



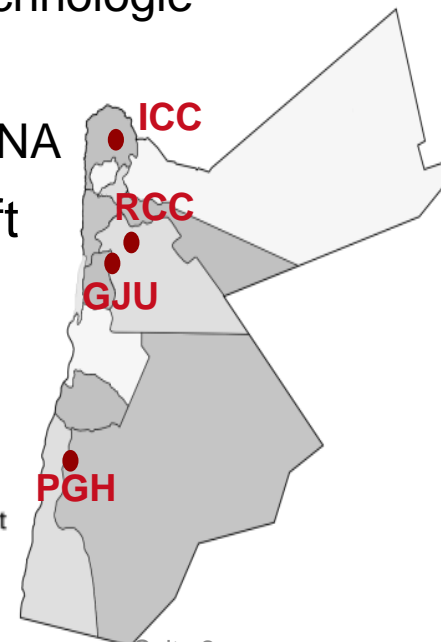
# Betriebserfahrungen neuer Absorptionskälteanlagen- technik zum solaren Kühlen in Jordanien

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/H<sub>2</sub>O)
  - 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



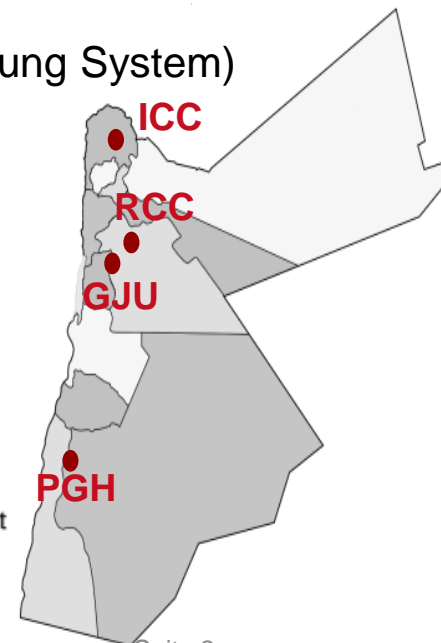
Im Auftrag des:



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/H<sub>2</sub>O)
  - 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







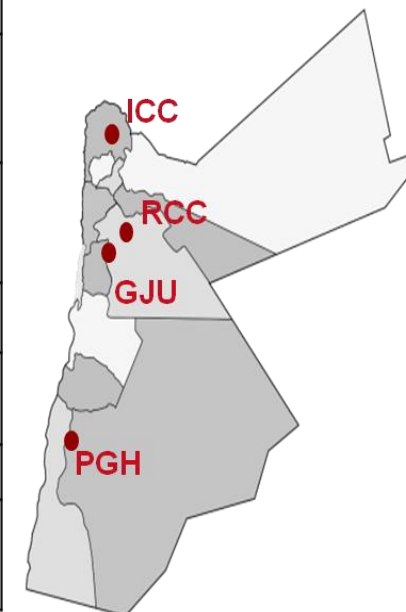
Im Auftrag des:



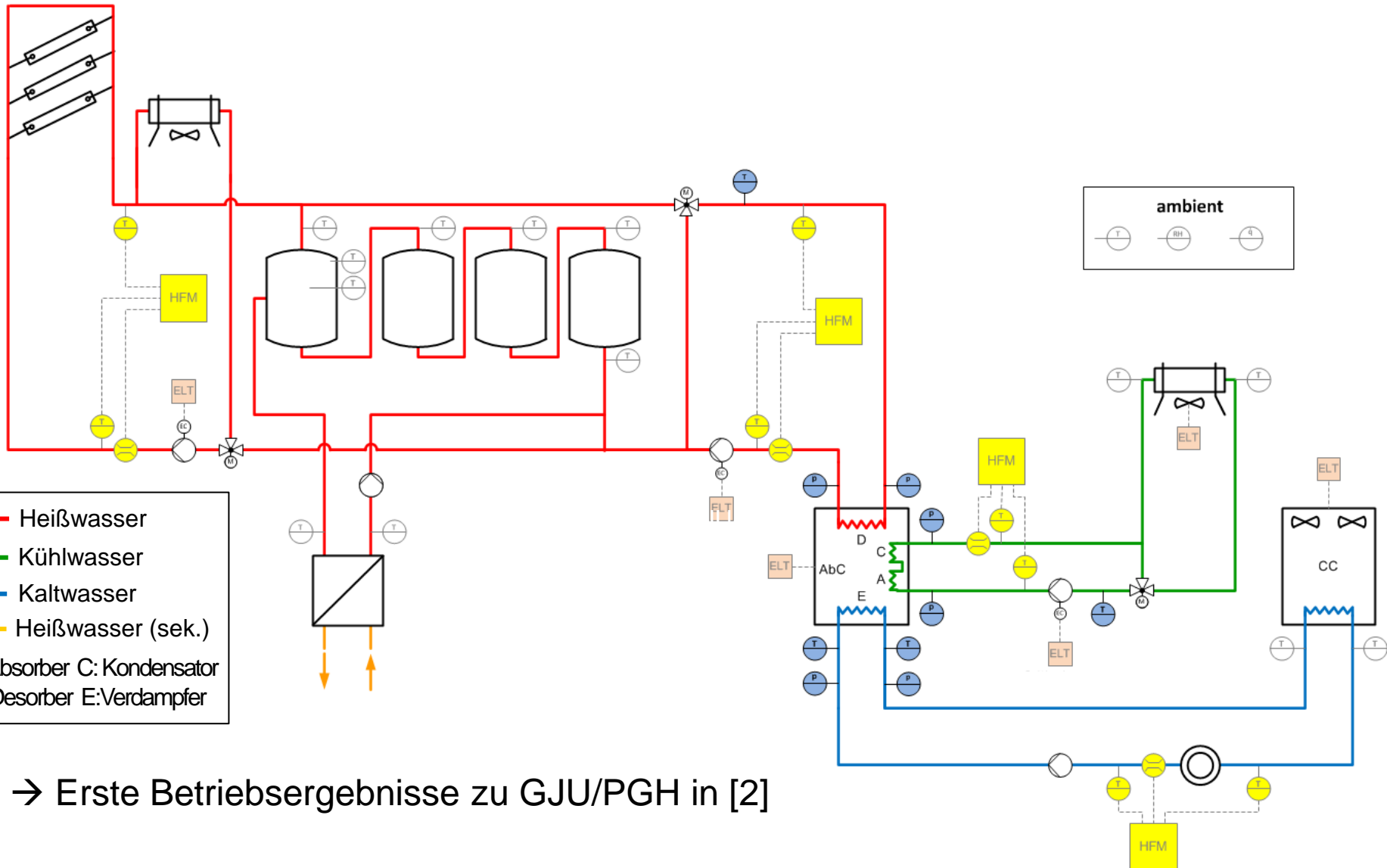
Bundesministerium  
für Umwelt, Naturschutz,  
Bau und Reaktorsicherheit

# 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> 
<b>Solarsystem</b>	Solarwärme für WW/Heizung- & AKA-System Compound Parabolic Collectors (CPC)			
	150 CPC, 480m <sup>2</sup> <sub>gross</sub>	114 CPC, 388m <sup>2</sup> <sub>gross</sub>	132 CPC, 449m <sup>2</sup> <sub>gross</sub>	41 CPC, 140m <sup>2</sup> <sub>gross</sub>
<b>Wärmespeicher</b>	4 x 3,5m <sup>3</sup> für sol. Heizen <i>hydraulisch ungekoppelt</i>	4 x 3m <sup>3</sup> für solare Heizen/Kühlen <i>hydraulisch gekoppelt</i>	3 x 3m <sup>3</sup> für sol. Heizen <i>hydraulisch gekoppelt</i>	1 x 3m <sup>3</sup> für sol. Heizen <i>hydraulisch gekoppelt</i>
<b>Kälteanlage(n)</b>	TUB Absorptionskälteanlage - Typ Hummel (FM160V021) [1]			TUB AKA Typ Biene (FM050V021) [1]
	1 / 2 direct air cooled compression chillers			
<b>Rückkühlung</b>	Rückkühlwerk - GEA V-Typ			
<b>Kältelast</b>	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



