

# Erste Ergebnisse des Monitorings der solaren Kühlung in Rottweil

**Prof. Dipl.-Ing. Elmar Bollin**

Fakultät Maschinenbau und Verfahrenstechnik (M+V),  
Leiter der Forschungsgruppe net – Nachhaltige Energietechnik an der Hochschule Offenburg

Badstraße 24, 77652 Offenburg

Tel.: 0781 205-126

E-Mail: bollin@hs-offenburg.de

**1954:** Geboren in Lörrach

Studium Maschinenbau an der Technischen Hochschule Karlsruhe

**1981:** Abschlussdiplom

**1982–92:** Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme Freiburg

**Seit 1993:** Professur an der Hochschule Offenburg

**Seit 2000:** Mitglied des Instituts für Angewandte Forschung (IAF) der Hochschule Offenburg



**Lehrgebiete:** Solartechnik, Regelungstechnik, Gebäudeautomation

**Forschungsgebiete:** Solarthermische Großanlagen, Photovoltaische Inselversorgung, Energiemanagement in Gebäuden

## 3.1 Erste Ergebnisse des Monitorings der solaren Kühlung in Rottweil

Prof. Dipl.-Ing. Elmar Bollin

Dipl.-Ing. (FH) Klaus Huber

### Abstract

In April 2011 the Deutsche Telekom at Rottweil decided to use a solar thermal system for building air conditioning. The solar thermal system is one of three heat source, which feeds into the existing heating network. The collector array with a gross collector surface of 503 m<sup>2</sup> (Abbildung 3.1-1) was installed on the flat roof of a workshop building, whereby the solar buffer storage was set up besides this building outdoor. The project aims to save a part of the fossil fuel, necessary for the air conditioning and space heating and hence to reduce CO<sub>2</sub>-emissions and operating costs. The cooling energy is used to condition office space, call centers and server rooms.

### Einleitung

Am Standort Rottweil der Deutschen Telekom wurde im April 2011 eine Solaranlage zur Unterstützung der Gebäudeklimatisierung in Betrieb genommen. Die Solaranlage ist die dritte Wärmequelle, die in das bestehende Heizungsnetz einspeist. Die schon vorhandenen Absorptionskältemaschinen wurden zuvor mit Gaskesseln und der Abwärme eines Blockheizkraftwerks (BHKW) betrieben. Das Kollektorfeld mit einer Brutto-Kollektorfläche von 503 m<sup>2</sup> (Abbildung 3.1-2) wurde auf dem Flachdach eines Werkstattgebäudes installiert, wobei der Solarspeicher neben diesem Gebäude im Freien aufgestellt wurde. Der Wärmeübertrager zwischen Kollektoren und Solarspeicher wurde zusammen mit den Pumpen und sonstigen Ar-



**Abb. 3.1-1:** Kollektorfeld der solaren Klimatisierungsanlage Rottweil

maturen im Keller des Gebäudes untergebracht. Durch den Einsatz der Solaranlage wird ein Teil des für die Klimatisierung und Raumheizung erforderlichen Brennstoffs eingespart, ein Beitrag zum Klimaschutz geleistet und eine Verbrauchskostenreduzierung erreicht.

Mit der erzeugten Kälte werden die Technik- und Serverräume sowie ein Call-Center der Deutschen Telekom gekühlt.

Die Solarwärme wird über einen Heizungsverteiler an die Verbraucher abgegeben. An diesem sind neben den Kältemaschinen auch andere Wärmeverbraucher wie die Gebäudeheizung angeschlossen. Dadurch kann die Solarwärme wahlweise zu Heiz- oder Kühlzwecken genutzt werden. Zur Nutzungsgradsteigerung der Kollektoren soll außerhalb der Kühlphasen die Systemtemperatur abgesenkt werden. Durch die genannten Maßnahmen kann ein

deutlich höherer Ertrag als bei alleiniger Nutzung durch die Adsorptionskältemaschinen erzielt werden.

