



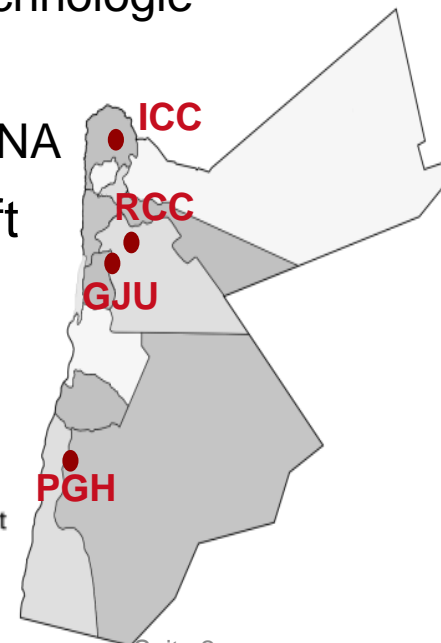
Betriebserfahrungen neuer Absorptionskälteanlagen- technik zum solaren Kühlen in Jordanien

C. Paitazoglou / S. Petersen / W. Lanser

1. Projektvorstellung SCIC
2. Überblick Systeme und Aufbau Solare Kühlung / AKA-Regelung
3. Dynamische Volumenstromregelung
4. Betriebsergebnisse
5. Zusammenfassung

Projektvorstellung SCIC

- Solar Cooling in Industry and Commerce SCIC (2012-2016)
Demonstration - Know-How Transfer – Promotion
- Installation von 4 Pilotprojekten zur solaren Kühlen in Jordanien
 - Nutzung von klimafreundlichen Kältemitteln (LiBr/H₂O)
 - Solarwärme als Antriebsenergie
- Projektziele
 - Demonstration einer energieeffizienten/nachhaltigen Technologie
 - Know-How Transfer bei Installation/Betrieb/Wartung
 - Promotion der Absorptionskälteanlagentechnologie in MENA
- Projektumsetzung erfolgt durch Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit(GIZ)



Partner



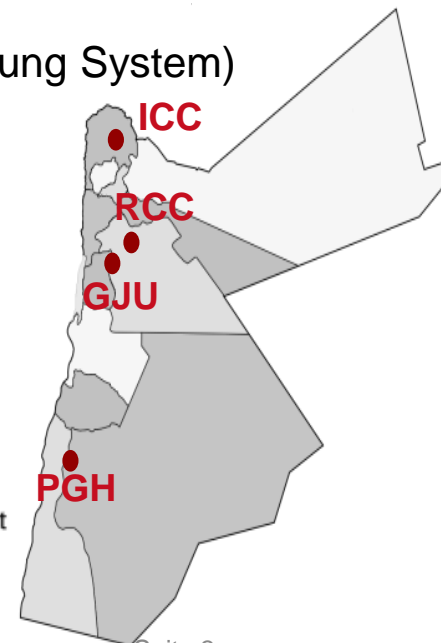
Im Auftrag des:



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz,
Bau und Reaktorsicherheit

Projektvorstellung SCIC

- Solar Cooling in Industry and Commerce SCIC (2012-2016)
Demonstration - Know-How Transfer – Promotion
- Installation von 4 Pilotprojekten zur solaren Kühlen in Jordanien
 - Nutzung von klimafreundlichen Kältemitteln (LiBr/H₂O)
 - Solarwärme als Antriebsenergie
- Arbeitsschwerpunkte TUB
 - Unterstützung/Begleitung der Planungs-/Installationsarbeiten
 - Erstellung messtechnischer Konzepte (Vermessung/Überwachung System)
 - Training von Ingenieuren/innen in Deutschland/Jordanien
 - Inbetriebnahme der AKA-Technologie
 - Dokumentationen (Betriebsberichte, Handbücher, etc.)



Partner







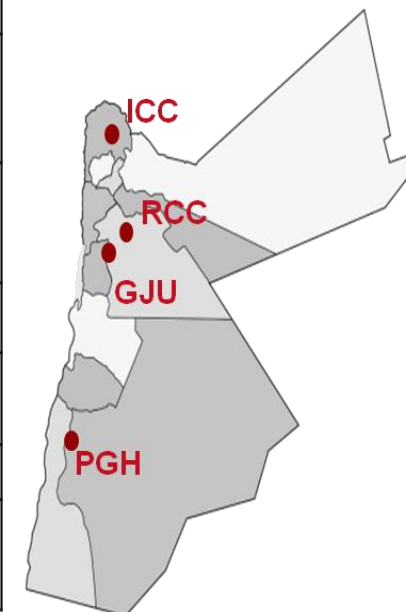
Im Auftrag des:



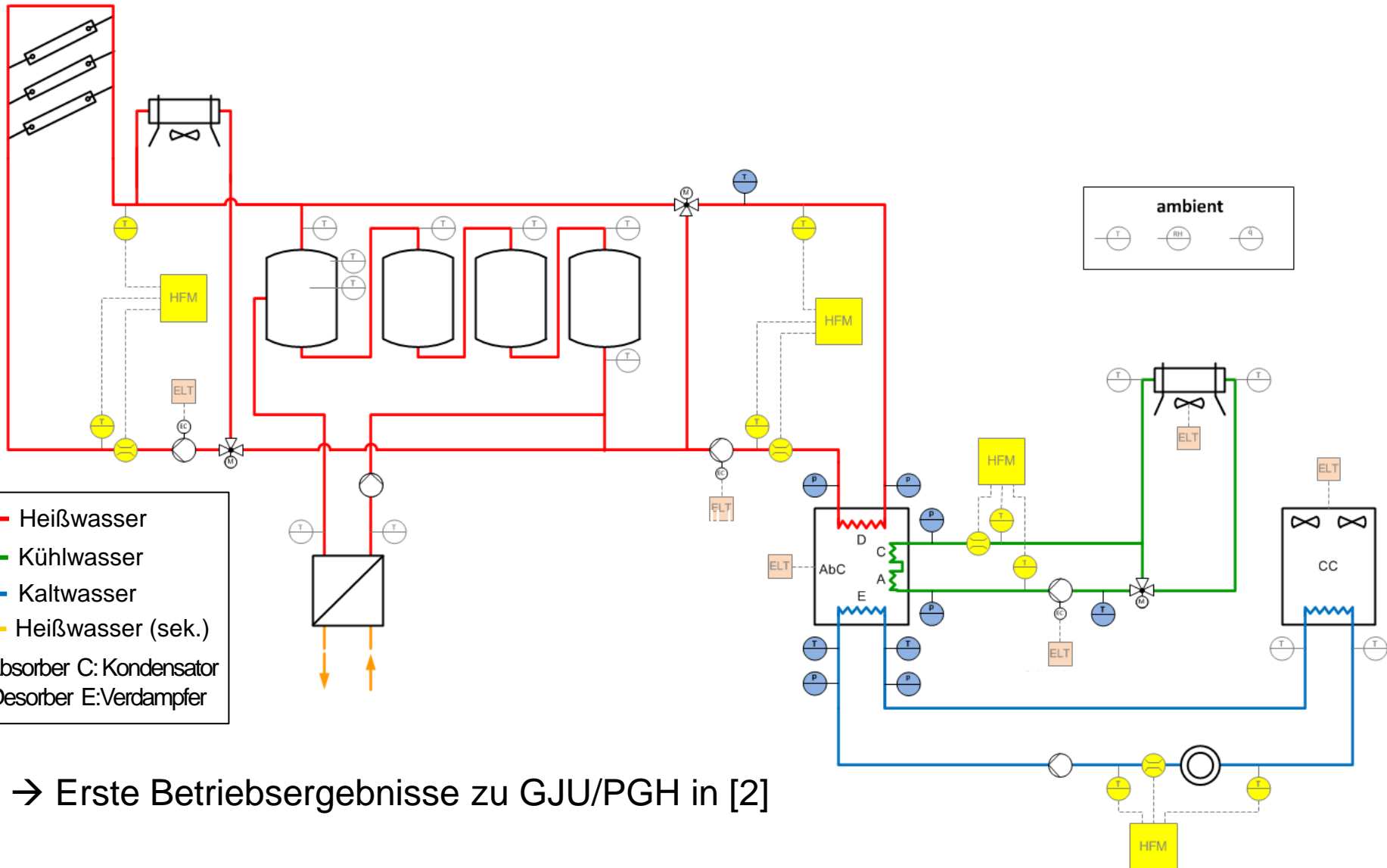
Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz,
Bau und Reaktorsicherheit

Systemskizzen der solaren Systeme

	<u>German Jordan University (GJU)</u> 	<u>Petra Guest House (PGH)</u> 	<u>Royal Culture Center (RCC)</u> 	<u>Irbid Chamber of Commerce (ICC)</u> 
Solarsystem	Solarwärme für WW/Heizung- & AKA-System Compound Parabolic Collectors (CPC)			
	150 CPC, 480m ² _{gross}	114 CPC, 388m ² _{gross}	132 CPC, 449m ² _{gross}	41 CPC, 140m ² _{gross}
Wärmespeicher	4 x 3,5m ³ für sol. Heizen <i>hydraulisch ungekoppelt</i>	4 x 3m ³ für solare Heizen/Kühlen <i>hydraulisch gekoppelt</i>	3 x 3m ³ für sol. Heizen <i>hydraulisch gekoppelt</i>	1 x 3m ³ für sol. Heizen <i>hydraulisch gekoppelt</i>
Kälteanlage(n)	TUB Absorptionskälteanlage - Typ Hummel (FM160V021) [1]			TUB AKA Typ Biene (FM050V021) [1]
	1 / 2 direct air cooled compression chillers			
Rückkühlung	Rückkühlwerk - GEA V-Typ			
Kältelast	Betriebstemperaturen 7 - 9°C to 14°C			
	8-16	24h/7d Auslegung:8-12am+6-12pm	8-24	8-16



Aufbau Solare Kühlung am Beispiel PGH



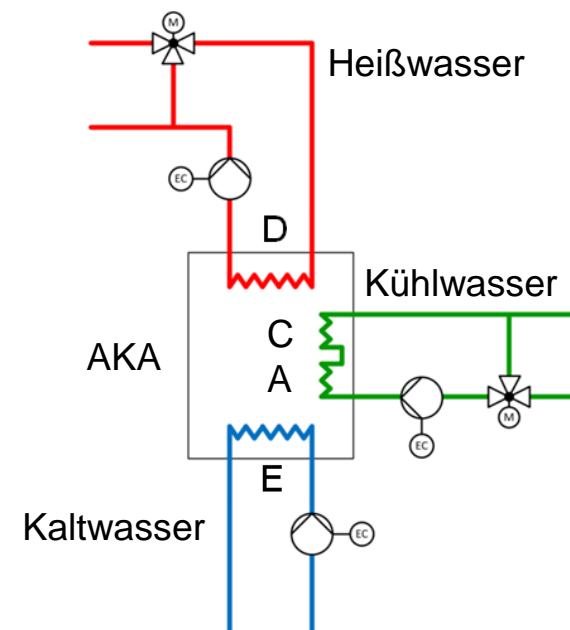
→ Erste Betriebsergebnisse zu GJU/PGH in [2]

