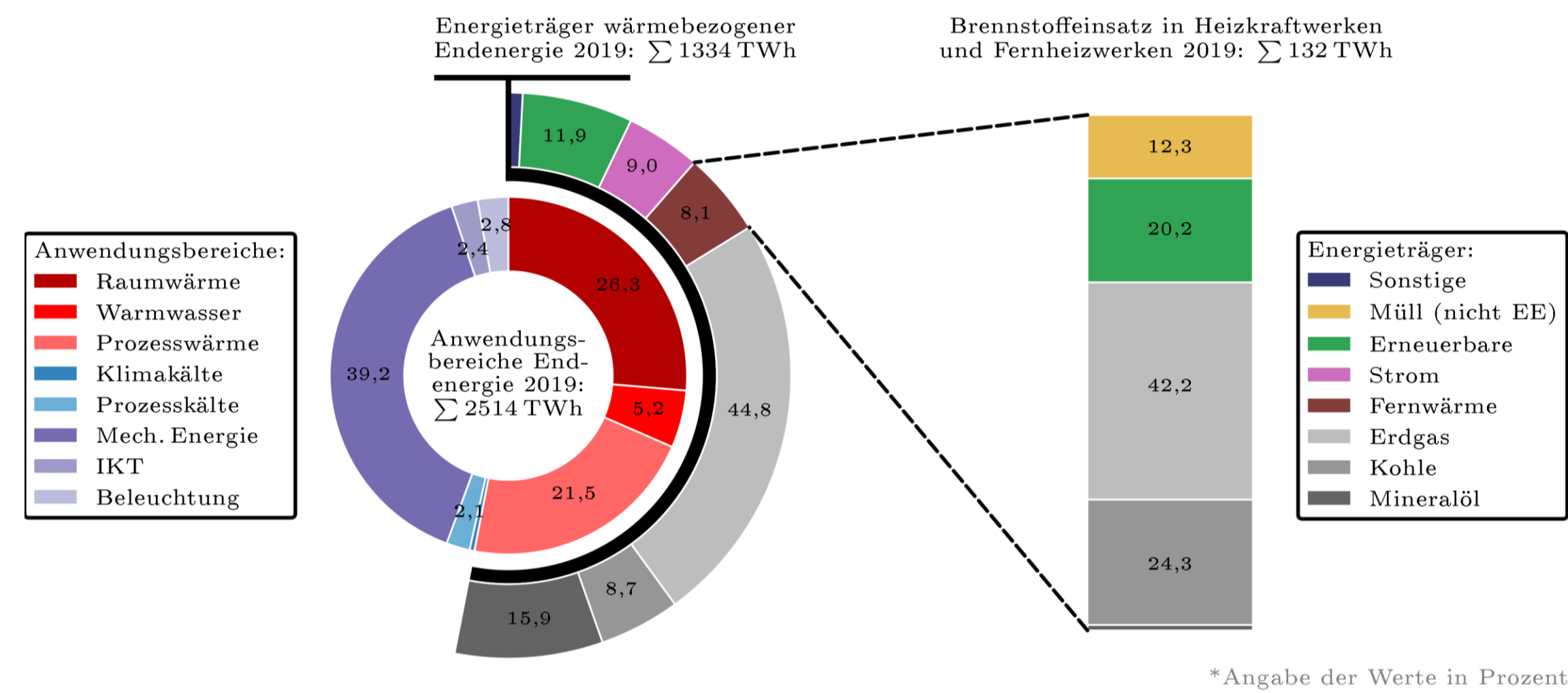


1 Motivation

- Mehr als 50% der Endenergie für Wärmezwecke aufgewendet⁽¹⁾
- Studien prognostizieren steigenden Beitrag der Fernwärme⁽²⁾
- Aktuell dominierende fossile Erzeugung steht unter Druck
- Welche Fernwärmeversorgungs-konzepte sind aus Betreiber- bzw. Investorensicht derzeit besonders wirtschaftlich?
- Wie beeinflusst der regulatorische Rahmen die Konzepte?

