

Ökonomische und ökologische Bewertung mitteltiefer Erdwärmesondenspeicher

*Der Geothermiekongress, Essen, 28. November 2018
Forum F5 - Wärmespeicher*



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Graduate School of
Energy Science
and Engineering

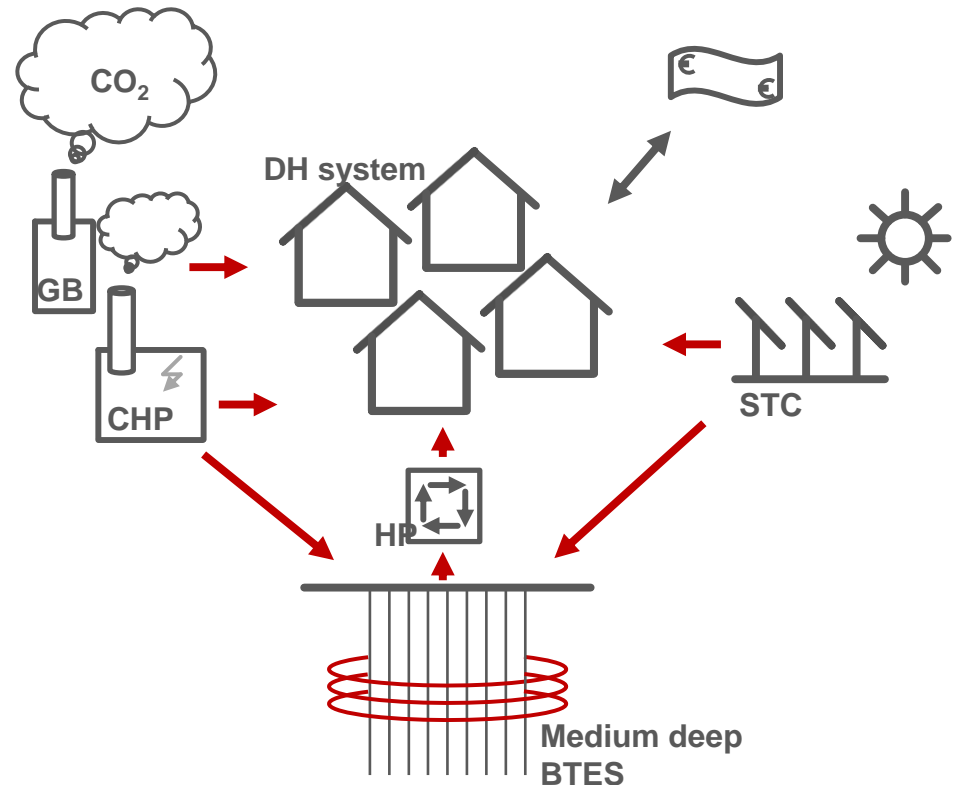
Bastian Welsch ^{1,3}
Laura Göllner-Völker ^{2,3}
Daniel O. Schulte ^{1,3}
Kristian Bär ¹
Liselotte Schebek ^{2,3}
Ingo Sass ^{1,3}

Technische Universität Darmstadt

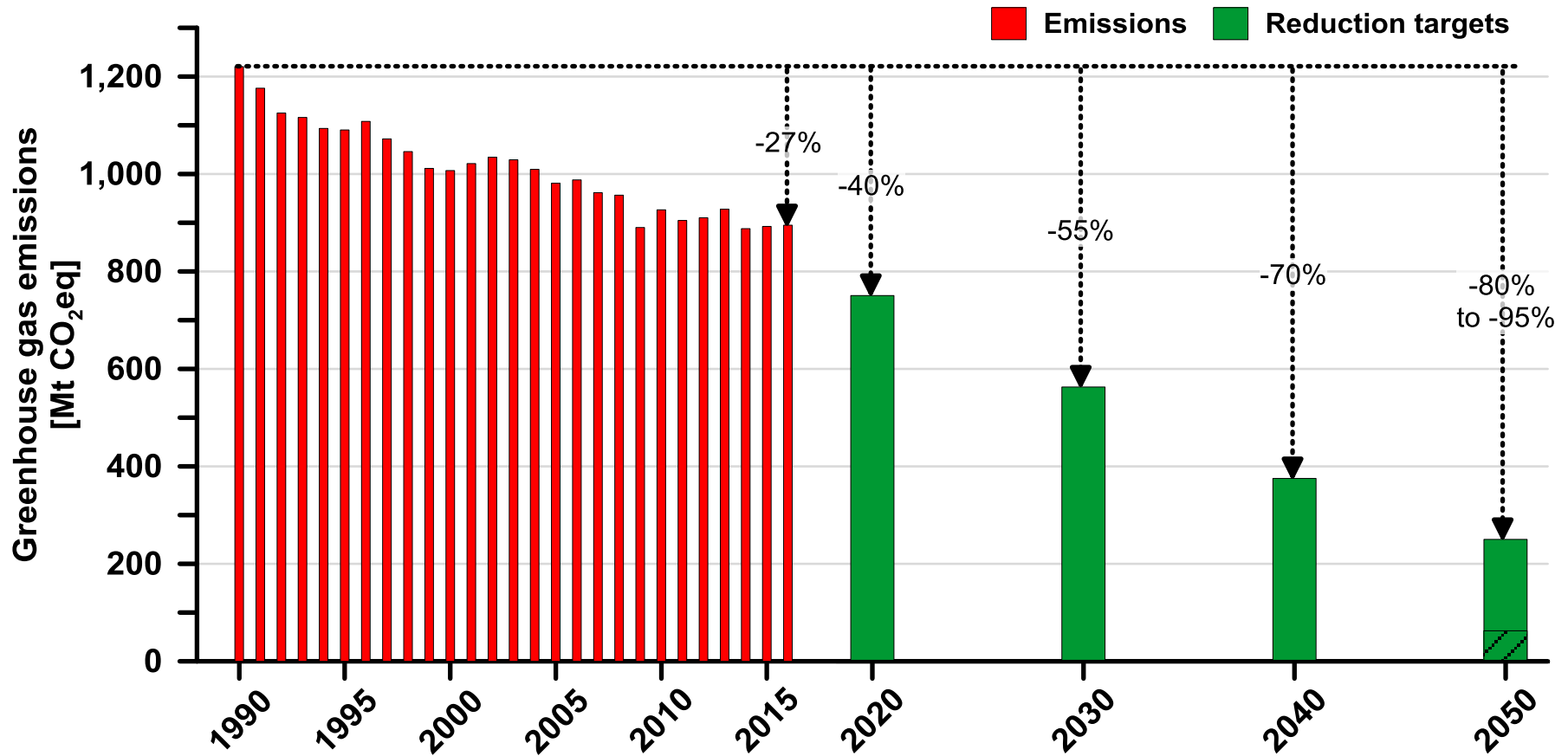
¹ Fachgebiet Angewandte Geothermie

² Fachgebiet Stoffstrommanagement und
Ressourcenwirtschaft

³ Darmstädter Exzellenz-Graduiertenschule für
Energiewissenschaft und Energietechnik