Steckbrief Absorptionskälteanlage(n)

- AKA Typ Hummel (160kW) / Biene (50kW)
- Steuerung/Regelung externer/interner Aktoren
- Leistungsregelung verfolgt zwei Ziele:
 - Bereitstellung erforderlicher Kältelast ($Q_{0Ex,set}$)
 - Einhaltung der geforderter Kaltwasseraustrittstemperatur ($t_{0Eo,set}$)
- Leistungsregelung erfolgt auf Basis der charakteristischen Gleichung
- Gleichzeitige Regelung von Heißwasser- (t_{2Di}) und Kühlwasser- (t_{1Ai}) eintrittstemperatur
- für 2016 geplant:
 - **Verbesserung Prozessführung**
 - **Verbesserung Anlagenbetrieb & Schnittstelle System**
 - **Dynamisch regelbare Volumenströme**



FM160V21 @GJU



D: Desorber A: Absorber C: Kondensator
E: Verdampfer AKA: Absorptionskälteanlage

Dynamische Volumenstromregelung

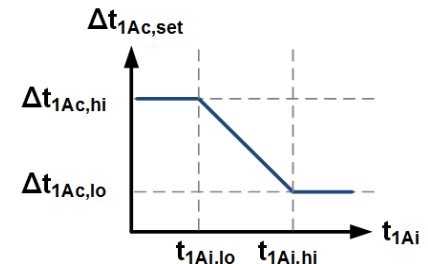
Konstante / Variable Temperaturspreizung im Kühlwasserkreis

Führungsgröße bildet die Temperaturspreizung Δt_{1AC} ($= t_{1Co} - t_{1Ai}$)

Volumenstrom V_{1Qx} (Pumpendrehzahl) geregelt nach $\Delta t_{1AC, set}$

Reduktion von Soll-Spreizung $\Delta t_{1AC, set}$ i.A.v. t_{1Ai}

→ Ziel: Reduktion Elektroenergieverbrauch im Kühlwasserkreis



Volumenstromnachführung im Kaltwasserkreis der AKA

Führungsgröße bildet der verbraucherseitige Kaltwasservolumenstrom $V_{0, Verbraucher}$

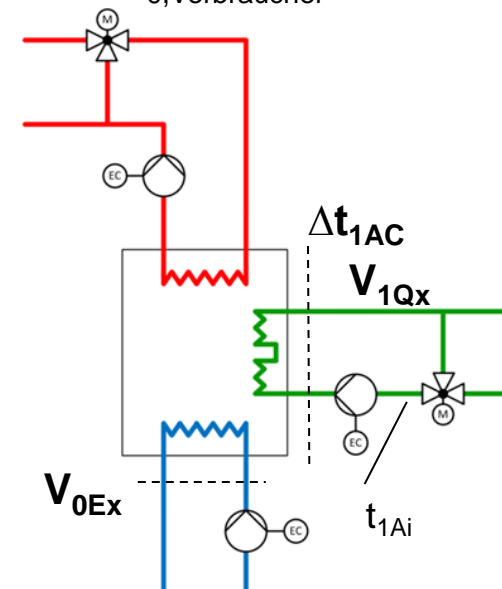
Volumenstrom V_{0Ex} (Pumpendrehzahl) geregelt nach $V_{0, Verbraucher}$

$V_{0Ex} \approx V_{0, Verbraucher}$

→ Ziel: Reduktion Elektroenergieverbrauch im Kaltwasserkreis

Reduktion thermischen Aufwand

Reduktion weiterer parasitärer Verbräuche



Die Anwendbarkeit dieser Regelstrategie ist beschränkt auf eine Erzeuger- bzw. Verbraucherseite, die gleiche Leistungsdichte aufweisen.

Dynamische Volumenstromregelung

Volumenstromnachführung im Heißwasserkreis der AKA

A) Vorgabe einer Soll-Austrittstemperatur am Desorber $t_{2Do, set}$

→ Ziel: Sicherstellung hohe Betriebszeit von KWK-Anlagen

Erhöhung Effizienz vom Kollektorfeld (Reduktion mittl. Temp.niveau)

B) Nachführung Erzeugervolumenstrom (Solarpumpe)

Führungsgröße bildet der erzeugerseitige Volumenstrom $V_{2Mx, Prod}$

Regelstrategie erweiterbar i.A.v. Wärmespeicher-Ladezustand LZ

$$LZ = \frac{t_{2Sp, m} - t_{2Sp, min}}{t_{2Sp, max} - t_{2Sp, min}} \quad [0 - 1]$$

