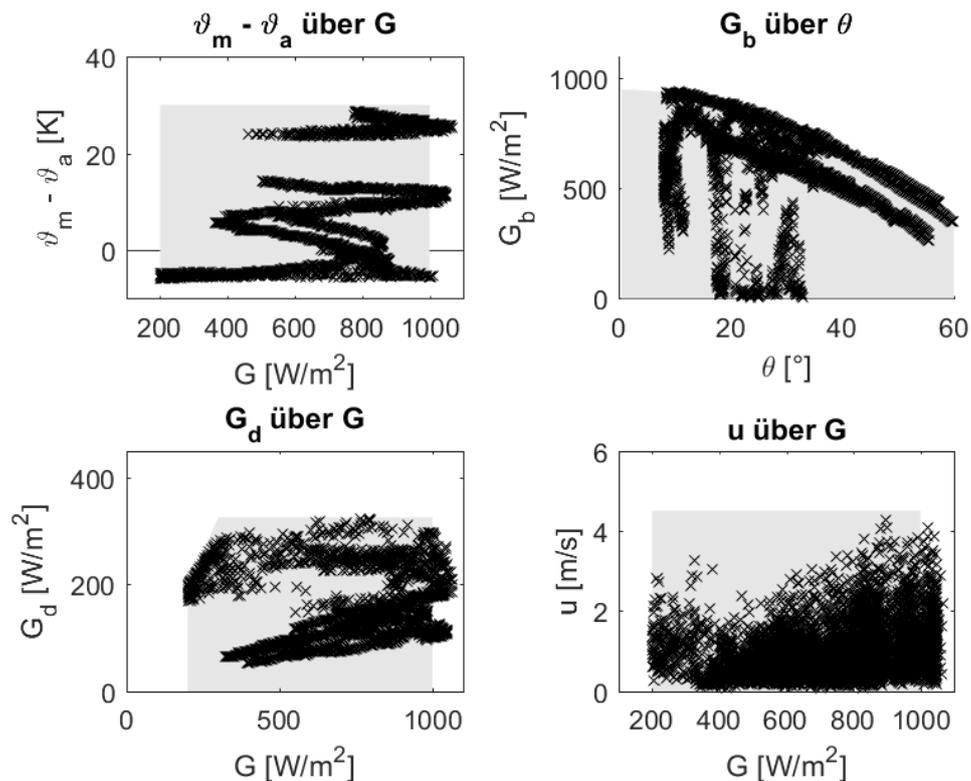


Abbildung 6: Grafische Evaluation eines Datensatzes nach DIN EN ISO 9806

Zusätzlich zur Evaluation der Messdaten anhand der Grafiken wird die Regression anhand der T-Verhältnisse (Kennwert geteilt durch dessen Standardabweichung) geprüft. Bei zu geringen T-Verhältnissen (größer drei und kleiner zehn) sollten weitere Messungen zur Erhöhung der Güte der Modellgleichung durchgeführt werden.

Umrechnung auf stationäre, thermische Parameter

Nach Abschluss der Regression nach Gleichung 5 wird anhand dieser Regression ein Datensatz generiert, wie er für die Leistungscharakterisierung nach stationärem Verfahren (entsprechend DIN EN ISO 9806) für einen ungedeckten Kollektor gemessen werden müsste. Die Modellgleichung des quasi-dynamischen Kollektortests wird dazu unter den nach Norm für die stationäre Messung geforderten Wetterbedingungen gelöst. Der Datensatz wird benötigt, da TRNSYS mit den Parametern des stationären Kollektormodells arbeitet, und diese nicht den Parametern des vollständigen Kollektormodells entsprechen.

Ermittlung der elektrischen Parameter nach Durisch [5]

Die resultierende Modellgleichung für den eingesetzte (ungedämmte) PVT-Kollektor nach dem Modell von Durisch ist in Abbildung 7 dargestellt. Man erkennt, dass die höchsten elektrischen Wirkungsgrade bei geringer Einstrahlung (200-400 W/m²) und niedriger Modultemperatur (0-20 °C) auftreten.

