

---

# BELEGARBEIT

---

Herr B.Eng. (FH), MBA  
**Jan Kock**

## **Aufgabe Nr. 12**

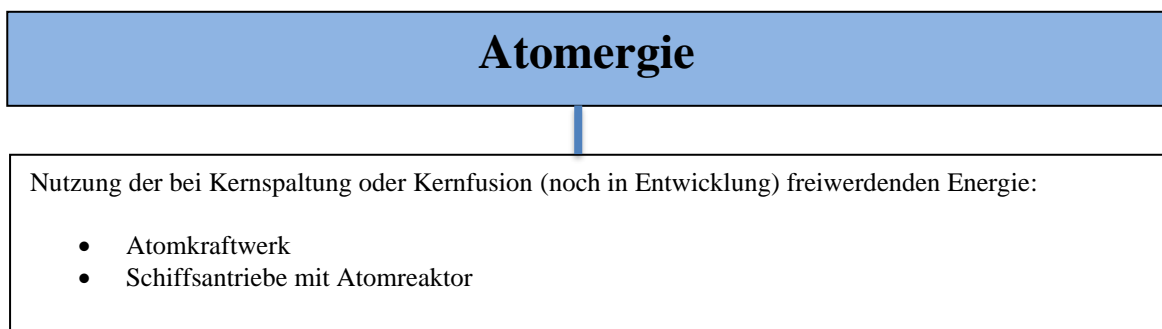
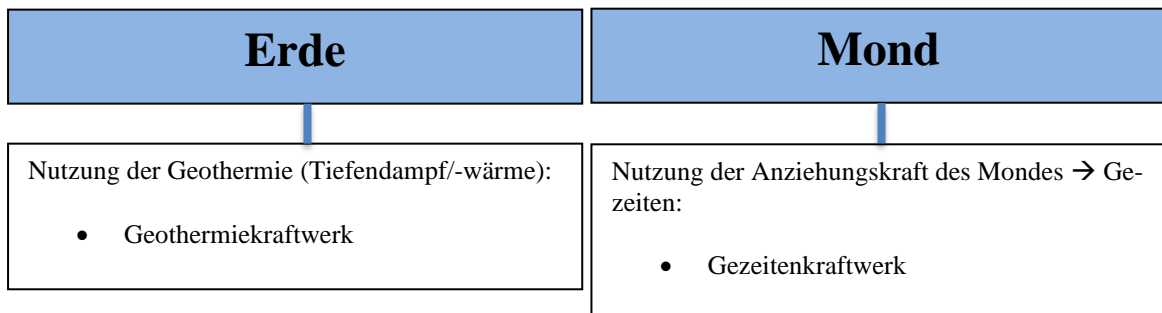
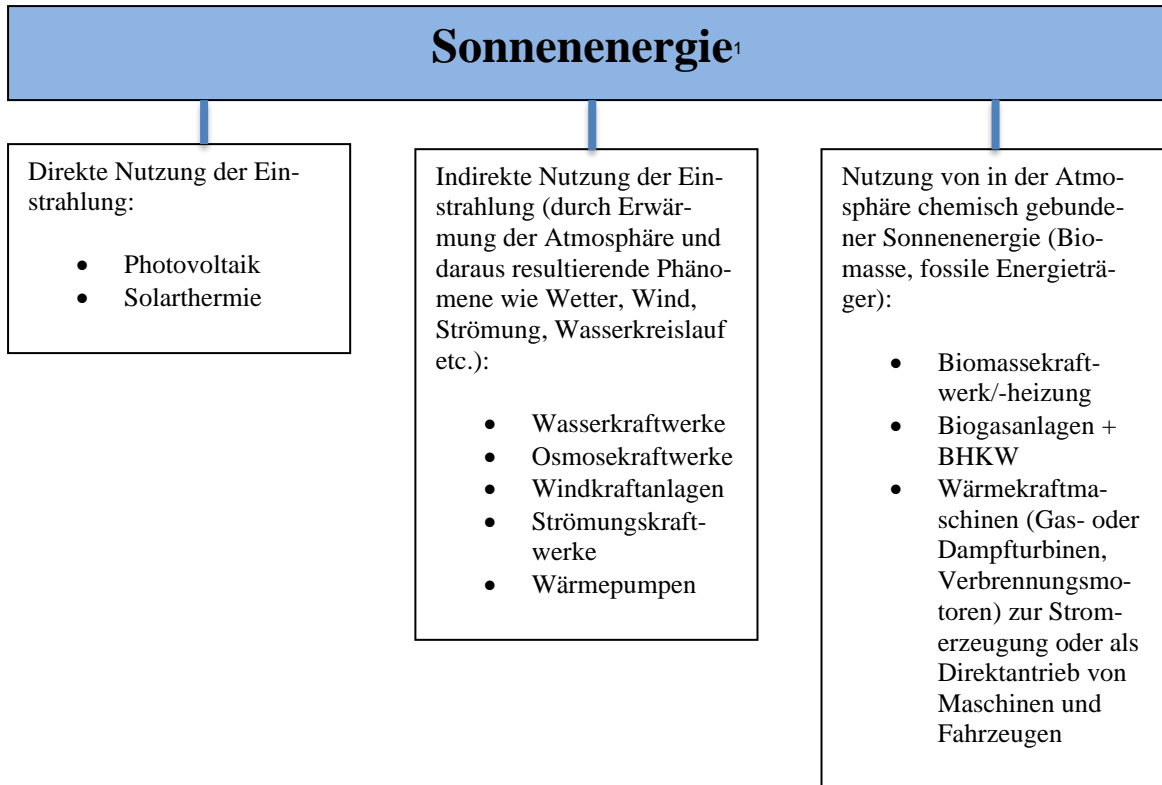
Mittweida, 13.06.2022  
IE21w1-D  
Energieerzeugungstechnologien

