

Koordinierter Schlussbericht

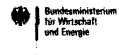
zum BMWi-Verbundvorhaben

„DELFIN – Decentralized Feed-In

Prognose der Auswirkungen dezentraler Einbindung von Wärme aus
erneuerbaren Energien und anderen Wärmeerzeugern in
Fernwärmenetze“

Förderkennzeichen: 03ET1358A-C
Laufzeit des Vorhabens: 01.01.2016 – 30.06.2019

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Verbundprojektpartner:

AGFW | Projektgesellschaft für Rationalisierung, Information und Standardisierung mbH

TUD - Technische Universität Dresden, Institut für Energietechnik, Professur für Gebäudeenergietechnik und Wärmeversorgung

Solites - Steinbeis Forschungsinstitut für solare und zukunftsfähige thermische Energiesysteme

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt bei den Autoren.

Stand: 16.12.2019



solites

Inhalt

| | |
|--|-----------|
| Kurzfassung | 13 |
| Executive Summary | 15 |
| 1 Einleitung | 17 |
| 2 Standorte und Wetterdaten | 22 |
| 2.1 <i>Verwendete Klimadatensätze</i> | 22 |
| 2.2 <i>Zu beachtende Randbedingungen und notwendige Umrechnungen</i> | 23 |
| 2.3 <i>Einfluss der Wahl der Wetterdaten und der Datenquelle auf den Ertrag einer Solarthermieanlage</i> | 25 |
| 2.4 <i>Literaturverzeichnis Kapitel 2</i> | 26 |
| 3 Abnehmermodellierung | 27 |
| 3.1 <i>Einleitung und Motivation</i> | 27 |
| 3.2 <i>Datenverfügbarkeit und -aufbereitung</i> | 28 |
| 3.3 <i>Modellierung des Abnehmerverhaltens</i> | 30 |
| 3.3.1 <i>Modellanforderungen und Modellwahl</i> | 30 |
| 3.3.2 <i>Modellierung der Wärmelastgänge</i> | 32 |
| 3.3.3 <i>Modellierung der Rücklauftemperatur der Abnehmer</i> | 39 |
| 3.3.4 <i>Verallgemeinerte Lastgangvariation</i> | 41 |
| 3.4 <i>Modellzuweisung der Abnehmer in der Netzsimulation</i> | 43 |
| 3.4.1 <i>Abnehmersimulation Netz B</i> | 43 |
| 3.4.2 <i>Abnehmersimulation Netz G</i> | 46 |
| 3.5 <i>Gleichzeitigkeitsfaktoren der Wärmeabnahme</i> | 46 |
| 3.5.1 <i>Ziel der Betrachtung</i> | 46 |
| 3.5.2 <i>Gleichzeitigkeit Netz B</i> | 48 |
| 3.5.3 <i>Gleichzeitigkeit Netz G</i> | 53 |
| 3.6 <i>Free Plan-Tool zur Lastgangerstellung</i> | 57 |
| 4 Modellierung solarthermischer Anlagen | 62 |
| 4.1 <i>Ausgangssituation</i> | 62 |
| 4.2 <i>Varianten zur Abbildung der Einbindung von Solarthermieanlagen in Wärmenetze</i> | 63 |
| 4.2.1 <i>Einbindeprofile</i> | 63 |
| 4.2.2 <i>Vereinfachtes Erzeugermodell</i> | 66 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4.2.3 | Detailliertes Erzeugermodell | 66 |
| 4.2.4 | Fazit..... | 67 |
| 4.3 | Vorarbeiten im Solarthermiemodell der Simulationsumgebung TRNSYS..... | 68 |
| 4.3.1 | Das MFC-Modell..... | 68 |
| 4.3.2 | Das QDT-Modell..... | 69 |
| 4.3.3 | Gegenüberstellung der theoretischen Annahmen beider Modelle | 70 |
| 4.3.4 | Fazit..... | 71 |
| 4.4 | Das Erzeugermodell für in Wärmenetze einbindende Solarthermieranlagen..... | 71 |
| 4.4.1 | Der Entwicklungsweg..... | 71 |
| 4.4.2 | Das Entwicklungsergebnis..... | 73 |
| 4.4.3 | Erfahrungen mit der Modellanwendung..... | 75 |
| 4.5 | Berechnungstool für die Wirtschaftlichkeit möglicher Solarthermieranlagen in Wärmenetzen | 75 |
| 4.6 | Literaturverzeichnis Kapitel 4..... | 79 |
| 5 | Modellierung stromorientierter BHKW..... | 80 |
| 5.1 | Rahmenbedingungen | 80 |
| 5.2 | Beschreibung des Vorgehens zur Erstellung der volatilen BHKW-Profile..... | 80 |
| 5.3 | Einschränkungen des verwendeten BHKW-Modells | 81 |
| 6 | Wirkungen dezentraler Einbindung in Fernwärmenetze - Simulationsstudie der Netze G und B (kleines und mittelgroßes Netz)..... | 83 |
| 6.1 | Charakterisierung Fernwärmenetze und dezentrale Erzeuger | 83 |
| 6.1.1 | Fernwärmenetze | 83 |
| 6.1.2 | Auswahl und Standort dezentraler Erzeuger im Netz | 86 |
| 6.1.3 | Einbindekonzept und Randbedingungen..... | 90 |
| 6.2 | Grundlagen der Simulationsstudie | 93 |
| 6.2.1 | Software und Schnittstelle..... | 93 |
| 6.2.2 | Netzmodellierung und Abbildung der Netzkomponenten..... | 95 |
| 6.2.3 | Variantenmatrix und Randbedingungen | 99 |
| 6.3 | Wärmebilanzen und dezentrale Deckungsanteile | 101 |
| 6.3.1 | Wärmebilanzen..... | 101 |
| 6.3.2 | Dezentraler Deckungsanteil..... | 107 |
| 6.4 | Thermohydraulische Effekte dezentraler Wärmeeinbindung..... | 111 |
| 6.4.1 | Übersicht auftretender Effekte | 111 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 6.4.2 | Methodik der Untersuchung | 114 |
| 6.4.3 | Ausgewählte Ergebnisse im Netz G | 115 |
| 6.4.4 | Ausgewählte Ergebnisse im Netz B | 124 |
| 6.5 | Auswirkungen auf Komponenten und wichtige Kenngrößen des Fernwärmenetzes | 135 |
| 6.5.1 | Netzdruckhaltung | 135 |
| 6.5.2 | Wechselbeanspruchungen des Rohrleitungssystems | 142 |
| 6.5.3 | Netzregelung | 151 |
