



**Hardware-in-the-loop
Untersuchungen**

—

**Methodik,
Randbedingungen,
funktionale
Systemanalyse und
Simulationsvalidierung**

Daniel Eggert
ISFH

Hardware-in-the-loop (HiL)



Dynamische Echtzeit-Laboruntersuchung eines Systems anhand von repräsentativen Betriebssituationen unter realitätsgetreuen Randbedingungen

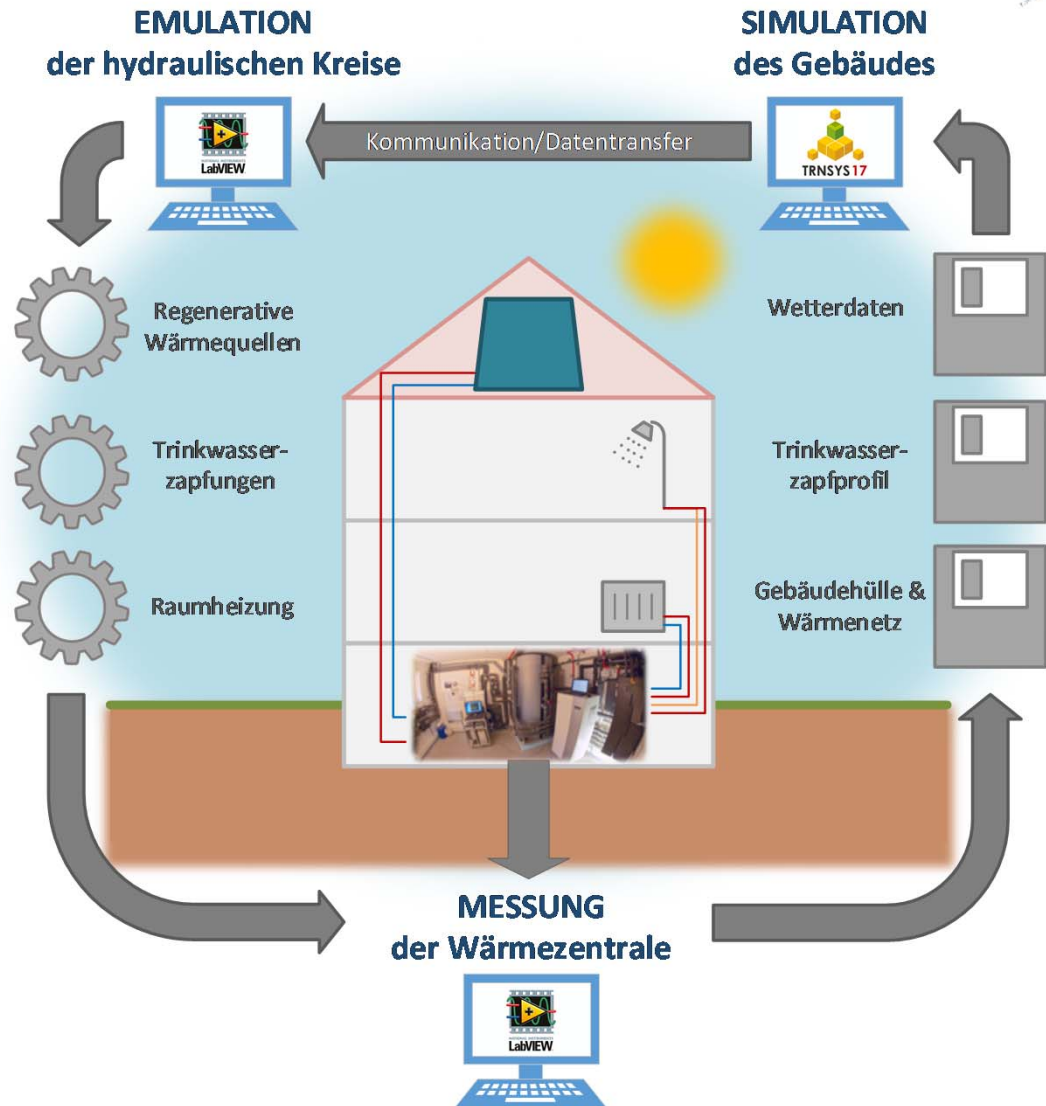
Projektbezogen:

Dynamische Echtzeit-Laboruntersuchung an solar unterstützten Wärmezentralen für ein Mehrfamilienhaus in Deutschland anhand von jahreszeitlich repräsentativen Tagen

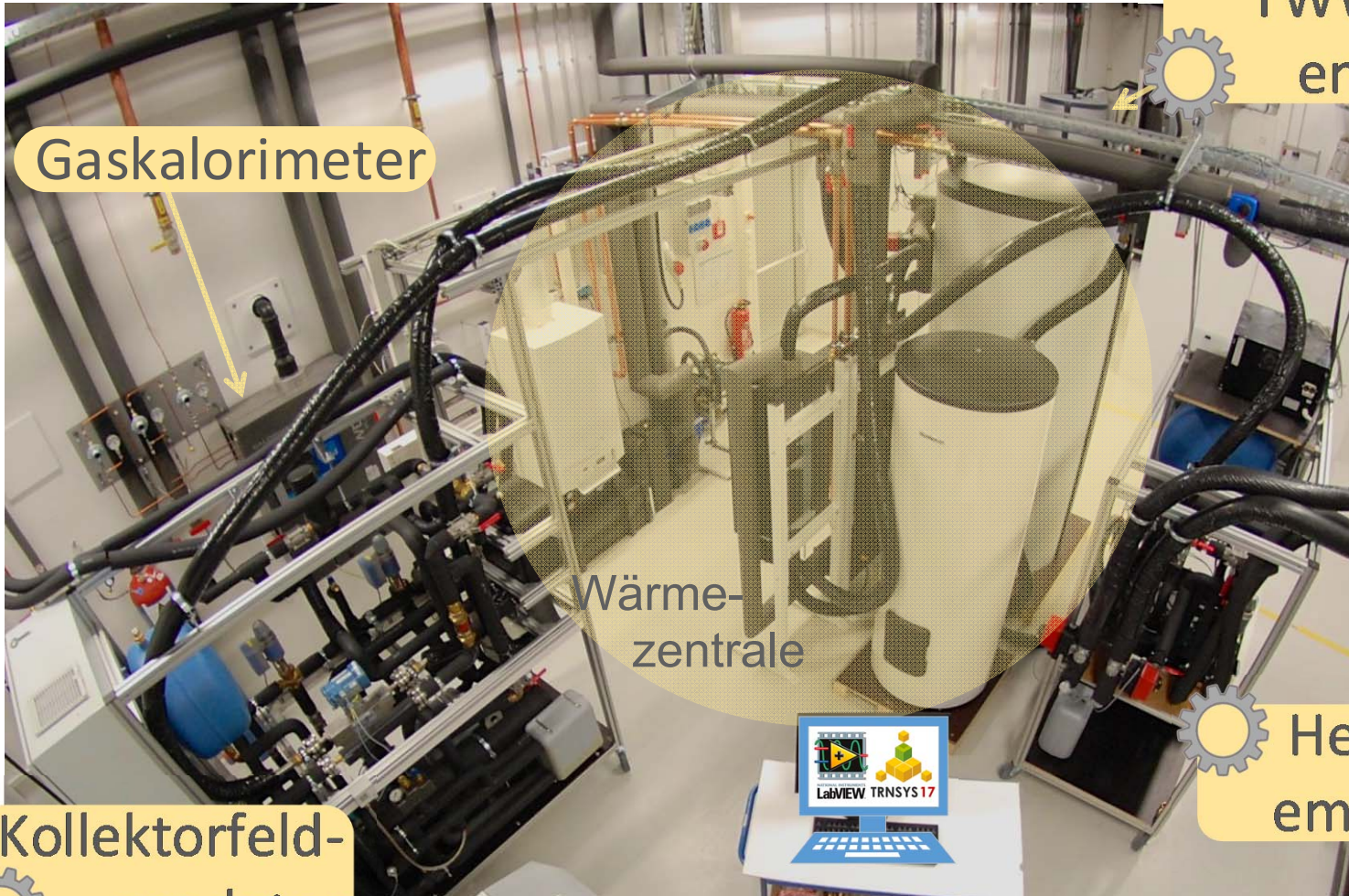
Ziel:

Bewertung und Optimierung von Wärmezentralen

Hardware-in-the-loop (HiL)



HiL-Prüfstand am ISFH



Gaskalorimeter

TWW-Lastemulator

Wärmezentrale

Heizlastemulator

Kollektorfeldemulator





Simulationsrandbedingung: Gebäudehülle und Verteilnetz



Gebäudehülle

Mehrfamilienhaus (MFH) basierend auf TRNSYS-Modell aus „MFH-re-Net“[1]

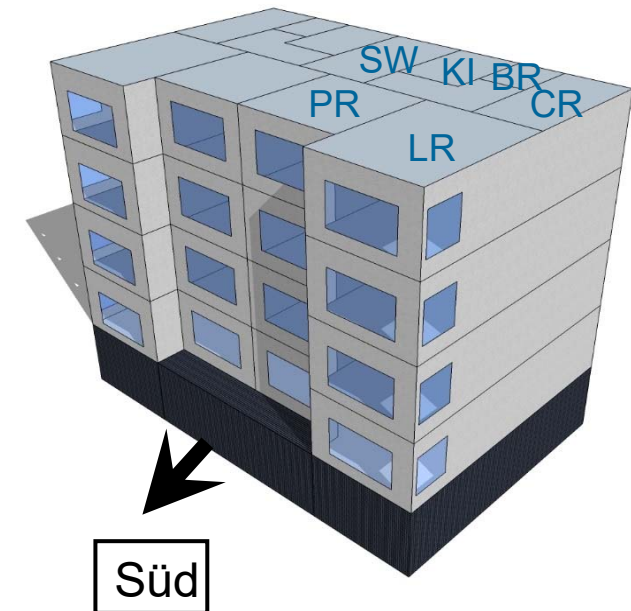
- Abbildung in TRNSYS (ISFH) und MATLAB (HSD)
- 8 Wohneinheiten (8 / 16 HiL)
- Energiebedarf: Saniert, 50 kWh/m²a (+ Unsaniert, 180 kWh/m²a HiL)