Mittweida

## Aufgabe 12

- a) Welche Umweltenergien lassen sich heute für die Gewinnung von Nutzenergie einsetzen? Welche Technologien sind damit verbunden?

Die Umweltenergien gliedern sich wie folgt<sup>1</sup>:



<sup>1</sup> Hartig, Ralf: *Regenerative Energien und neue Energiesysteme: Der Ausbau der erneuerbaren Energien als politische Zielstellung und technische Herausforderung*, Mittweida 2022, 13 ff.

- b) Was verstehen Sie unter Photovoltaik? Was unterscheidet diese von der Solarthermie?

Unter Photovoltaik versteht man ein Prinzip, bei dem die Sonneneinstrahlung in einem Siliziumhalbleiter direkt in elektrische Energie umgewandelt wird. Hierbei werden durch den Photoelektrischen Effekt Elektronen im Halbleitermaterial freigesetzt und es kommt zu einem Stromfluss<sup>2</sup>.

Demgegenüber wird bei der Solarthermie Sonneneinstrahlung absorbiert und hierbei in nutzbare Wärmeenergie umgewandelt, die in einem Medium (Wasser, Luft, Öl, Flüssigsalz) gespeichert und zu ihrem Bestimmungsort transportiert werden kann. Die gewonnene Wärme kann entweder direkt (z.B. zum Heizen, zur Warmwasseraufbereitung, als Prozesswärme etc.) oder in Solarthermiekraftwerken zur Stromerzeugung genutzt werden<sup>3</sup>.

---

<sup>2</sup> Hartig, Ralf: *Regenerative Energien und neue Energiesysteme: Regenerative Energiesysteme zur Stromerzeugung - Die Photovoltaik* -, Mittweida 2022, S. 2.

<sup>3</sup> Hartig, Ralf: *Regenerative Energien und neue Energiesysteme: Regenerative Energiesysteme zur Wärmeerzeugung - Die Solarthermie* -, Mittweida 2022, 2 ff.

- c) Skizzieren Sie die Strom- Spannungskennlinie einer PV- Zelle ( $I_k = 1\text{A}$ ,  $U_L = 0,6\text{V}$ ) und geben Sie die Einflussfaktoren auf den Verlauf der Kennlinie an.

Der Stromfluss einer PV-Zelle erhöht sich proportional durch eine erhöhte Einstrahlung und/oder eine größere Fläche der Zelle. Die Leerlaufspannung hingegen steigt bereits bei geringer Bestrahlung schlagartig auf ihren Maximalwert an. Durch zunehmende Erwärmung der Zelle sinkt die Spannung ab. Die Einflüsse auf die Spannung sind nicht linear-proportional<sup>4 5</sup>.