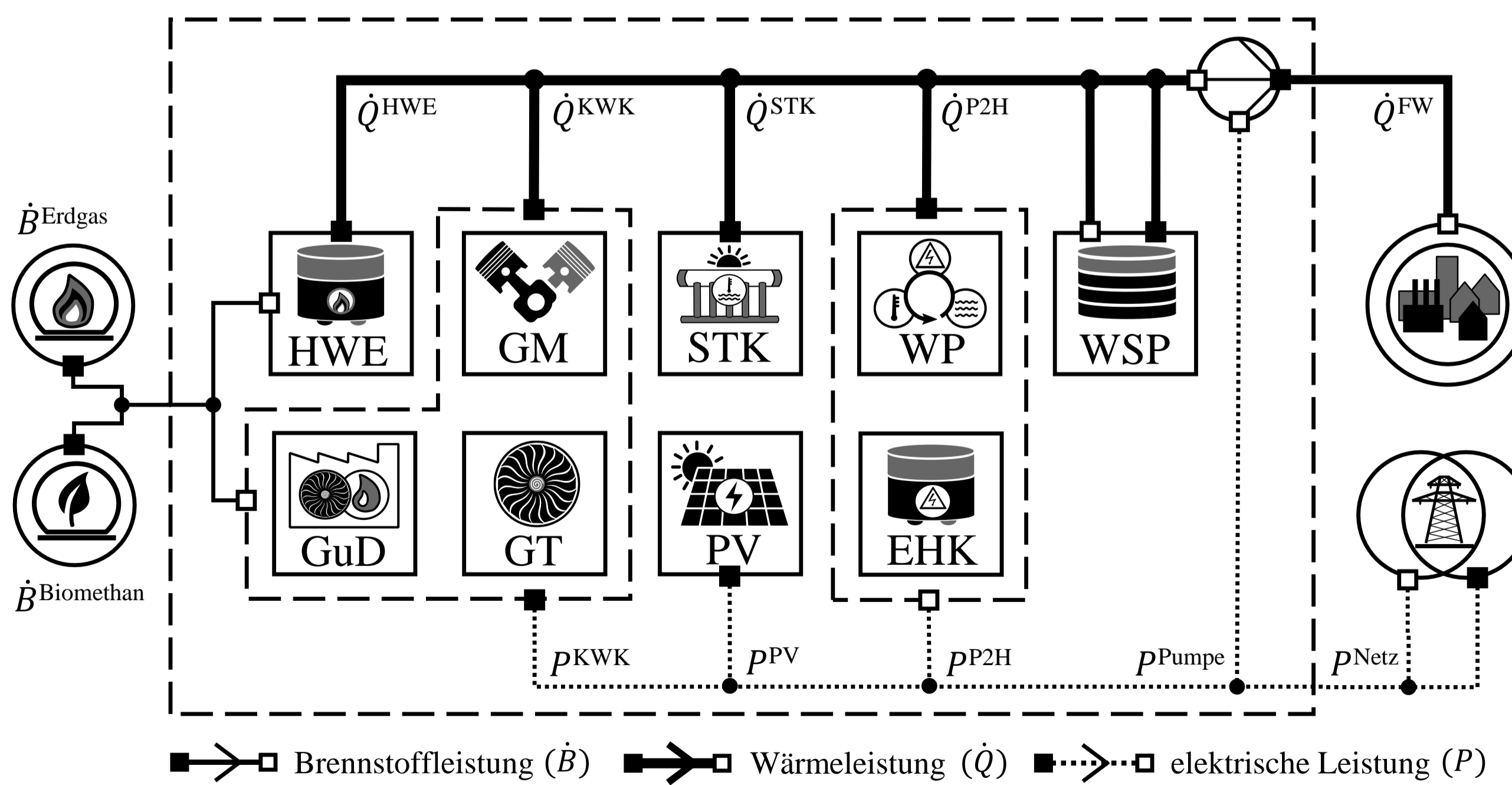


⁽¹⁾ BMWi. Zahlen und Fakten: Energiedaten. 2021

⁽²⁾ HIC GmbH und FFE mbH. Grüne Fernwärme für Deutschland – Potenziale, Kosten, Umsetzung. 2021