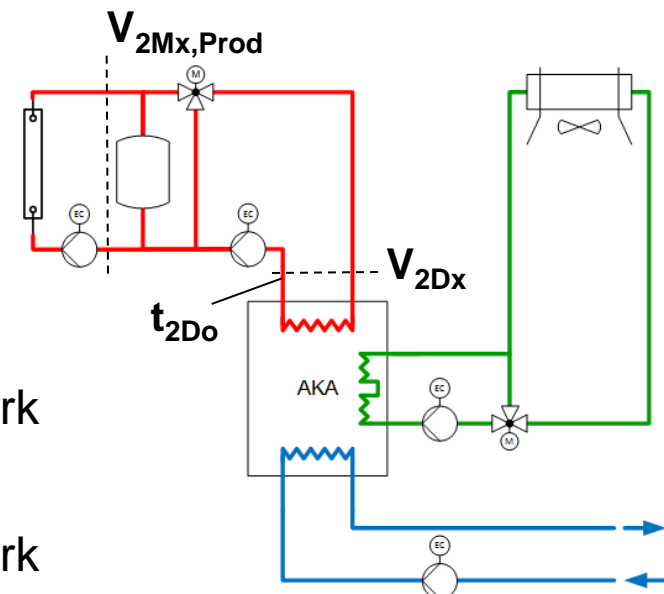
min/max Temperatur $t_{2sp, min/max} = 60^\circ\text{C}/100^\circ\text{C}$
mittlere Temperatur $t_{2Sp, m}$

geringer Ladezustand: $V_{2Dx} \ll V_{2Mx, Prod}$

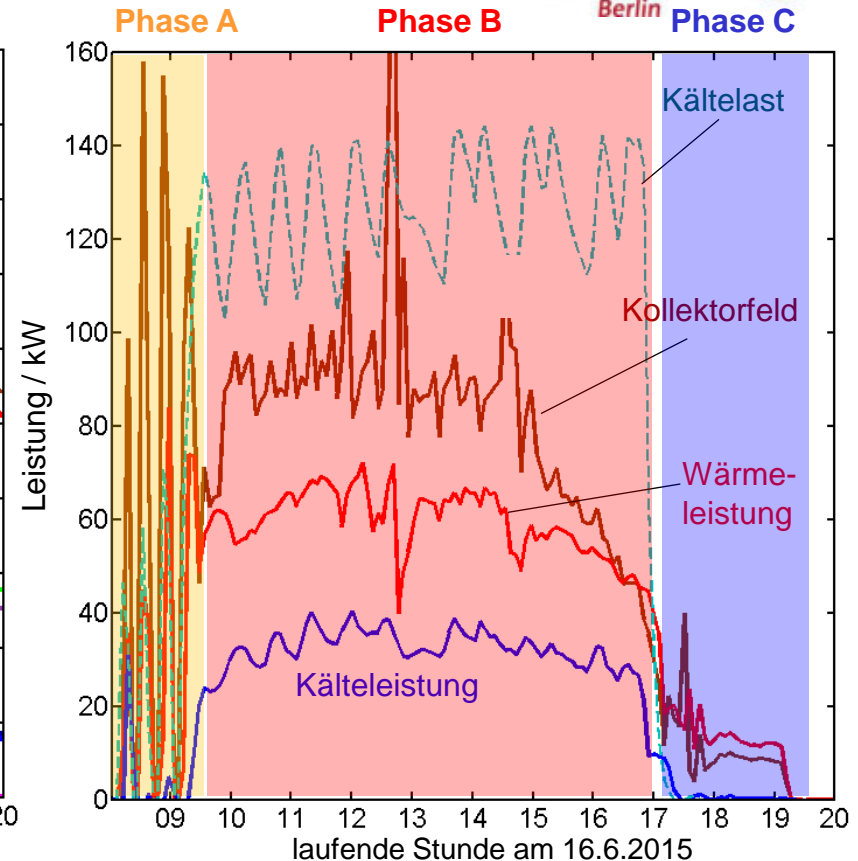
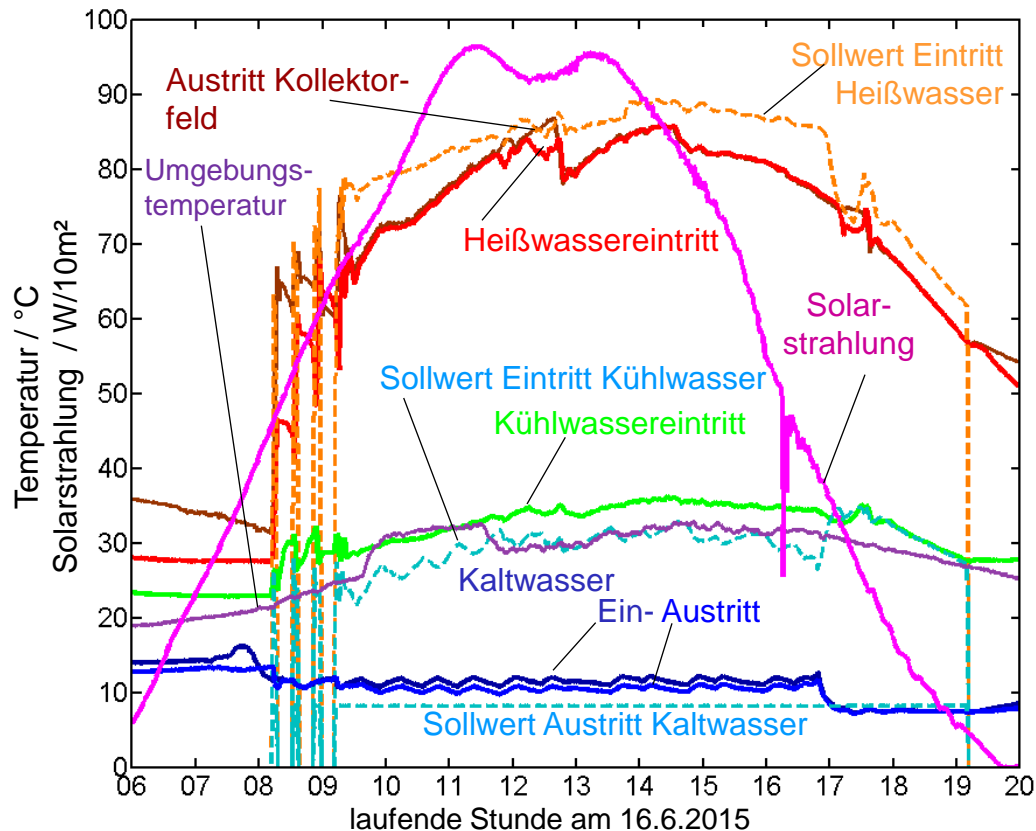
→ Speicherbeladung stark

hoher Ladezustand: $V_{2Dx} \leq V_{2Mx, Prod}$

→ Speicherbeladung stark



Betriebsergebnisse GJU (16.6.15) [2]

