

Analyse der Wärme- und Elektrizitätsversorgung des deutschen Wohngebäudesektors in einem optimierenden Energiesystemmodell

Symposium Energieinnovation, Graz, 15.-17. Februar 2012

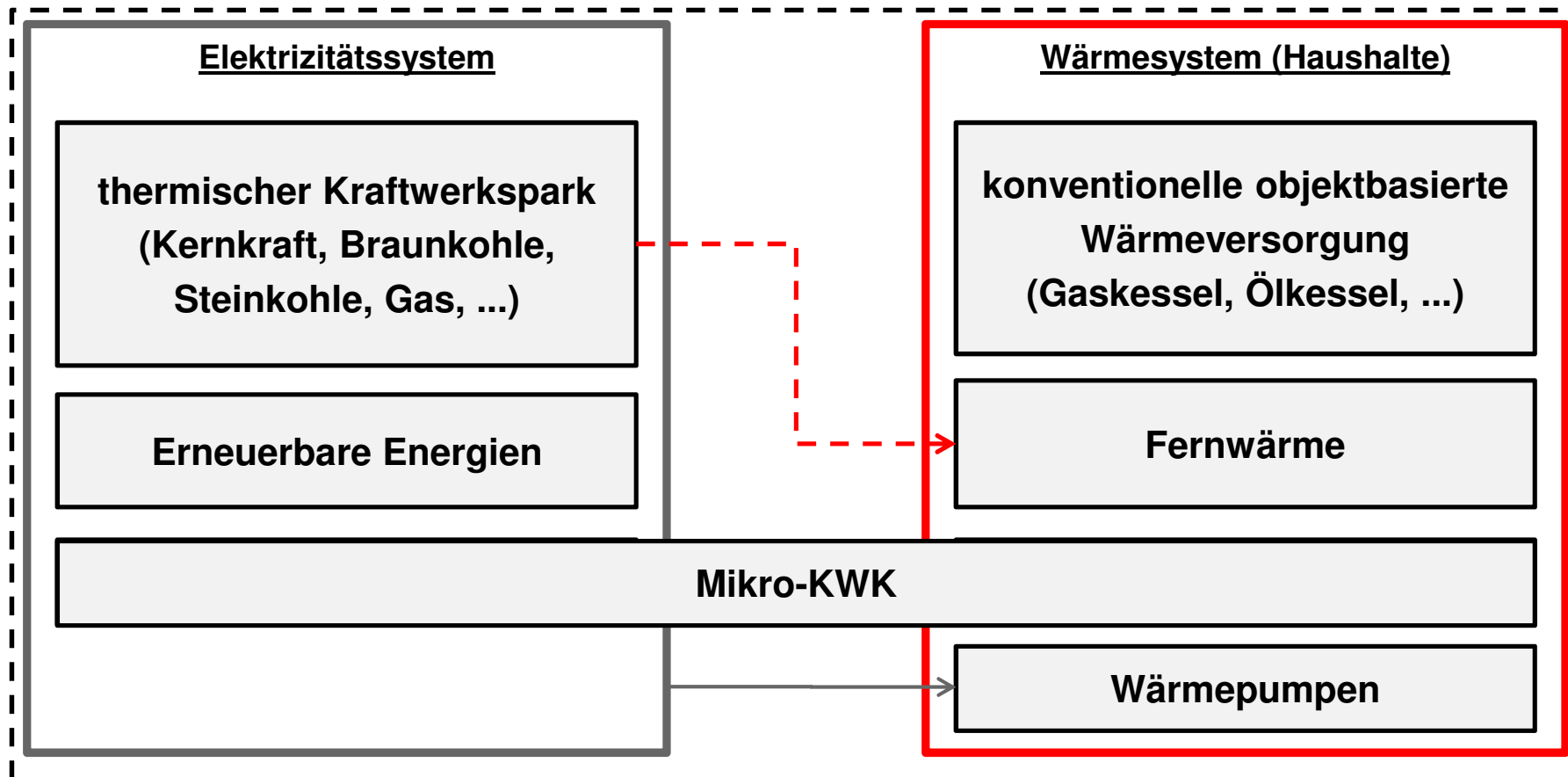
Erik Merkel, Daniel Fehrenbach, Russell McKenna, Wolf Fichtner