Verteilnetz

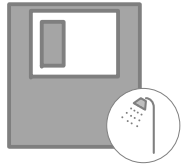
- 4-Leiter / 2-Leiter, abhängig von Wärmezentrale
- Ringnetzverteilung je Wohnung
- Radiatorheizung

Kollektorfeld (Standardflachkollektor)

- 20 / 24 m² (HiL)
- 14 m² bis 33 m² (Jahressimulation)



[1] Oliver Mercker, Oliver Arnold, Ansätze zur Reduktion der konventionell erzeugten Wärmeverteilverluste in solar unterstützten Mehrfamilienhäusern, BMWi-Förderkennzeichen: 03ET1194A

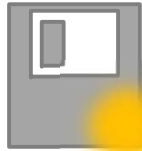


Simulationsrandbedingung: Trinkwasserzapfprofil



- Zapfvolumen: 55 l/d (pro Wohneinheit), 33 l/d (pro Person)
 - Gleichzeitigkeit: ca. 20%
- Für Jahressimulation realitätsnahes globales Jahresprofil generiert [2]
- Für HiL ein repräsentatives Tagesprofil ausgewählt
- Kaltwassertemperatur: konstant 10°C
 - Warmwassertemperatur: minimal 60°C
 - Warmwasser-Zapftemperatur: 45°C
 - Zirkulationsrücklauftemperatur: minimal 55°C, sofern keine andere zulässige Maßnahme zur Legionellen-Prävention gegeben
 - Zirkulationszeit: 24 h
 - Zirkulationsvolumenstrom: 150 l/h (8WE)

[2] Jordan U., Vajen K., DHW-calc: Computerprogramm zur Generierung von Trinkwasser-Zapfprofilen auf statistischer Basis, Universität Kassel



Simulationsrandbedingung: Wetterdaten



Untersuchung bei typischen Betriebsbedingungen

→ repräsentative meteorologischen Daten notwendig

- Standort: Zürich, Meteonorm

Für HiL

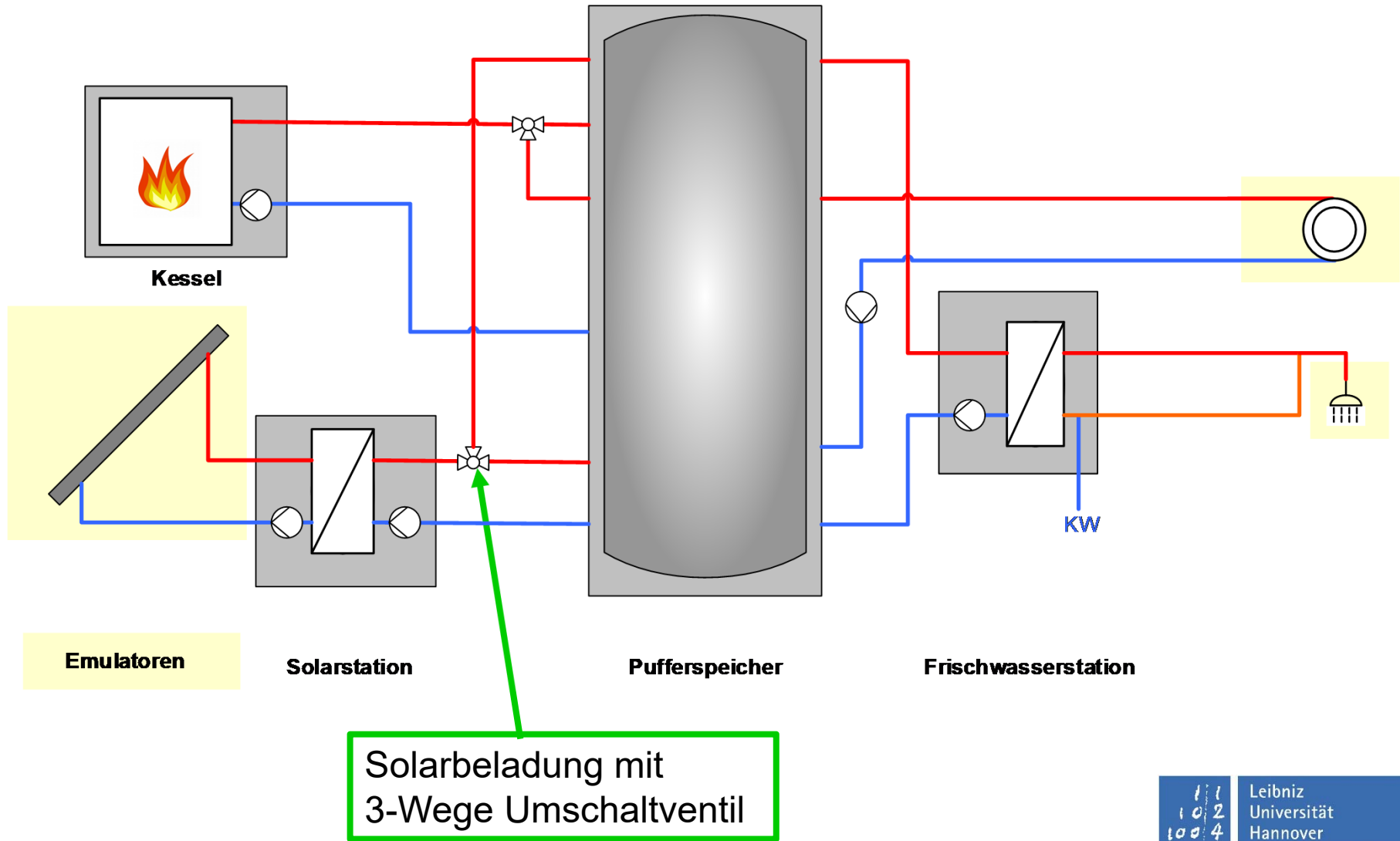
Auswahlkriterien für repräsentative Tage → **Typtage**

- Tagesmittelwerte der Umgebungstemperatur
- clearness factor bzw. K_T (= Globalbestrahlungsstärke / Extraterrestrische Strahlung)

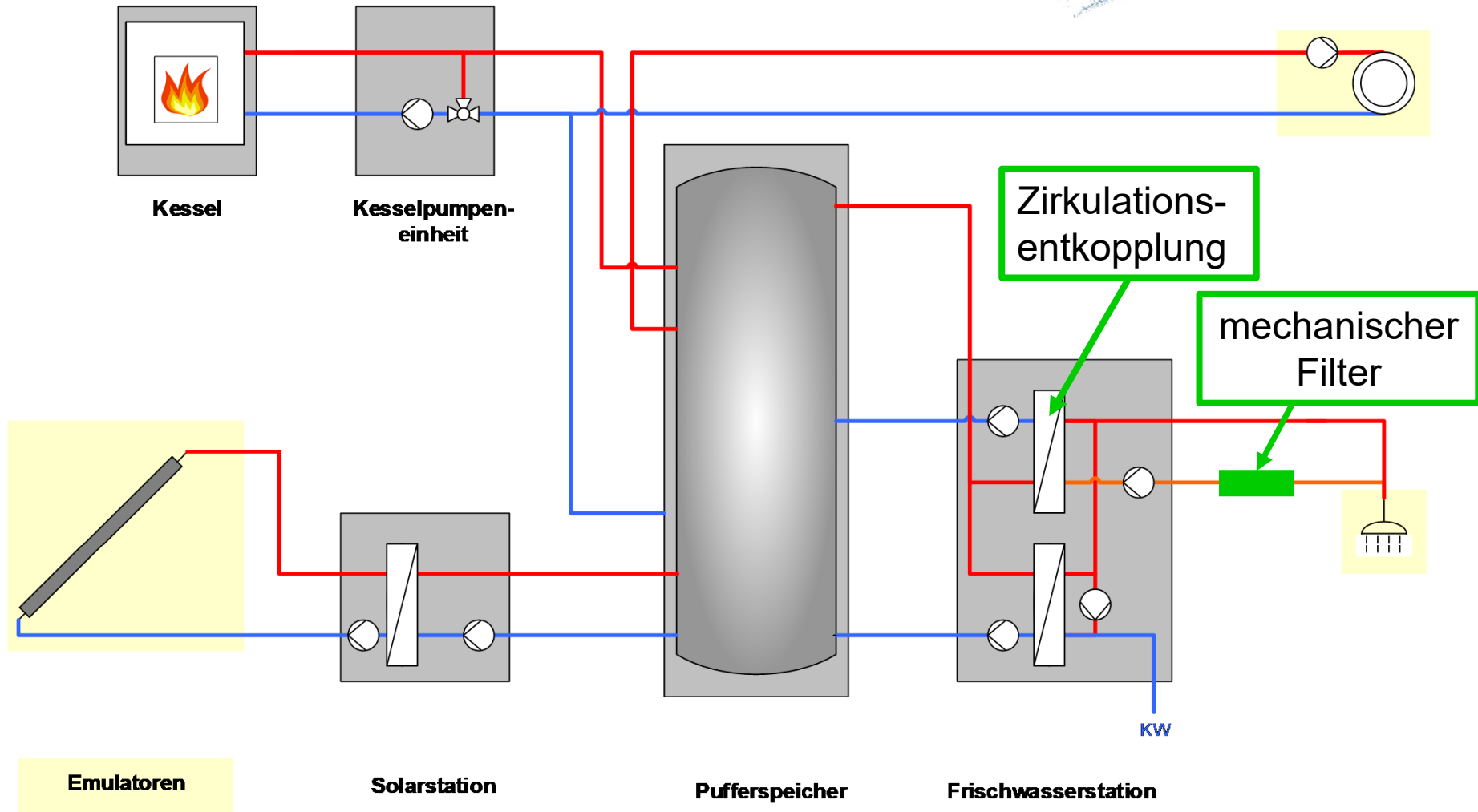
Auswahl

- Auswahlverfahren mit Clusteranalyse
- Typtage für: Winter / Sommer / Übergangszeit jeweils sonnig / bedeckt
- Zusätzlicher Tag mit höchster Heizlast sowie sonnigster warmer Tag für Extremwetterlage