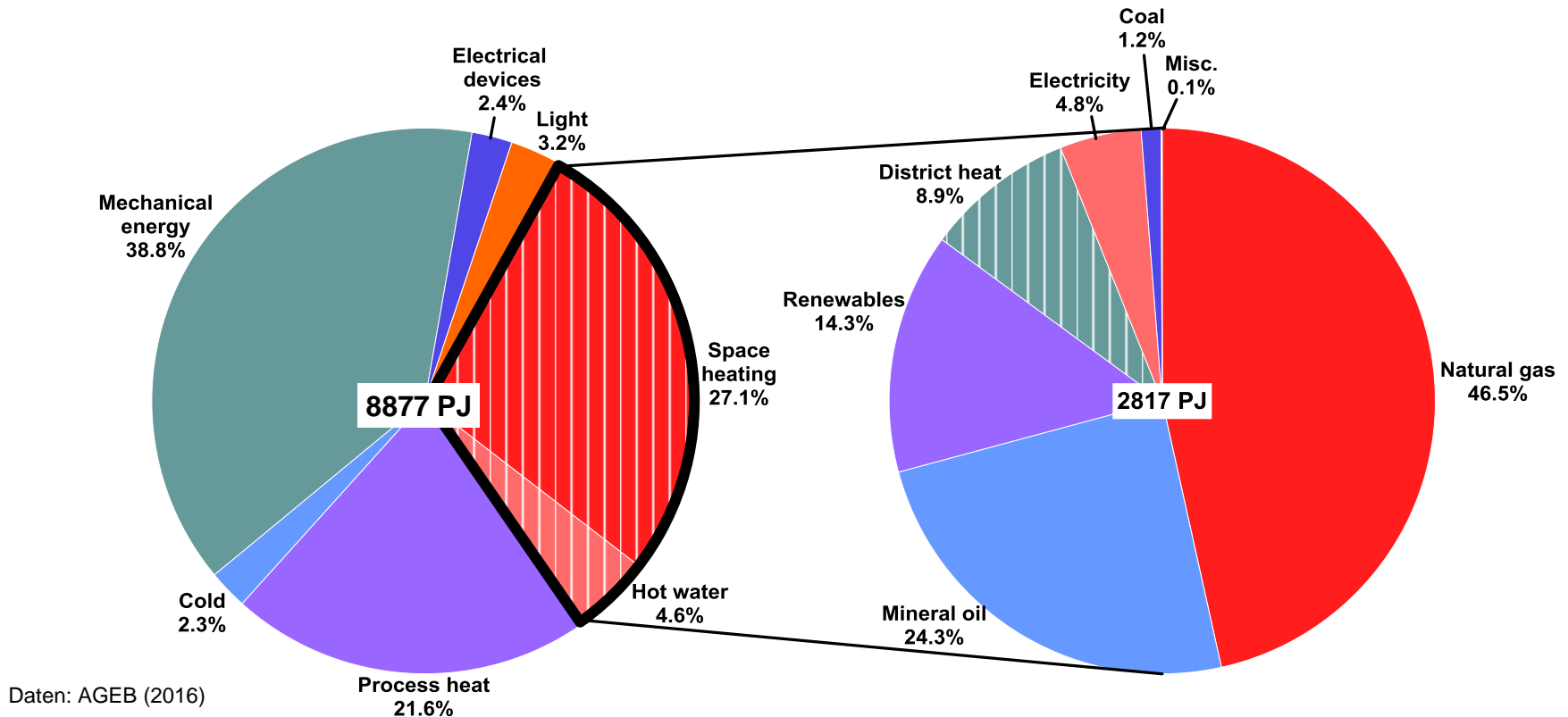


Treibhausgasemissionen und Reduktionsziele in Deutschland



Daten: UBA (2018) / Aktionsprogramm Klimaschutz 2020 (BMUB 2014) / Klimaschutzplan 2050 (BMUB 2016)

Endenergieverbrauch in Deutschland 2015



Daten: AGE B (2016)

Etwa 32 % für Raumwärme und Warmwasser

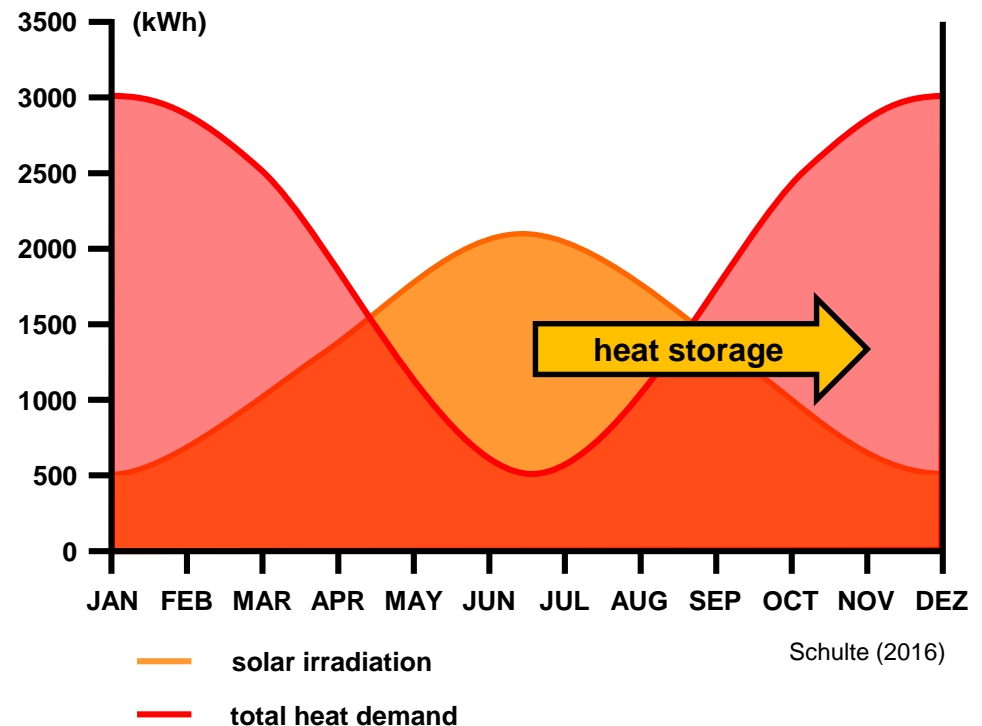
Davon deutlich mehr als 70 % aus fossilen Energieträgern