Agenda

- Motivation
- Modellaufbau
- Methodische Umsetzung
- Beispielhafte Ergebnisse
- Fazit und Ausblick

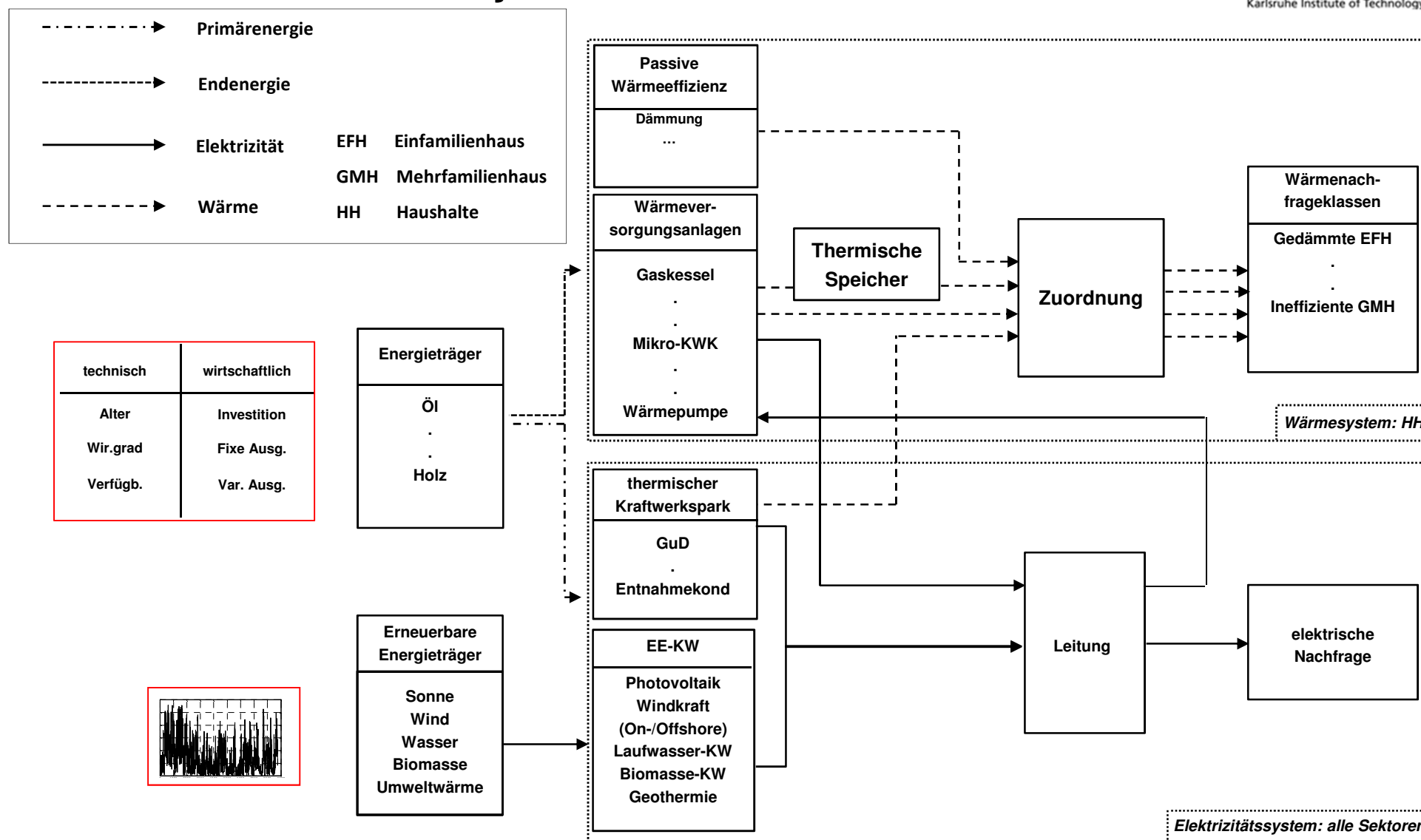
Motivation



- Umfassende Netzstruktur
 - Zentralisierte Produktion
- ⇒ Abstraktion von Netzinfrastruktur
- ⇒ Aggregierte Nachfrage

- Netze begrenzter Reichweite
 - Hauptsächlich objektbasierte Versorgung
- ⇒ Heterogenität
- ⇒ Nachfrageklassifizierung

Modellaufbau - Gesamtsystem



Methodische Umsetzung