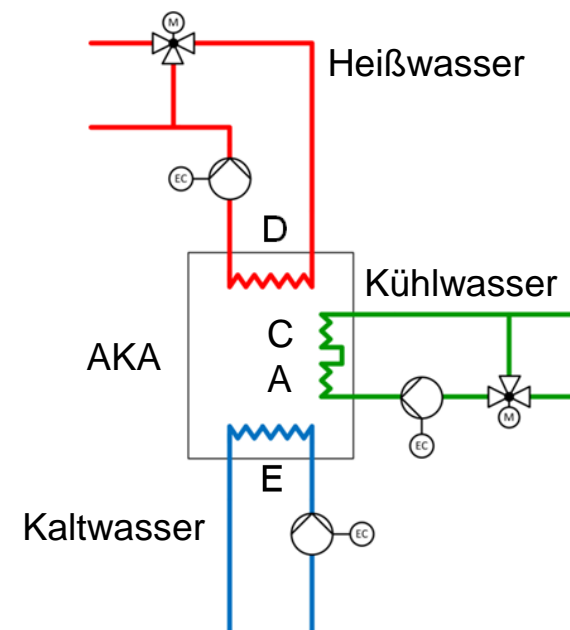
→ Erste Betriebsergebnisse zu GJU/PGH in [2]

## 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

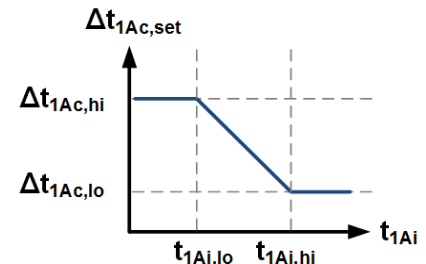
## Konstante / Variable Temperaturspreizung im Kühlwasserkreis

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

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  $V_{0, Verbraucher}$

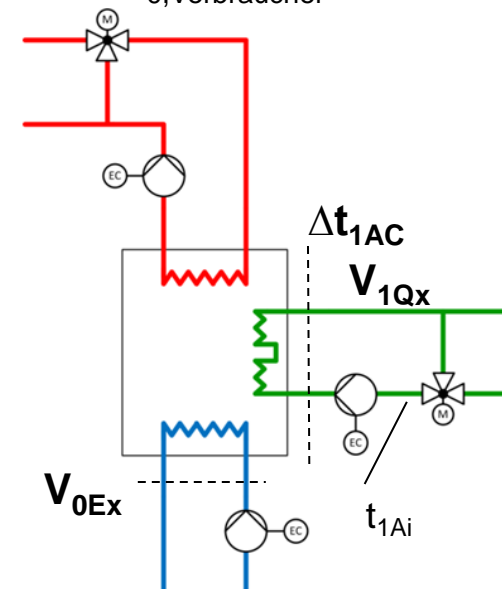
Volumenstrom  $V_{0Ex}$  (Pumpendrehzahl) geregelt nach  $V_{0, Verbraucher}$

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

→ 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

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

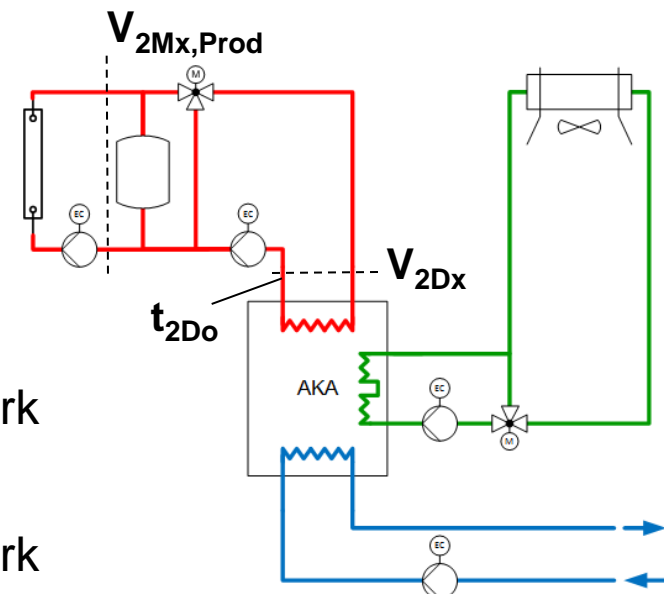
min/max Temperatur  $t_{2sp, min/max} = 60^\circ\text{C}/100^\circ\text{C}$   
mittlere Temperatur  $t_{2Sp, m}$