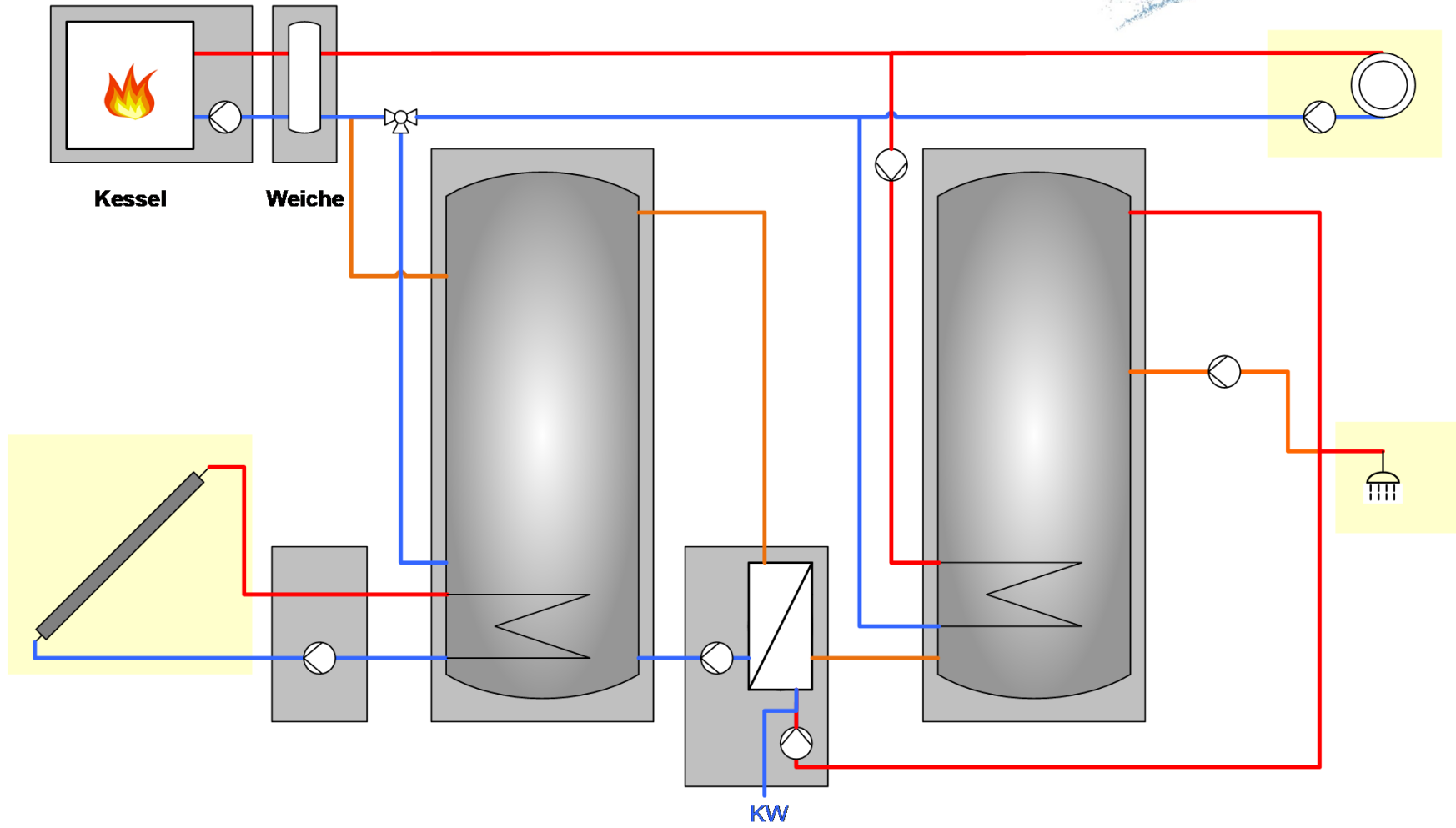
Konzept 1: Frischwasserstation



Konzept 1: Frischwasserstation mit Zirkulationsentkopplung und Ultrafiltration



Konzept 2: Durchlaufsystem + monovalenter WW-Speicher



Emulatoren

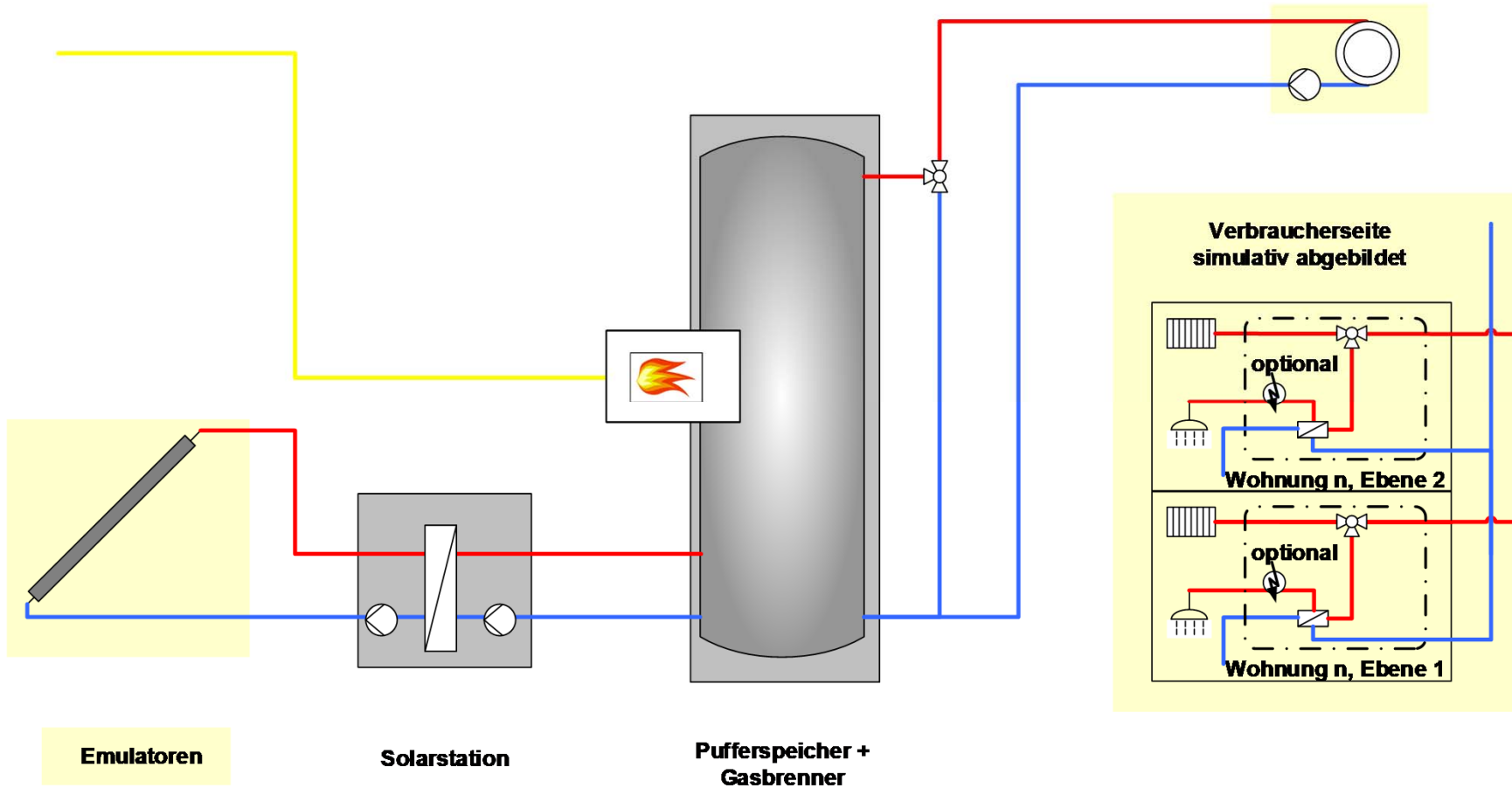