- Umsetzung in optimierendem Energiesystemmodell (TIMES)
- Planungszeitraum: 2000 – 2050
- Entscheidungsvariablen: Kraftwerksausbau- und –einsatzplanung in Elektrizitäts- und Wärmesystem
- Zielfunktion: Minimierung der diskontierten Systemausgaben

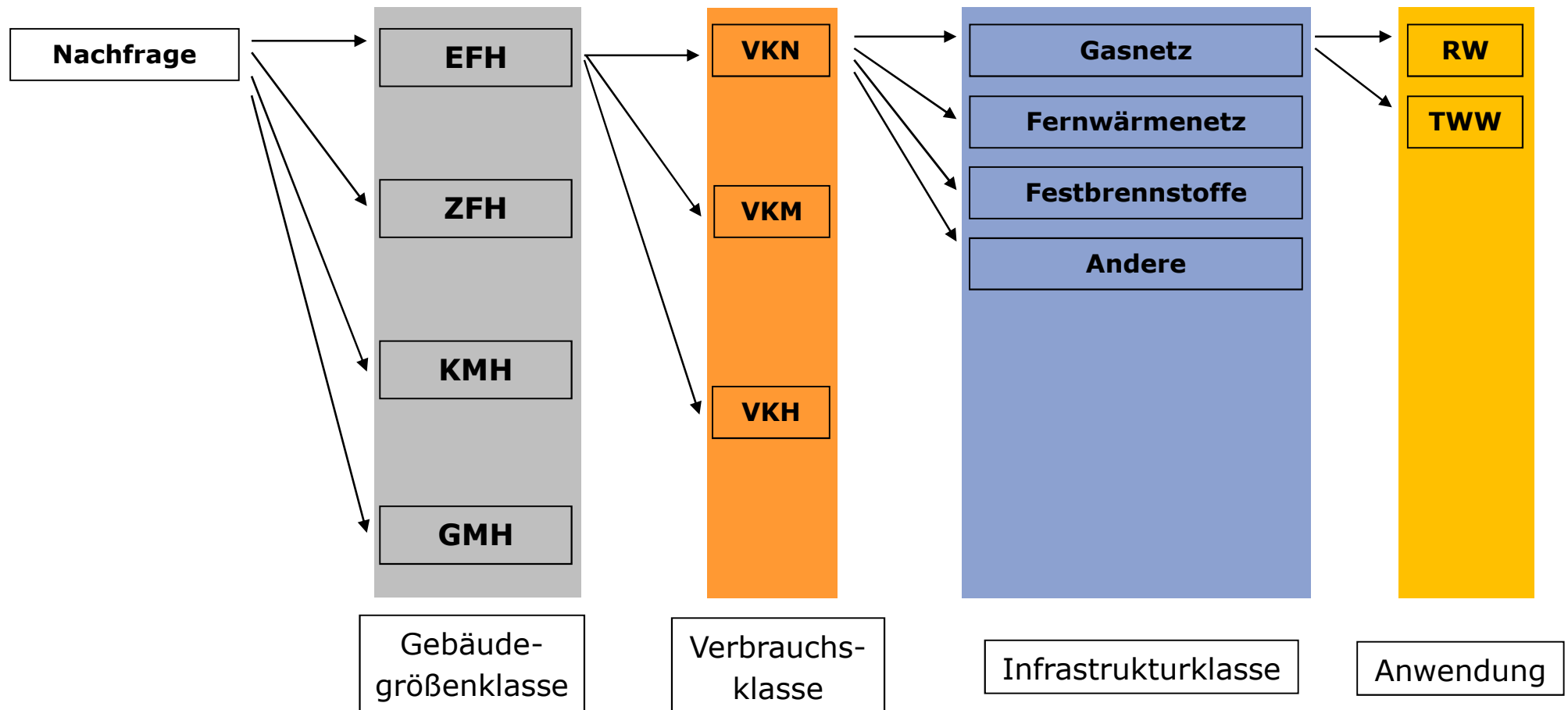
$$ZF = \sum_{y \in (t_0, T)} DISC(y, t_B) \times \left\{ \begin{array}{l} INVCOST(y) + INVTAXSUB(y) + COSTDECOM(y) + \\ FIXCOST(y) + VARCOST(y) \end{array} \right\}$$