2 Modellierung

- Überstrukturbasierte Optimierung mit detaillierter gemischt-ganzzahlig linear Modellierung (MILP) der Komponenten
- Gewähltes Basisjahr 2019 (Strom-, Brennstoff-, EUA-Preise)
- Fiktiver Anlagenstandort; Zeitreihen für Potsdam im Jahr 2019
- Stand der modellierten Energiegesetzgebung (KWKG, GEG, EnergieStG, StromStG, EEG) ist Januar 2021



- Zielfunktion: Maximierung des Barwerts der Investition (NPV)

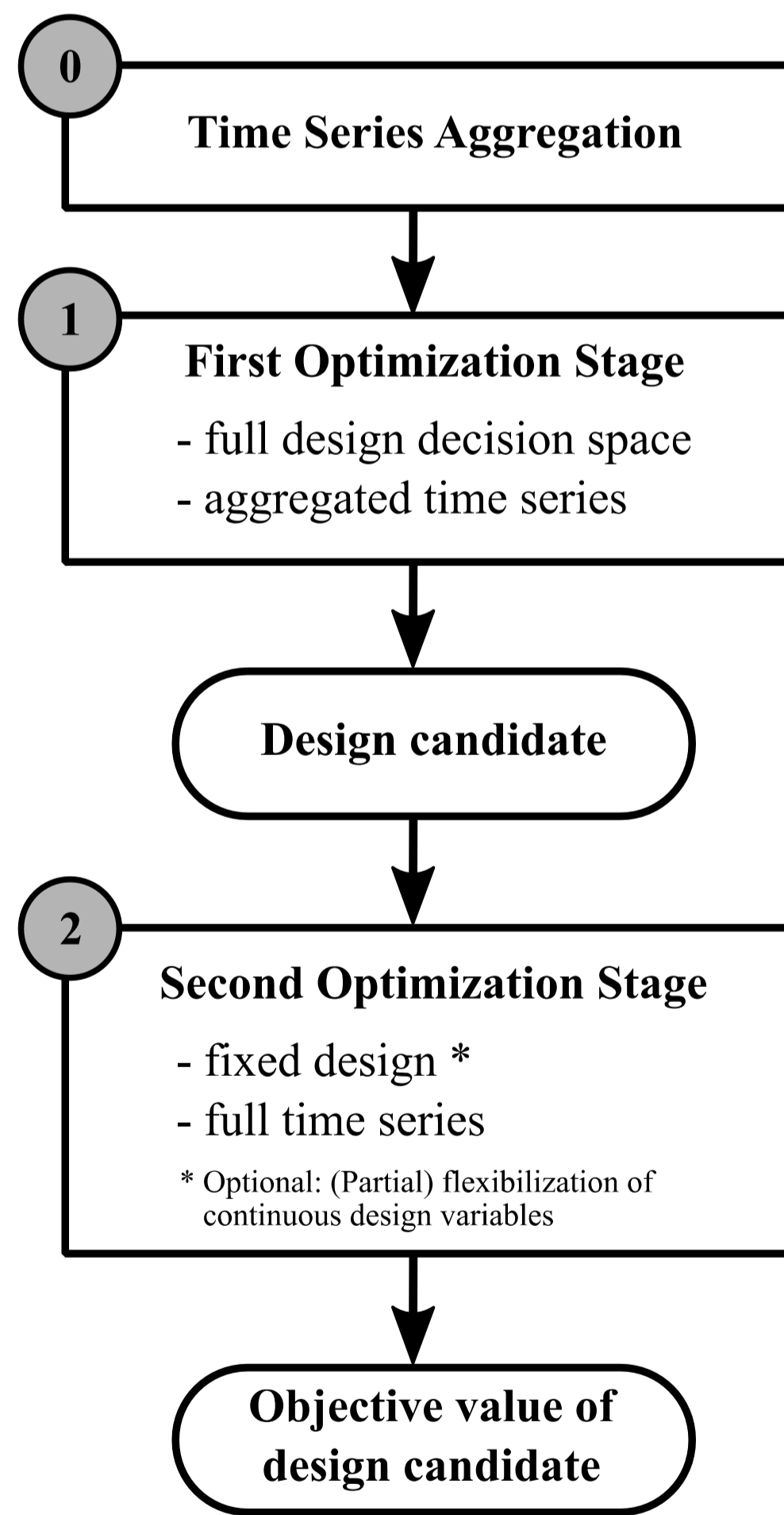
$$\max NPV = -I + Z + \sum_{a=1}^{\tau} \frac{1}{(1+i)^a} \cdot C \quad \text{mit: } C = C^{\text{Fuel}} + C^{\text{CO}_2} + C^{\text{El}} + C^{\text{O\&M}} + C^{\text{SU}} + C^{\text{Tax}}$$