Solarstation

Solarspeicher

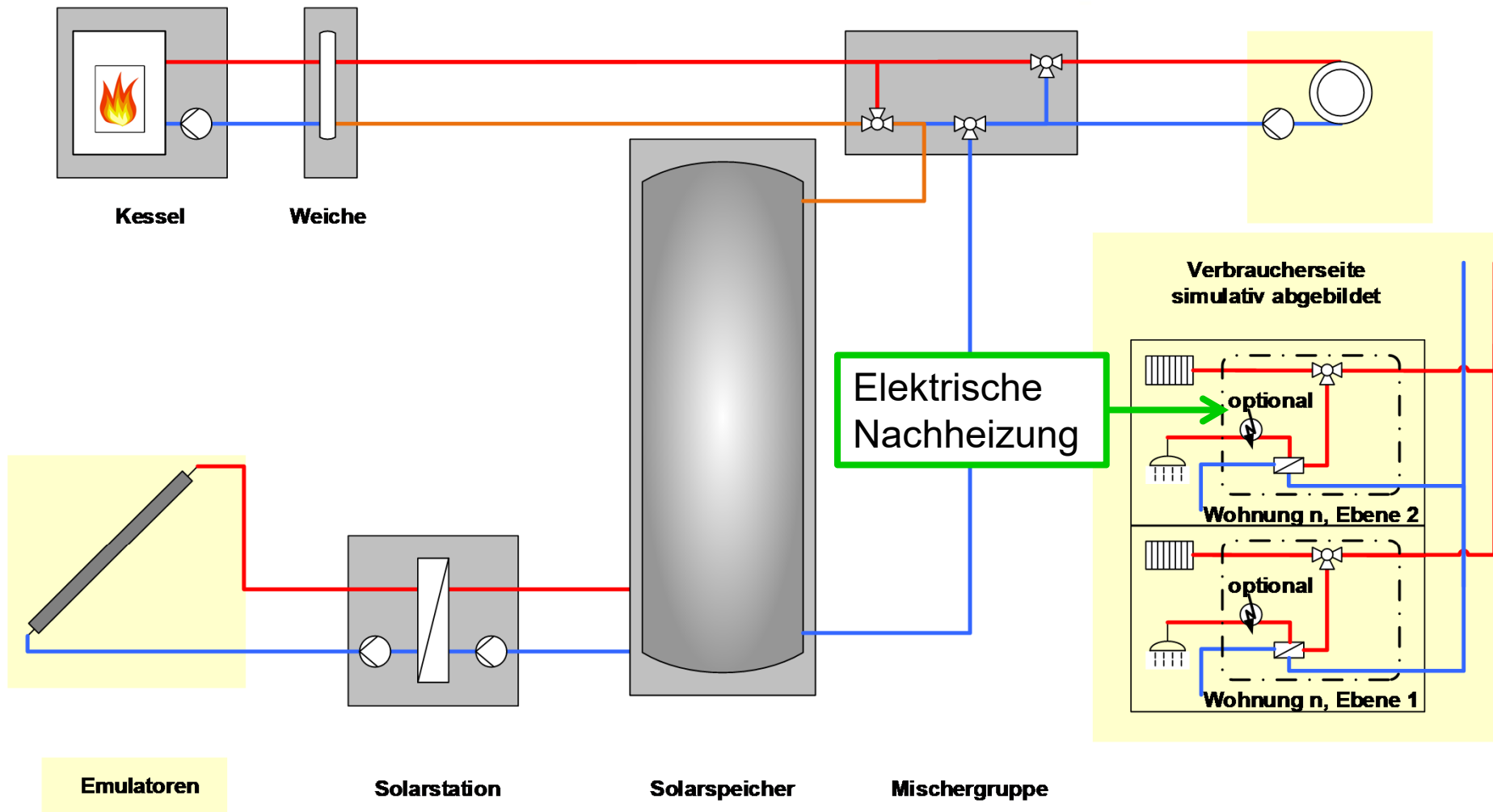
Frischwasserstation

Trinkwasserspeicher

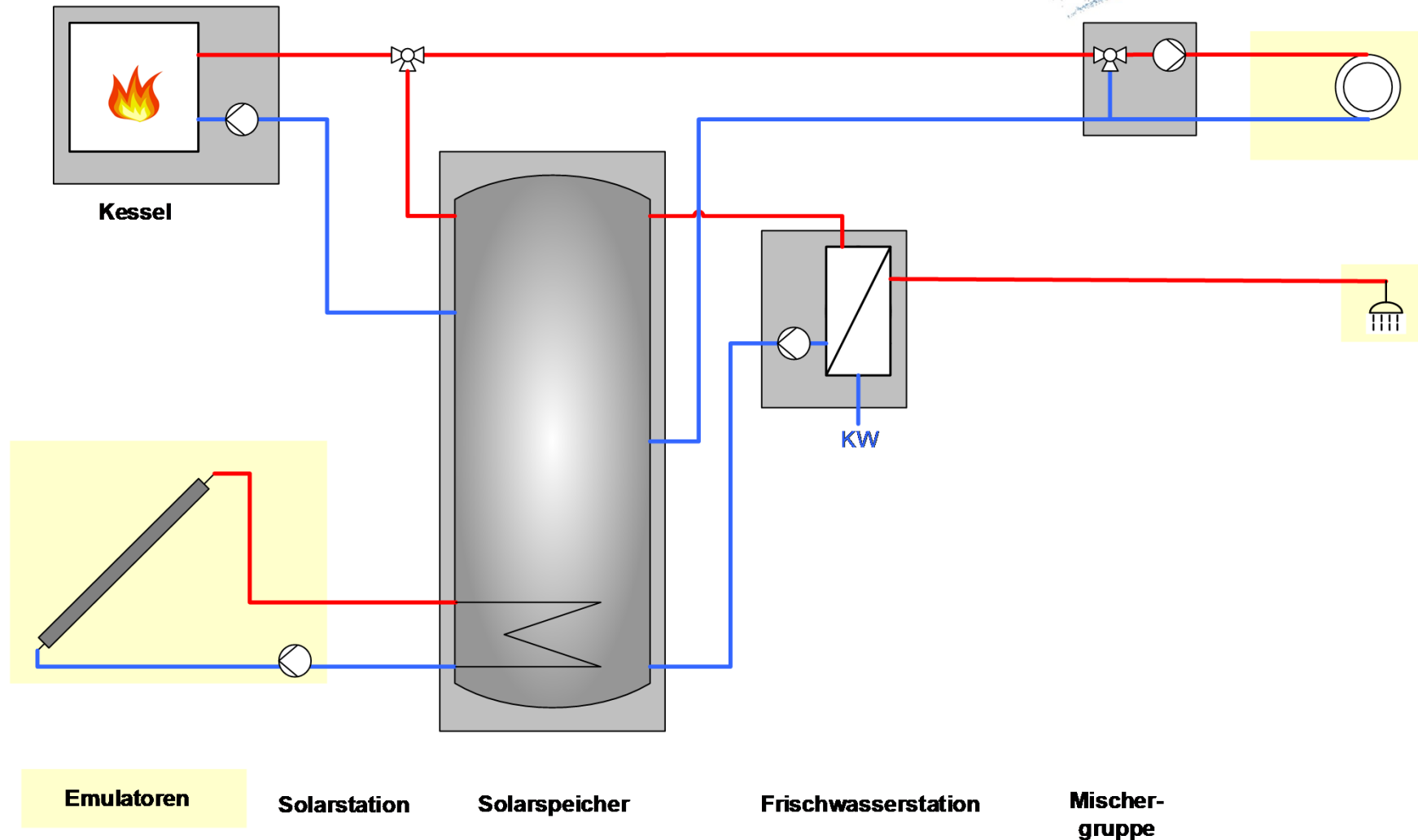
Konzept 8a: 2-Leitersystem mit direkt nachgeheiztem bivalentem Pufferspeicher