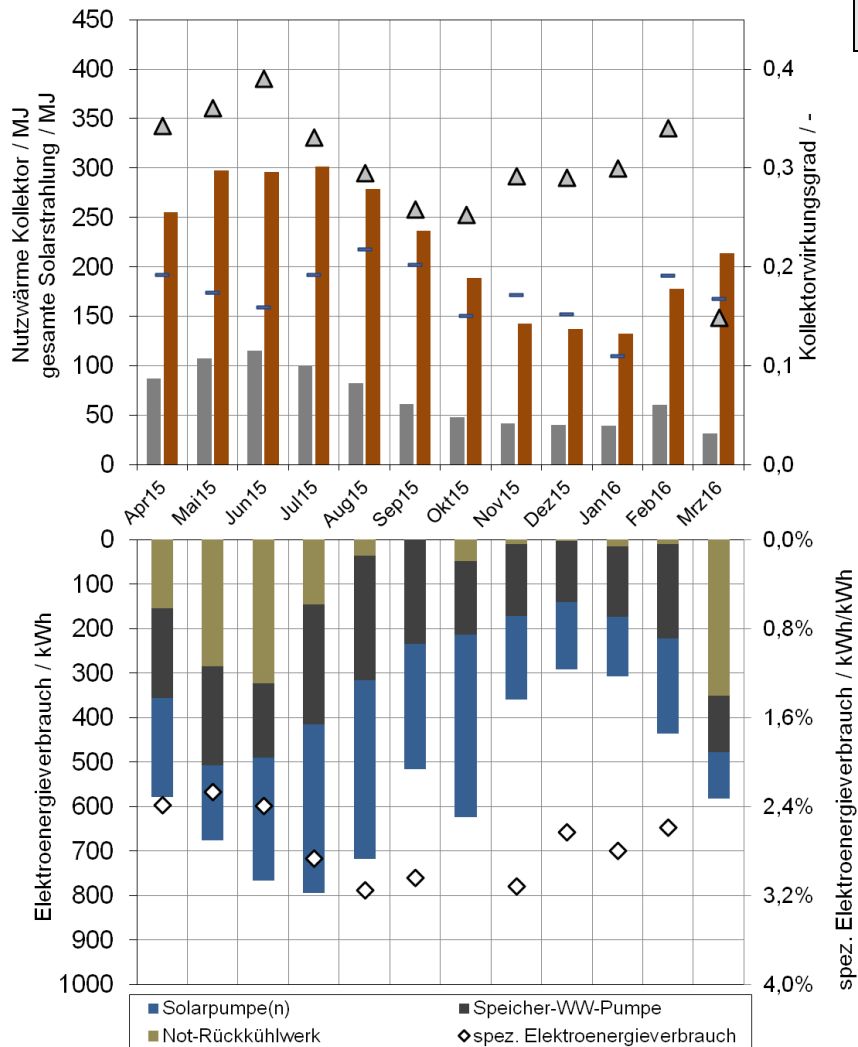


Stark ineffizienter Betrieb des Solarsystems

- Verfügbare Antriebstemperaturen zwischen 60°C und 85°C
- Ungünstiger Einschaltzeitpunkt für Not-Rückkühlung (→85°C)
- Unoptimale Durchströmung Kollektorfeld (→ reduzierte Kollektorleistung laut Auslegung 200kW_{peak})

Jahresbetriebsauswertung Solares Heizen PGH/GJU

Betriebsdaten 4/15 bis 3/16



Betriebsergebnisse

- **Jahres-Kollektorwirkungsgrad** von **0,3** (PGH/GJU)
- **spez. Elektroenergieverbräuche** der sol. brutto-Wärme bei **30 kWh_{el} / MWh_{Wärme}**
- Mittlere Temperatur (Kollektor) in PGH höher als in GJU (jährliches Mittel +10K)
- Kollektorfeldertrag in GJU liegt bei 25% mehr Fläche nur 15% über PGH
- Energiebedarf-Verhältnis Pumpe zu Not-Rückkühlung: PGH 4:1 / GJU 5:1

→ **Unnötiger Betrieb Not-Rückkühlung**

→ **Ungleiche Durchströmung Kollektorfeld**

Für die Solare Kühlung folgt:

Reduktion hoher Antriebstemperaturen

Berechnung von Kennzahlen / -werten

- thermische / elektrische Effizienz einer Kälteanlage i

$$\zeta_{el,i}^{\Delta\tau} = \frac{E_{0,i}^{\Delta\tau}}{W_{i,BR}^{\Delta\tau}}$$

$$\zeta_{th,i}^{\Delta\tau} = \frac{E_{0,i}^{\Delta\tau}}{E_{2,i}^{\Delta\tau}}$$

zB. Berechnung der Kältearbeit (AKA)