(kalk. Zinssatz $i=5\%$ und wirt. Anlagennutzungsdauer $\tau=20a$)

- Modellimplementierung im Python-Paket „aristopy“
- Open-Source-Tool zur Modellierung und Optimierung des Entwurfs und Betriebs von Energiesystemen basierend auf Pyomo/Python
- Generische Modellerstellung und flexible Formulierung der Komponenten-Constraints mittels String-Auswertung
- Code: <https://github.com/sbruche/aristopy>
- Docs: <https://aristopy.readthedocs.io/>

3 Methodische Ansätze

- Hohe Rechenzeit erforderlich zur Lösung der Modelle. Ursachen:
 - Die Entwurfsvariablen koppeln die Betriebsvariablen in vertikaler Richtung der Koeffizientenmatrix
 - Zeitlich koppelnde Constraints (z.B. Speicherbilanz) verbinden die Betriebsvariablen in horizontaler Richtung der Koeffizientenmatrix
- Anwendung eines zweistufigen Lösungsansatzes (Abb. unten links)
- Verwendung der Methode von Kotzur et al.⁽³⁾ mit inter-periodischen Zeitschritten für Speicher (hier: Erweiterung für Startbedingungen)

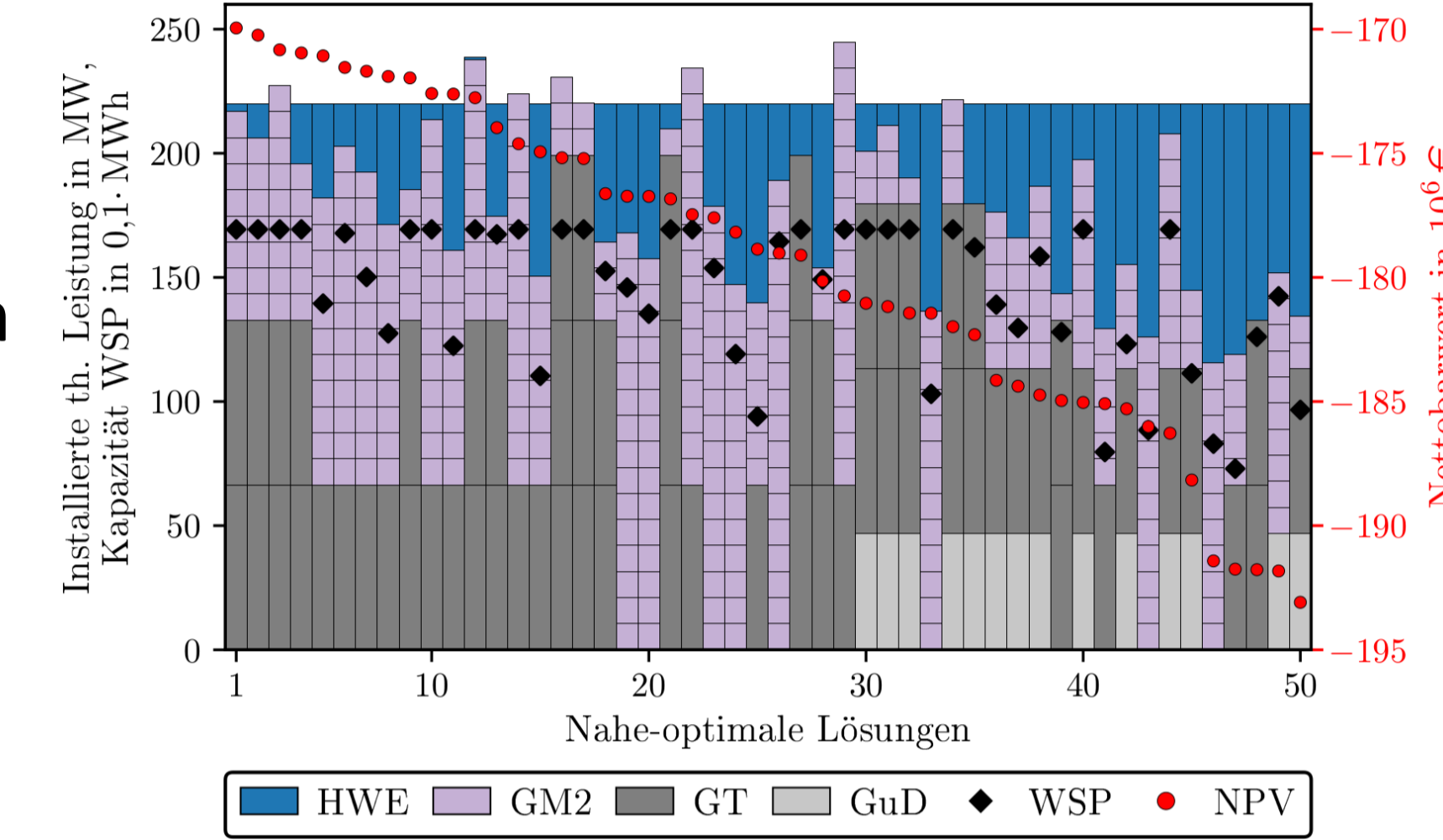


- Wenige typische Perioden (Typtage) ausreichend für qualitativ hochwertige Energiesystementwürfe aus Optimierungsrechnungen
- Deutliche Reduktion der Rechenzeit für einzelnen Optimierungslauf im zweistufigen Lösungsansatz (bei moderater Anzahl Typperioden)
- Inter-periodische Zeitschritte wichtig für saisonale Zusammenhänge (z.B. Verhinderung von Unlösbarkeiten), aber erhöhen Rechenbedarf
- Flexibilisierung kontinuierlicher Entwurfsvariablen bringt zusätzliche Vorteile, aber kann zu merklichen Rechenzeiterhöhungen führen