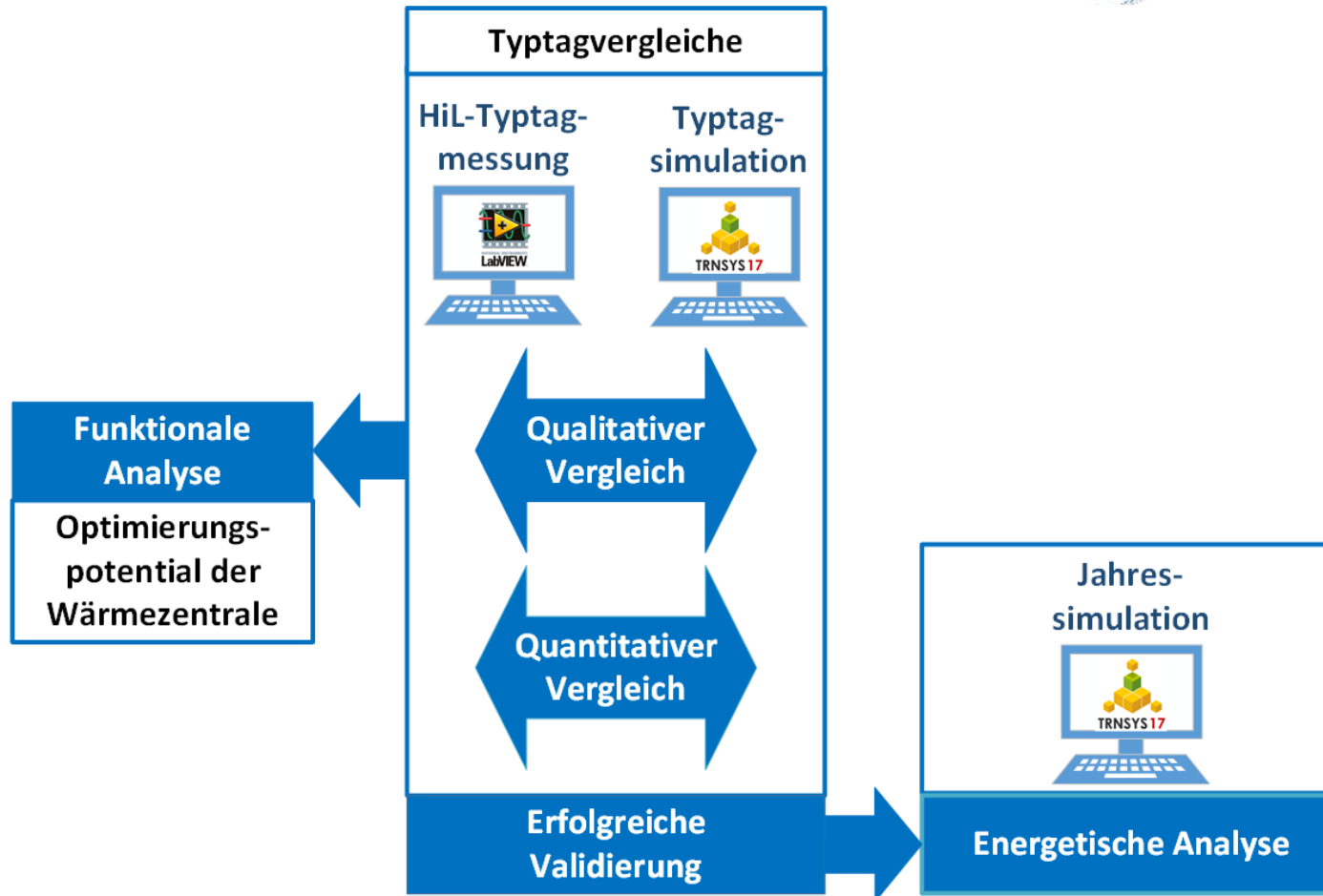


Konzept 8b: 2-Leitersystem mit Solarspeicher



Konzept 10: Dezentrales System



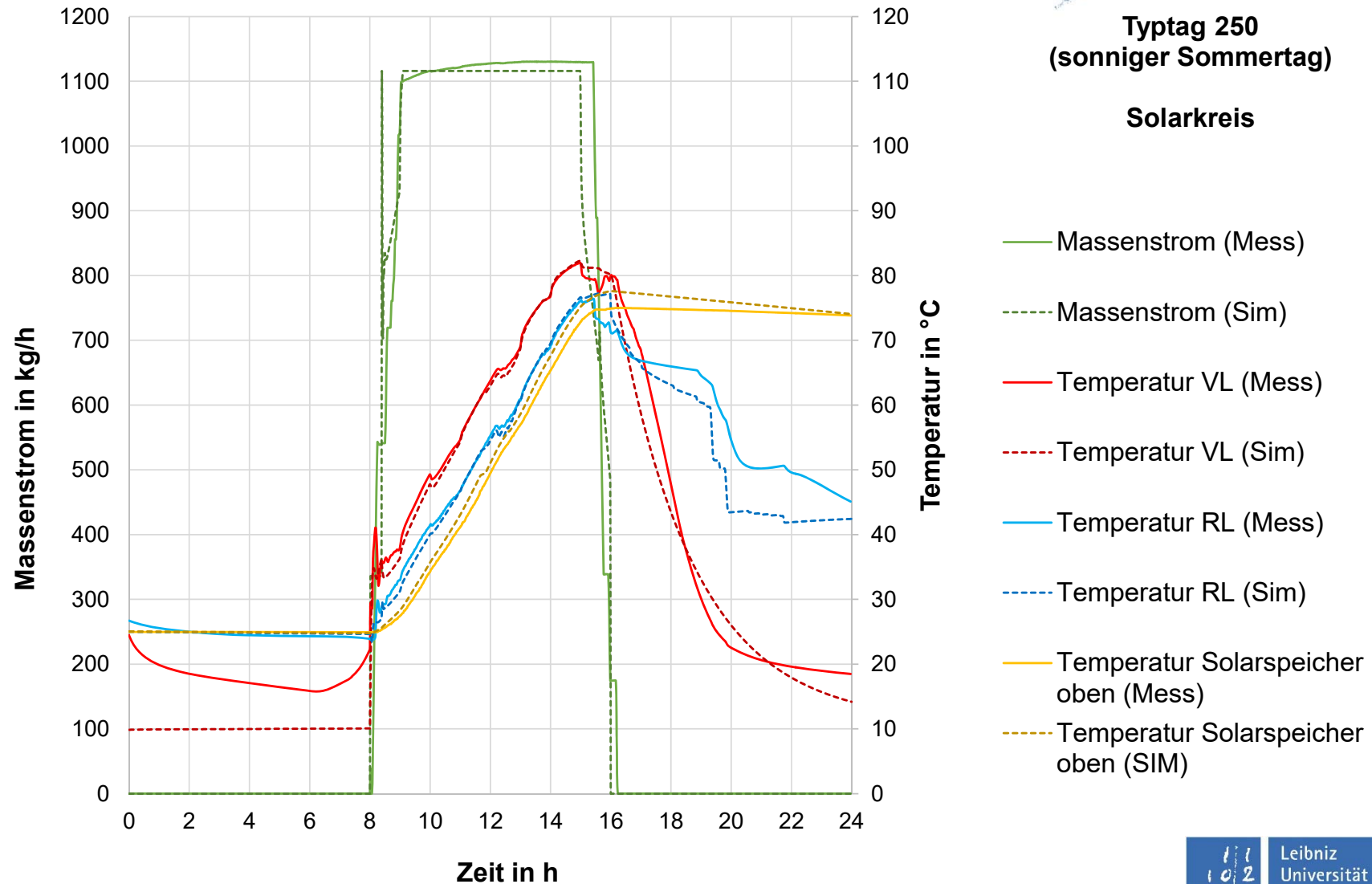


Qualitativer Vergleich

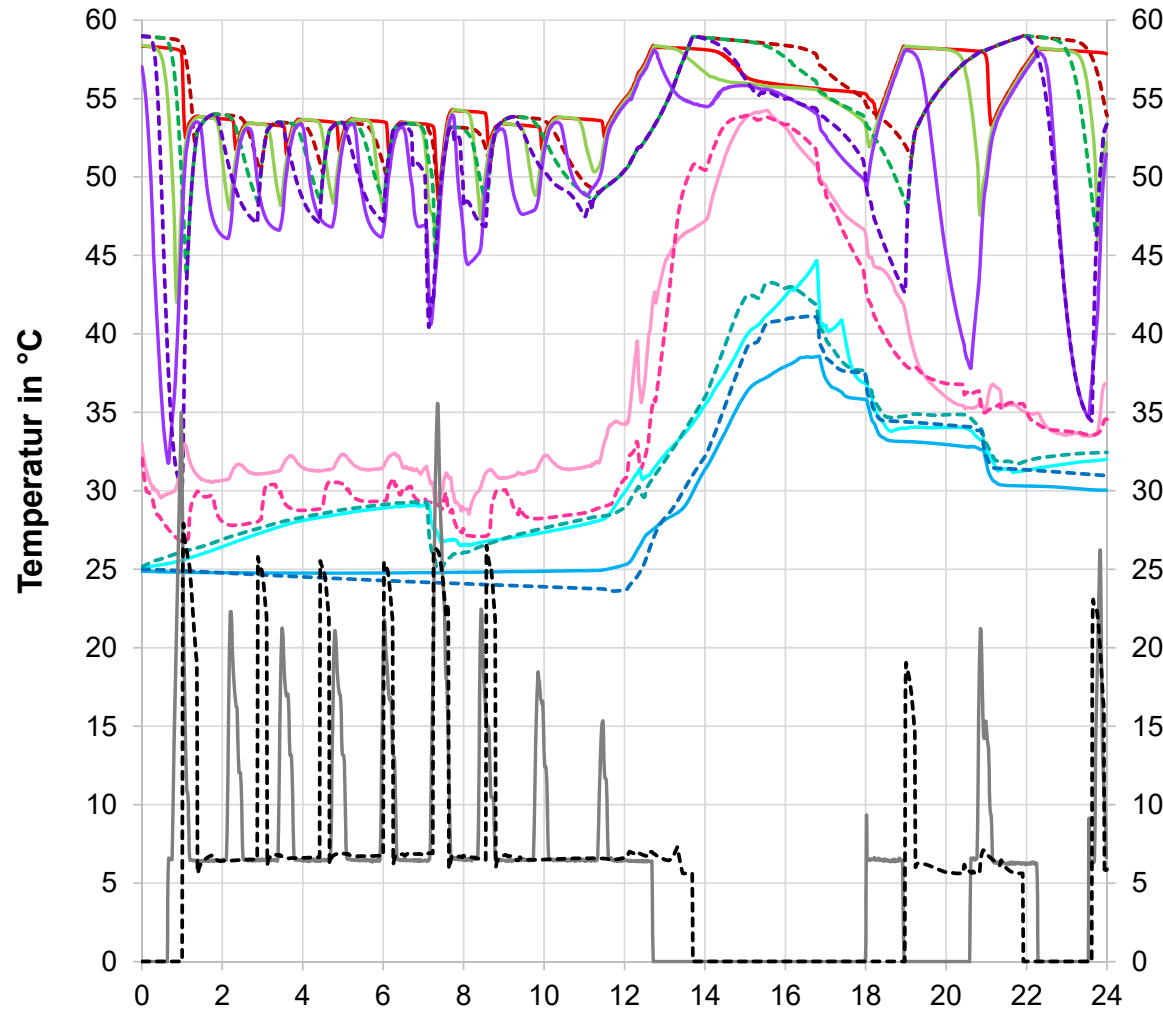


Typtag 250
(sonniger Sommertag)