➔ Großes Potenzial für Verringerung der Treibhausgasemissionen

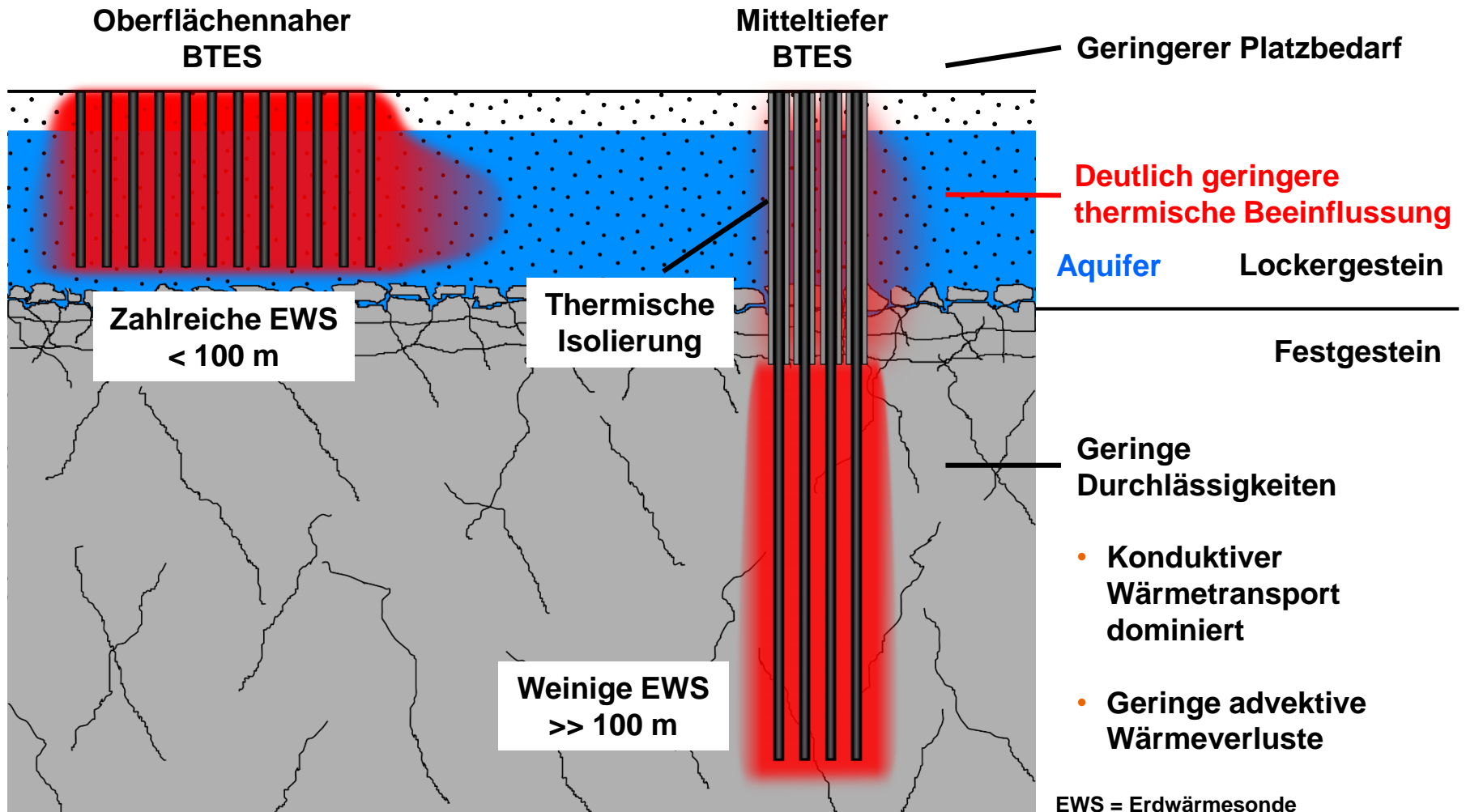
Zeitlicher Versatz von Wärmebedarf und erneuerbarer Wärmeerzeugung

- Sommer:
Erzeugungspotenzial
übersteigt Bedarf
- Winter:
Bedarf übertrifft
Erzeugungspotenzial
- Vergleichbares Problem
bei KWK
- Saisonale Wärmespeicher:
Verlagerung
überschüssiger Wärme in
Zeiten erhöhten Bedarfs

Jährlicher Energiebedarf eines
Einfamilienhauses und solare Einstrahlung



Konzept mitteltiefer Erdwärmesondenspeicher (BTES)

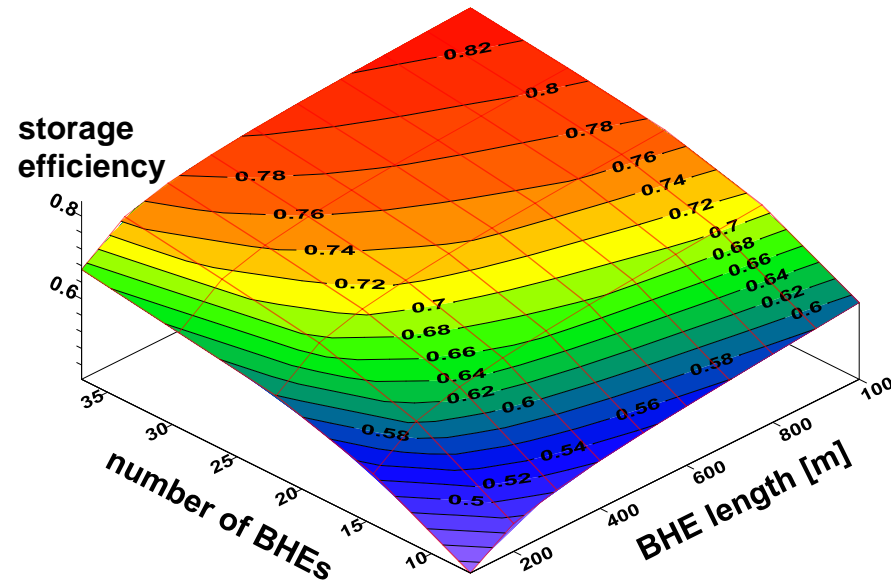


- **Potenzial zur saisonalen Wärmespeicherung**
- **Quantifizierung der thermischen Beeinflussung des Grundwassers und Vergleich zu oberflächennahen Systemen**
- **Ökonomische und ökologische Auswirkung der Integration von EWSS in Fernwärmenetze**



