



## PVT-Kollektormodell

M. Stegmann

## Anforderungen:

- Keine Konstruktionsparameter, sondern
- Parametrierbar mit Ergebnissen genormter Testverfahren oder aus Datenblättern
- Berücksichtigung der Einflüsse von Wind, Infrarotstrahlungsbilanz, Wärmekapazität, Kondensationseffekte
- Genaue Abbildung thermische u. elektrische Leistungen bzw. Erträge
- Zuverlässige Simulation der Effekte durch Kühlung des PVT
- Umsetzbar im Simulationsprogramm TRNSYS

## Warum neues Modell?

### Vorhandene Modelle:

- Gelten fast ausschließlich für verglaste PVT-Kollektoren
- Benötigen i.A. konstruktive Angaben → (woher kommen Parameter?)
- Vernachlässigen Einfluss Wind, Infrarotstrahlung, Kondensationseffekte und Wärmekapazität des Kollektors

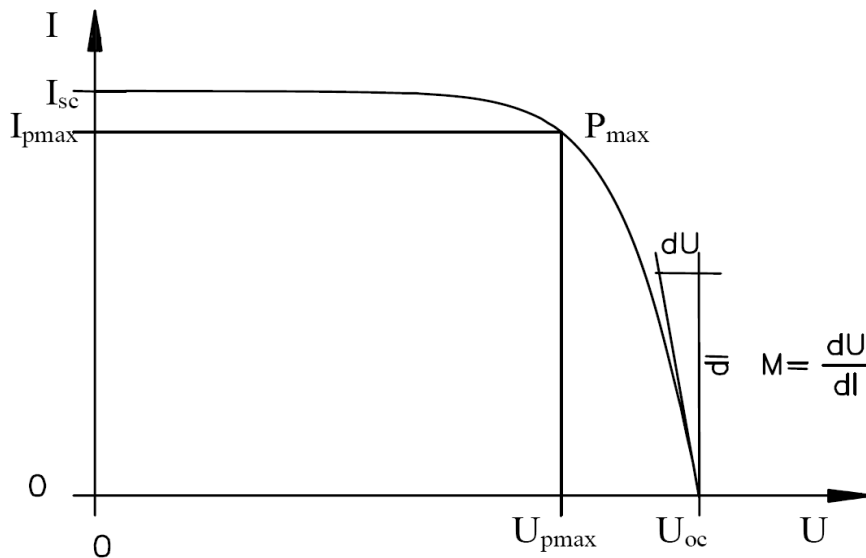
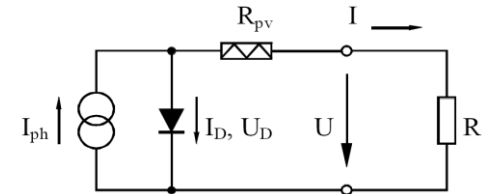
### Neues Modell:

- Kennlinienmodelle (thermisch u. elektrisch)
- Parametrierbar mit Standard-Testmessungen oder Datenblatt
- Berücksichtigt wichtigste Einflussgrößen für unverglaste PVT (Wind, Infrarotstrahlung, Kondensationseffekte u. Wärmekapazität Kollektor)
- Berechnung des internen thermischen Leitwerts aus thermischer Kennlinie

## Elektrische Leistung:

„Effektives Solarzellen-Kennlinien-Modell“<sup>1</sup>

mit Kennwerten nach EN 60904-1



$$P_{PV} = \eta_{STC} \cdot \eta_{rel} \cdot G' \cdot A_{PVT}$$

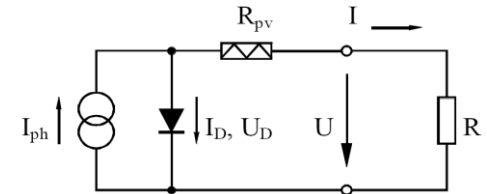
### Parameter aus Datenblatt PV-Modul:

$U_{MPP}$	Spannung im MPP-Punkt
$I_{MPP}$	Strom im MPP-Punkt
$U_L$	Leerlaufspannung
$I_K$	Kurzschlussstrom
$c_T$	Leistungstemperaturkoeffizient
$\eta_{STC}$	Wirkungsgrad unter STC

<sup>1</sup> Quelle: „Photovoltaik Engineering“, Andreas Wagner, Springer Verlag, 1999

## Elektrische Leistung:

„Effektives Solarzellen-Kennlinien-Modell“<sup>1</sup>



$$P_{PV} = \eta_{STC} \cdot \eta_{rel} \cdot G' \cdot A_{PVT}$$

berücksichtigt das nicht lineare Verhalten des Wirkungsgrads über der Einstrahlung mit Einbeziehung von:

- Kennlinienverlauf ( $U_{MPP}$ ,  $I_{MPP}$ ,  $U_L$ , ...)
- Temperatureinfluss ( $c_T$ )
- logarithmische Abhängigkeit von Einstrahlung

STC: standard test conditions  
 $G' = 1000 \text{ W/m}^2$   
 $T_{PV} = 25^\circ\text{C}$   
 $AM = 1,5$  (airmass)