- Nebenbedingungen: Bilanzgleichungen, Kapazitätsrestriktionen usw.

$$\begin{array}{l} VAR.FLO(p, c, ts) \leq AFS(p, ts) \times \{PASTI(p, t) + VAR.NCAP(p, t)\} \times \\ CAPACT(p, c) \times DUR(ts) \qquad \qquad \qquad \forall p \in P, c \in C, ts \in \{1, \dots, 224\} \end{array}$$

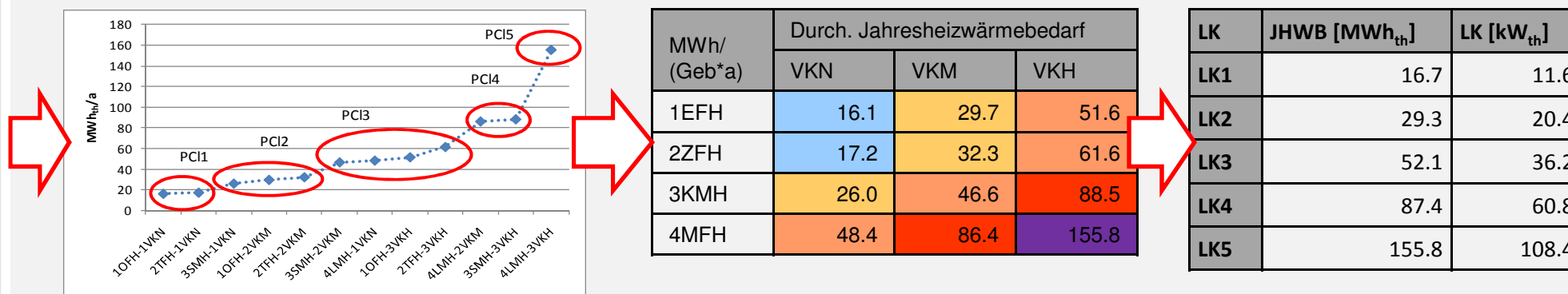
Methodische Umsetzung

Modellierung der Nachfrage



Methodische Umsetzung Zuordnung Nachfrage-Technologieoptionen

1. energetisch: Technologien zu Leistungsklassen (LK)



2. infrastrukturell: Technologien zu Infrastrukturklassen

- Möglichkeit des Gasnetzanschlusses
- Möglichkeit des Fernwärmenetzanschlusses

⇒ Reduktion der Zuordnungsmatrix von 864 zu 514 Kombinationsmöglichkeiten von Technologie und Nachfrageklasse