**I/U-Kennlinie:**

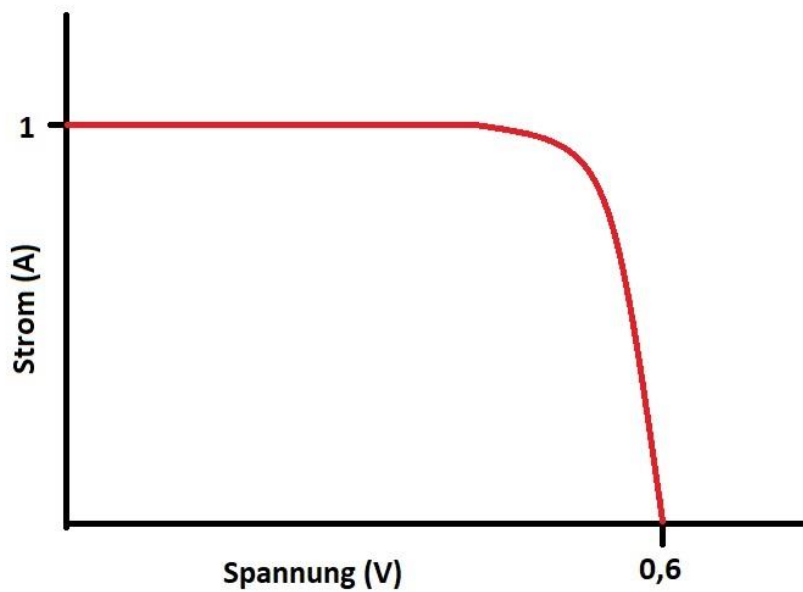


Abbildung 1 I/U-Kennlinie einer PV-Zelle

<sup>4</sup> Hartig, Regenerative Energien und neue Energiesysteme (s. Anm. 2), 12 ff.

<sup>5</sup> Photovoltaik.org, „Kennlinie“, <https://www.photovoltaik.org/wissen/kennlinie> (Zugriff: 12. Juni 2022).

- d) Skizzieren Sie die Leistungskennlinie einer PV- Zelle und tragen Sie den MPP ein (Qualitativ). Was bedeutet dieser?

Der MPP (Maximum Power Point) ist der Arbeitspunkt auf der Kennlinie, an dem eine PV-Zelle ihre maximale Leistung abgibt <sup>6</sup>.

**Leistungskennlinie mit MPP:**

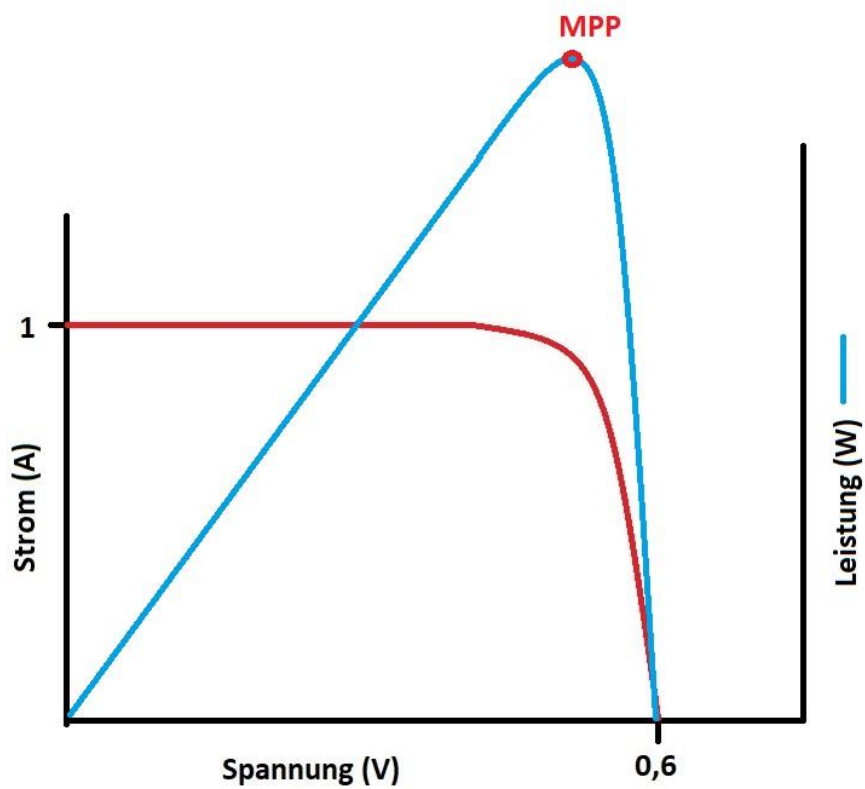


Abbildung 2: Leistungskennlinie einer PV-Zelle

<sup>6</sup> ebd.

e) Welcher technische Zusammenhang wird durch den Füllfaktor beschrieben?