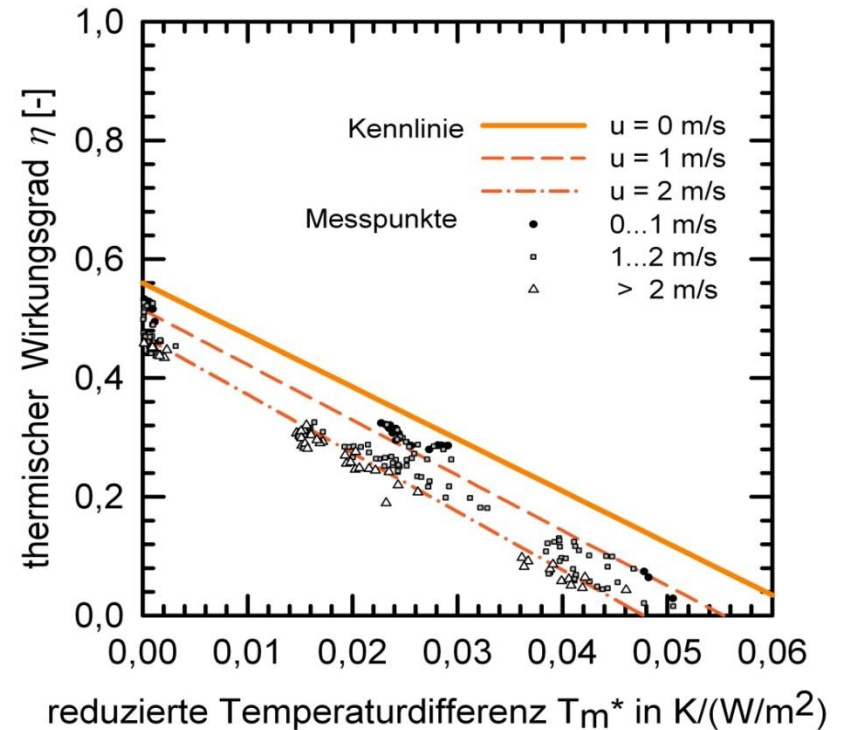
## Thermische Leistung:



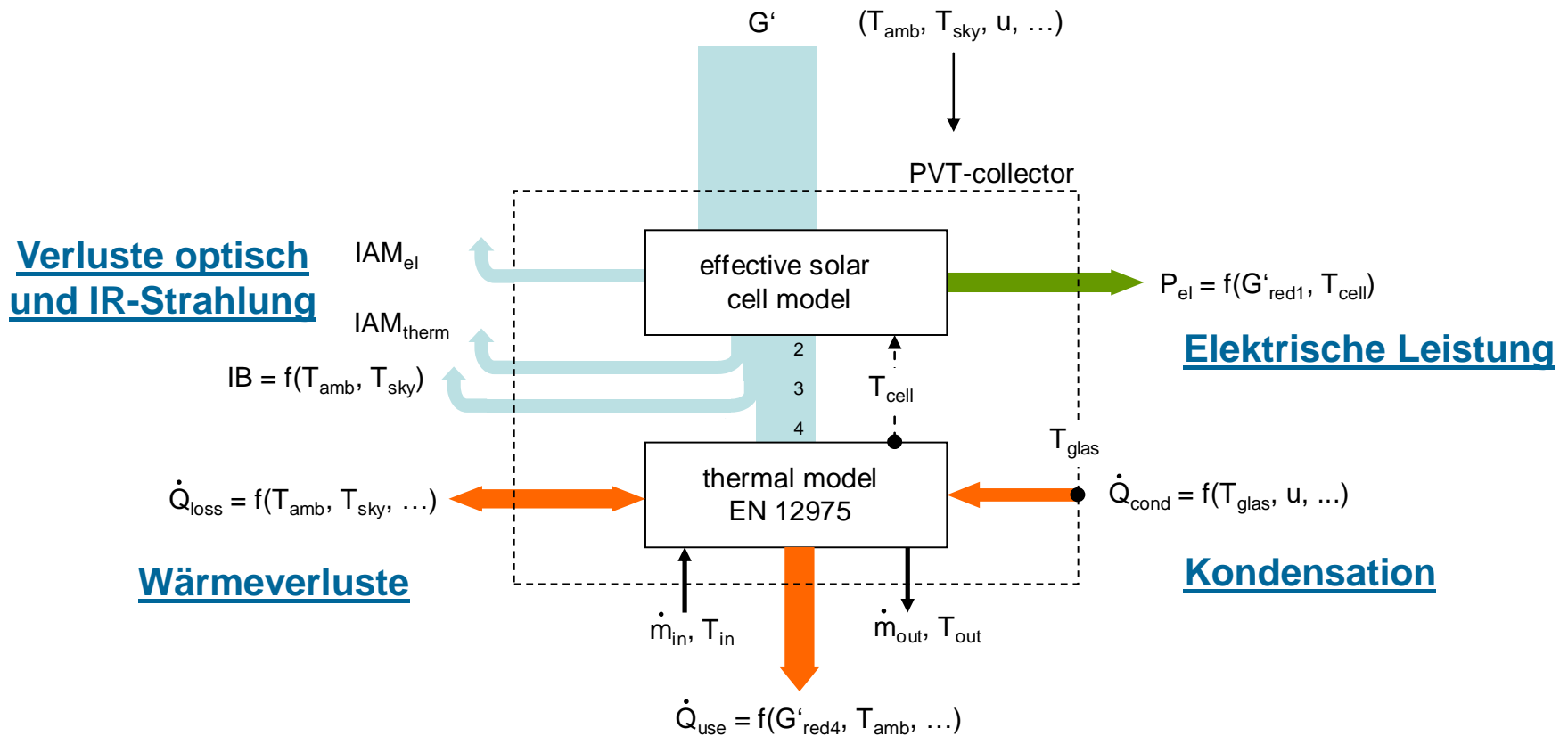
Messung nach EN 12975-2  
(Messung im Leerlauf  $P_{el} = 0$ )

Thermische Kollektorkennlinie:

$$\eta = \eta_0 \cdot (1 - b_u \cdot u) - (b_1 + b_2 \cdot u) \cdot \frac{T_m - T_{amb}}{G_n}$$