Thermische Leistungsfähigkeit

Sondenabstand = 5 m
30. Betriebsjahr



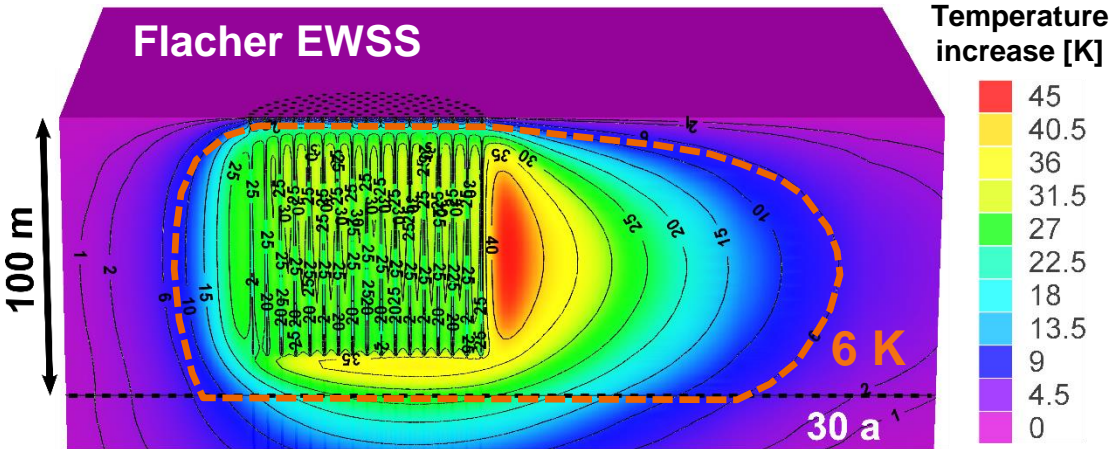
Welsch et al. (2016)

- Speicherkapazitäten von 15 GWh/a und mehr sind möglich.
 - Speichereffizienzen steigen mit der Größe der Speicher signifikant an.
 - Speichereffizienzen von über 80 % können erreicht werden.
- ➔ **Mitteltiefe EWSS eignen sich hervorragend für die saisonale Wärmespeicherung.**

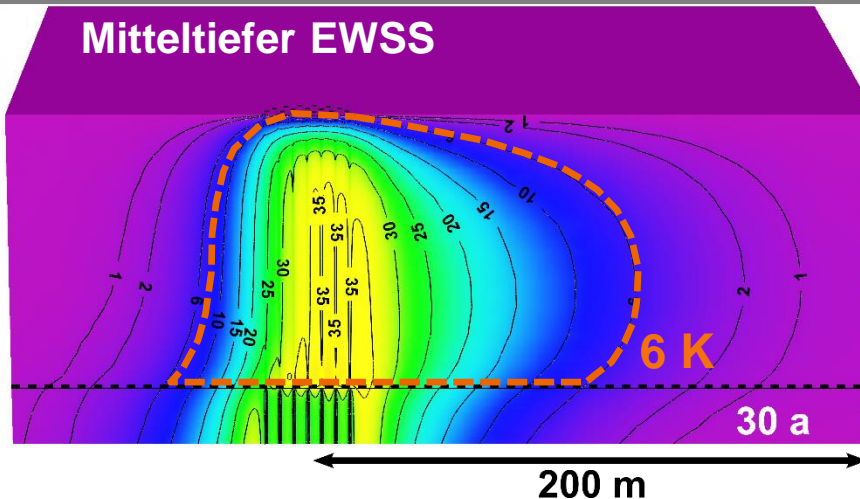
Beeinflussung oberflächennaher Aquifere – Nach 30 Betriebsjahren

Anstieg der Untergrundtemperatur

Flacher EWSS



Mitteltiefer EWSS



Relative Wärmeverluste zum Aquifer

38,9 %

-87 %

5,0 %

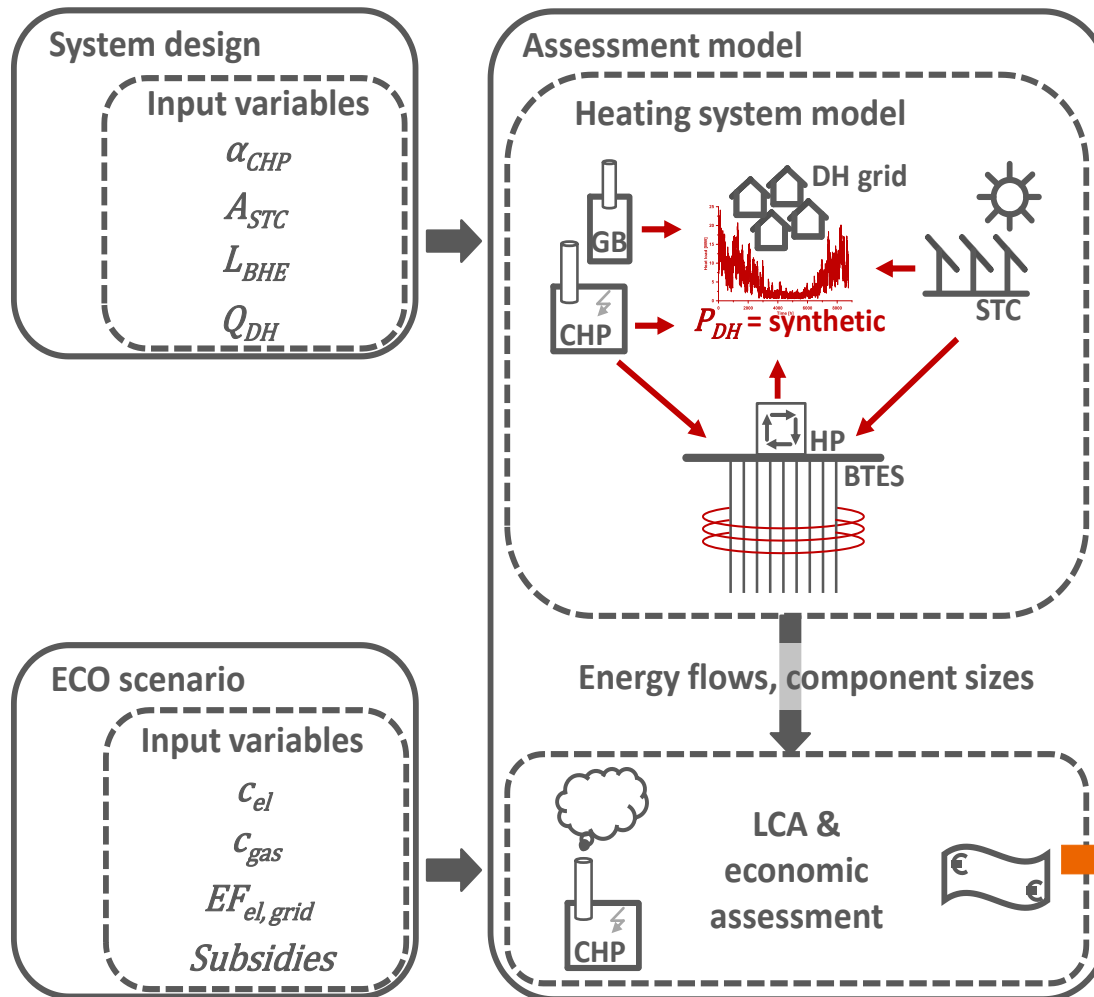
Beeinflusstes Volumen ($\Delta T > 6 \text{ K}$)