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

→ Speicherbeladung stark

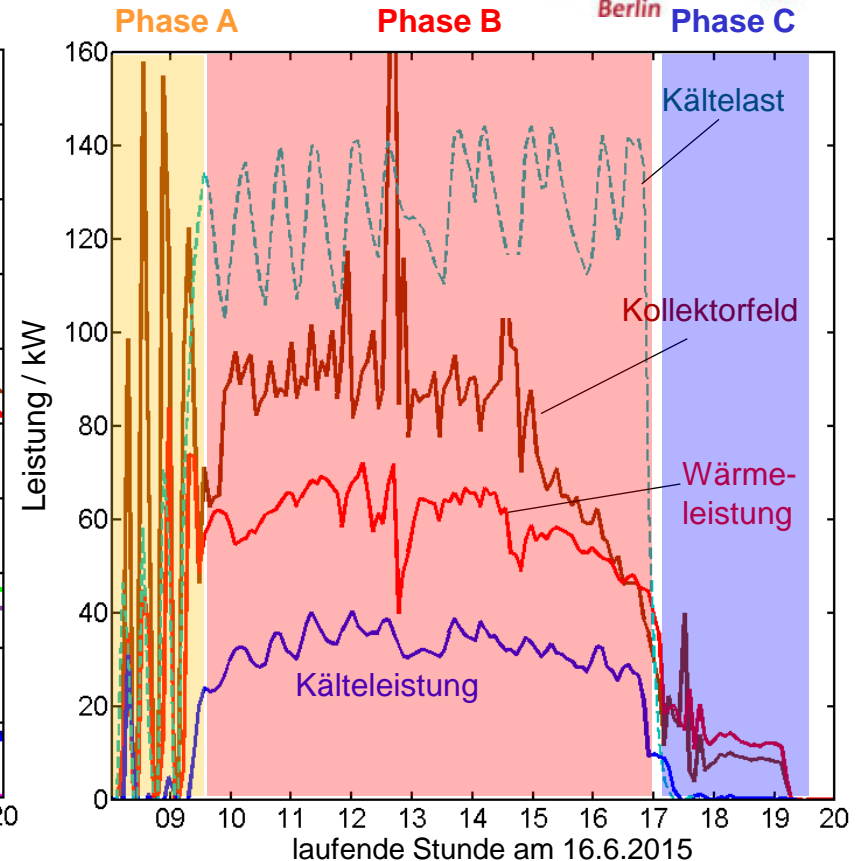
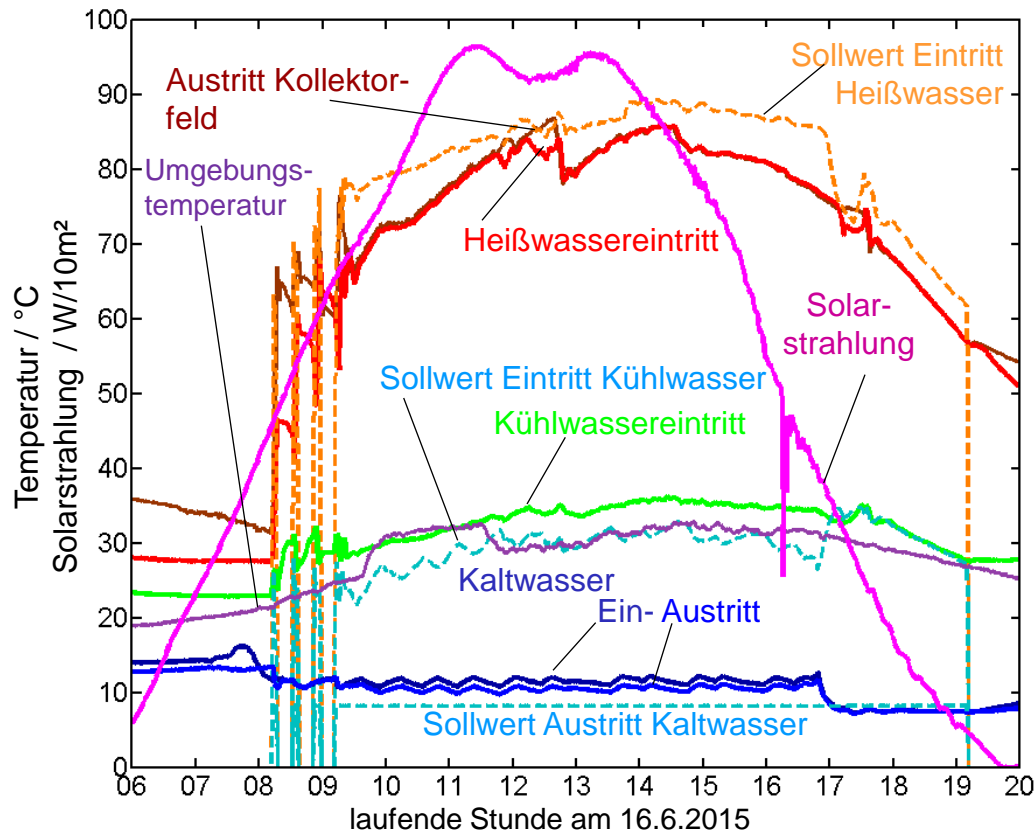
hoher Ladezustand:  $V_{2Dx} \leq V_{2Mx, Prod}$