## Kombination elektrisches und thermisches Modell



Verluste optisch und IR-Strahlung

Elektrische Leistung

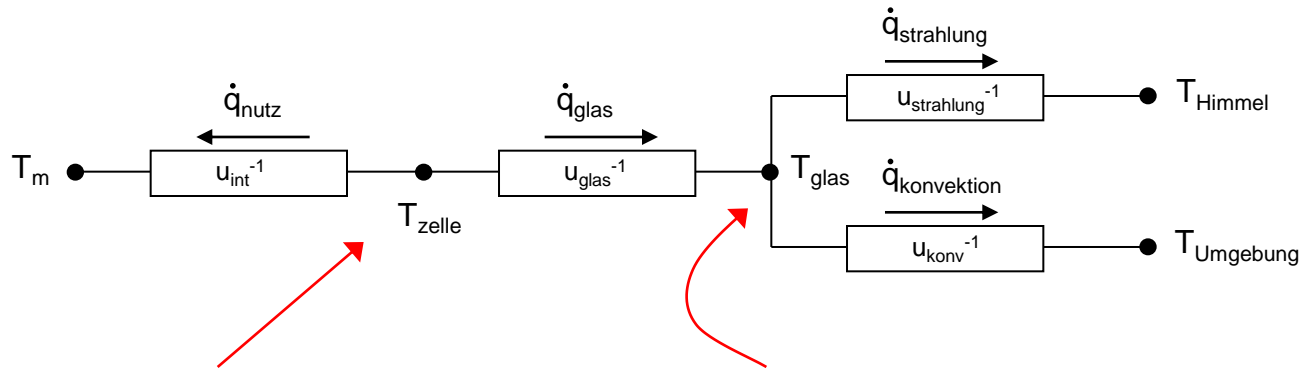
Wärmeverluste

Kondensation

Thermische Nutzleistung

$$G'_{red,4} = G_n$$

## Bestimmung von Zell- und Oberflächentemperatur



Zelltemperatur

Oberflächentemperatur

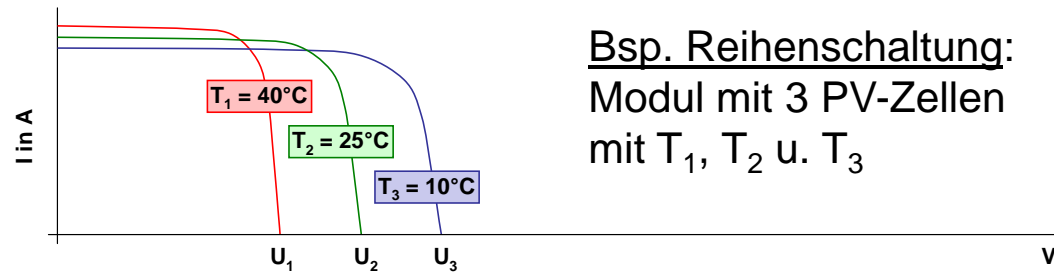
Ausgehend von mittlerer Fluidtemperatur

- mit Nutzwärmestrom
- und internem thermischen Leitwert (berechnet aus therm. Kennlinie)

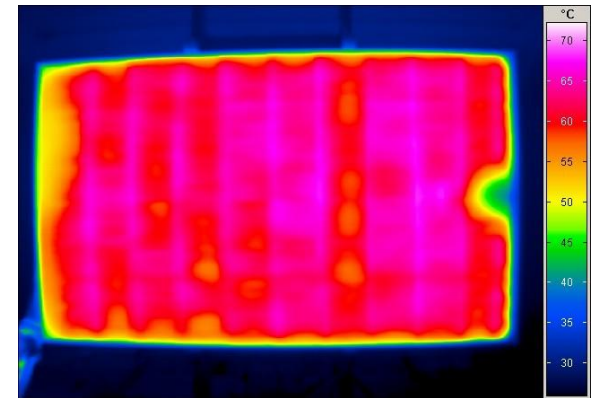
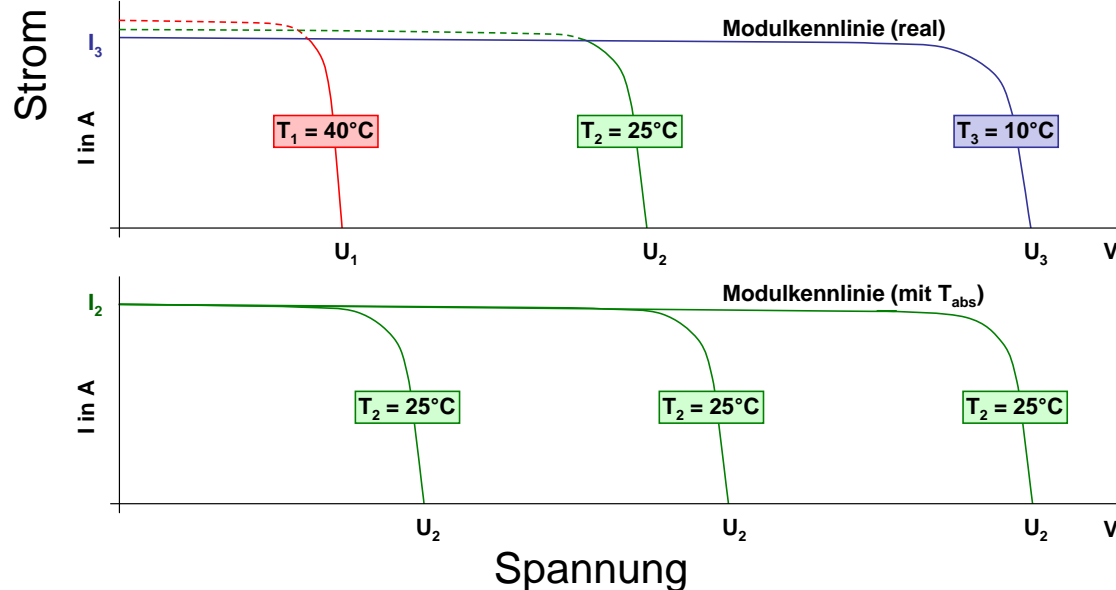
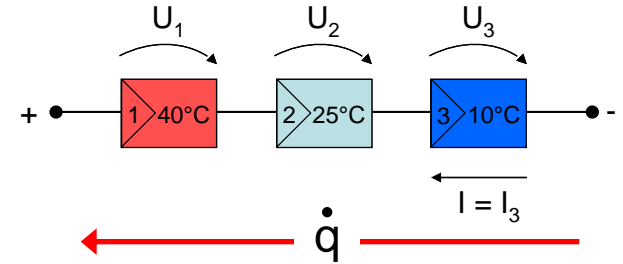
Ausgehend von Zelltemperatur