$2,71 \cdot 10^6 \text{ m}^3$

-72 %

$0,77 \cdot 10^6 \text{ m}^3$

Ökologische und ökonomische Betrachtung – Entwicklung eines Bewertungs-Tools



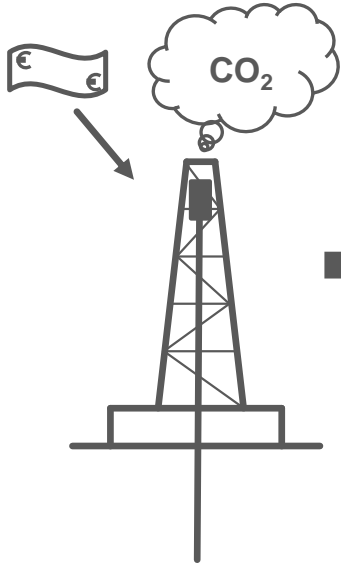
- **Energiebilanzmodell des Heizsystems**
- **Energieflüsse zwischen den Komponenten des Systems werden auf stündlicher Basis ermittelt.**

Berechnung der Treibhausgasemissionen und Wärmekosten mittels Lebenszyklusbetrachtung

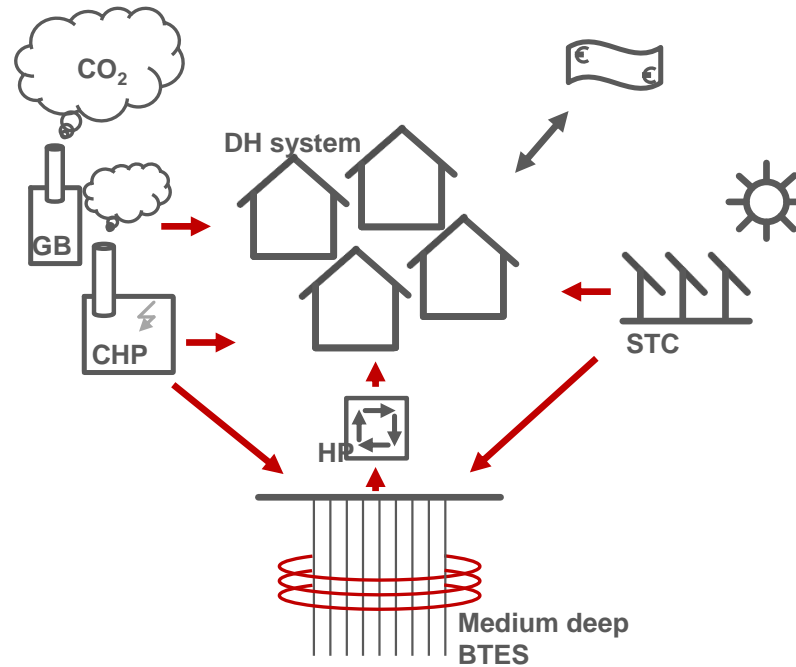
Welsch et al. (2018)

Lebenszyklusbetrachtung

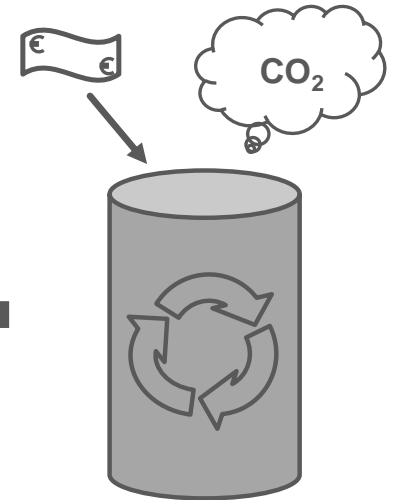
Produktionsphase



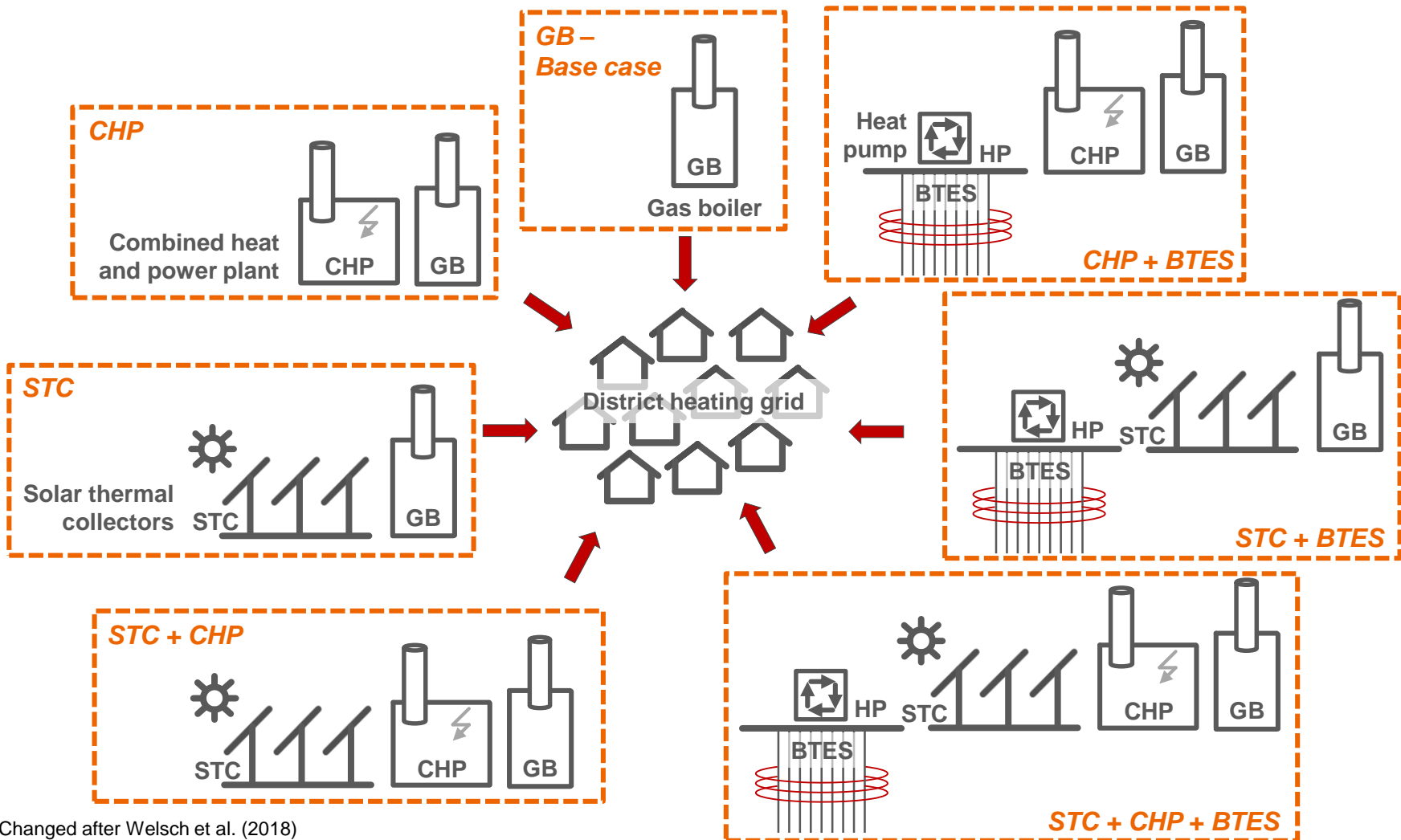
Betriebsphase



Entsorgung



Vergleichende Bewertungsstudie – Systemkombinationen



Changed after Welsch et al. (2018)