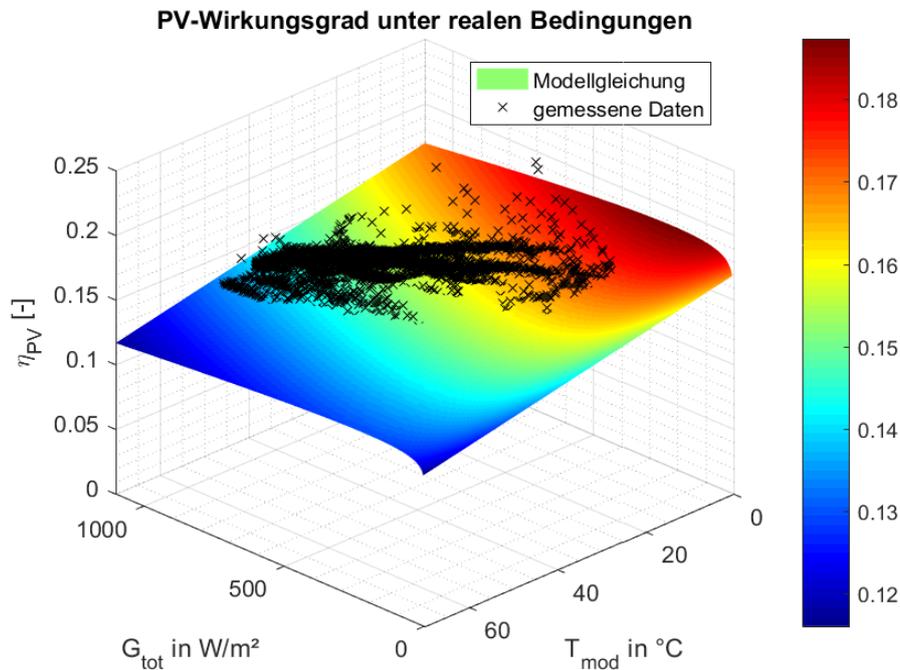


Abbildung 7: Visualisierung der Wirkungsgradgleichung nach Durisch für den eingesetzten PVT-Kollektor

Überblick: Ermittelte Parameter-Datensätze für den PVT-Kollektor

- Thermische Parameter:
 - o Gedämmter PVT-Kollektor
 - (MPP-Betrieb)
 - Auf Leerlauf rückgerechneter MPP-Betrieb
 - o Ungedämmter PVT-Kollektor
 - (MPP-Betrieb)
 - Auf Leerlauf rückgerechneter MPP-Betrieb
 - Leerlaufbetrieb
- Elektrische Kennwerte/Parameter:
 - o Kennlinie Modul (Test Hersteller mit AAA-Flasher)
 - o Wirkungsgrad und Leistungs-Temperaturkoeffizient nach Durisch

Die thermischen Parameter aus dem MPP-Betrieb können für das Simulationsmodell nicht verwendet werden, da hier die Parameter aus dem Leerlaufbetrieb eingesetzt werden müssen. Daher stehen für die Simulation des ungedämmten Kollektors zwei thermische Parameter-Datensätze zur Verfügung: „Leerlaufbetrieb“ und aus dem MPP-Betrieb rückgerechneter Leerlaufbetrieb, genannt „MPP_Leerlaufbetrieb“. Die Rückrechnung erfolgt indem die Einstrahlung vor der Kennwertbestimmung um die elektrische Leistung reduziert wird.

Auch auf der elektrischen Seite liegen zwei Parameter-Datensätze vor, genannt „Kennlinie“ und „Durisch“. Der Datensatz „Durisch“ enthält den Wirkungsgrad und den Leistungs-Temperaturkoeffizienten nach Durisch und die Strom- und Spannungswerte entsprechend dem Datensatz „Kennlinie“.

Validierung

Durch einen Vergleich der simulierten Ergebnisse mit den Messungen unter realen Bedingungen vom Labordach, kann eine Aussage getroffen werden, ob das Verfahren zu realistischen Simulationsergebnissen führt und das Simulationsmodell bzw. auch das Verfahren somit validiert werden kann. Bei der Validierung wird nur der ungedämmte Kollektor betrachtet. Wetterbedingt konnten bisher nur zwei Betriebsmodi über jeweils ca. 30 h vermessen werden. Dies entspricht in etwa jeweils vier Messtagen und somit den oben angeführten Prüfperioden. Für die Einstrahlwinkelkorrekturen IAM_{el} und IAM_{therm} wurde auf typische Werte für einen Flachkollektor zurückgegriffen. Hier wird auf Standard-Werte zurückgegriffen, da der b_0 -Ansatz entsprechend Gleichung 4 teilweise zu nicht interpretierbaren Ergebnissen führt. Die auf dem Labordach gemessenen meteorologischen Daten und Randbedingungen werden dem Type 203 in TRNSYS als Inputs zugeführt. Als Parameter des Types kommen die oben aufgeführten Parameter-Datensätze zum Einsatz (in verschiedenen Kombinationen). Für die Validierung wird der thermische und elektrische Ertrag des PVT-Kollektors [kWh] über den Mess- bzw. Simulationszeitraum aufsummiert und verglichen (Simulation & Messung). Die Messdaten wurden in einem Intervall von 10 s aufgenommen. Der gleiche Zeitschritt wurde auch in der Simulation gewählt. Das generelle Ablaufschema der Validierung ist in Abbildung 8 dargestellt.