- mit Wärmeleitung Abdeckung,
- konvektiver- und
- Strahlungswärmeübergang
- $T_{glas}$  ist Hilfsgröße (Kondensation)

## Auswirkung inhomogener Kollektortemperaturen:



Bsp. Reihenschaltung:  
 Modul mit 3 PV-Zellen  
 mit  $T_1$ ,  $T_2$  u.  $T_3$



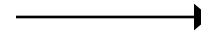
Thermographieaufnahme  
 heiß durchströmter PVT

## Inhomogene Temperaturverteilung

Temperaturkoeffizient elektrische Leistung  $c_T$

→ ändert sich in Folge Kennlinienverschiebung durch:

- Temp.-koeffizient Kurzschlussstrom  $\alpha$
- Temp.-koeffizient Leerlaufspannung  $\beta$



$\beta$  ist ~ 10 x größer als  $\alpha$

Mit arithmetisch gemittelter Modultemperatur

- Spannung richtig
- Strom geringfügig höher



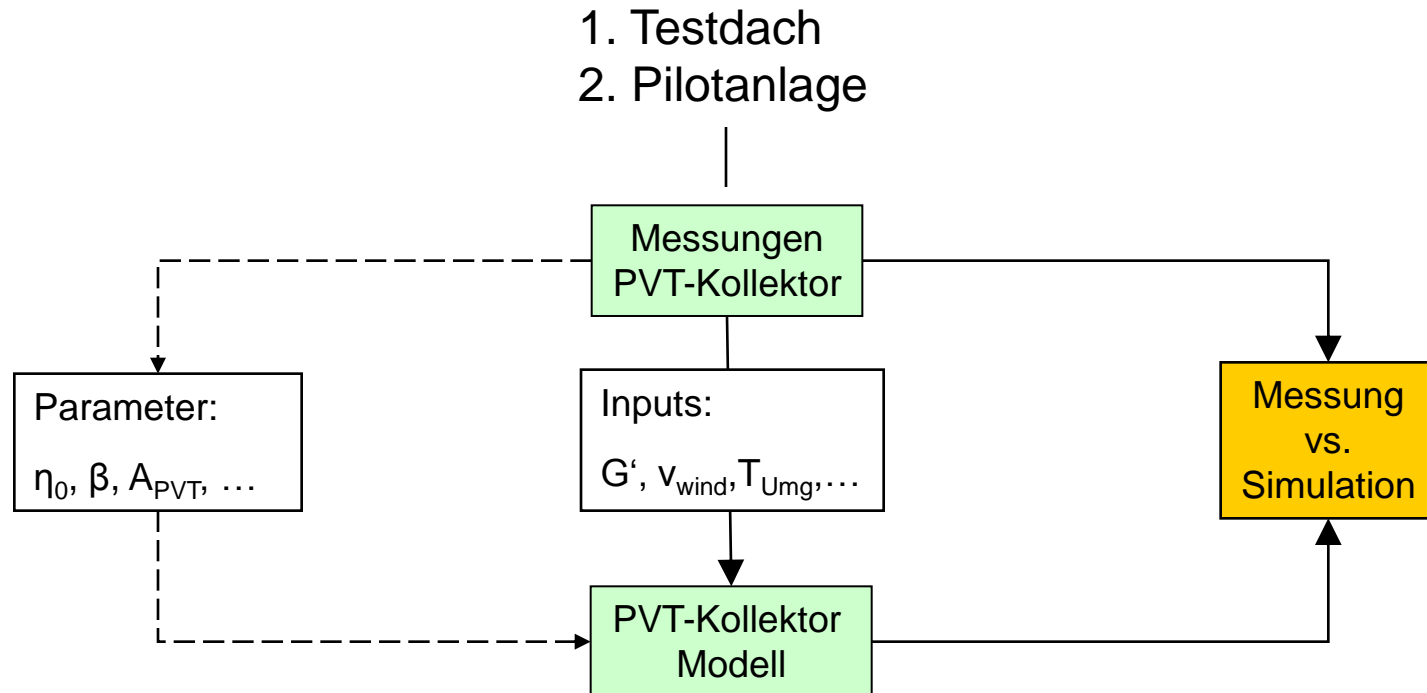
**Fehler Modulleistung < 1%**

Leistungsberechnung mit mittlerer Absorbtemperatur  
bei Reihenschaltung vernachlässigbar kleiner Fehler!