(Index 0Ex für
AKA Verdampfer)

$$E_{0,AKA}^{\Delta\tau_{12}} = Z_{0Ex}^{\tau_2} - Z_{0Ex}^{\tau_1}$$

$$E_{0E,AKA}^{\Delta\tau_{12}} = \int_{\tau_1}^{\tau_2} Q_{0Ex} d\tau$$

- Primärenergiefaktor Kälte / Primärenergetische Effizienz

$$f_{pe,i}^{\Delta\tau} = \left(\frac{PE_{ges}}{E_0} \right)_i^{\Delta\tau} = \left(\frac{PE_{el} + PE_w}{E_0} \right)_i^{\Delta\tau} = \left(\frac{W_{BR} \cdot f_{el} + E_2 \cdot f_w}{E_0} \right)_i^{\Delta\tau}$$

$$\zeta_{pe,i}^{\Delta\tau} = \frac{1}{f_{pe,i}^{\Delta\tau}}$$

- spez. CO₂-Emissionen der Kälteerzeugung

$$\zeta_{CO_2,i}^{\Delta\tau} = \frac{\Lambda_{CO_2,i}}{E_{0,i}^{\Delta\tau}} = \frac{W_{i,BR}^{\Delta\tau} \cdot f_{CO_2}}{E_{0,i}^{\Delta\tau}}$$

- Bewertungsfaktoren

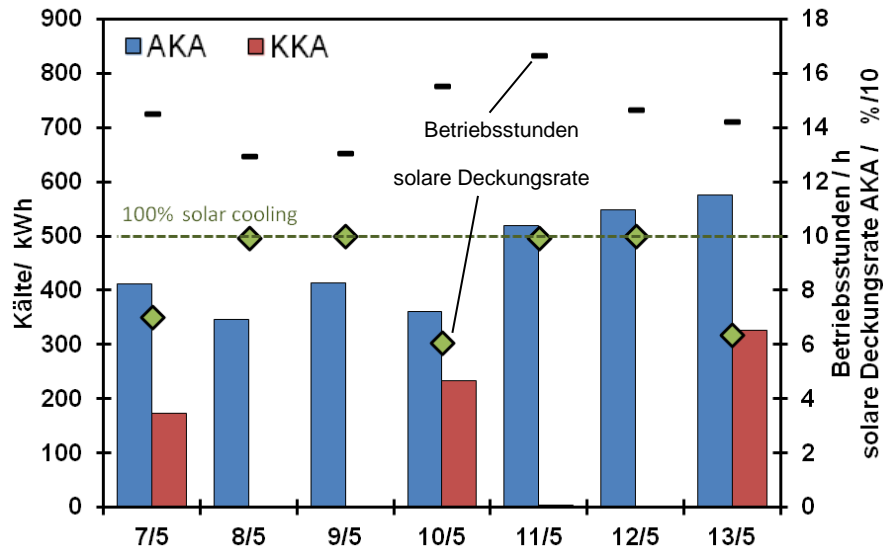
$$f_{el} = 3 \text{ kWh}_{PE} / \text{kWh}_{el} \quad [3]$$

$$f_{CO_2} = 0,64 \text{ kg}_{CO_2} / \text{kWh}_{el} \quad [4]$$

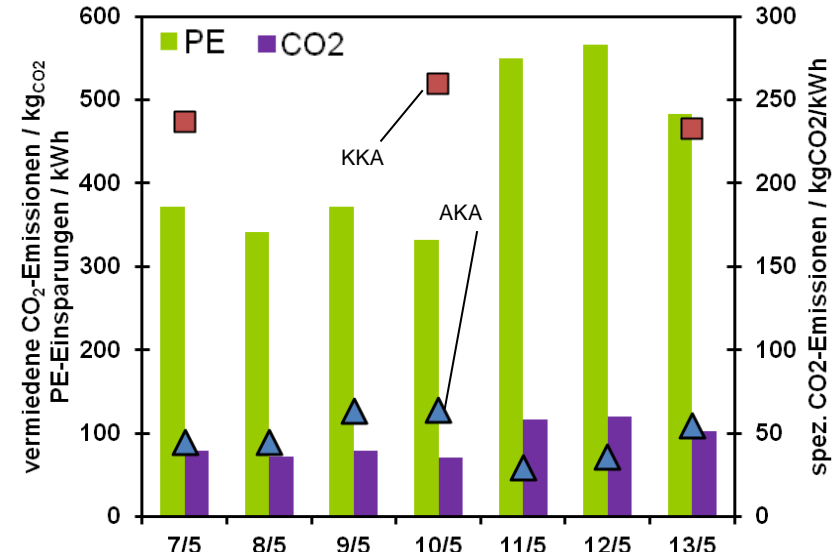
$$f_w = 0 \text{ kWh}_{PE} / \text{kWh} \text{ (Solarwärme)}$$

$E_{0,i}$	erzeugte Kälte der Kälteanlage i
$E_{2,i}$	Antriebswärme der AKA i
PE	Primärenergieverbrauch
W_{BR}	Elektroenergieverbräuche der Kälteanlage i
$\Delta\tau$	Betrachtungszeitraum
$\Lambda_{CO_2,i}$	CO ₂ -Emissionen der Kälteanlage i
ζ_{th}/ζ_{el}	thermische/elektrische Effizienz
f_{pe}/ζ_{pe}	Primärenergiefaktor Kälte / PE-Effizienz
$\zeta_{CO_2,i}$	spez. CO ₂ -Emmissen der Kälteanlage i

Erste Betriebsergebnisse PGH (7-13. Mai 2016)



- 12-17 AKA-Betriebsstunden pro Tag
- Solare Deckungsrate von bis 100%
- AKA: 400-600 kWh_{Kälte} pro Tag