### Anlagenbeschreibung

Die installierte Solaranlage verfügt über 124 Vakuumröhrenkollektoren mit einer Gesamt-Bruttokollektorfläche von 503 m<sup>2</sup>. 62 Kollektoren haben eine Aperturfläche von 2,034 m<sup>2</sup> (S-POWER DF 20/2000 TPS insideS) und 62 eine Aperturfläche von 3,051 m<sup>2</sup> (S-POWER DF 30/3000 TPS insideS). Insgesamt ergibt sich eine Aperturfläche von 315 m<sup>2</sup>. Die Kollektoren sind auf dem Flachdach eines Werkstattgebäudes montiert. Sie sind gegenüber der Horizontalen um 20° geneigt und weichen in ihrer Ausrichtung um 54° nach Osten von der Südrichtung ab. Die relativ flache Neigung der Kollektoren wurde gewählt, um die zweite Kollektorreihe nicht durch die erste zu verschatten. Die flache Neigung macht sich auch wegen der deutlichen Abweichung von der Südrichtung posi-

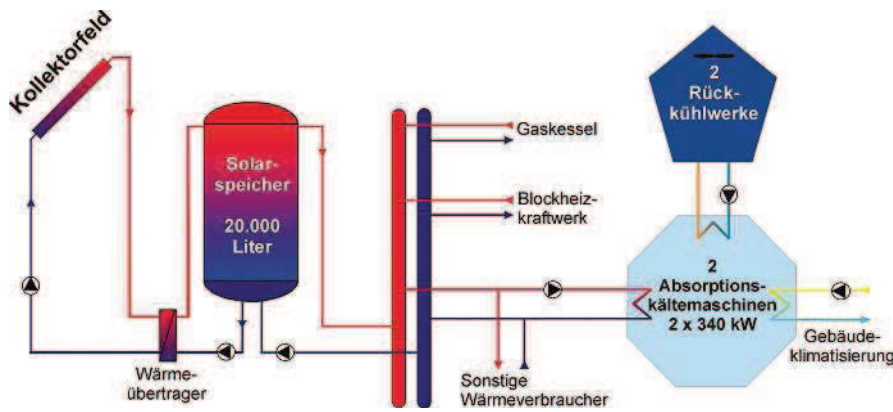


Abb. 3.1-2: Kollektorfeld der solaren Klimatisierungsanlage Rottweil

tiv bemerkbar, da dadurch auch im späteren Tagesverlauf, wenn die Sonne mit einem sehr ungünstigen Winkel zur Solaranlage steht, noch Erträge realisiert werden können. Jeweils ein DF 20/2000- und ein DF 30/3000-Kollektor sind zu einem Kollektor zusammengefasst.

Damit besteht ein Kollektor aus 50 Vakuumröhren die parallel geschaltet sind. Die dadurch entstehenden 62 Kollektoren sind alle parallel miteinander verschaltet und nach Tichelmann verrohrt. Die Kollektoren sind in zwei gleich große Teilfelder unterteilt, die hintereinander aufgestellt sind. Das durch die eingestrahlte Sonnenenergie in den Kollektoren erwärmte Glykol-Wasser-Gemisch wird durch einen Wärmeübertrager zur Erwärmung des Speicher-

ladekreises im Keller des Gebäudes gepumpt. Der Speicher hat ein Volumen von 20.000 Litern und ist im Freien neben dem Gebäude aufgestellt.

Aus den Speichern wird die solare Wärme im Sommer über einen Heizungsverteiler zu den Kältemaschinen gepumpt. Im Winter wird die Wärme über denselben Verteiler in das Heizungsnetz des Gebäudes eingespeist. Die beiden einstufigen Absorptions-Kältemaschinen vom Typ York International/Mitsubishi Typ ES-IA 2 MW werden mit Stoffpaar Wasser-Lithiumbromid betrieben und weisen jeweils 340 kW Kälteleistung im Nennbetrieb (Heiztemperatur 99 °C, Rückkühltemperatur 27 °C) auf. Die Kältemaschinen wurden bereits vor Inbetriebnahme der Solaranlage mit der Ab-

wärme eines Blockheizkraftwerks (BHKW) und Wärme von zwei Gaskesseln betrieben. Mit der erzeugten Kälte werden Büroräume, Call-Center und Serverräume auf dem Betriebsgelände gekühlt. Seit Inbetriebnahme der Solaranlage liefern die Kollektoren als dritte Wärmequelle einen Teil der Antriebswärme für die Absorptionskälteanlage. Hierdurch wird der Primärenergie-Einsatz reduziert und die Energiekosten gesenkt.