→ Speicherbeladung stark





# Betriebsergebnisse GJU (16.6.15) [2]

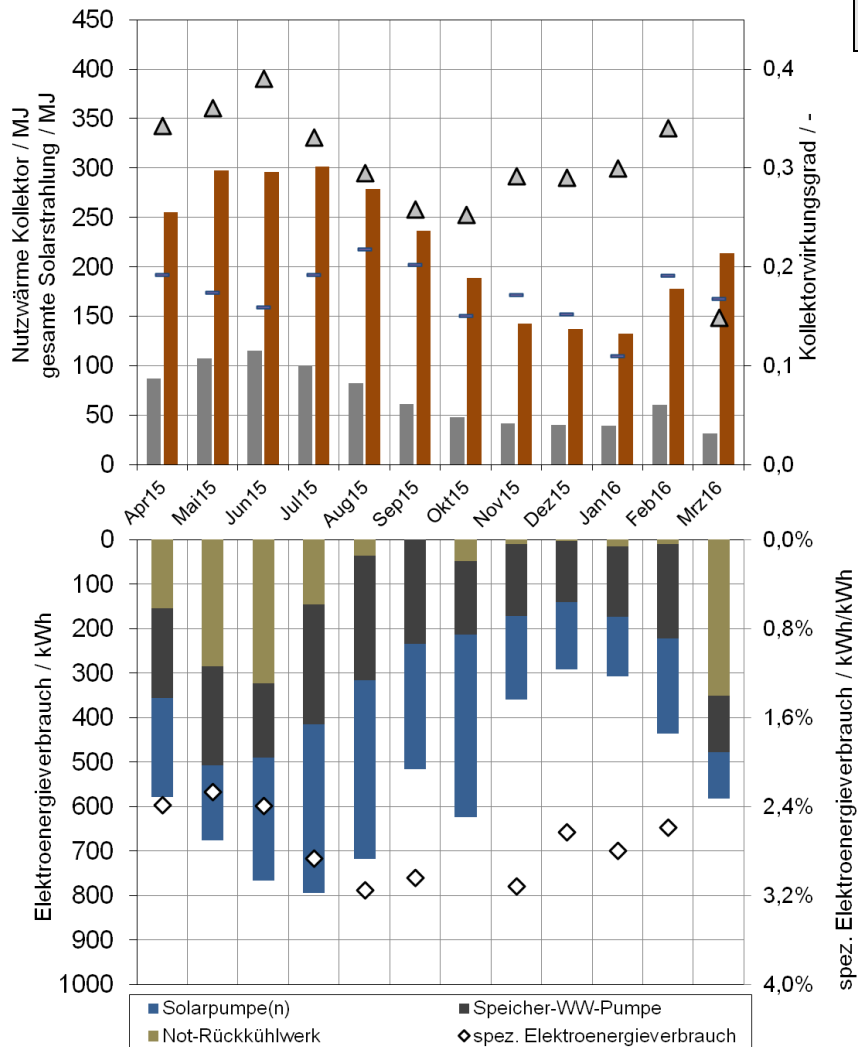


## Stark ineffizienter Betrieb des Solarsystems

- Verfügbare Antriebstemperaturen zwischen 60°C und 85°C
- Ungünstiger Einschaltpunkt für Not-Rückkühlung (→85°C)
- Unoptimale Durchströmung Kollektorfeld (→ reduzierte Kollektorleistung laut Auslegung 200kW<sub>peak</sub>)