| 6.5.4 | Zentrale Erzeugung | 156 |
| 6.5.5 | Hilfsenergieaufwand (Pumpen) | 158 |
| 6.5.6 | Thermische Netzverluste | 162 |
| 6.5.7 | Gegenseitige Beeinflussung dezentraler Erzeuger | 165 |
| 6.6 | Zusammenfassung der Erkenntnisse der Simulationsstudie | 167 |
| 7 | Wirkungen dezentraler Einbindung in Fernwärmenetze - Simulationsstudie des Fernwärmenetzes K (großes Netz)..... | 172 |
| 7.1 | Allgemeine Festlegung im Vorfeld der Simulation | 172 |
| 7.2 | Struktur und Parameter in Netz K | 173 |
| 7.3 | Modelleinstellungen und Simulationsbedingungen..... | 174 |
| 7.3.1 | Simulationssoftware SIR 3S® | 174 |
| 7.3.2 | Neuer Modellbaustein für Solarthermie und BHKW | 174 |
| 7.3.3 | Parameter Solaranlagen | 176 |
| 7.3.4 | Parameter BHKW | 176 |
| 7.3.5 | Parameter Kraftwerke | 177 |
| 7.3.6 | Parameter Wärmeverbraucher | 177 |
| 7.3.7 | Parameter Kälteanlagen | 178 |
| 7.3.8 | Netzfahrkurve | 179 |
| 7.3.9 | Regelungsstrategie und Pumpstationen | 179 |
| 7.3.10 | Grenzdrücke | 180 |
| 7.4 | Simulationsszenarien | 181 |
| 7.4.1 | Allgemeines | 181 |
| 7.4.2 | Berechnungsverfahren | 182 |
| 7.4.3 | Referenzfall | 183 |
| 7.4.4 | Szenario 1 – Großflächige Solaranlagen | 184 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 7.4.5 | Szenario 2 – Mittlere und kleine Solaranlagen | 190 |
| 7.4.6 | Szenario 3 – Mittlere und kleine BHKW | 192 |
| 7.4.7 | Ersatz der Pumpstationen im Netz durch dezentrale Wärmeerzeuger möglich?..... | 195 |
| 7.4.8 | Einfluss der dezentralen Wärmeerzeuger rund um einen Schlechtpunkt..... | 198 |
| 7.4.9 | Auswirkung des Detaillierungsgrades des Lastgangs | 198 |
| 7.4.10 | Netz K – Zusammenfassung und Hinweise..... | 201 |
| 8 | Jahresmittlere Auswirkungen auf Ressourcenverbrauch und Treibhausgasemissionen | 205 |
| 8.1 | Untersuchte Szenarien | 205 |
| 8.2 | Auswahl der Bewertungs- und Vergleichskriterien | 207 |
| 8.2.1 | Primärenergieverbrauch..... | 208 |
| 8.2.2 | Ressourcenverbrauch (gesamt)..... | 209 |
| 8.2.3 | Ressourcenverbrauch (fossil) | 210 |
| 8.2.4 | Treibhausgasemissionen | 211 |
| 8.2.5 | Zusammenfassung der Kriterienauswahl | 211 |
| 8.3 | Berechnungsvorschriften | 211 |
| 8.3.1 | Grundlegenden Festlegungen..... | 211 |
| 8.3.2 | Allgemein..... | 212 |
| 8.3.3 | Erdgas-Heizkessel..... | 213 |
| 8.3.4 | Erdgas GuD und BHKW..... | 214 |
| 8.3.5 | Solarthermie | 215 |
| 8.3.6 | Hilfsstrom..... | 216 |
| 8.4 | Ergebnisse | 217 |
| 8.4.1 | Netz G | 218 |
| 8.4.2 | Netz B..... | 219 |
| 8.4.3 | Netz K..... | 223 |
| 8.5 | Fazit | 228 |
| 9 | Systemeinbindung von Wärmespeichern bei dezentralen Erzeugern in Fernwärmenetzen | 230 |
| 9.1 | Einführung | 230 |
| 9.2 | Notwendigkeit eines Wärmespeichers | 231 |
| 9.2.1 | Allgemeine Fallunterscheidung | 231 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 9.2.2 | Richtwerte bei dezentraler Einbindung einer Solarthermieanlage | 233 |
| 9.3 | Hydraulische Einbindekonzepte eines Wärmespeichers | 235 |
| 9.3.1 | Zentral eingebundene Wärmespeicher | 235 |
| 9.3.2 | Teilzentral eingebundene Wärmespeicher | 239 |
| 9.3.3 | Dezentral eingebundene Wärmespeicher | 241 |
| 9.4 | Simulationsstudie zur technisch-wirtschaftlichen Optimierung der Systemintegration von Wärmespeichern in Wärmenetze für dezentral eingebundene Solarthermieanlagen | 243 |
| 9.4.1 | Randbedingungen der durchgeführten Optimierungsstudie | 243 |
| 9.4.2 | Vorgehen bei der Durchführung der Optimierungsstudie | 246 |
| 9.4.3 | Darstellung der Ergebnisse der Optimierungsstudie in Nomogrammen | 249 |
| 9.5 | Literaturverzeichnis zu Kapitel 9 | 270 |
| 10 | Ergebnisse zentrale Wärmespeicher unterschiedlicher Fahrweisen in den Netzen G und B | 272 |
| 10.1 | Theoretische Speicherfahrweisen | 272 |
| 10.2 | Ergebnisse Speicherbetrachtung Netz G | 273 |
| 10.3 | Ergebnisse Speicherbetrachtung Netz | 277 |
| 10.4 | Zusammenfassung | 281 |
| 11 | Schlussfolgerungen und Ausblick | 283 |
| 11.1 | Modellierung von Abnehmer-Lastgängen und dezentralen Wärmeerzeugern | 283 |
| 11.2 | Ergebnisse der Netzsimulationen | 284 |
| 11.3 | Bewertung jahresmittlerer Effekte auf Ressourcenverbrauch und Treibhausgasemissionen | 287 |
| 11.4 | Einbindung von Speichern | 290 |
| 12 | Symbole, Abkürzungen und Begriffserläuterungen | 292 |
| | Anhang | 298 |
| | Anhang A - Standorte und Wetterdaten | 299 |
| | Anhang B - Abnehmermodellierung | 300 |
| B.1 | Überprüfung der Anwendbarkeit der Standardlastprofile (SLP) Gas auf Fernwärmenetze | 300 |
| B.1.1 | Standardlastprofile (SLP) Gas – Das Verfahren im Überblick | 300 |
| B.1.2 | Die Standardlastprofile (SLP) Gas | 310 |
| B.1.3 | Stundenallokation | 316 |
| B.1.4 | Saisonale Korrekturfaktoren | 316 |