Der Füllfaktor ist der Quotient aus maximaler Leistung ( $P_{MPP}$ ) und dem Produkt aus Kurzschlussstrom ( $I_K$ ) und Leerlaufspannung ( $U_L$ ). Je höher der Füllfaktor, desto höher der Wirkungsgrad einer Zelle <sup>7</sup>.


$$Füllfaktor = \frac{P_{MPP}}{I_K * U_L}$$


---

<sup>7</sup> ebd.

- f) Geben Sie das vereinfachte Ersatzschaltbild einer PV- Zelle an und erläutern Sie die physikalische Funktion der Ersatzelemente.

 → Stromquelle

 → Diode = interner Verlust

 → Widerstand = Verbraucher

Das vereinfachte Schaltbild zeigt eine ideale Solarzelle <sup>8 9 10</sup>.

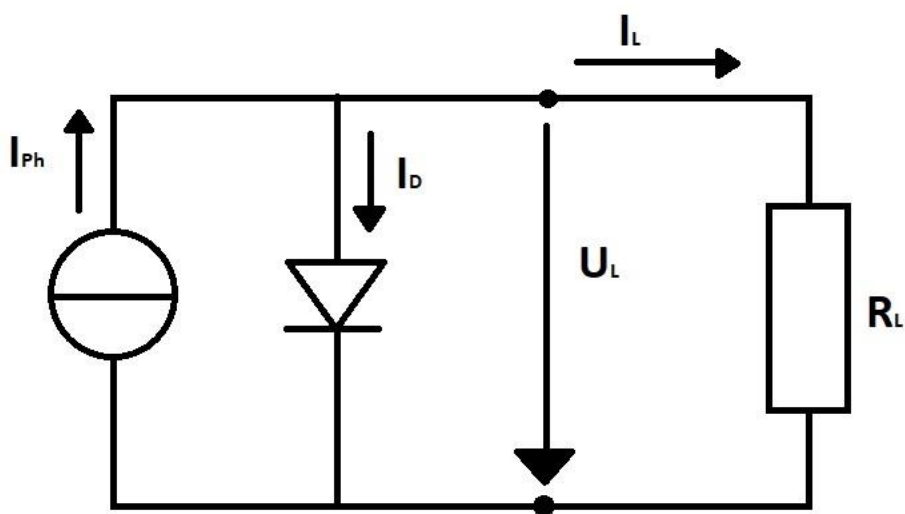


Abbildung 3: Ersatzschaltbild ideale PV-Zelle

<sup>8</sup> Wesselak, Viktor und Voswinckel, Sebastian: *Photovoltaik - Wie Sonne zu Strom wird*, 2. Auflage, Berlin, Heidelberg 2016, 38 ff.

<sup>9</sup> Wagner, Andreas: *Photovoltaik Engineering: Handbuch für Planung, Entwicklung und Anwendung*, 5. Auflage, Berlin 2019, 48 ff.

<sup>10</sup> Hartig, *Regenerative Energien und neue Energiesysteme* (s. Anm. 2), S. 11.

- g) Entwickeln Sie aus dem vereinfachten Ersatzschaltbild die Strom-Spannungskennlinie sowie die Leistungskennlinie.

Die Zelle verhält sich zunächst wie eine ideale Stromquelle, die Spannung steigt bei konstantem Strom kontinuierlich an (Bereich I in Abbildung 4). Nähert sich die Spannung der Leerlaufspannung, so wird die Durchlassspannung der Diode überschritten und es beginnt Strom über die Diode zu fließen (Bereich II). Bei Erreichen der Leerlaufspannung fließt schließlich der Strom vollständig über die Diode (Bereich III)<sup>11 12</sup>.