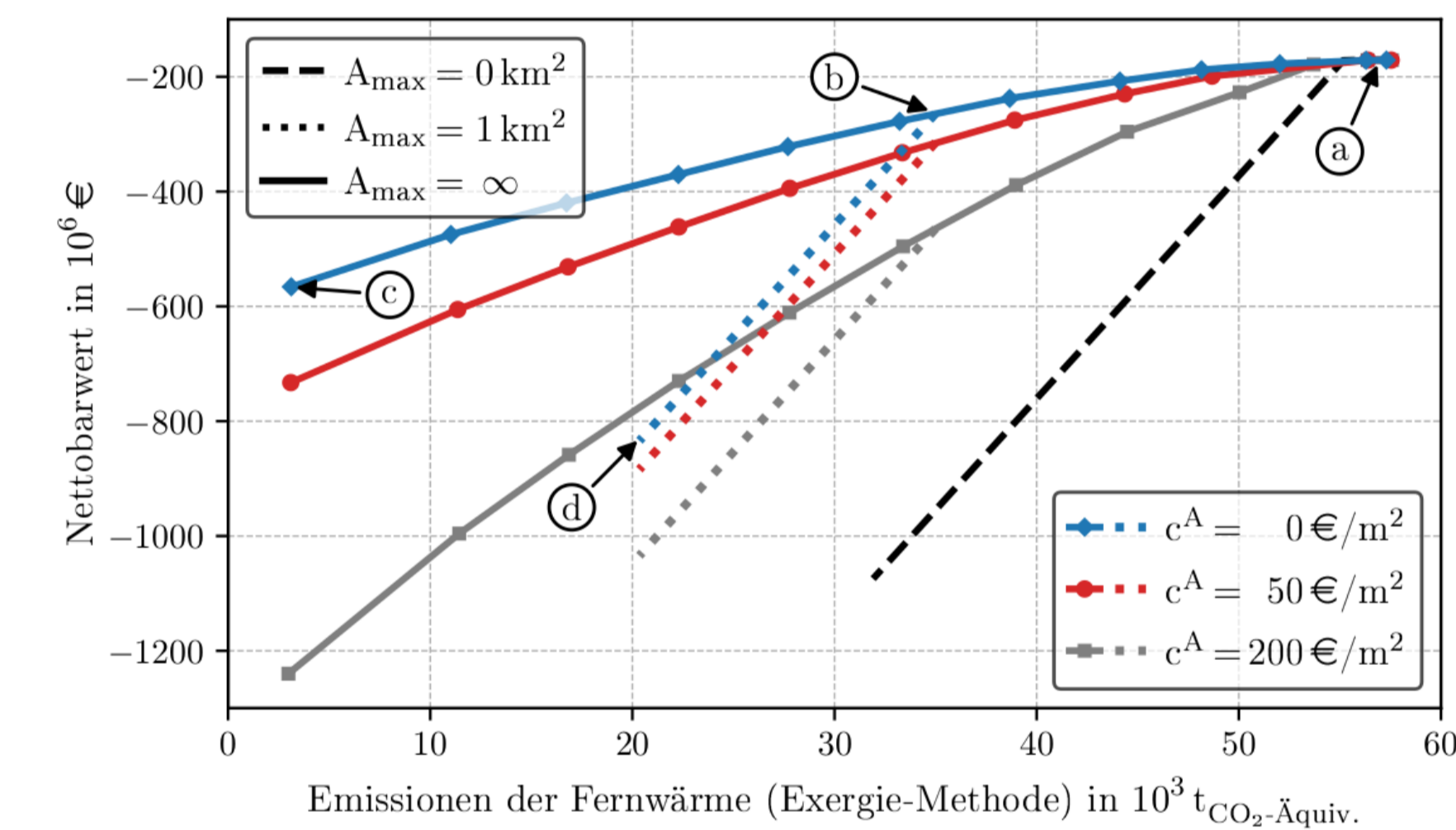
⁽³⁾ L. Kotzur, P. Markewitz, M. Robinius, D. Stolten. Time series aggregation for energy system design: Modeling seasonal storage. Applied Energy, 213:123–135, 2018