Reihenschaltung von gekühlten und nicht gekühlten Modulen sollte möglich sein, aber nicht erprobt

**Vorsicht: Dies gilt nicht bei Parallelschaltung !!!**

## Vorgehensweise:



<u>Simulation</u>	<u>Testdach</u>	<u>Pilotanlage</u>
Zeitschritt:	1 s	1 min
Dauer:	3 Tage	365 Tage

## PARAMETER

### Elektrisch

- PV-Modulwirkungsgrad bei STC
- Spannung im MPP-Punkt
- Strom im MPP-Punkt
- Leerlaufspannung
- Kurzschlussstrom
- Leistungstemperaturkoeffizient

} Datenblatt PV-Modul  
(EN 60904-1)

### Allgemein:

- Betriebsmodi
- Kollektorfläche
- Kollektorneigungswinkel
- Kollektorazimut

### Thermisch:

- Konversionsfaktor
- Windabhängigkeit des Konversionsfaktors
- Wärmeverlustkoeffizient des Kollektors
- Windabhängigkeit des Wärmeverlustkoeffizienten
- Effektive Wärmekapazität des Kollektors
- Absorptionsgrad
- Emissionsgrad
- Interner thermischer Leitwert (Absorber zu Fluid)
- Spezifische Wärmekapazität des Fluids
- Wärmeleitwert Glasscheibe

} Prüfnorm (EN 12975-2)

## INPUTS

- Abnahme PV-Leistung AN/AUS
  - Globalstrahlung in Kollektorebene
  - Direkte Strahlung in Kollektorebene
  - Einfallswinkel der Direktstrahlung
  - Sonnenzenitwinkel
  - Sonnenazimutwinkel
  - Umgebungslufttemperatur
  - Himmelstemperatur
  - Windgeschwindigkeit
  - Fluideintrittstemperatur
  - Fluidmassenstrom
  - Umgebungsluftdruck
  - Umgebungsluftfeuchte
  - Konvektiver Wärmeverlustkoeffizient
- } Nur bei Kondensation

## OUTPUTS

- Fluidmassenstrom
- Fluidaustrittstemperatur
- Nutzwärmestrom
- Mittlere Absorbtemperatur
- Oberflächentemperatur (Glasscheibe)
- Kondensativer Wärmegewinn
- Elektrische PV-Leistung

## Auswertegrößen (Testdach):

Relative Abweichung des absoluten Ertrags:

$$\Delta Q = \frac{\sum Q_{\text{sim}} - Q_{\text{mess}}}{\sum Q_{\text{mess}}} \quad \Delta E_{\text{el}} = \frac{\sum E_{\text{el,sim}} - E_{\text{el,mess}}}{\sum E_{\text{el,mess}}}$$

Relative quadratische Abweichung<sup>1</sup> absoluter Erträge pro Zeitschritt (Minute):

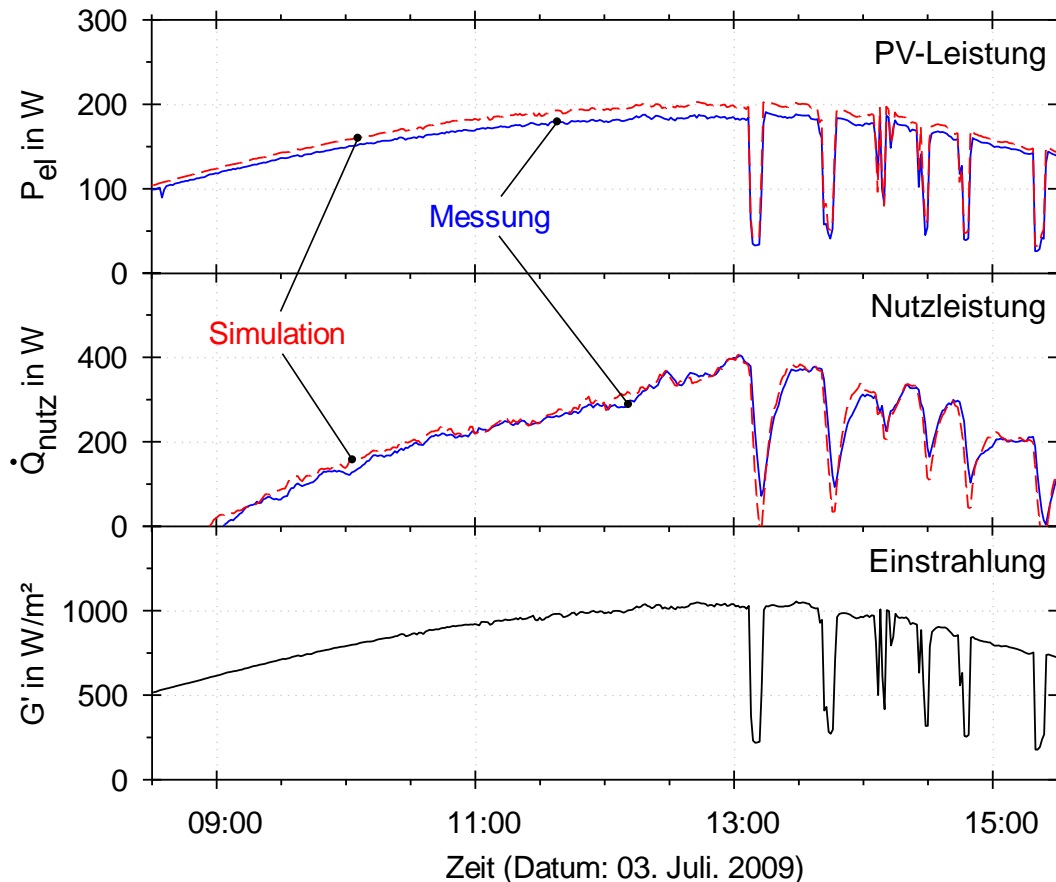
$$\bar{V} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \sqrt{\frac{(x_{\text{sim}} - x_{\text{mess}})^2}{\bar{x}_{\text{mess}}^2}}$$

$x$  Ertrag (Zeitschritt 1 Minute)

$\bar{x}$  Mittelwert Erträge über betrachteten Zeitraum  $N$  (= 21 h)

<sup>1</sup>Hilmer, F., et al., 1999. Numerical solution and validation of a dynamic model of solar collectors working with varying fluid flow rate. Solar Energy Vol. 65, No. 5.