Eine Besonderheit dieses Systems ist der Notkühler, der in den Kollektorkreis integriert ist. Bei drohender Stagnation wegen zu geringer Wärmeabnahme wird die Solarwärme über den Notkühler abgeführt und damit eine hohe thermische Belastung des Kollektorfluids weitgehend vermieden.

Eine weitere Besonderheit der Anlage ist der thermische Frostschutz. Bei Frostgefahr pumpt die Anlage zeitweise warmes Wasser aus dem Pufferspeicher durch die Rohrleitungen im Freien, um diese vor dem Einfrieren zu bewahren. Die Leitungen im Kollektorkreis sind hiervon allerdings explizit ausgenommen, da dort der Frostschutz chemisch durch ein Glykol-Wasser-Gemisch garantiert wird.

Für diese Solaranlage liegen Messdaten seit Juni 2011 vor, die in Tabelle 2 und Abbildung 3.1-3 als Monatswerte zusammengefasst dargestellt sind. Es konnten im Maximum im August bis zu 23 MWh (74 kWh/m<sup>2</sup> Aperturfläche) an solarer Wärme in die Speicher eingespeist werden was einem Nutzungsgrad von 38 % entspricht. Das bedeutet 38 % der solaren Strahlungsmenge konnten im August als Wärme dem Speicher zugeführt werden. Von der eingespeisten Wärme konnten wiederum 20 MWh (63 kWh/m<sup>2</sup>) dem Speicher entnommen und ins Heizungsnetz eingespeist werden. Die Differenz ging als Wärmeverluste an die Umgebung verloren. Speziell im November und Dezember sind diese Wärmeverluste besonders auffällig, da in diesen Monaten naturrelevant nur wenig Wärme in die Speicher eingespeist werden konnte, sind die Verluste auf bis zu 100 % angestiegen. Ein weiterer Faktor ist, dass auch Wärme für die Frostschutzfunktion zur Vermeidung des Einfrierens der Verbindungsrohre benötigt wurde, die ebenfalls den Speichern entnommen wurde. Nur in Extremfällen,

#### Solaranlage:

Kollektorbauart	Vakuumröhrenkollektor
Kollektortyp	(S-POWER DF x0/x000 TPS insideS)
Fläche brutto / Apertur	503 m <sup>2</sup> / 315 m <sup>2</sup>
Ausricht. und Neig.	-54° / 20°
Speicher	20.000 l
Wärmeübertrager	Ein Plattenwärmeübertrager
Wärmenutzung	Kälteerzeugung, Heizung, WW-Bereitung
Zusatzheizung	1 x BHKW (315 kW <sub>therm</sub> ), 2 x Gaskessel (je 1 MW)

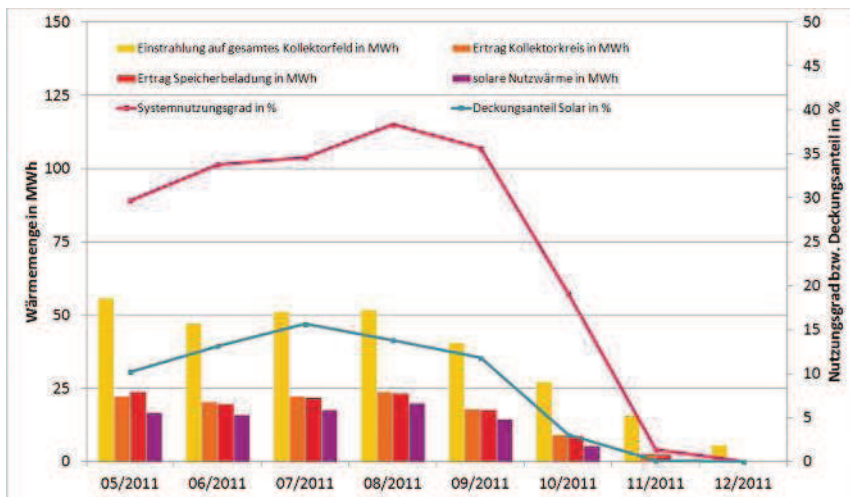
#### Kältemaschinen:

Bauart	Absorptionskältemaschinen
Hersteller	York International/Mitsubishi Typ
Typ	ES-IA 2 MW mit je 340 kW
Leistung	2 x 340 kW