4 Ausgewählte Optimierungsergebnisse

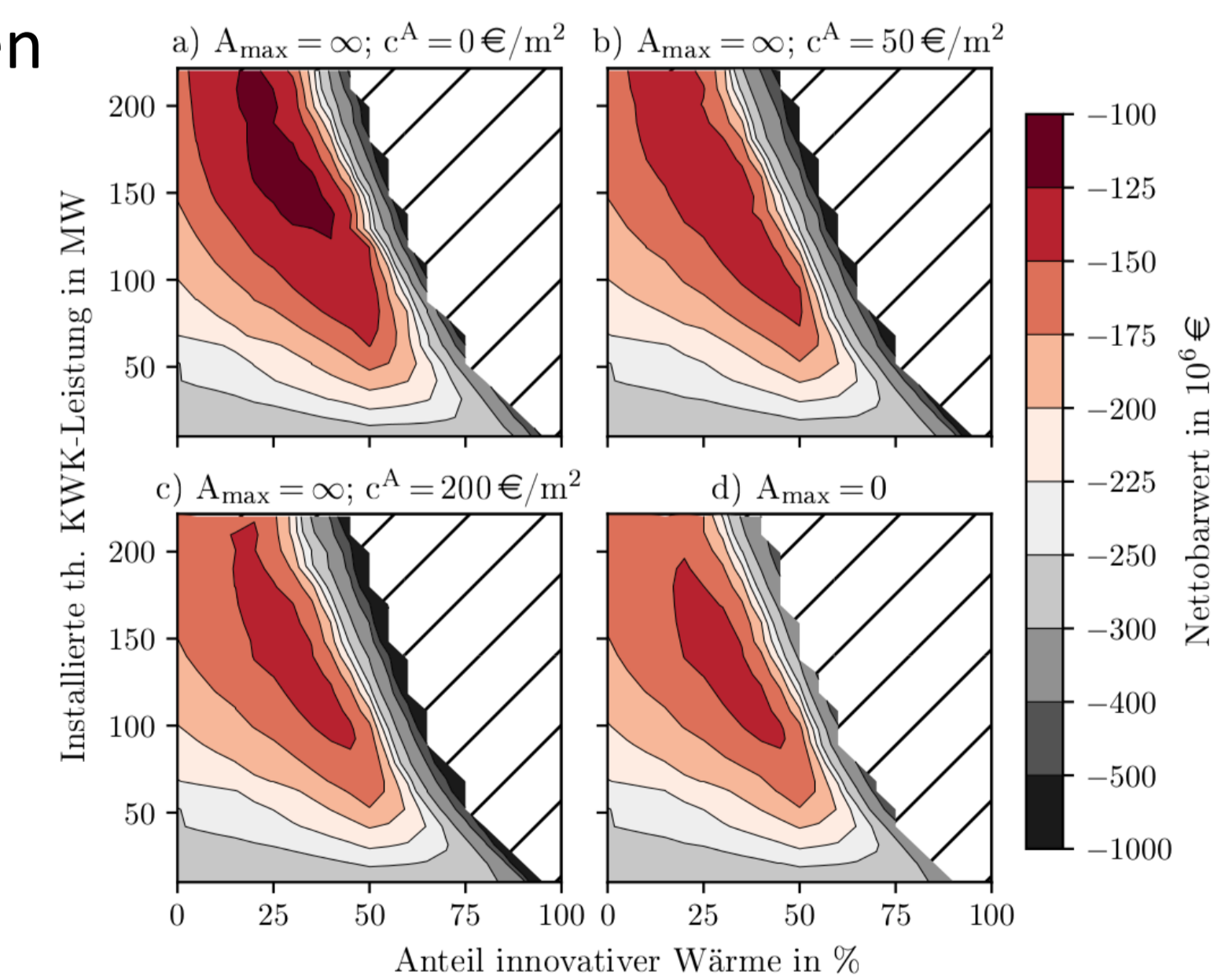
- Aktuell höchste Wirtschaftlichkeit von Anlagenkonzepten mit starkem Fokus auf Erdgas-KWK. Mittelfristig erwartete Strompreisanstiege verstärken den Trend und hinterlassen Fragen bzgl. des KWK-Förderregimes.
- Das Optimierungsproblem hat ein flaches Optimum, d.h. viele verschiedene Konfigurationen mit hohen Zielfunktionswerten existieren.



- Die Anwendung der Stromgutschrift-Methode zur Allokation der Emissionen der Fernwärme führt zu kontraintuitiven Ergebnissen; eine Umstellung auf die exergetische Bewertung ist zu empfehlen.
- Die Emissionsreduktion der Fernwärme ist mit hohen Kosten und teils hohem Flächenbedarf verbunden.



- Der neue „Bonus für innovative erneuerbare Wärme“ nach §7a KWKG ist sehr lukrativ und stellt einen starken Anreiz für Investition in Wärmepumpen dar.
- Die Wirtschaftlichkeit von Solarthermie-Anlagen ist abhängig von der Verfügbarkeit und den Kosten der Aufstellflächen, sowie vorhandenen Investitionszuschüssen.



i Acknowledgments & Kontaktdaten



Entwickelt im Verbundvorhaben „OEB-EnSys – MINLP-Optimierung des Entwurfs und Betriebs eines komplexen Energiesystems“ (FKZ: 03ET4053A)



Stefan Bruche, M.Sc.
TU Berlin, FG Energietechnik und Umweltschutz
stefan.bruche@tu-berlin.de, +49 (0)30 314 23848