## Messungen Testdach



	Messung	Simulation
Q	4,05 kWh	3,92 kWh
E <sub>el</sub>	2,69 kWh	2,96 kWh

$$\Delta Q = -3,1\% \text{ (Ertrag abs.)}$$

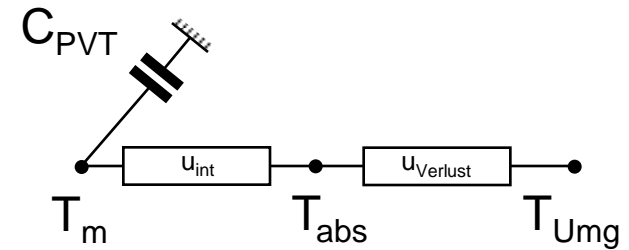
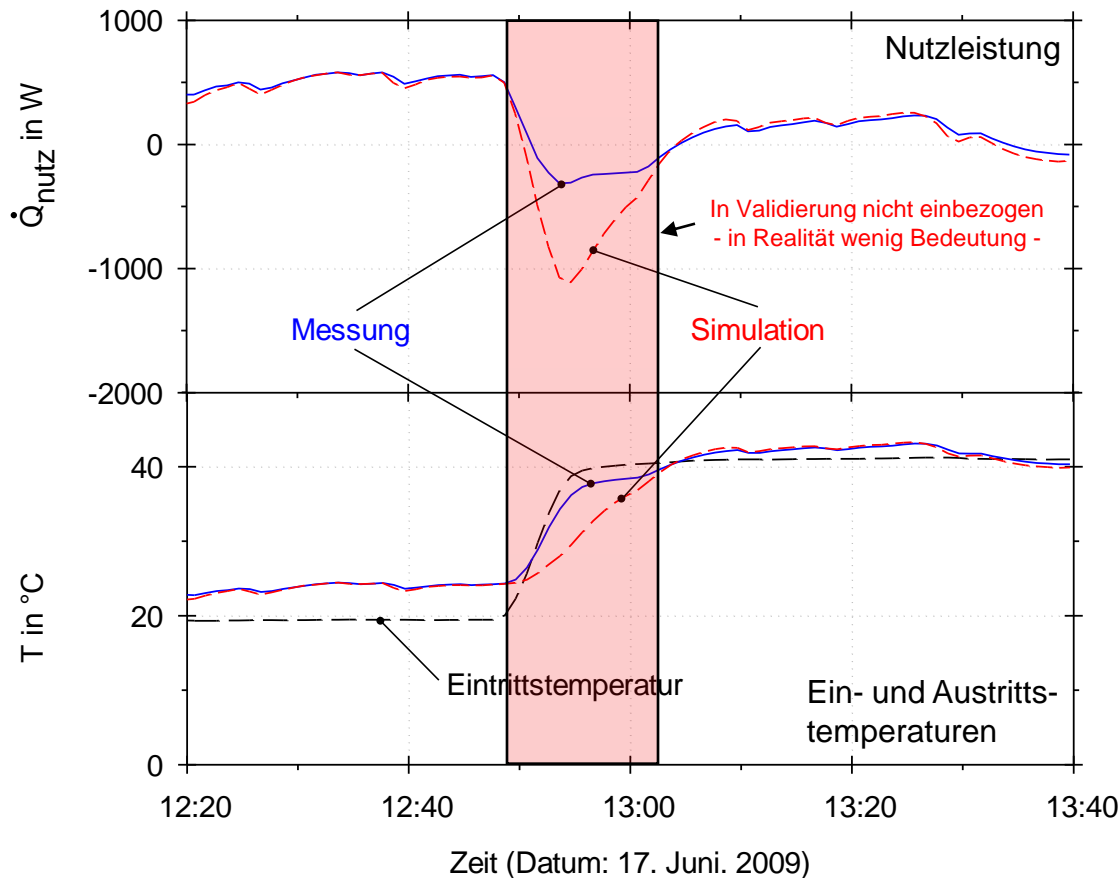
$$12,5\% \text{ (}\bar{V}\text{)}$$

$$\Delta E_{el} = 9,7\% \text{ (Ertrag abs.)}$$

$$9,9\% \text{ (}\bar{V}\text{)}$$

Kollektoranzahl: 1  
 Messtage: 3  
 Messzeitraum: 21 h  
 T<sub>in</sub> und  $\dot{m}$  konstant

## Problem Eintrittstemperatursprung



## Sprung Eintrittstemperatur:

- Modell: auf 1 Wärmekapazität reduziert, d.h. gesamter Kollektor muss erwärmt werden
- Realer Kollektor: Sprungantwort mit mehreren verteilten Kapazitäten

## Auswertegrößen (Pilotanlage):

Relative Abweichung des absoluten Jahresertrag:

$$\Delta Q = \frac{\sum Q_{\text{sim}} - Q_{\text{mess}}}{\sum Q_{\text{mess}}} \quad \Delta E_{\text{el}} = \frac{\sum E_{\text{el,sim}} - E_{\text{el,mess}}}{\sum E_{\text{el,mess}}}$$

Relative quadratische Abweichung<sup>1</sup> der absoluten Tageserträge:

$$\bar{V} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \sqrt{\frac{(x_{\text{sim}} - x_{\text{mess}})^2}{\bar{x}_{\text{mess}}^2}}$$