| | | |
|-----------------|---|------------|
| B.1.5 | Genauigkeit..... | 317 |
| B.1.6 | Recherche zur Anwendbarkeit der SLP Gas auf Fernwärmenetze..... | 318 |
| B.1.7 | Literaturverzeichnis..... | 322 |
| B.2 | Dokumentation FreePlan..... | 325 |
| Anhang C | - Modellierung solarthermischer Anlagen | 337 |
| C.1 | Dokumentation des Erzeugermodells zur Abbildung von in Wärmenetze einbindenden Solarthermieanlagen | 337 |
| C.1.1 | Strahlung | 337 |
| C.1.2 | Eingaben | 339 |
| C.1.3 | Formeln | 340 |
| C.1.4 | Nomenklatur des entwickelten Erzeugermodells..... | 348 |
| C.2 | Darstellung des Berechnungstools für die Wirtschaftlichkeit möglicher Solarthermieanlagen in Wärmenetzen | 352 |
| C.3 | Literaturverzeichnis Anhang C..... | 355 |
| Anhang D | - Wiedergabe der DELFIN-Studie zu volatilen BHKW [Kra16] | 356 |
| Anhang E | - Wirkungen dezentraler Einbindung in Fernwärmenetze Simulationsstudie der Netze G und B (kleines und mittelgroßes Netz) | 382 |
| E.1 | Detaillierte Netzinformationen | 382 |
| E.1.1 | Netz G | 382 |
| E.1.2 | Netz B..... | 383 |
| E.2 | Co-Simulation im Rahmen der Simulationsstudie | 385 |
| E.2.1 | Detailinfos zur FMI-Schnittstelle..... | 385 |
| E.2.2 | Programmablaufpläne der Teilmodelle..... | 386 |
| E.3 | Detailergebnisse Netz G..... | 389 |
| E.3.1 | Wärmeeinträge | 389 |
| E.3.2 | Thermohydraulische Effekte | 392 |
| E.3.3 | Auswirkungen auf Komponenten und wichtige Kenngrößen des Fernwärmenetzes | 395 |
| E.4 | Detailergebnisse Netz B | 396 |
| E.4.1 | Wärmeeinträge | 396 |
| E.4.2 | Thermohydraulische Effekte | 398 |
| E.4.3 | Auswirkungen auf Komponenten und wichtige Kenngrößen des Fernwärmenetzes | 404 |