Solarkreis



Qualitativer Vergleich



Typtag 112
(sonniger Übergangstag)

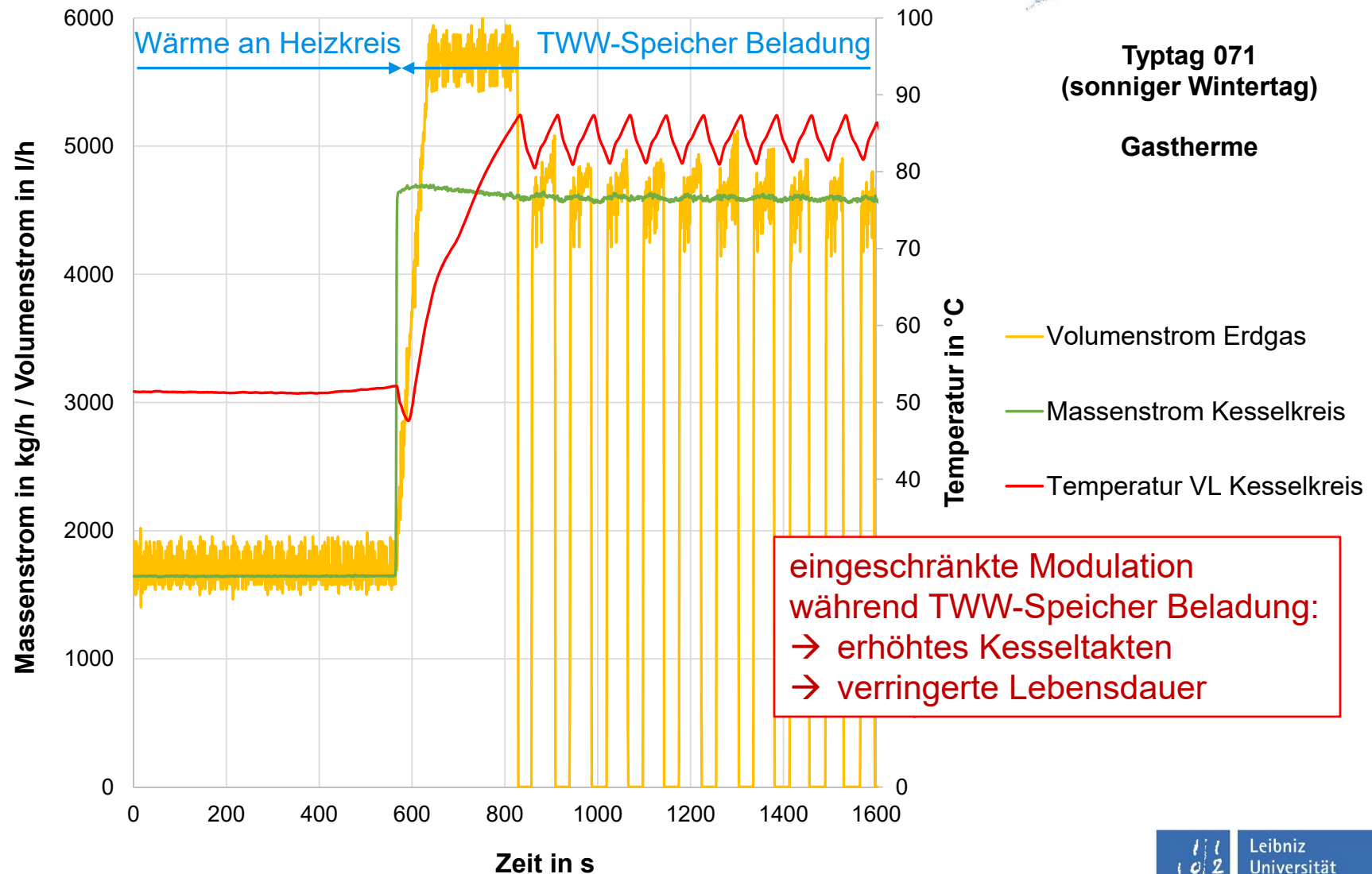
Pufferspeicher

- TSS9_185cm (Mess)
- - - TSS9_185cm (Sim)
- TSS7_151cm (Mess)
- - - TSS7_151cm (Sim)
- TSS6_122cm (Mess)
- - - TSS6_122cm (Sim)
- TSS5_92cm (Mess)
- - - TSS5_92cm (Sim)
- TSS3_47cm (Mess)
- - - TSS3_47cm (Sim)
- TSS1_7cm (Mess)
- - - TSS1_7cm (Sim)
- P_Erdgas (Mess)
- - - P_Erdgas (Sim)

reale Startzeit:
16:50Uhr, 24.07.2017

Simulationszeit in h

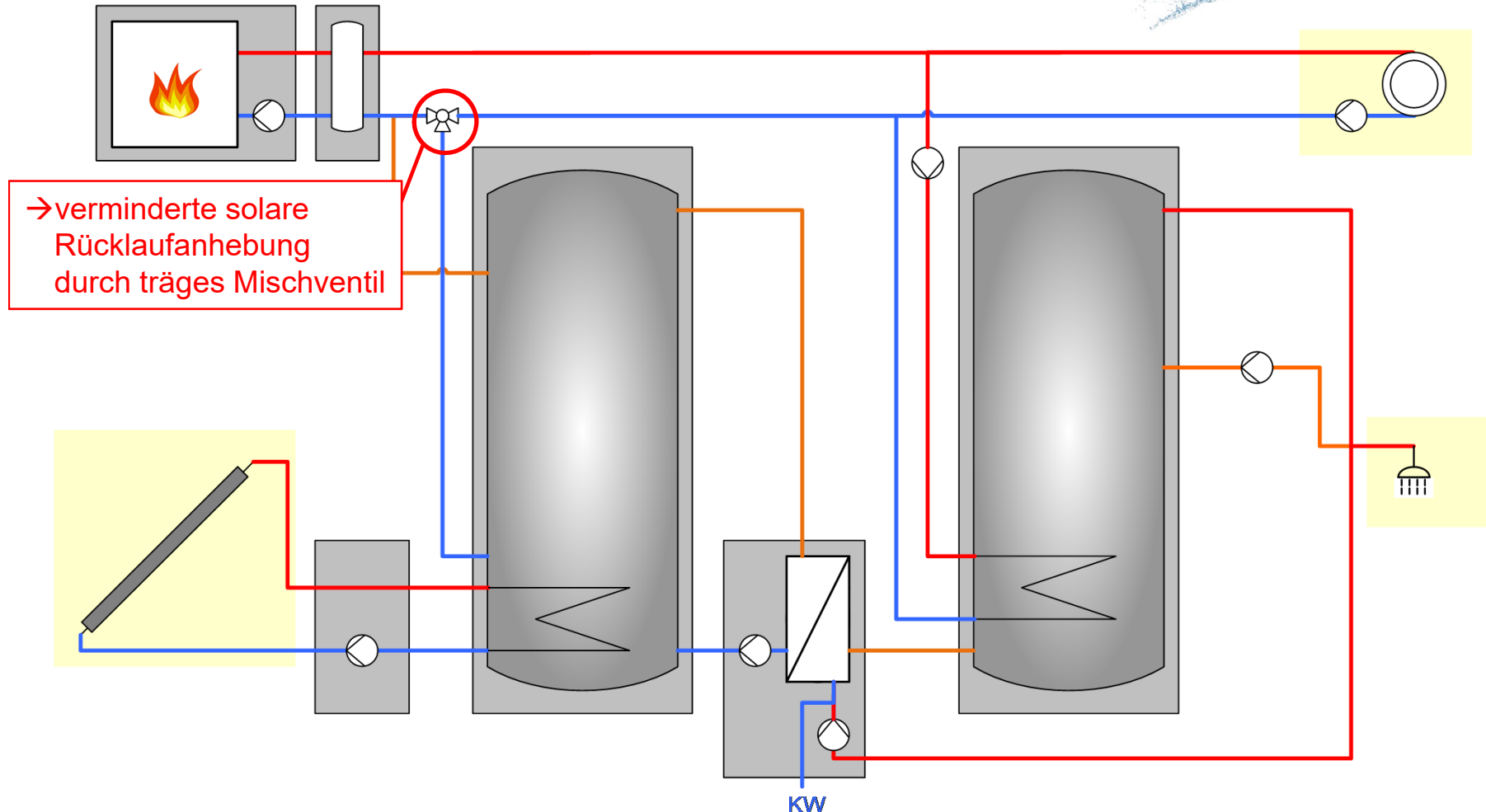
Funktionale Analyse Kesseltakten



Typtag 071
(sonniger Wintertag)