$x$  Tagesertrag

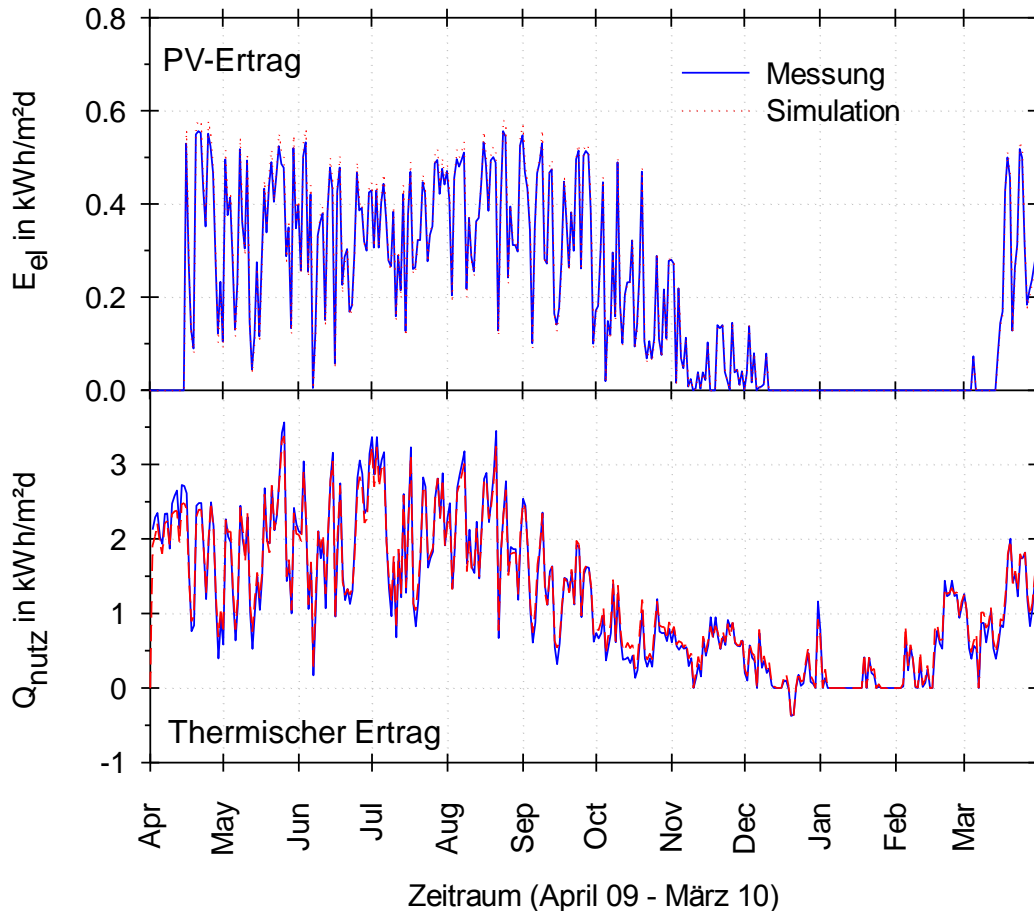
$\bar{x}$  Mittelwert Tageserträge über betrachteten Zeitraum  $N$  (= 365 Tage)

<sup>1</sup>Hilmer, F., et al., 1999. Numerical solution and validation of a dynamic model of solar collectors working with varying fluid flow rate. Solar Energy Vol. 65, No. 5.

# Validierung PVT-Modell



## Pilotanlage – Tageswerte über 1 Jahr



Messung Simulation

Q	kWh/m²	439,8	447,1
$E_{el,mit}$	kWh/m²	74,4	75,5
$E_{el,ohne}$	kWh/m²	74,3	75,0

$$\Delta Q = 1,7\% \text{ (Ertrag abs.)}$$

$$6,3\% \text{ (}\bar{V}\text{)}$$

$$\Delta E_{el} = 1,0\% \text{ (Ertrag abs.)}$$

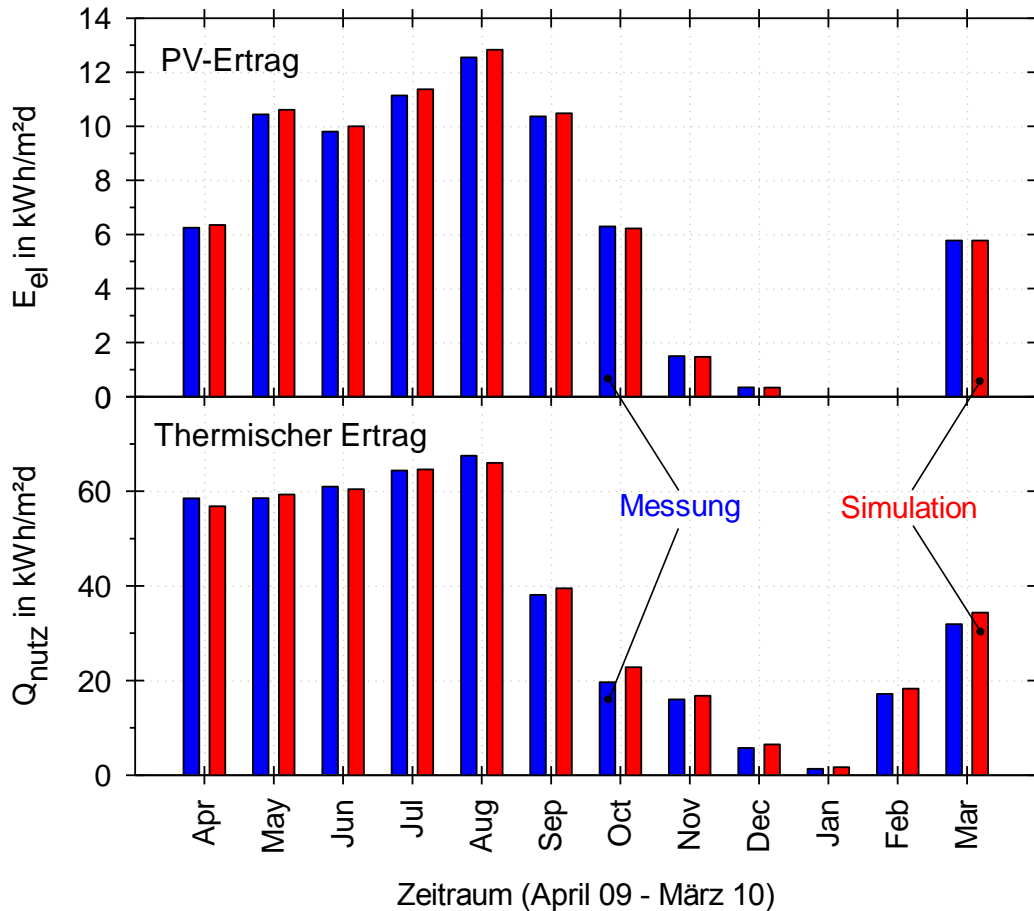
$$\text{(mit Dämmung) } 2,7\% \text{ (}\bar{V}\text{)}$$