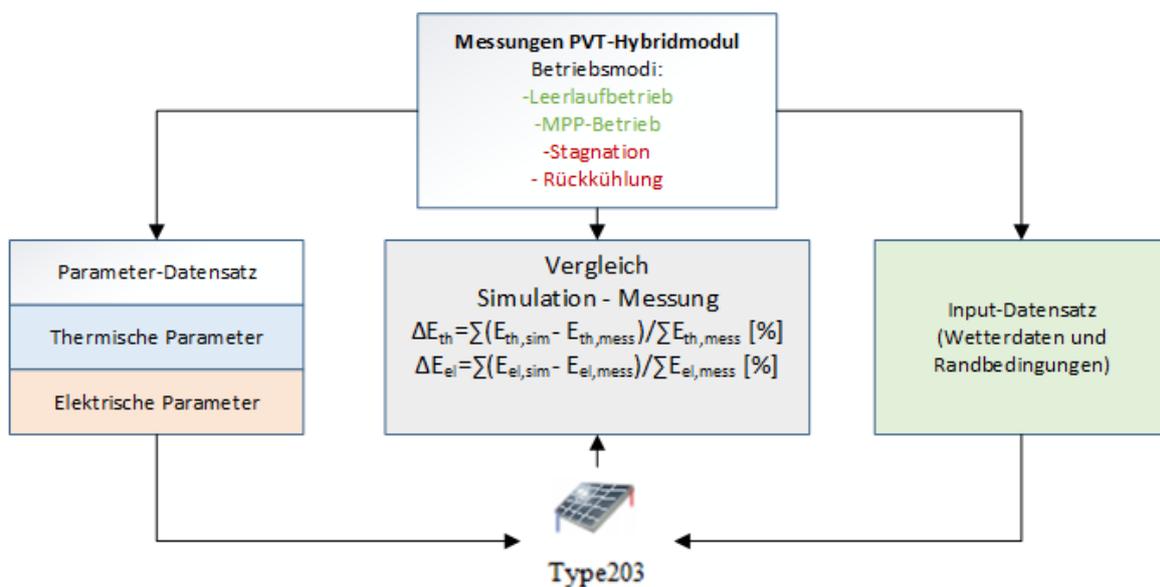


Abbildung 8: Ablaufschema der Validierung

Im Folgenden wird nur der erste Ansatz einer Validierung anhand der bisher aufgenommenen Messdaten dargestellt. Für die folgenden beiden Betriebsmodi wurden bereits Messdaten aufgenommen:

Leerlauf:

Vergleich der simulierten Werte mit den gemessenen Werten des Kollektors im elektrischen Leerlaufbetrieb (PV-Modul). Für diesen Betriebsmodus sind nur die thermischen Parameter von Interesse. Wie aus Tabelle 3 ersichtlich wird, kommt es, je nach Parameter-Satz, zu Abweichungen von 8-13 %. Der Betrachtungszeitraum liegt bei knapp 31 h. Über diesen Zeitraum kommt es zu einer absoluten Abweichung ($\sum E_{th,sim} - \sum E_{th,mess}$) von ca. 1-1,5 kWh. Die

Simulationsergebnisse beider Parameter-Datensätze liegen unterhalb der Messergebnisse. Es werden negative Abweichungen ermittelt.

Tabelle 3: Vergleich der simulierten und gemessenen Werte für die thermische Energie und elektrische Energie des PVT-Kollektors über den Messzeitraum von knapp 31 h für den Betriebsmodus „Leerlauf“

Nr.	Thermische Parameter	Elektrische Parameter	ΔE_{th} [%]	ΔE_{el} [%]
1	Leerlaufbetrieb	-/-	-12,6	-/-
2	MPP_Leerlaufbetrieb	-/-	-8,7	-/-

MPP-Betrieb

Vergleich der simulierten Werte mit gemessenen Werten im MPP-Betrieb: Für diesen Betriebsmodus sind die thermischen und elektrischen Parameter von Interesse. Wie aus Tabelle 4 ersichtlich wird, kommt es, je nach Parametersatz, beim thermischen Ertrag, zu Abweichungen von 4-5 % und beim elektrischen Ertrag von 4-9 %. Der Betrachtungszeitraum liegt bei knapp 23 h. Die absolute thermische Abweichung ($\sum E_{th,sim} - \sum E_{th,mess}$) liegt über alle vier Datensatz-Kombinationen bei ca. 0,3 kWh. Die absolute elektrische Abweichung variiert zwischen 0,2 und 0,4 kWh, je nach Datensatz.