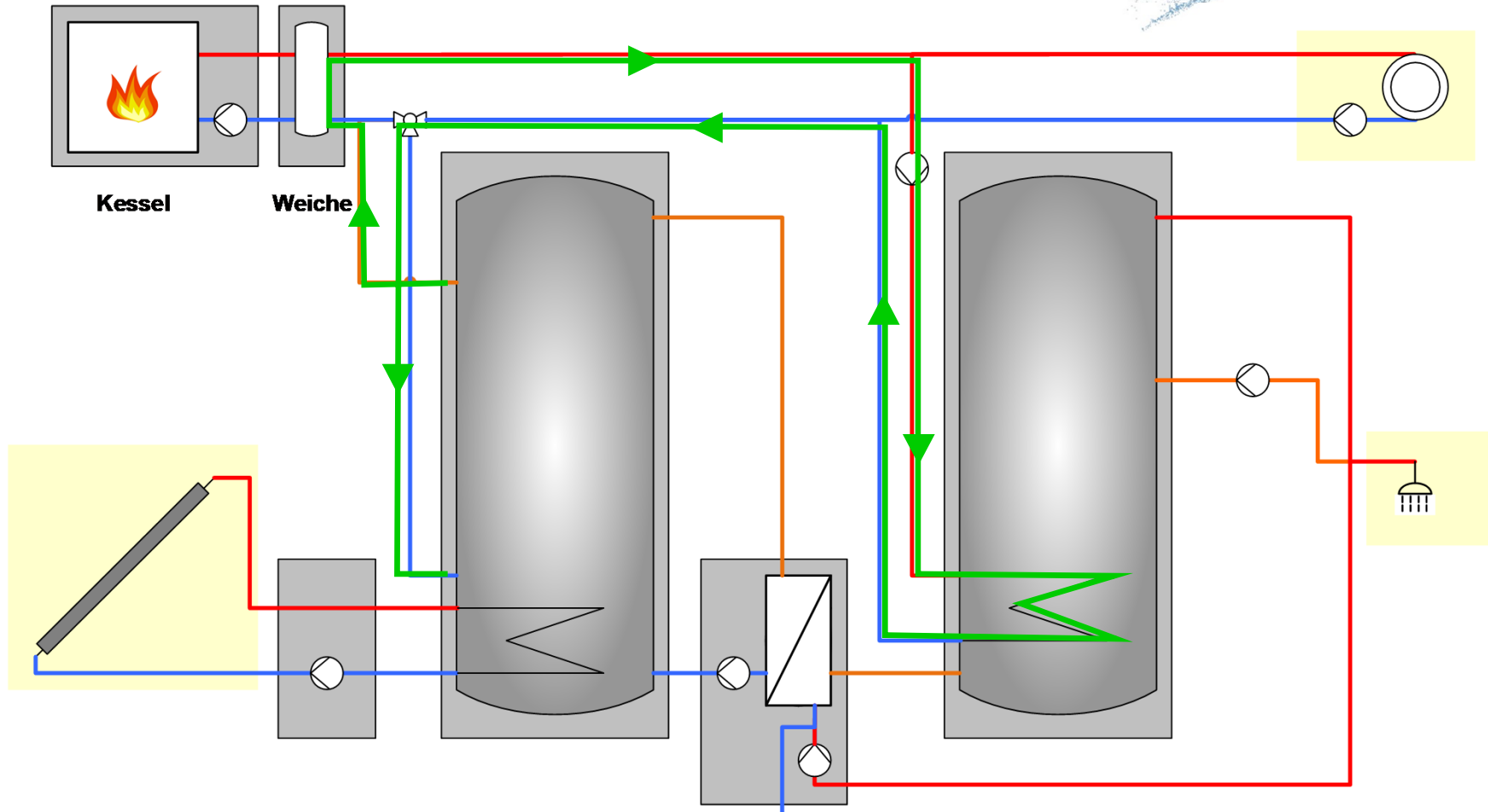
Gastherme

Funktionale Analyse solare Rücklaufanhebung



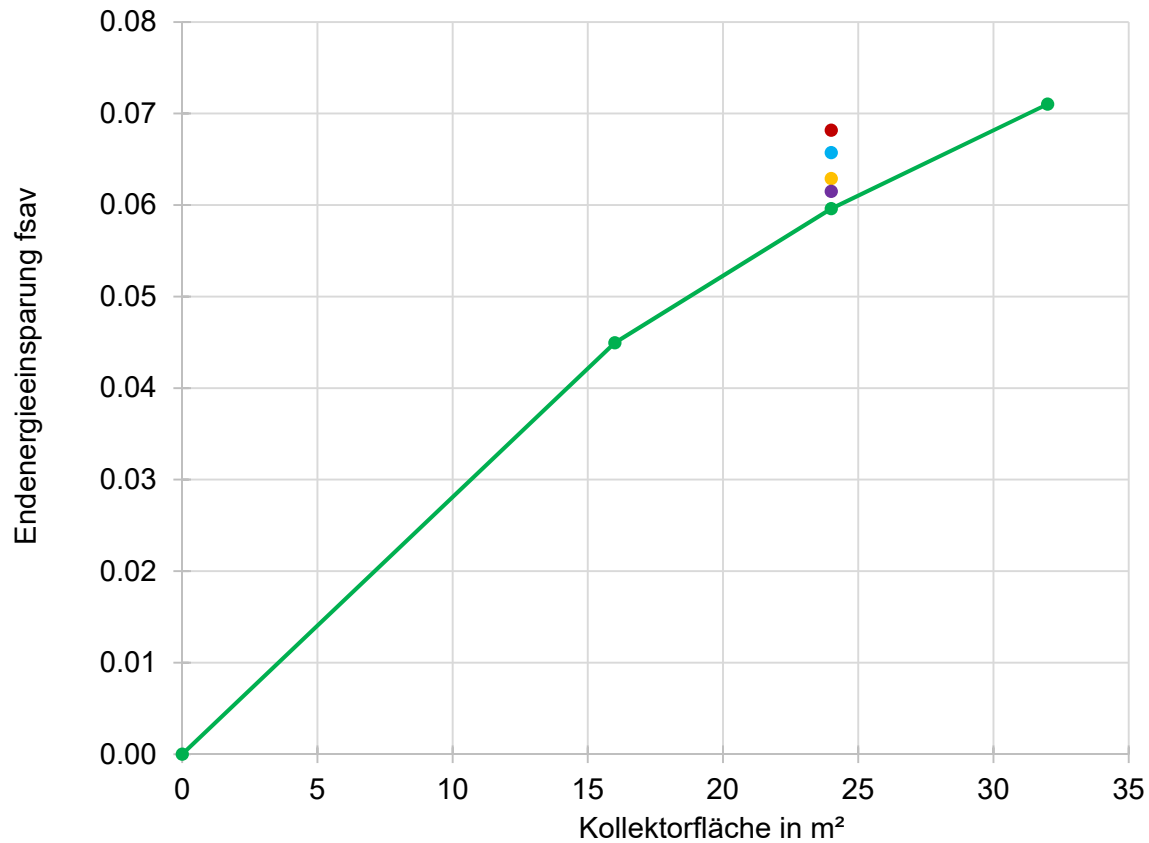
Emulatoren Solarstation Solarspeicher Frischwasserstation Trinkwasserspeicher

Funktionale Analyse Umschichtung solare Wärme



keine Umschichtung solarer Wärme in den TWW-Speicher:
hydraulisch möglich, regelungstechnisch bisher nicht