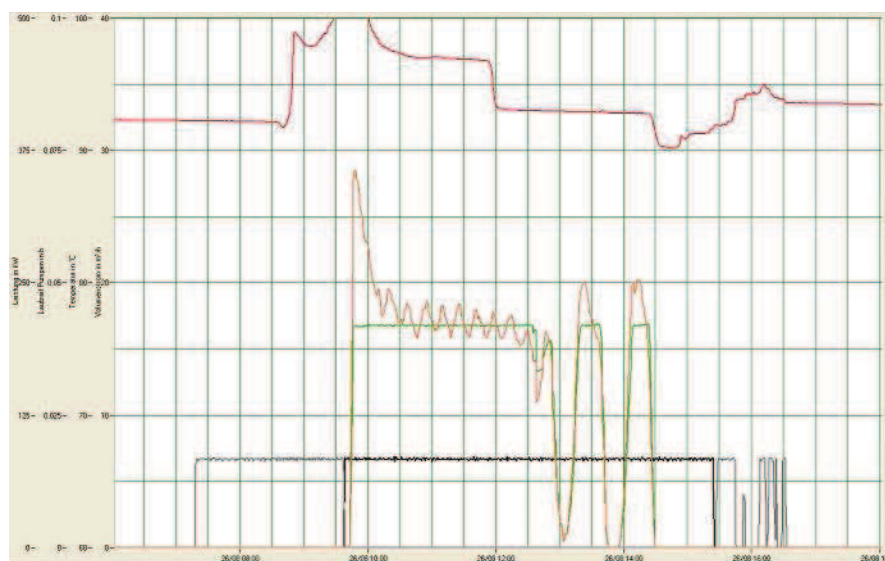
Tabelle 1: Kenndaten der solaren Klimatisierungsanlage Rottweil

	06/2011	07/2011	08/2011	09/2011	10/2011	11/2011	12/2011
<b>Einstrahlung auf gesamtes Kollektorfeld in MWh</b>	47	51	52	41	27	16	5,5
<b>Ertrag Speicherbeladung in MWh</b>	20	22	23	18	8,7	2,5	0,29
<b>Kollektornutzungsgrad in %</b>	42	43	45	43	32	16	5,3
<b>solare Nutzwärme in MWh</b>	16	18	20	14	5	0,21	0
<b>spezifische solare Nutzwärme in kWh/m<sup>2</sup></b>	50	56	63	46	17	0,7	0,0
<b>Systemnutzungsgrad in %</b>	34	35	38	36	19	1,35	0
<b>Arbeitszahl Solarsystem</b>	47	54	57	52	29	1,76	0
<b>Deckungsanteil Solar in %</b>	13	16	14	12	3	0,09	0
<b>Wärmeverbrauch Absorptionskältemaschinen in MWh</b>	40	35	78	37	6	0	0
<b>Kälte von Absorptionskältemaschinen in MWh</b>	22	19	45	20	3	0	0
<b>COP</b>	0,55	0,55	0,57	0,55	0,53	–	–

**Tabelle 2:** Erste Messergebnisse des zweiten Halbjahrs 2011 der solaren Klimatisierungsanlage Rottweil



**Abb. 3.1-3:** Wichtigste Messergebnisse des zweiten Halbjahrs 2011 der solaren Klimatisierungsanlage Rottweil



**Abb. 3.1-4:** Darstellung der Betriebszeiten der Speicherentladepumpen HP3/1 (groß) und HP3/2 (klein), des Speicherentladevolumenstroms VSV, der wie die Speicherentladeleistung (PSV) nur dann erfasst wird, wenn der Bypass zum Heizungssystem geöffnet ist. Es zeigt sich, dass die Pumpen morgens und abends jeweils ca. zwei Stunden ohne Wärmeabgabe die Rohrleitungen warm halten

wenn die Speichertemperatur zu niedrig ist, wird Wärme aus dem Heizungsnetz benötigt, um die Frostfreiheit zu gewährleisten. Im Juli konnte ein maximaler solarer Deckungsanteil am Gesamtwärmeverbrauch von 16 % erreicht werden. Dieser relativ geringe Deckungsanteil ist darauf zurückzuführen, dass das Kollektorfeld aus Platzgründen nicht größer ausgelegt werden konnte.

Die in Tabelle 2 aufgeführte Arbeitszahl gibt das Verhältnis aus erzieltm solarem Ertrag zu Stromverbrauch des Solarsystems (für Pumpenbetrieb und Regler) wieder. Hier wurde im August ein maximaler Wert von 57 erreicht.