Tabelle 4: Vergleich der simulierten und gemessenen Werte für die thermische Energie und elektrische Energie des PVT-Kollektors über den Messzeitraum von ca. 23 h für den Betriebsmodus „MPP-Betrieb“

Nr.	Thermische Parameter	Elektrische Parameter	ΔE_{th} [%]	ΔE_{el} [%]
1	Leerlaufbetrieb	Kennlinie	-5,4	9,2
2	Leerlaufbetrieb	Durisch	-4,5	4,7
3	MPP_Leerlaufbetrieb	Kennlinie	-4,7	8,1
4	MPP_Leerlaufbetrieb	Durisch	-3,9	4,4

Anmerkung: Im Rahmen der dynamischen Messungen an dem PVT-Kollektor wurde für K_d (Einfallswinkelkorrekturfaktor für Diffusstrahlung des Absorbers, Parameter Nr. 16 aus Tabelle 1) Werte zwischen 0,2 [] und 1,2 [] ermittelt. Dieser Wert hat einen großen Einfluss, primär auf die thermischen Ergebnisse der Simulation und somit die Differenz zwischen Simulation und Messung. Indirekt werden jedoch auch die elektrischen Ergebnisse durch den Wert beeinflusst. Die obigen Abweichungen wurden mit dem K_d -Wert aus der dynamischen Messung ermittelt. Die Ansetzung und Interpretation des Wertes muss daher im Rahmen von längerfristigen Messungen überprüft werden.

Fazit: Validierung (Type 203 und ermittelte Parameter)

Für eine belastbare Validierung des Simulationsmodells (Type 203) und des Verfahrens für den eingesetzten PVT-Kollektor liegen bisher noch zu wenige Messdaten vor. Zusätzlich wurden einige Betriebsmodi noch nicht realisiert bzw. ausgewertet. Es wird angenommen, dass mit der Anzahl der aufgenommenen und ausgewerteten Messdaten auch die „Güte“ der thermischen Parameter-Datensätze zunimmt. Diese Vermutung gilt es im Laufe des Projektes und der verbleibenden Messungen zu verifizieren. Auf Grundlage der bisherigen Ergebnisse wurden die geringsten Abweichungen bei Nutzung der elektrischen Kennwerte nach Durisch ermittelt. Bei den thermischen Parametern sind die Abweichungen zwischen den beiden Modellen sehr gering. Beide Ansätze liefern ähnliche Abweichungen. Da sich die beiden Anteile (thermisch und elektrisch) gegenseitig beeinflussen sind diese immer gemeinsam zu betrachten.

Fazit: In situ-Messung und Verfahren zur Ermittlung der Parameter

Das erarbeitete Verfahren kann noch nicht abschließend bewertet werden. Hierfür fehlen noch zusätzliche Messdaten der verschiedenen Betriebsmodi des PVT-Kollektors und das Ergebnis einer Validierung aller möglichen Betriebszustände.

Generell ist die in situ Vermessung eines PVT-Kollektors bzw. einer Anlage mit dem hier beschriebenen Verfahren und der eingesetzten Messtechnik möglich. Zur Ermittlung der thermischen Parameter kann das quasi-dynamische Verfahren nach DIN EN ISO 9806 verwendet werden. Eine Ermittlung der Parameter für die Simulation mit Type 203 scheint sowohl über eine Messung im Leerlaufbetrieb als auch durch Rückrechnung der Messwerte aus dem MPP-Betrieb auf den Leerlaufbetrieb möglich. Bisher scheint es, dass beide Ansätze ähnliche Parameter und somit auch ähnliche Simulationsergebnisse liefern. Bei den resultierenden thermischen Parametern verbleibt die Frage nach der physikalischen Interpretierbarkeit, insbesondere der Einfallswinkelkorrekturfaktoren (IAM und K_d) und der thermischen Kapazität des Kollektors. Gleichzeitig muss in situ sichergestellt werden, dass über den Messzeitraum die geforderte Bandbreite an Temperaturen angefahren wird bzw. werden kann und die Eintrittstemperatur die geforderte Konstanz aufweist. Zu beachten sind hier auch die Randbedingungen wie z.B. Verschattung oder Teilverschattung. Auch die gegenseitige Beeinflussung der Komponenten spielt hier eine entscheidende Rolle, z.B. bei der Reihenschaltungen mehrerer Kollektoren.