Funktionelle Analyse Potential von Systemoptimierungen



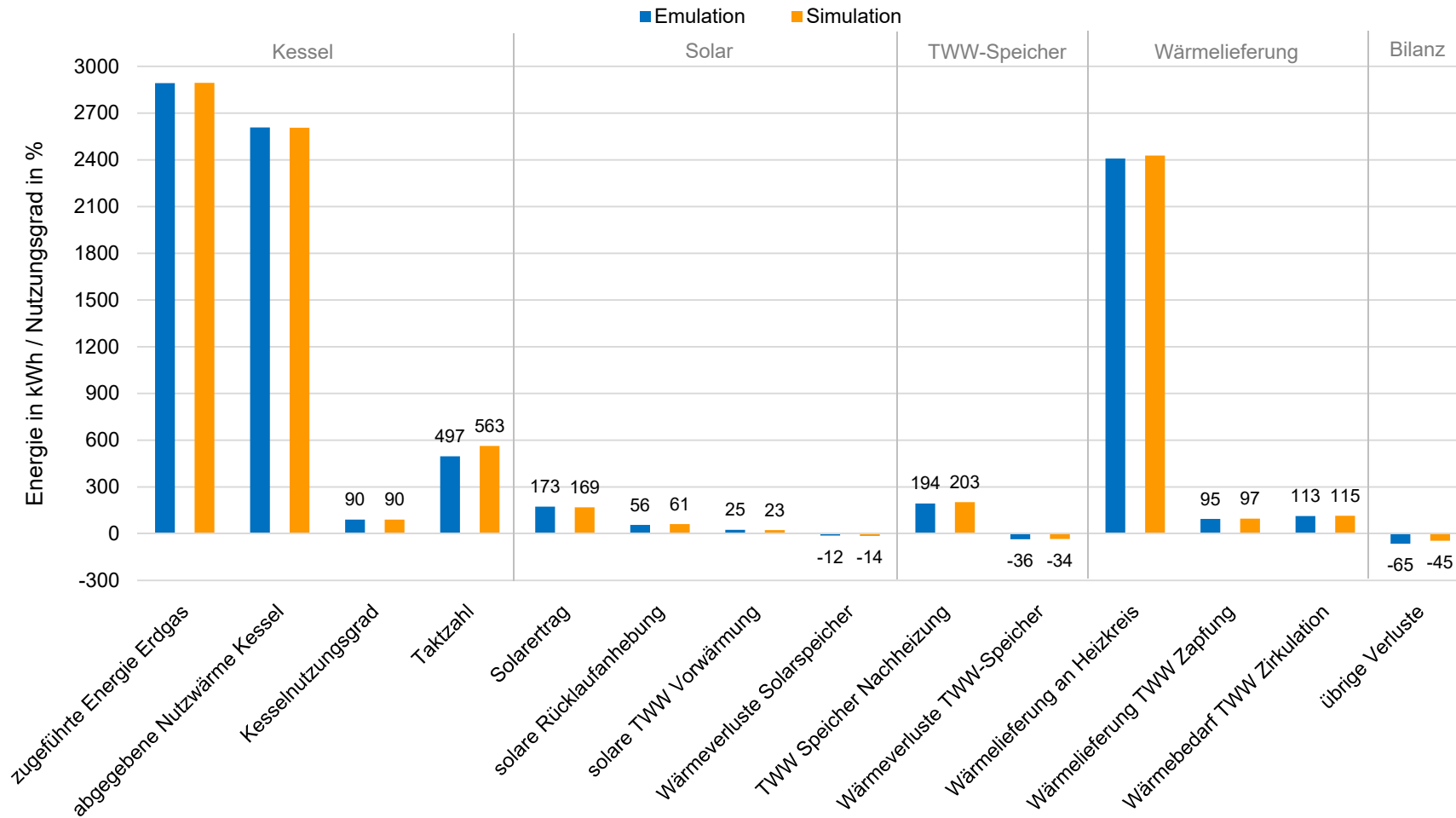
Regelungsoptimierungen

- **Optimierte Regelung solare Rücklaufanhebung**
- **Komplett modulierender Kessel**
- **Umschichtung solare Wärme**
- **Kombination**

Quantitativer Vergleich



Energiebilanz der 7 Typtage (ohne extremen Sommertag)





- Vorteile ggü. Feldversuchen, reinen Simulationen oder Komponentenuntersuchungen
 - Reale dynamische Verhaltensuntersuchung des Gesamtsystems
 - Realitätsgetreue Abbildung der Randbedingungen
 - Reproduzierbare, valide Ergebnisse
 - Variable orts- und gebäudespezifische Betrachtungen
 - Jahreszeitunabhängig
 - Zeitersparnis
 - Laborbedingungen (Mess- und Analysemöglichkeiten; keine Nutzer)
- Prüfstände und Untersuchungsverfahren erfolgreich umgesetzt
- Optimierungspotentiale können erkannt und ermittelt werden
- Validierungen der Simulationsmodelle erfolgreich
 - Qualitativ: sehr gute Übereinstimmung des Systemverhalten zwischen Messung und Simulation
 - Quantitativ: Sehr gute Übereinstimmung der Energiebilanzen

Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

FKZ: 03ET1212B

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



BOSCH



Vaillant



parabel
ENERGIE OHNE ENDE



SOLVIS

VIESMANN

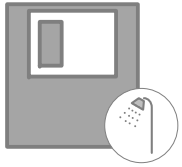
Hochschule Düsseldorf
University of Applied Sciences

HSD

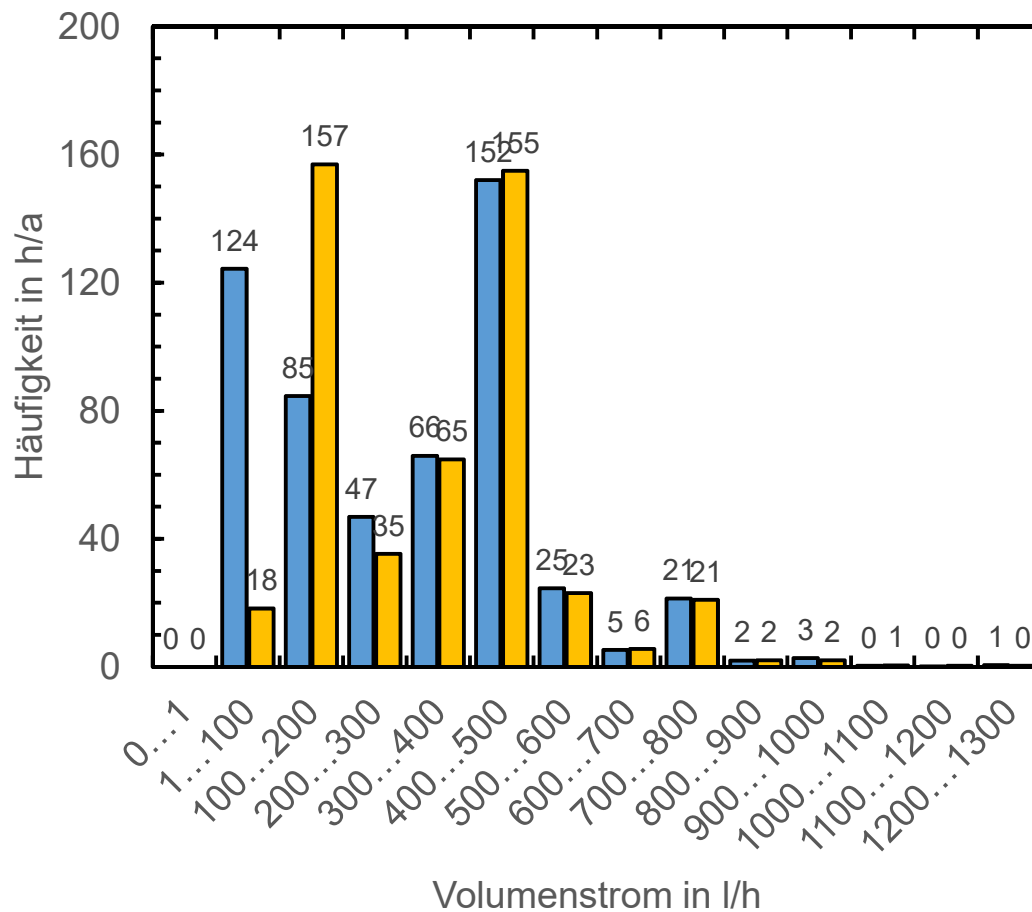
11
102
1004

Leibniz
Universität
Hannover





Simulationsrandbedingung: Trinkwasserzapfprofil



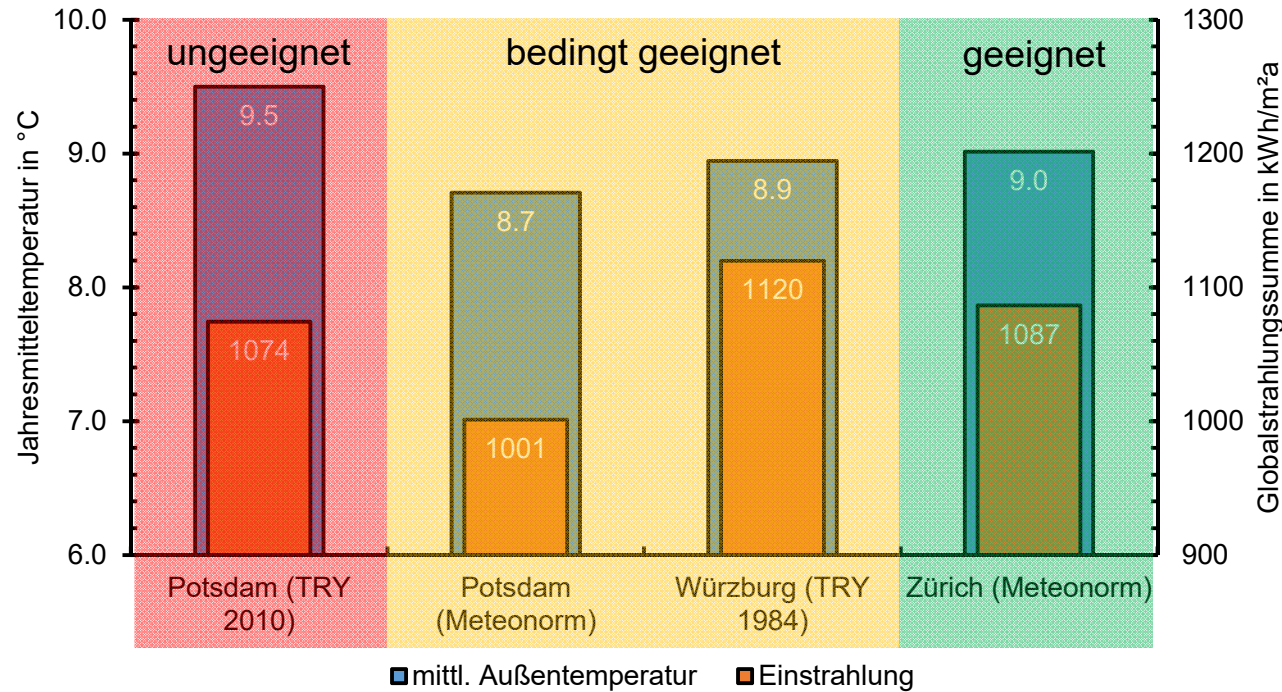
Globales Zapfprofil (gelb)

- erzeugt mit DHW-calc
- Minutenzeitschritte
- 365 Tage (ohne Urlaub)
- Zapfprofil für 8 WE, 440 l/d
- Gleichzeitigkeit ca. 20 %
- Min. Volumenstrom ca. 100 l/h
- Max. Volumenstrom (10 min): ca. 1450 l/h
- Max. Zapfleistung (10 min): 59 kW
- Max. Entnahme (10 min): 9.8 kWh

Vergleich mit Einzelzapfprofil (blau)

- Unterschiede im Bereich 1...200 l/h

HiL-Randbedingung Wetter



→ Zürich als Referenz, ggf. weitere Standorte als Variationsmöglichkeiten