Vergleichende Bewertungsstudie – Variation der einzelnen Komponenten

Bemessungs- größe	Variable			Umfang		Schritt- größe
				von	bis	
BTES-Größe	EWS-Länge*	L_{BHE}	[m]	0	1.000	50
Größe Solarthermie- anlage	Kollektorfläche	A_{STC}	[m ²]	0	100.000	5.000
BHKW-Größe	Anteil BHKW-Wärme an Spitzenlast	α_{CHP}	[-]	0	1	0,05

*Sondenanzahl konstant bei 37

Vollfaktorieller Versuchsplan → 9261 unterschiedliche Systemauslegungen

Vergleichende Bewertungsstudie – Ökonomisch-ökologische Szenarien

Betrachtungszeitraum 30 Jahre

Szenario	Gaspreis [ct/kWh]	Einspeise- vergütung BHKW- Strom [ct/kWh]	Strompreis Industrie [ct/kWh]	Emissionsfaktor Strommix [g/kWh]	Berück- sichtigung Subventionen
BAU	3,08 ¹	3,66 ²	13,08 ³	532 ⁴	
BAU SUB	3,08 ¹	3,66 ²	13,08 ³	532 ⁴	✓
EVO	prognostiziert	prognostiziert	prognostiziert	prognostiziert	
EVO SUB	prognostiziert	prognostiziert	prognostiziert	prognostiziert	✓

¹Durchschnittlicher Gaspreis für Industrie in Deutschland 2015 (Statistisches Bundesamt, 2017)

³Durchschnitt für 2015 (Statistisches Bundesamt, 2017)

²3,16 ct/kWh Durchschnitt für Grundlast am EPEX Spot 2015 (European Energy Exchange AG, 2017)

⁴Strommix Deutschland 2015 (IINAS, 2016)

plus 0.5 ct//kWh für vermiedene Netzkosten

Berücksichtigung von Subventionen für

- **Stromeinspeisung aus KWK und**
- **Installation von Solarkollektoren und Wärmespeichern**

Ökonomische Betrachtung

- **Wärmegestehungskosten (engl. Levelized Cost of Heat, LCOH)**

$$LCOH = \frac{\sum_{a=0}^{a_{end}} (I_a + M_a + F_a - R_a) \cdot (1 + r)^{-a}}{\sum_{a=0}^{a_{end}} Q_a \cdot (1 + r)^{-a}} \cdot 100$$

Ökobilanzierung (engl. Life Cycle Assessment, LCA)

- **Treibhauspotenzial (engl. Global Warming Potential, GWP) [t CO₂ eq]**
- **Emissionsfaktor (EF) [g CO₂ eq/kWh]**

Multikriterielles Optimierungsproblem

Zwei prinzipiell unabhängige Zielfunktionen

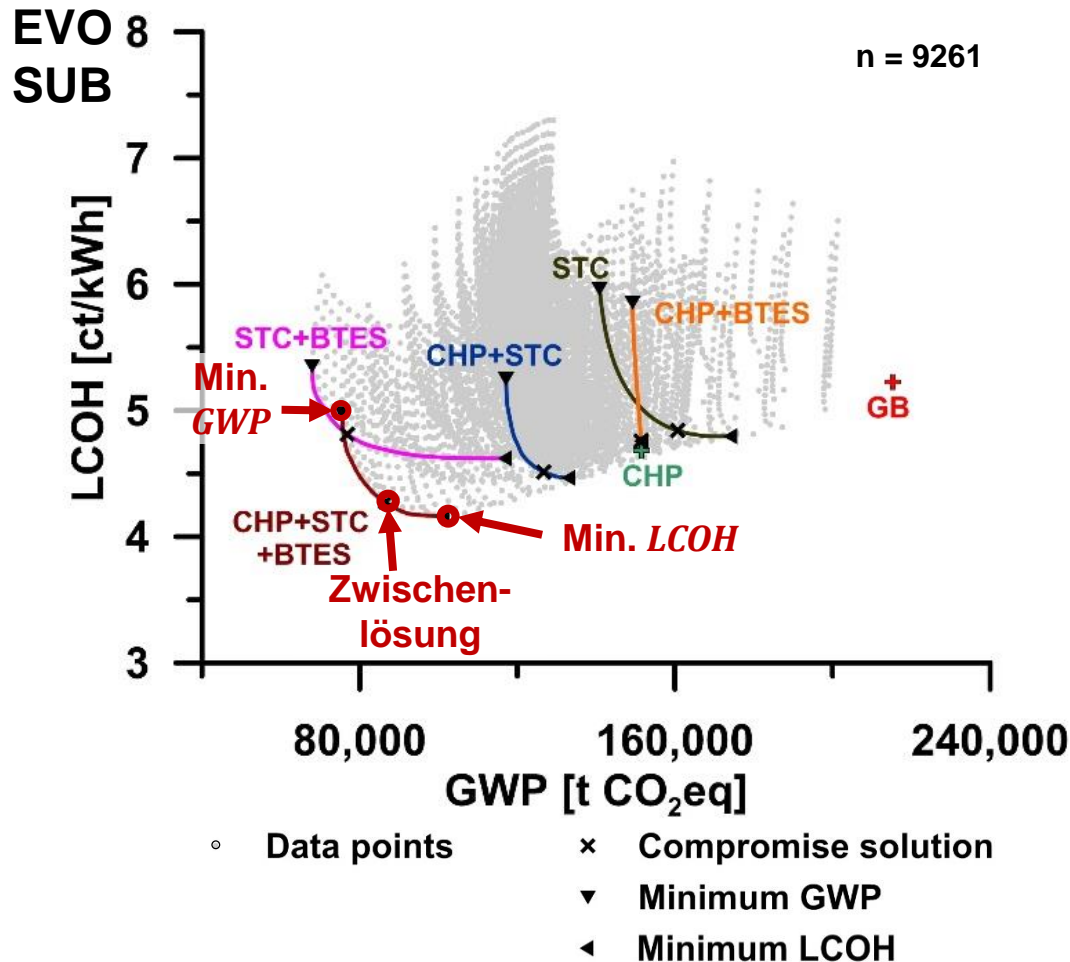
$$\min_{L_{BHE}, A_{STC}, \alpha_{CHP} \in \mathbb{R}^3} LCOH(L_{BHE}, A_{STC}, \alpha_{CHP})$$

$$\min_{L_{BHE}, A_{STC}, \alpha_{CHP} \in \mathbb{R}^3} GWP(L_{BHE}, A_{STC}, \alpha_{CHP})$$

$$\begin{aligned} \text{subject to} \quad & 0 \text{ m} \leq L_{BHE} \leq 1,000 \text{ m} \\ & 0 \text{ m}^2 \leq A_{STC} \leq 1,000 \text{ m}^2 \\ & 0 \leq \alpha_{CHP} \leq 1 \end{aligned}$$