Die elektrische Leistung ergibt sich als Produkt aus Strom (I) und Spannung (U). Daher steigt die Leistung in Bereich I linear an, in Bereich II steigt sie weiter bis zum Maximum MPP und fällt aufgrund des auf 0 sinkenden Stroms schließlich ebenfalls auf 0 ab.

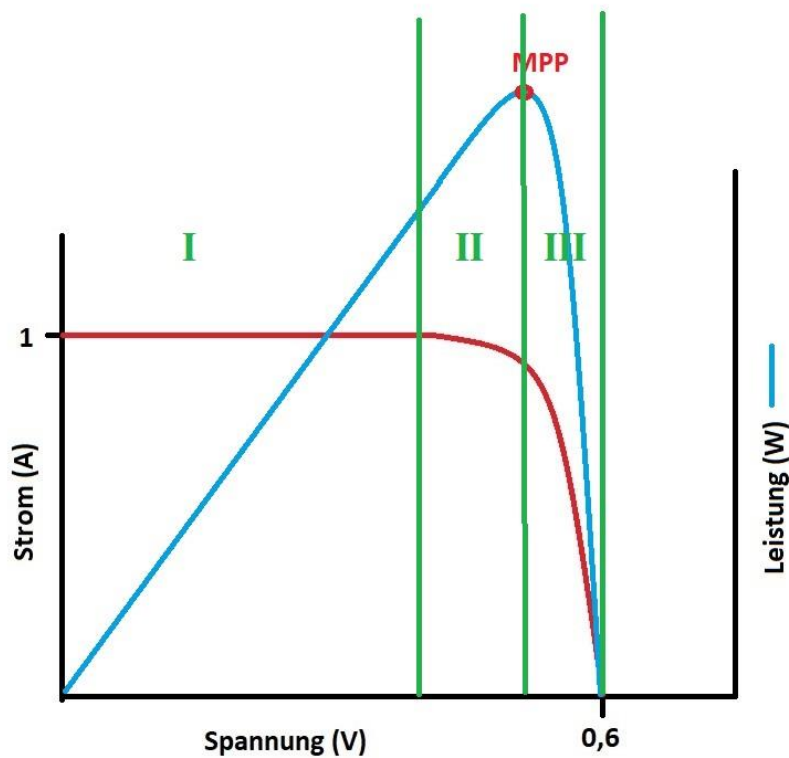


Abbildung 4: U/I- und Leistungskennlinie einer PV-Zelle

<sup>11</sup> Wesselak/Voswinkel, Photovoltaik - Wie Sonne zu Strom wird (s. Anm. 8), 38 ff.

<sup>12</sup> Wagner, Photovoltaik Engineering (s. Anm. 9), 48 ff.

- h) Welche zusätzlichen Ersatzelemente sind zu dem vereinfachten Ersatzschaltbild hinzuzufügen, um eine genauere Beschreibung der realen Vorgänge zu erreichen?

Das Ersatzschaltbild lässt sich durch zusätzliche Widerstände und eine zweite, parallelgeschaltete Diode dem Verhalten der realen Solarzelle weiter annähern. Die beiden Dioden verfügen dabei um ein unterschiedliches Durchlassverhalten. Der Widerstand  $R_P$  berücksichtigt Oberflächen-Rekombinationsprozesse (Erzeugung oder Vernichtung eines Elektronenlochpaares<sup>13</sup>), die zu Verlusten führen. Der Widerstand  $R_S$  berücksichtigt sonstige Verluste aufgrund schlechter Leitfähigkeit etc.<sup>14</sup>. Somit ergibt sich z.B. das Zwei-Dioden-Modell (siehe Abbildung 5).