Bei den Kältemaschinen wurde in allen Betriebsmonaten eine für einstufige Absorptionskältemaschinen im unteren typischen Bereich liegender thermischer Coefficient of Performance ( $COP_{th}$ ), entsprechend dem Quotient aus Nutzkälte und Antriebswärme, zwischen 0,53 und 0,57 ermittelt. Die Maschinen wurden im Heizkreis häufig mit Temperaturen unter 80 °C angetrieben und takten häufig. Beides wirkt sich negativ auf den  $COP_{th}$  aus.

Die Kältemaschinen hatten im August mit 78 MWh den größten Wärmebedarf im Messzeitraum und erzeugten in diesem Zeitraum 45 MWh Kälte, was einem COP von 0,57 entspricht. Dementsprechend konnten pro kWh Wärme 0,57 kWh Kälte erzeugt werden. Weitere Messergebnisse entnehmen Sie bitte Tabelle 2 und Abbildung 3.1-3.

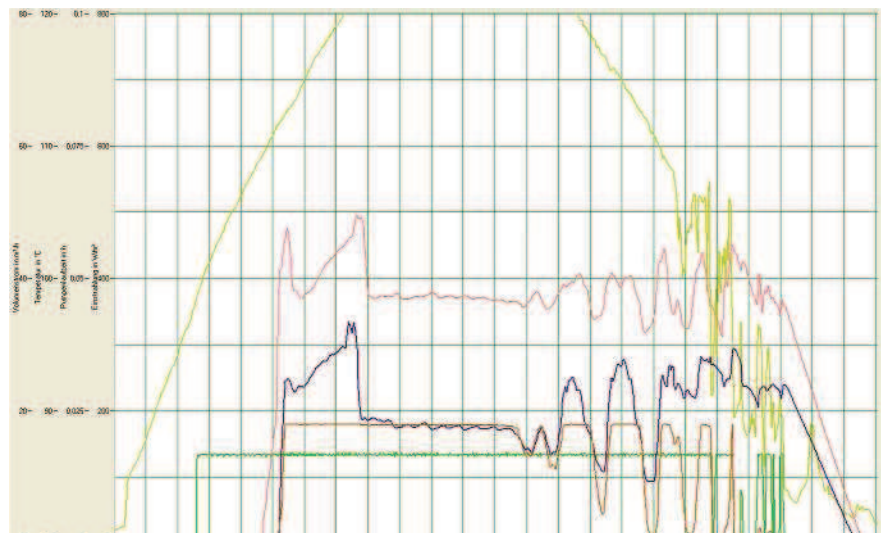
#### Detailanalyse der Messdaten

Bei der Untersuchung der Messdaten

zeigten sich relativ hohe Wärmeverluste im Solarspeicher und der an ihm angeschlossenen Verrohrung. Die Rohrleitung zwischen Speicher und der Schnittstelle zum Heizungsnetz mussten über eine längere Strecke (einfache Strecke ca. 50 m) im Freien verlegt werden. Dementsprechend liegt es nahe, dass ein großer Teil der Wärmeverluste trotz guter Wärmedämmung an diesen Rohren entsteht. Die Zirkulation in diesem Kreislauf wird durch zwei unterschiedlich große Pumpen gewährleistet. Die kleinere Pumpe geht immer parallel zur Kollektorkreispumpe in Betrieb, um die lange Rohrleitung über einen Bypass bis zur Einspeisestelle warm zu halten. Dadurch ist diese Pumpe deutlich länger in Betrieb, als Wärme ins Heizungsnetz eingespeist wird (Abbildung 3.1-4). Die Pumpe geht damit unabhängig von Speichertemperatur und Wärmebedarf ab einer Einstrahlung von  $350 \text{ W/m}^2$  in Betrieb.