# 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<sub>el</sub> / MWh<sub>Wärme</sub>**
- 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. CO<sub>2</sub>-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

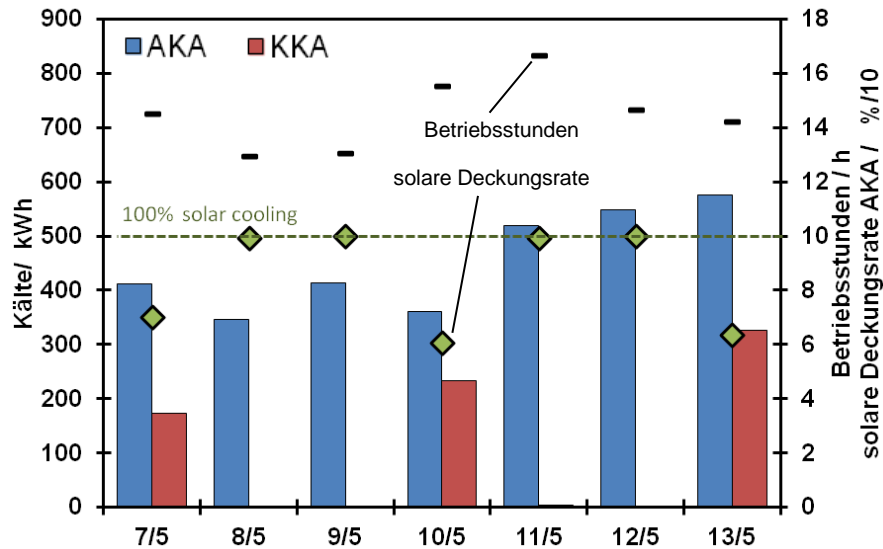
$$f_{el} = 3 \text{ kWh}_{PE} / \text{kWh}_{el} \quad [3]$$

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

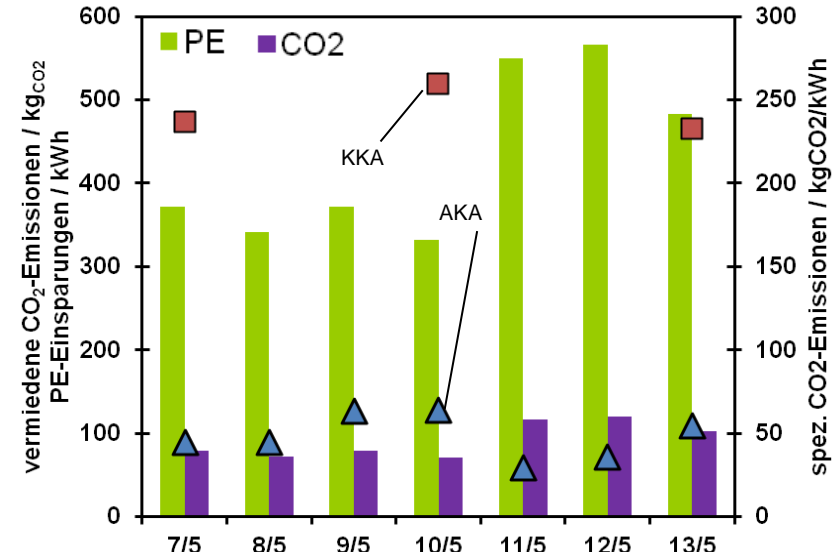
$$f_w = 0 \text{ kWh}_{PE} / \text{kWh} \text{ (Solarwärme)}$$

$E_{0,i}$	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 <sub>2</sub> -Emissionen der Kälteanlage i
$\zeta_{th}/\zeta_{el}$	thermische/elektrische Effizienz
$f_{pe}/\zeta_{pe}$	Primärenergiefaktor Kälte / PE-Effizienz
$\zeta_{CO_2,i}$	spez. CO <sub>2</sub> -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<sub>Kälte</sub> pro Tag