| | |
|--|------------|
| Anhang F - Wirkungen dezentraler Einbindung in Fernwärmenetze - Simulationsstudie des Fernwärmenetzes K (großes Netz) | 405 |
| F.1 Allgemeine Festlegungen im Vorfeld der Simulation | 405 |
| F.1.1 Wärmeeinbindung nicht ohne Temperaturbeschränkung - AGFW | 405 |
| F.2 Modelleinstellungen und Simulationsbedingungen..... | 406 |
| F.2.1 Unsicherheiten bei der Wärmelastberechnung..... | 406 |
| F.2.2 Einfluss der Modellvorbereitung – Einfluss hochaufgelöster Wärmelastprofile | 412 |
| F.3 Detaillierte Ergebnisse aus den Simulationsszenarien..... | 417 |
| F.3.1 Referenzfall..... | 418 |
| F.3.2 Szenario 1 Großflächige Solaranlagen..... | 421 |
| F.3.3 Szenario 2 Mischung aus mittleren und kleineren Solaranlagen | 437 |
| F.3.4 Szenario 3 Mischung aus mittleren und kleineren BHKW..... | 440 |
| F.3.5 Detaillierungsgrad des Lastgangs | 449 |
| Anhang G - Jahresmittlere Effekte auf Ressourcenverbrauch und Treibhausgasemissionen | 453 |
| G.1 Berechnungsvorschriften für die Berechnung der Primärenergieverbräuche (nicht erneuerbar) | 453 |
| G.2 Detailergebnisse der Untersuchung jahresmittlerer Effekte inklusive Primärenergieverbräuchen | 454 |
| G.2.1 Netz G | 455 |
| G.2.2 Netz B..... | 457 |
| G.2.3 Netz K..... | 462 |
| G.3 Annahmenübersicht für die Bewertung | 466 |
| G.3.1 Annahmen für alle Netze..... | 466 |
| G.3.2 Netz G | 475 |
| G.3.3 Netz B..... | 475 |
| G.3.4 Netz K..... | 476 |
| G.4 Literaturverzeichnis – Kapitel 8 und Anhang G | 477 |
| G.5 Quellenwiedergabe [IWU14]..... | 479 |
| Anhang H - Systemeinbindung von Wärmespeichern bei dezentralen Erzeugern in Fernwärmenetzen | 483 |
| Anhang I - Ergebnisse zentrale Wärmespeicher unterschiedlicher Fahrweisen in den Netzen G und B | 486 |