$$\Delta E_{el} = 1,4\% \text{ (Ertrag abs.)}$$

$$\text{(ohne Dämmung) } 3,4\% \text{ (}\bar{V}\text{)}$$

Kollektorfläche: 2 x 19,7 m²  
 Zeitraum Q: 365 d  
 Zeitraum P: ohne Schatten &  
 > 10%  $P_{nenn, Wechselrichter}$

## Pilotanlage – Erträge monatlich über 1 Jahr



Monat	Q	$E_{el}$
Apr 09	-2.8%	1.7%
Mai 09	1.3%	1.6%
Jun 09	-0.9%	1.7%
Jul 09	0.4%	1.7%
Aug 09	-2.3%	1.9%
Sep 09	3.6%	0.9%
Okt 09	16.3%	-0.5%
Nov 09	4.9%	-1.0%
Dez 09	12.4%	-0.9%
Jan 10	24.5%	-
Feb 10	6.6%	-
Mrz 10	7.7%	-0.9%
<b>Gesamt</b>	<b>1.7%</b>	<b>1,2%</b>

## Entwickelter TRNSYS-Type:

### Betriebsmodi des Types

1. Unverglaster Kollektor
2. Unverglaster Kollektor mit Kondensationsberechnung
3. Unverglaster PVT-Kollektor
4. Unverglaster PVT-Kollektor mit Kondensationsberechnung

### Spezifikationen:

- PV-Modulkennlinie („Effektives Solarzellen-Kennlinien-Modell“)
- PV-Leistung als Input geregelt schaltbar (Betrieb MPP oder OC)
- Berechnung interner thermischer Leitwert aus thermischer Kennlinie
- Kondensationsberechnung
- Einstrahlwinkelkorrektur für Einstrahlung: thermisch und elektrisch
- Berücksichtigung der Kollektorkapazität
- Infrarotstrahlungsbilanz, Windeinfluss

## Verteilung

Die Verteilung des Types ist geplant über:

**janßen energieplanung**  
**Hohenzollernstraße 51**  
**D-30161 Hannover**

Gegen eine Aufwandspauschale (ähnlich den Type-Einzelpreisen von transsolar) ist der Type vorrausichtlich erhältlich ab

## Mai 2011

Bestandteile werden sein:

- TRNSYS-Type (dll, proforma)
- Quellcode
- Dokumentation

## Zusammenfassung:

	$\Delta Q$		$\Delta E_{el}$ gedämmt		$\Delta E_{el}$ ungedämmt	
	$\Delta \Sigma$ Sim-Mess	$\bar{V}$	$\Delta \Sigma$ Sim-Mess	$\bar{V}$	$\Delta \Sigma$ Sim-Mess	$\bar{V}$
Testdach	-3,1%	12,5%			9,7%	9,9%
Pilotanlage	1,7%	6,3%	1,0%	2,7%	1,4%	3,4%

### Warum ist Testdach ungenauer?

- kleinerer Zeitschritt → größere Abweichung (Minuten vs. Tage)  
(Werte Pilotanlage liegen zu 68% innerhalb 6,3% und zu 95%  $\pm$  12,6%)
- größerer Fehler MPP-Tracker (Modulwechselrichter)
- IAM Einfluss (Pilotanlage ohne Schatten, also erst ab Mittag)
- teilweise negative Wärmeströme auf Testdach
- Einzelmodul auf Testdach vs. Kollektorfeld in Pilotanlage  
(Unsicherheit Kennlinienbestimmung in Pilotanlage haben weniger Gewicht)

**Fazit: Erträge thermisch und elektrisch gut nachbildbar**  
**Momentanleistungen mit geringen Abweichungen**

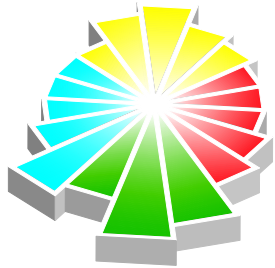
# Danksagung



## Das Verbundvorhaben

“Solare Gebäude-Wärmeversorgung mit unverglasten photovoltaisch-thermischen Kollektoren, Erdsonden und Wärmepumpen für 100% Deckungsanteil“ -Kurzname BiSolar-WP. Förderkennzeichen: 0325952

wird mit Mitteln des Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Die Projektpartner bedanken sich für die Unterstützung.



**SOLAR + HEAT PUMP**



Bundesministerium  
für Umwelt, Naturschutz  
und Reaktorsicherheit

## Verbundpartner



Gesellschaft zur Entwicklung  
und Förderung von  
Geothermen Anlagen mbH

**Institut für Solarenergieforschung Hameln**