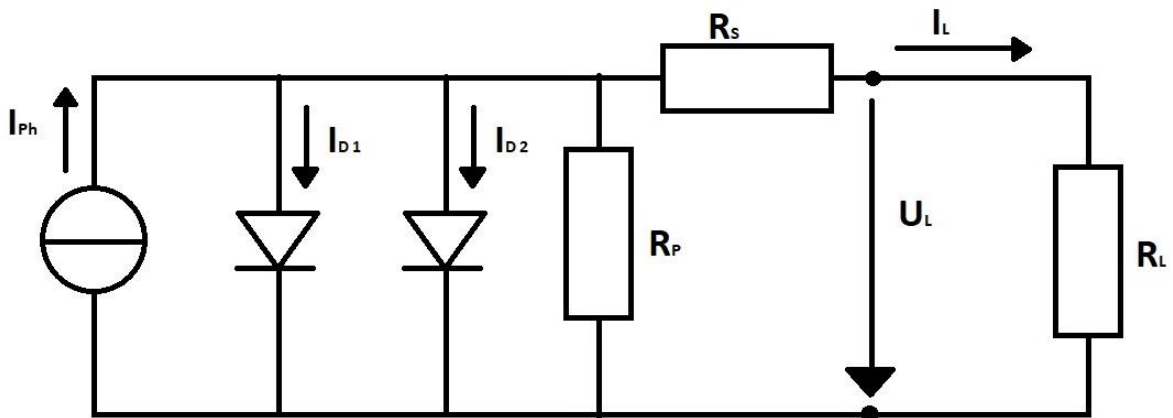


Abbildung 5: Ersatzschaltbild Zwei-Dioden-Modell

<sup>13</sup> Leendertz, Caspar: *Effizienzlimitierende Rekombinationsprozesse in amorph/kristallinen und polykristallinen Siliziumsolarzellen* 2012, S. 15.

<sup>14</sup> Wagner, *Photovoltaik Engineering* (s. Anm. 9), 49 ff.

i) Für eine Werkhalle soll eine solare Luft-Heizung aufgebaut werden. Es werden die angegebenen Hybrid- Kollektoren verwendet. (\*STC-Bedingungen: 1000W/m<sup>2</sup> 25°C; AM 1,5, \*\*Bei Solarstrahlung: 1000W/m<sup>2</sup>; Volumenstrom pro m<sup>2</sup>, Kollektorfläche: 50m<sup>3</sup>/h)

<b>Maße</b>	<b>L x B x H</b>	1732 x 1000 x 175 mm
Fläche eines Kollektors		1,73 m <sup>2</sup>
Reihenlänge		10 – 40 m (6 - 23 Kollektoren)
<b>Elektrische Leistung*</b>	<b>P<sub>Mpp</sub></b>	<b>230 Wp</b>
Elektrischer Normwirkungsgrad*	$\eta_{el}$	13%
Spannung*	U <sub>oc</sub> / U <sub>Mpp</sub>	36,5 / 29,0 V
Strom*	I <sub>sc</sub> / I <sub>Mpp</sub>	8,71 / 7,94 A
<b>Thermische Leistung**</b>	<b>P<sub>th</sub></b>	<b>690 Wp</b>
Thermischer Normwirkungsgrad**	$\eta_{th}$	40%
Temperaturerhöhung **	$\Delta T$	20K
Volumenstrom pro m <sup>2</sup>		40-100 m <sup>3</sup> /h
Volumenstrom pro Reihe		800-2000 m <sup>3</sup> /h
Stillstandstemperatur	T <sub>max</sub>	100°C

j) Beschreiben Sie den Aufbau und die Wirkungsweise eines Luftkollektors. Welche Vor- und Nachteile ergeben sich in Bezug zu wassergeführten Anlagensystemen?

Ein Luftkollektor ist üblicherweise als Flachkollektor ausgeführt und besteht meist aus einem Aluminiumgehäuse. In diesem ist zunächst eine Wärmedämmung aufgebracht, darauf befinden sich die luftdurchströmten Fluidkanäle, durch die ein Ventilator angesaugte Außenluft bläst. Auf den Fluidkanälen befindet sich eine transparente Abdeckung, durch die das Sonnenlicht auf die Fluidkanäle fällt und diese aufwärmt. Der Ventilator wird meist über in die Abdeckung integrierte Solarzellen gespeist, so dass keine externe Stromversorgung erforderlich ist und die Anlage quasi autark und netzunabhängig arbeiten kann. Die in den Kanälen erwärmte Luft kann entweder direkt in den Wohnraum oder bei Nutzung als Prozesswärme in die Anlage geblasen (offenes System) oder über einen Wärmetauscher auf ein anderes Medium (z.B. Wasser) übertragen werden (geschlossenes System) <sup>15</sup>.