- rel. PE-Einsparung(pee): 1 kWh<sub>PE</sub>/kWh<sub>Kälte</sub>
- PE-Einsparung durch AKA-System 70%
- spez. CO<sub>2</sub>-Emmissionen
  - AKA: 47 kg<sub>CO2</sub>/MWh<sub>Kälte</sub>
  - KKA: 240 kg<sub>CO2</sub>/MWh<sub>Kälte</sub>

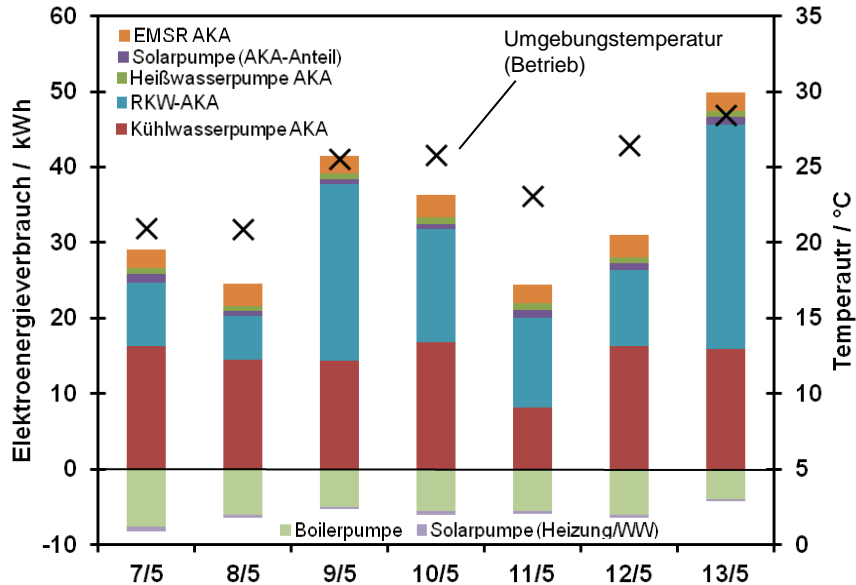
rel. PE-Einsparung pro erzeugte AKA Kälte:

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

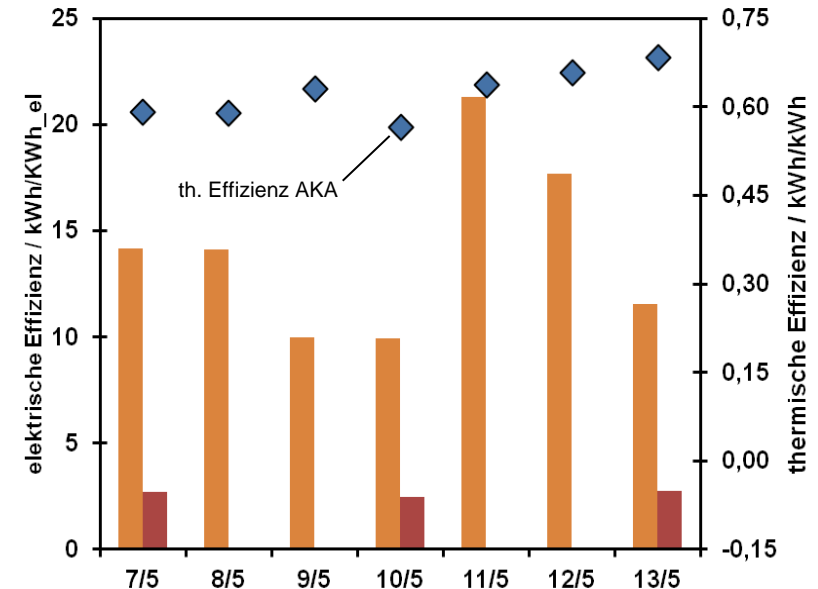
%-PE-Einsparung durch AKA System

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

# Erste Betriebsergebnisse PGH (7-13. Mai 2016)



- Elektroenergieverbrauch im Kühlwasserkreis bei knapp 90%

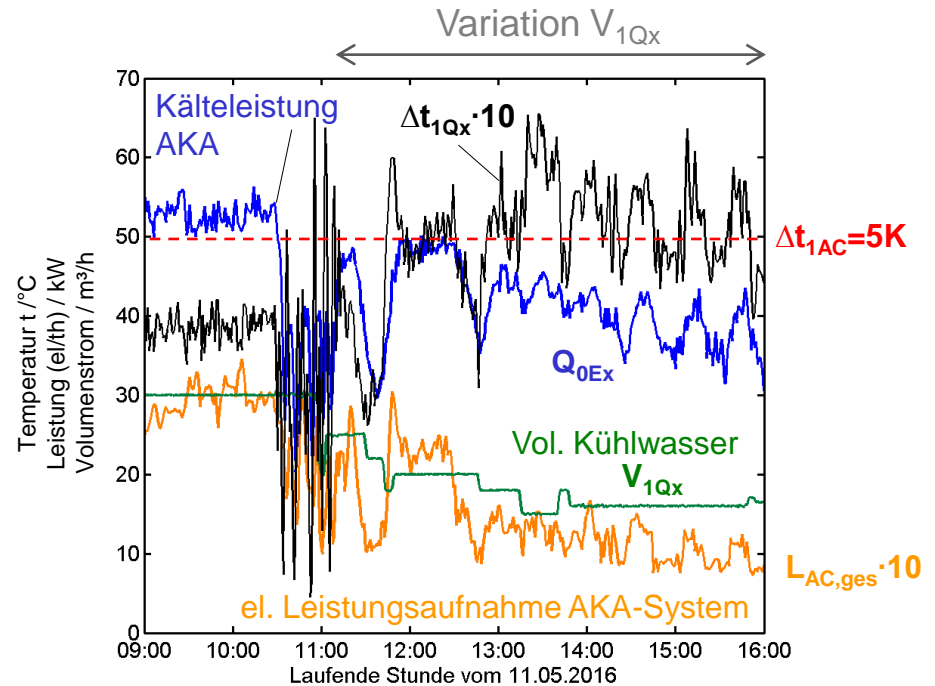
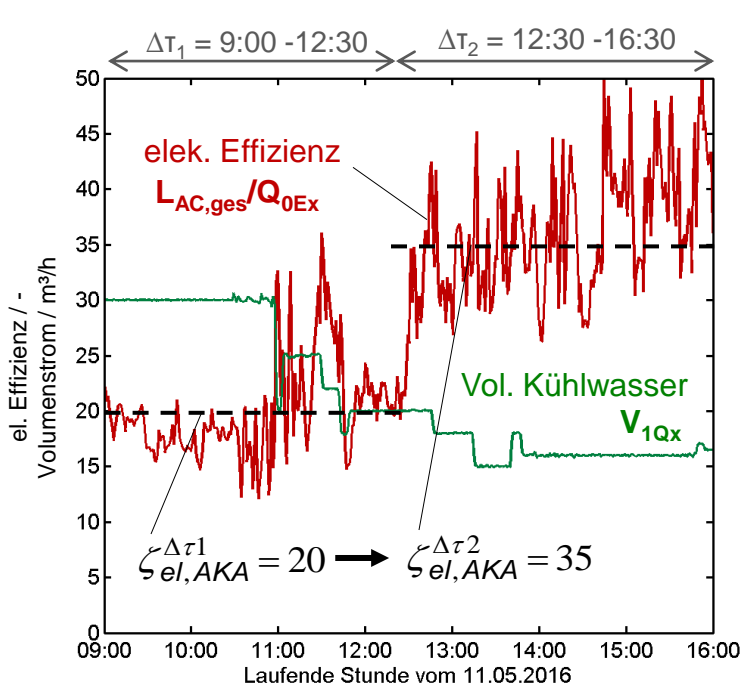


- Thermische Effizienz bei 0,63
- Elektrische Effizienz
  - AKA bei 13
  - KKA bei knapp 3
- PE-Effizienz (PE-Faktor)
  - AKA 4,5 (0,2)
  - KKA 1,1 (0,9)

# 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 ~ w<sup>3</sup>)
- 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.  $\text{CO}_2$  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.