- rel. PE-Einsparung(pee): 1 kWh_{PE}/kWh_{Kälte}
- PE-Einsparung durch AKA-System 70%
- spez. CO₂-Emmissionen
 - AKA: 47 kg_{CO2}/MWh_{Kälte}
 - KKA: 240 kg_{CO2}/MWh_{Kälte}

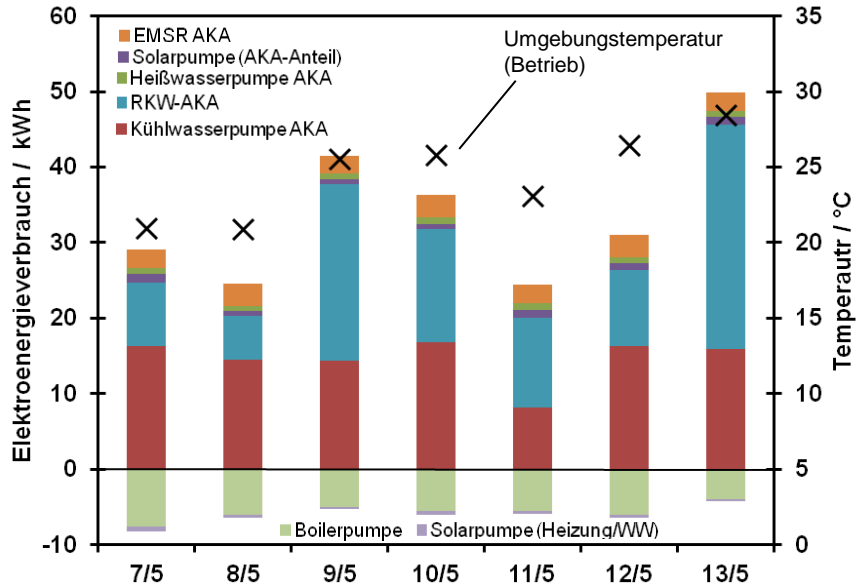
rel. PE-Einsparung pro erzeugte AKA Kälte:

$$pee^{\Delta\tau} = \left(\frac{PEE}{E_{0,AKA}} \right)^{\Delta\tau} \cdot \frac{E_{0,AKA} \cdot f_{el,AKA}}{\zeta_{el,KKA} \cdot PE_{AKA}}$$

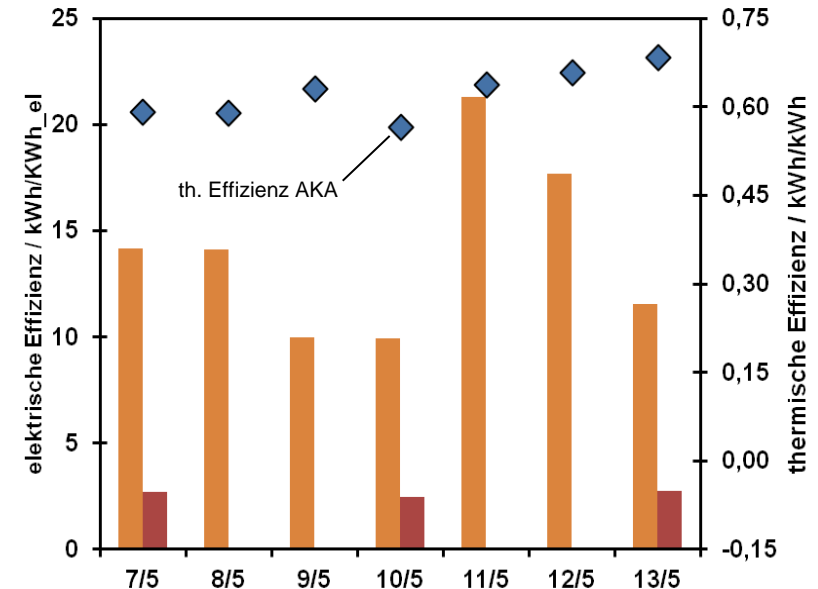
%-PE-Einsparung durch AKA System

$$\left(1 - \frac{PE_{AKA} + PE_{KKA}}{E_{0,AKA} \cdot f_{el,KKA}} \right) \times 100\%$$

Erste Betriebsergebnisse PGH (7-13. Mai 2016)