Vorteile liegen u.a. darin, dass Luft als Medium unproblematischer ist als Wasser (kein Einfrieren, Verdampfen, begünstigt keine Korrosion, Leckagen unkritisch), dadurch sind die Anlagen entsprechend langlebig, kostengünstiger in der Anschaffung und verfügen zudem über gute Wirkungsgrade. Über Hybridsysteme können gleichzeitig Strom und warme Luft erzeugt werden. Nachteilig gegenüber wassergeführten Systemen sind die größeren Flächen aufgrund der ungünstigeren Wärmeleitfähigkeit und -kapazität von Luft im Vergleich zu Wasser, zudem lässt sich erwärmtes Wasser unproblematischer über längere Strecken transportieren, bei Luftkollektoren sind hingegen die Leitungslängen begrenzt bzw. große Längen nur aufwendig zu realisieren <sup>16</sup>.

<sup>15</sup> Schabbach, Thomas und Leibbrandt, Pascal: *Solarthermie: Wie Sonne zu Wärme wird*, 2. Auflage, Berlin, Heidelberg 2021, 37 ff.

<sup>16</sup> Sophia Papalamprou, „Mit dem Luftkollektor umweltfreundlich heizen“, <https://www.aroundhome.de/solaranlage/solarthermie/luftkollektor/> (Zugriff: 12. Juni 2022).

k) Weisen Sie den angegebenen elektrischen Wirkungsgrad nach.

Wirkungsgrad = abgegebene Nutzleistung / aufgenommene Leistung

Nutzleistung = elektrische Leistung:  $P_{el} = U \cdot I = 29,0 \text{ V} \cdot 7,94 \text{ A} = 230,26 \text{ W}$

Aufgenommene Leistung = Sonneneinstrahlung:  $1000 \text{ W/m}^2 \cdot 1,73 \text{ m}^2 = 1730 \text{ W}$

Wirkungsgrad:  $\eta_{el} = \frac{230,26 \text{ W}}{1730 \text{ W}} = 0,133 = 13,3 \%$

- l) Es sollen zwei Varianten betrachtet werden. Zusammenschaltung von 6 bzw. 23 Kollektoren in Reihe.  
Bestimmen Sie jeweils die el.- bzw. thermische Leistung.

Elektrisch:

230 W je Kollektor →

6 Kollektoren:  $6 * 230 \text{ W} = 1380 \text{ W}$

23 Kollektoren:  $23 * 230 \text{ W} = 5290 \text{ W}$

Thermisch:

690 W je Kollektor →

6 Kollektoren:  $6 * 690 \text{ W} = 4140 \text{ W}$

23 Kollektoren:  $23 * 690 \text{ W} = 15870 \text{ W}$

m) Neben den Luftkollektoren sind noch andere Kollektortypen an Markt verfügbar. Welche sind das und welches Funktionsprinzip liegt diesen jeweils zu Grunde?

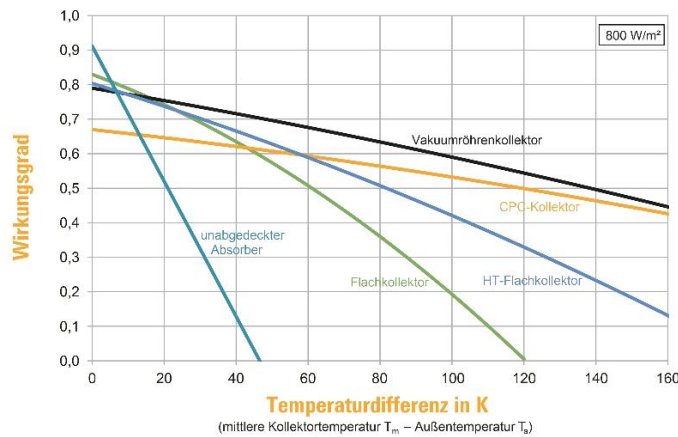
Es gibt u.a. folgende Kollektortypen<sup>17</sup>:

- Unabgedeckte Kollektoren: offenliegende dunkle Rohre ohne Isolierung, geeignet für Anwendungen, in denen nur geringe Temperaturerhöhungen und keine kompakten Abmessungen erforderlich sind z.B. zur Beheizung von Schwimmbädern
- Wasserdurchströmte, abgedeckte Flachkollektoren: Aufbau ähnlich wie Luftkollektor, aber mit Rohrregister oder serpentinenförmigem Rohr
- Vakuumröhrenkollektoren: eine flüssigkeitsgefüllte Röhre verläuft durch ein Glasrohr, zwischen beiden herrscht Vakuum, das innere Rohr erwärmt sich, durch die Isolationswirkung des Vakuums sind hohe Temperaturen im Inneren bei gleichzeitig niedriger Außentemperatur der Rohre möglich, so kommt zu weniger Verlusten, insbesondere bei niedrigen Außentemperaturen, verfügbar mit nasser Anbindung (Vakuumröhren werden direkt vom zu erwärmenden Wasser durchströmt) oder trockener Anbindung (Wasser wird im nach oben und unten geschlossenen Rohr verdampft, steigt nach oben, Wärme geht in einen Sammelbehälter über, Dampf kondensiert und sinkt wieder nach unten, der Sammelbehälter wird vom zu erhitzenden Wasser durchströmt)
- Konzentrierende Kollektoren: Parabolrinnenspiegel o.ä., die mit Sonnenlicht angestrahlt werden und es gebündelt auf einen Absorber (z.B. Vakuumröhrenkollektor) reflektieren, geeignet für Hochtemperaturanwendungen (z.B. Solarthermiekraftwerke)

---

<sup>17</sup> Hartig, Regenerative Energien und neue Energiesysteme (s. Anm. 3), 7 ff.

- n) In der Abb. sind die Wirkungsgradkennlinien verschiedener Kollektoren angegeben. Was besagen diese? Welche Sachverhalte beschreiben diese?



Die abgebildeten Wirkungsgradkennlinien beschreiben den Wirkungsgrad, also das Verhältnis von absorbierte Wärmeenergie zu eingestrahelter Strahlungsenergie in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz zwischen Kollektor und Umgebung. Da eine große Temperaturdifferenz zwischen Kollektor und Umgebung dazu führt, dass die über den Kollektor aufgenommene Sonnenenergie an die Umgebung abgegeben wird, sinkt der Wirkungsgrad mit zunehmender Temperaturdifferenz. Da mit zunehmender Temperaturdifferenz die Wärmeabstrahlung des Kollektors neben der Konvektion an Bedeutung gewinnt, verläuft die Kennlinie nicht geradlinig.

Da ungedeckte Absorber über keinerlei Isolierung verfügen, sinkt ihr Wirkungsgrad erwartungsgemäß am schnellsten. Vakuumröhrenkollektoren als anderes Extrem hingegen sind durch das Vakuum zwischen der inneren und äußeren Röhre sehr gut isoliert, folglich reduziert sich der Wirkungsgrad auch bei großen Temperaturdifferenzen nur geringfügig <sup>18</sup>.

<sup>18</sup> ebd., S. 21.

- o) Wie ändert sich der Wirkungsgrad eines Flachkollektors bzw. Vakuumkollektors in Abhängigkeit der Einstrahlung?

Der Wirkungsgrad ist zunächst einmal von der Transmission der Deckscheibe bzw. Außenröhre, dann von der Absorption des eigentlichen Absorbers und schließlich von der Emission, also der vom Absorber wieder an die Umgebung abgegebene Wärme abhängig. Während Transmission und Absorption material- und bauartspezifische Konstanten sind, ist die Emission maßgeblich vom Temperaturunterschied zwischen Kollektor und Umgebung abhängig (siehe Aufgabe m). Die Transmission kann allerdings in Abhängigkeit der Wellenlänge des einfallenden Lichtes variieren. Kommt es zur Erwärmung des Kollektors, so sinkt der Wirkungsgrad des Flachkollektors aufgrund der schlechteren Isolierung stärker und fällt dementsprechend unter den des Vakuumkollektors.

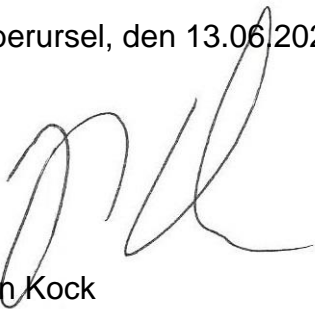
# Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Oberursel, den 13.06.2022

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized, cursive letters that appear to be 'JK'.

Jan Kock