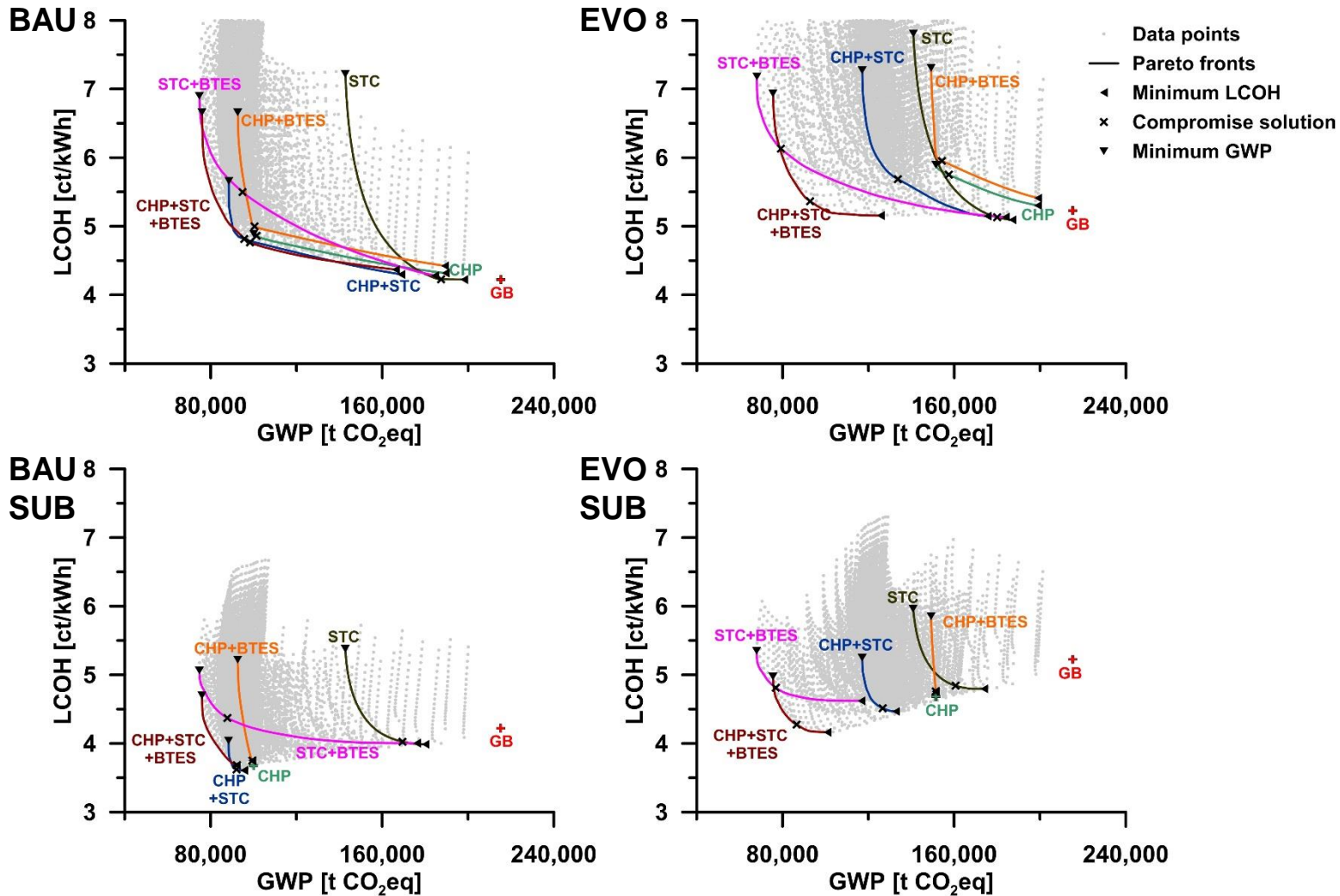
- ➔ **Ermittlung Pareto-effizienter Lösungen:**
Systemauslegungen, für die eine Verbesserung der einen Zielgröße immer mit einer Verschlechterung der jeweils anderen Zielgröße einhergeht.