- Elektroenergieverbrauch im Kühlwasserkreis bei knapp 90%

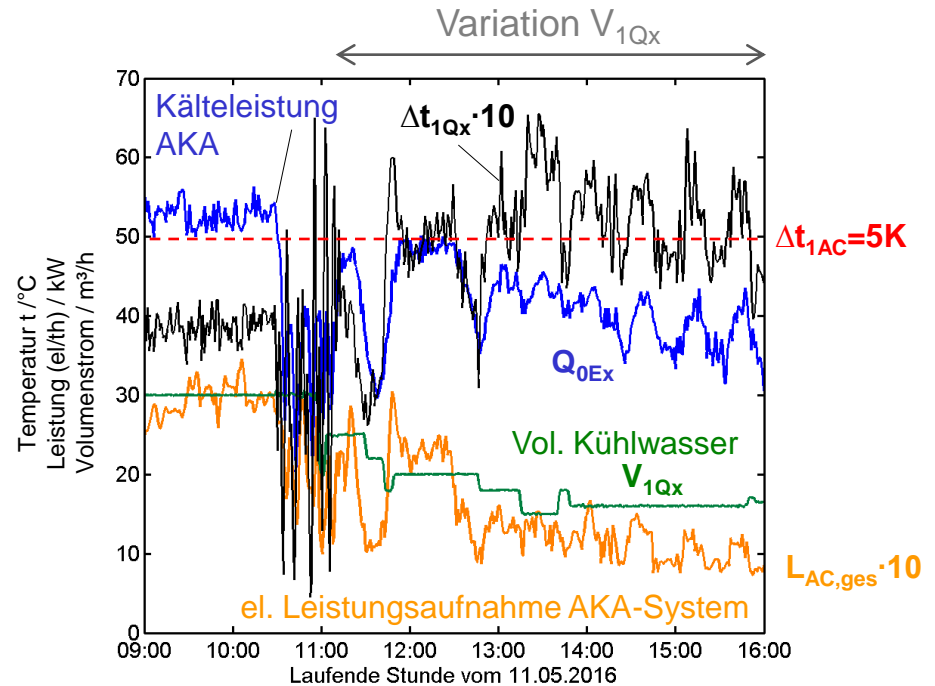
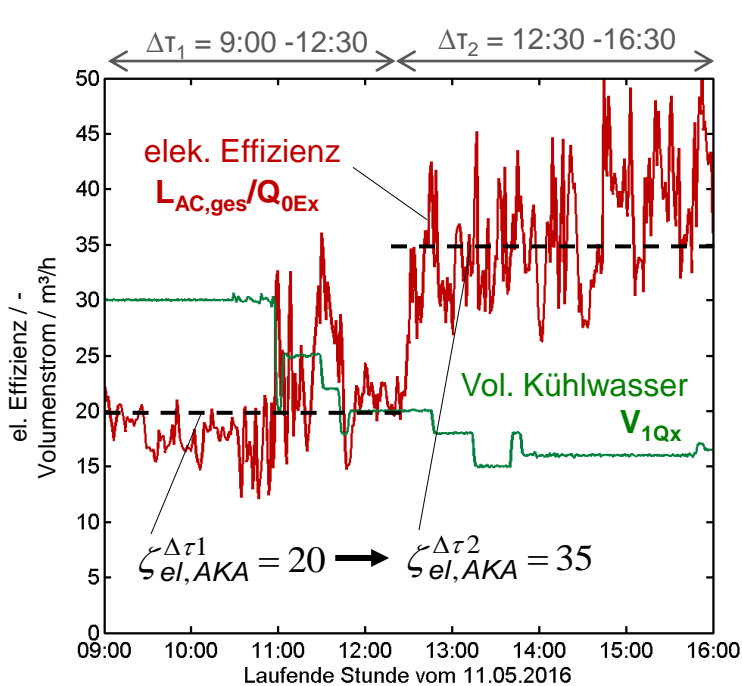


- Thermische Effizienz bei 0,63
- Elektrische Effizienz
 - AKA bei 13
 - KKA bei knapp 3
- PE-Effizienz (PE-Faktor)
 - AKA 4,5 (0,2)
 - KKA 1,1 (0,9)

Volumenstromregelung Kühlwasserkreis

Manuelle Volumenstromanpassung im Kühlwasserkreis

Ziel: $\Delta t_{AC} = 5K$



- Reduktion V_{1Qx} bis zu 50% → Erhöhung el. Effizienz von 20 auf 35 (Leistungsaufnahme Pumpe ~ w³)
- Erhöhung Temperaturniveau im Kühlwasserkreis um 1K

Zusammenfassung

- Zwei weitere Kältesysteme zur solaren Kühlung ab 08/2016 in Betrieb
- System zur solaren Kühlung in GJU/PGH betriebsbereit seit 2015
- Betrieb des Solarkreises in GJU wirkt sich leistungsmindernd für das solare Kälteerzeugungssystem aus
Jahreswerte: $30\text{kWh}_{\text{el}}/\text{MWh}_{\text{Wärme}}$, Kollektorstufiger Wirkungsgrad 30%
- Stabiler Absorptionskälteanlagenbetrieb in PGH seit Mai 2016
 - th. Effizienz $>0,6$ / el. Effizienz 10-20
 - spez. CO_2 Emissionen der AKA 80% tiefer als Referenztechnologie
 - rel. PE-Einsparung der erzeugten AKA Kälte $1\text{kWh}_{\text{PE}}/\text{kWh}_{\text{Kälte}}$
 - PE-Faktor Kälte $0,22\text{kWh}_{\text{PE}}/\text{kWh}_{\text{Kälte}}$ (AKA) und $0,88\text{kWh}_{\text{PE}}/\text{kWh}_{\text{Kälte}}$ (KKA)
- Implementierung von Betriebsstrategien zur dynamischen Volumenstromregelung, zur Effizienzsteigerung und einer besseren Speicherbe-/-entladung in 2016

Literaturquellen

- [1] C. Paitazoglou, S. Petersen, S. Hunt, W. Lanser, J. Albers, A. Hanßke, C. Henrich, W. Hüls, F. Ziegler: Möglichkeiten und Einsatzpotentiale neuer Absorptionskälteanlagen, Tagungsband Deutsche Klima-Kälte-Tagung. Hannover, November 2013.
- [2] C. Paitazogou, S. Petersen, W. Lanser: First performance results of solar cooling in Jordan based on highly efficient absorption chillers. In: Proc. 6th Solar Air-Conditioning. Rome, Italy : OTTI, 24 Sep. – 25 Sep 2015, S. 258-263 – ISBN 978-3-943891-54-6
- [3] International Energy Agency IEA. Jordan Balances for 2013.
- [4] International Energy Agency IEA. CO2 Emissions from Fuel Combustion - Highlights. *IEA Statistics*, 2015.