Die elektrischen Kennwerte können vom Hersteller bezogen werden bzw. nach dem Ansatz von Durisch teilweise im dynamischen Betrieb ermittelt werden. Eine elektrische Charakterisierung nach Norm in situ ist somit nicht erforderlich. Gleichzeitig wäre diese in situ schwer realisierbar. Auf Grundlage der ersten Ergebnisse besteht die Annahme, dass die elektrischen Kennwerte, die mit Hilfe der Modellgleichung nach Durisch [5] ermittelt wurden, zu besseren Simulationsergebnissen (geringere Abweichungen zwischen Messung und Simulation) führen.

Danksagung: Für die Mitarbeit und Betreuung der hier dargestellten Arbeiten möchten wir uns bei Frau Danjana Theis vom Solarenergie-Labor im Studiengang Erneuerbare Energien/Energiesystemtechnik der htw saar bedanken. Die Projekte LEXU und LEXU II wurden gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestags unter den Fördernummern: 0327370Y/T. Wir möchten uns an dieser Stelle für die Unterstützung bedanken.

Literatur

- [1] Adam M, Wirth P, Radosavljevic R: Verbundprojekt: Standardisierung und Normung von multifunktionalen PVT Solarkollektoren (PVT-Norm), Teilvorhaben: PVT-Systemanwendung und Simulationen, Abschlussbericht, Düsseldorf, 2011
- [2] DIN EN ISO 9806:2016-05, Solarenergie – Thermische Sonnenkollektoren – Prüfverfahren, Beuth Verlag, Berlin, 2016
- [3] DIN EN 60891:2010-10, Photovoltaische Einrichtungen – Verfahren zur Umrechnung von gemessenen Strom-Spannungs-Kennlinien auf andere Temperaturen und Bestrahlungsstärken, Beuth Verlag, Berlin, 2010
- [4] DIN EN 60904: Teil 1-3, Photovoltaische Einrichtungen, Beuth Verlag
- [5] Durisch W, Bitnar B, Mayor J, Kiess H, Lam K, Close J.: Efficiency model for photovoltaic modules and demonstration of its application to energy yield estimation, J Solar Energy Materials and Solar Cells 2007; 79:91.
- [6] Fischer, Stephan: Dynamische Prüfung von Sonnenkollektoren unter besonderer Berücksichtigung der Einfallswinkelkorrektur und der Reduzierung der Prüfdauer, Shaker Verlag, Aachen, 2011, ISBN: 978-3-8440-0610-0
- [7] Klein S, Beckman W, Mitchell J, Duffie J, Freeman T: TRNSYS 17: A Transient System Simulation Program, SEL, 2012 University of Wisconsin, Madison, USA.
- [8] Rodriguez-Hidalgo M, Rodriguez-Aumente P, Lecuona A, Gutierrez-Urueta G, Ventas R: Flat Plate Thermal Solar Collector Efficiency: Transient Behavior Under Working Conditions. Part II: Model Description And Design Contributions. Applied Thermal Engineering, Elsevier, 2011, 31 (14-15), pp.2385.
- [9] Schmidt C, Altgeld H, Groß B, Luther G, Schmidt D: LEXU II – Einsatz von außenliegender Wandtemperierung bei der Gebäudesanierung, In: Proceedings of CESBP/BauSim, 2016, S.843 – 850
- [10] Stegmann M, Bertram E, Rockendorf G, Janßen S: Modell eines unverglasten photovoltaischen-thermischen Kollektors basierend auf genormten Prüfverfahren, 22. OTTI Symposium Thermische Solarenergie, Bad Staffelstein, 2012, ISBN: 978-3-941785-89-2
- [11] Type 203: Modell eines unverglasten photovoltaischen-thermischen Sonnenkollektors für TRNSYS 16, Dokumentation, ISFH, 4. Überarbeitete Version, 2011
- [12] Zenhäusern D, Bohren A, Rommel M, Dittmann S, Friesen T, Frontini F: Thermische und elektrische Charakterisierung von PVT-Kollektoren, 25. OTTI Symposium Thermische Solarenergie, Bad Staffelstein, 2015
- [13] Eckert M, Palm S: Durchführung von in situ Messungen zur dynamischen Leistungscharakterisierung und Modellierung einer PVT-Kollektoranlage im Rahmen eines Demonstrationsobjektes, Bachelor-Thesis, htw saar, Saarbrücken 2017
- [14] Luther G, Altgeld H: Die außenliegende Wandheizung, In: Gesundheits-Ingenieur-Haustechnik-Bauphysik-Umwelttechnik, 2002, (1), S. 8-15