| | | |
|---|--|------------|
| I.1 | Detailergebnisse Speicher Netz G | 486 |
| I.2 | Detailergebnisse Speicher Netz B | 487 |
| Anhang J - Checkliste für die Einbindung von Solarthermieanlagen in bestehende Fernwärmesysteme..... | | 489 |
| J.1 | Analyse der IST-Situation (Erzeugung, Netz und Betrieb) und Suche nach potenziellen Standorten für eine Solarthermieanlage und einen möglichen Wärmespeicher | 491 |
| J.1.1 | Sondierung vorhandener Flächen | 491 |
| J.1.2 | Erzeugerstruktur | 491 |
| J.1.3 | Netzstruktur | 492 |
| J.1.4 | Betriebsbedingungen | 492 |
| J.2 | Vorüberlegungen zur Änderung der Betriebsweise | 493 |
| J.2.1 | Veränderte Betriebsbedingungen des Netzes und des zentralen Erzeugers | 493 |
| J.2.2 | Ausbaukonzept für dezentrale Einbindung und Speicherung | 493 |
| J.2.3 | Anschluss an das bestehende Fernwärmenetz..... | 495 |
| J.3 | Dimensionierung der Solaranlage | 496 |
| J.4 | Vorgaben für die Übergabe der solaren Wärme an das Netz /NEST | 497 |
| J.4.1 | Sicherheitsmaßnahmen und Kriterien der Wärmeaufnahme in das Netz | 497 |
| J.4.2 | Anforderungen an die Komponenten der NEST | 498 |
| J.5 | Vorgaben und Kriterien für die solarthermische und netzhydraulische Simulation | 499 |
| J.5.1 | Solaranlage..... | 499 |
| J.5.2 | Netz | 499 |
| J.5.3 | NEST | 500 |
| J.5.4 | Bewertung der Veränderung durch die dezentrale Einbindung | 501 |
| J.6 | Flächenfindung | 501 |
| J.7 | Finanzierung und Förderung..... | 502 |
| J.8 | Literaturverzeichnis..... | 503 |
| Anhang K - Verwendung des Begriffs Einbindung statt des Begriffs Einspeisung | | 504 |
| Anhang L - Projektveröffentlichungen..... | | 506 |