Zur Reduzierung der Speicherverluste wurde die Regelung geändert, sodass die kleine Pumpe nicht mehr in Abhängigkeit von der Einstrahlung geregelt wird. Zukünftig soll die Speichertemperatur und der Wärmebedarf im Heizungsnetz als Regelkriterien für den Betrieb der beiden Pumpen dienen. Bei Erreichen einer Mindesttemperatur von  $95^\circ\text{C}$  im Speicher oben und Mitte soll die Pumpe in Betrieb gehen. Der Bypass soll erst nach einer festgelegten Zeitspanne den Weg zum Heizungsnetz freigeben. Die Zeitspanne ist so zu bemessen, dass nach Ablauf heißes Wasser am Bypassventil angekommen ist und das Einströmen kalten Wassers in das Heizungssystem weitgehend vermieden wird. Durch diese Regeländerung werden die Rohre nicht mehr so lange mit heißem Wasser warm gehalten, sodass eine Reduzierung der Wärmeverluste erwartet wird. Außerdem wird eine Reduzierung des Stromverbrauchs und damit eine Erhöhung der Arbeitszahl erwartet.

Neben den beschriebenen Verlusten aufgrund der ungünstigen Regelstrategie fallen außerdem noch Verluste für die Frostschutzschaltung an, mit deren Hilfe die im freien befindlichen, mit Wasser gefüllten Rohre eisfrei gehalten werden. Bei weniger als  $5^\circ\text{C}$  Außentemperatur



**Abb. 3.1-5:** Darstellung der Betriebszeiten der Kollektorkreisumpen HP1/1 und HP1/2, des Kollektorvolumenstroms VKT, der nur dann erfasst wird, wenn der Bypass zum Wärmeübertrager geöffnet ist. Es zeigt sich, dass die Pumpen vor allem morgens ca.  $1\frac{1}{4}$  Stunden ohne Wärmeabgabe betrieben werden

wird in regelmäßigen Abständen die Pumpe für eine halbe Stunde gestartet, um bereits abgekühltes Wasser in den Rohren durch wärmeres Wasser aus dem Speicher zu ersetzen.

Hier wäre sicher sinnvoll, die Temperaturen im/am Rohr an kritischen Stellen zu überwachen, um dadurch die Pumpe seltener und kürzer in Betrieb nehmen zu müssen und ein unnötiges Beheizen der Rohre zu vermeiden.

Im Kollektorkreislauf zeigt sich ein ähnliches Verhalten wie auf der Entladeseite, da dessen Pumpe ebenfalls ab  $350 \text{ W/m}^2$  solarer Einstrahlung eingeschaltet wird. Dadurch kommt es ebenfalls zu Betriebsphasen, in denen die Pumpe zwar in Betrieb ist, aber das Wasser-Glykol-Gemisch im Bypass am Wärmetauscher vorbeigeführt wird, da das Kollektorfluid nicht wärmer als das Wasser im Speicher ist. Vor allem morgens ist dieses Verhalten zu beobachten. (Abbildung 3.1-5).

Durch eine schrittweise Anhebung des Sollwerts der solaren Einstrahlung von  $350 \text{ W/m}^2$  um jeweils  $50 \text{ W/m}^2$  soll der ideale Schaltzeitpunkt für den Start der Kollektorpumpe ermittelt werden. Die schrittweise Anhebung ist hier zwingend notwendig, da es sonst zur Stagnation wegen Überhitzung in den Vakuumröhren kommen kann. Stagnation ist unbe-

dingt zu vermeiden, da dadurch das Kollektorfluid und die Kollektoren geschädigt werden können.

Die oben erwähnte Notkühlung war bisher noch nicht in Betrieb, da die anfallende Wärme des Solarsystems jederzeit in das Heizungssystem eingespeist werden konnte und auch keine Störungen vorlagen, die deren Betrieb notwendig gemacht hätte. Hier ist geplant, an einem sonnenreichen Tag im Frühjahr die Speicherentladung zu unterbinden und damit den Notkühlerbetrieb zu provozieren, um die Funktion zu überprüfen und das Betriebsverhalten beobachten zu können.

### Zusammenfassung und Ausblick

Die Solaranlage Rottweil bringt bisher angesichts des hohen Temperaturniveaus der Anlage von  $80^\circ\text{C} - 95^\circ\text{C}$  gute Erträge und läuft weitgehend störungsfrei. Im November und Dezember wurden bisher kaum solare Erträge erzielt, was einerseits auf die hohen Speicherverluste, andererseits auf das hohe Temperaturniveau der Anlage zurückgeführt werden muss, das bei der geringen Einstrahlung im Winter nicht erreicht wird. Die vorgeschlagenen Optimierungsmaßnahmen sollen noch vor Beginn der sommerlichen Kühlphase durchgeführt werden, um deren Erfolg baldmöglichst überprüfen zu können.