Vergleichende Bewertungsstudie – Datenprozessierung

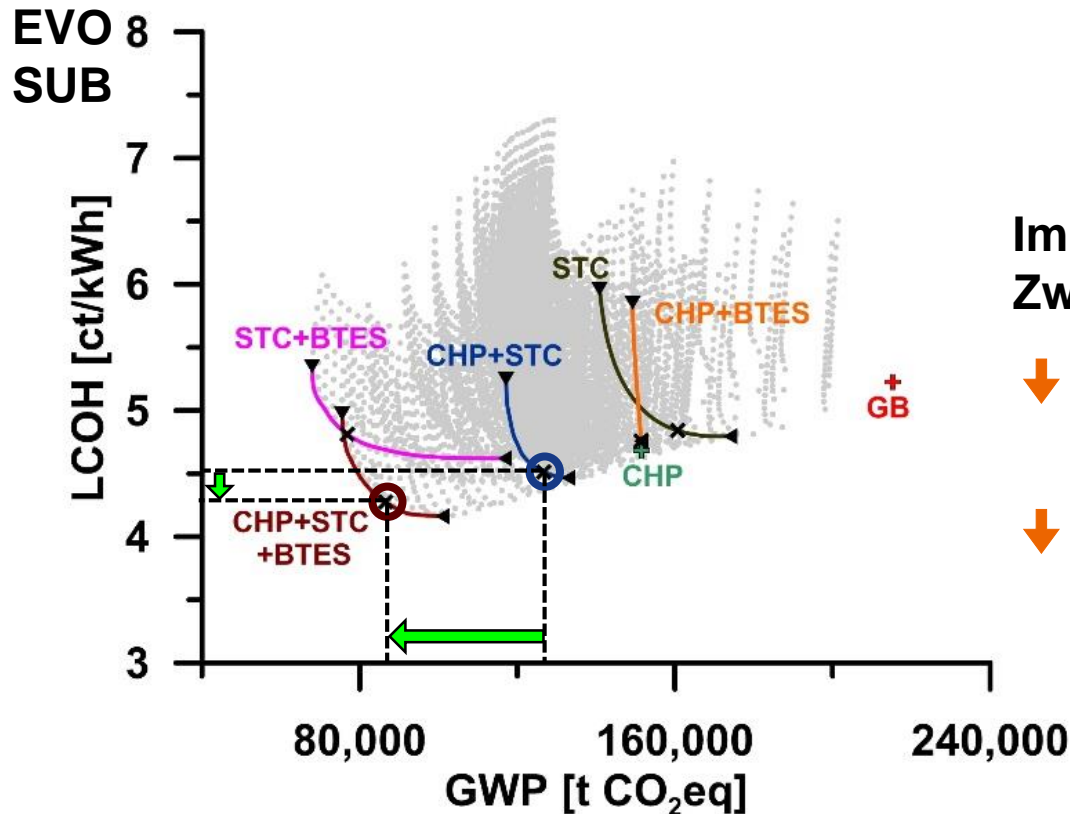


- Identifikation von Pareto-Fronten
- Identifikation dreier charakteristischer Pareto-effizienter Systeme:
 - Minimum *LCOH*
 - Minimum *GWP*
 - Zwischenlösung: Punkt, an dem die relative Treibhausgasreduktion dem relativen Anstieg der Wärmekosten entspricht.

Ergebnisse stark abhängig von den ökonomisch-ökologischen Annahmen



Verringerung der Treibhausgasemissionen und der Wärmekosten durch Integration von EWSS



- Data points
- Pareto fronts
- × Compromise solution
- ▼ Minimum GWP
- ◀ Minimum LCOH

Im Vergleich zur effizientesten Zwischenlösung ohne Speicher:

- ↓ Verringerung Treibhausgasemissionen um 32 %
- ↓ Verringerung der Wärmegestehungskosten um 5,3 %

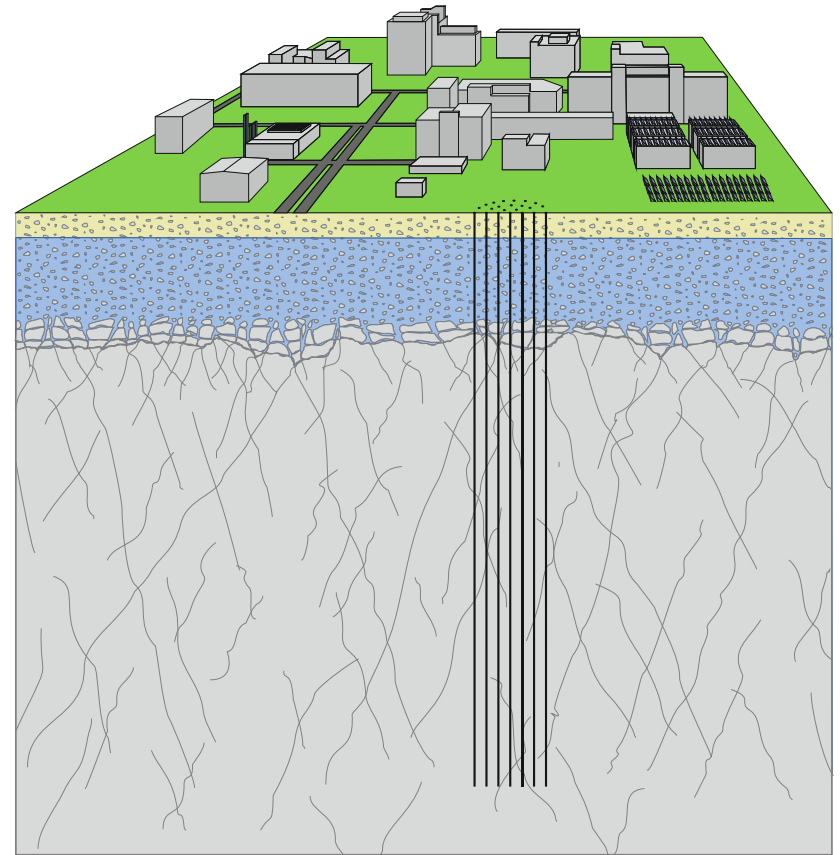
Mitteltiefe Erdwärmesondenspeicher

- eignen sich hervorragend für die saisonale Wärmespeicherung und
- können die thermische Beeinträchtigung oberflächennaher Grundwasservorkommen in Vergleich zu flachen Systemen deutlich reduzieren.

Der wirtschaftliche und ökologische Nutzen der Systeme hängt stark von den ökonomisch-ökologischen Rahmenbedingungen ab.

Bei steigenden Energiepreisen und einer Erhöhung des Anteils regenerativer Energien im Strommix stellen BTES in Verbindung mit Solarthermie eine **wirtschaftliche und saubere Alternative** zur KWK dar.

- Verbindung des Bewertungs-Tools mit gekoppelten numerischen Modellen
 - Demonstration der technischen Umsetzbarkeit
- ➔ **Forschungsskizze zum Bau eines Demonstrators am Campus TU Lichtwiese ist eingereicht.**



Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!

Förderung



Graduate School of
**Energy Science
and Engineering**

Literatur

- AGEb (2016): Anwendungsbilanzen für die Endenergiesektoren in Deutschland in den Jahren 2013 bis 2015. Studie beauftragt vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Projektnummer: 072/15., Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V.
- BMUB (2014): Aktionsprogramm Klimaschutz 2020, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
- BMUB (2016): Klimaschutzplan 2050 - Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
- IINAS - International Institute for Sustainability Analysis and Strategy (2016): GEMIS model and database, version 4.93, *in* Strategy, IfSAa, ed., Darmstadt.
- Schlesinger M, Hofer P, Kemmler A, Kirchner A, Koziel S, Ley A, Piégsa A, Seefeldt F, Straßburg S, Weinert K, Lindenberger D, Knaut A, Malischek R, Nick S, Panke T, Paulus S, Tode C, Wagner J, Lutz C, Lehr U and Ulrich P (2014): Entwicklung der Energiemärkte – Energiereferenzprognose, Projekt Nr. 57/12, <http://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/entwicklung-der-energiemaerkte-energiereferenzprognose-endbericht.html>, accessed 07.06.2017.
- Schulte DO (2016): Simulation and Optimization of Medium Deep Borehole Thermal Energy Storage Systems, Dissertation, Technische Universität Darmstadt, XXII, 132 p.
- UBA (2018): National Trend Tables for the German Atmospheric Emission Reporting 1990-2016, Dessau, Umweltbundesamt.
- Welsch B, Rühaak W, Schulte DO, Bär K and Sass I (2016): Characteristics of medium deep borehole thermal energy storage, *International Journal of Energy Research*, v. 40, no. 13, p. 1855-1868, doi: 10.1002/er.3570.
- Welsch B, Göllner-Völker L, Schulte DO, Bär K, Sass I and Schebek L (2018): Environmental and Economic Assessment of Borehole Thermal Energy Storage in District Heating Systems, *Applied Energy*, v. 216, p. 73–90, doi:10.1016/j.apenergy.2018.02.011.