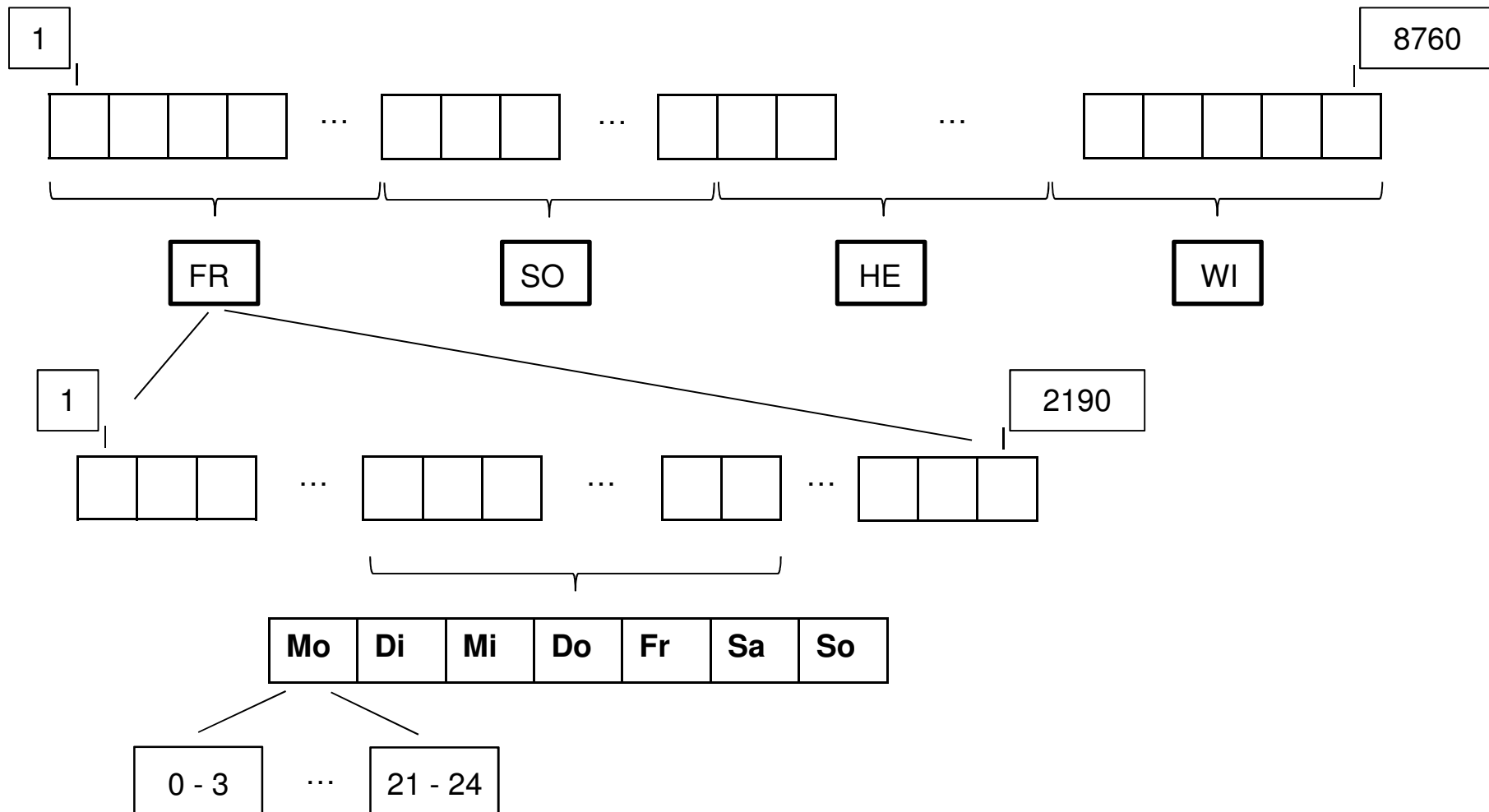
Karlsruhe Institute of Technology

45 Technologieoptionen

96 Nachfrageklassen

Methodische Umsetzung

Zeittypisierung



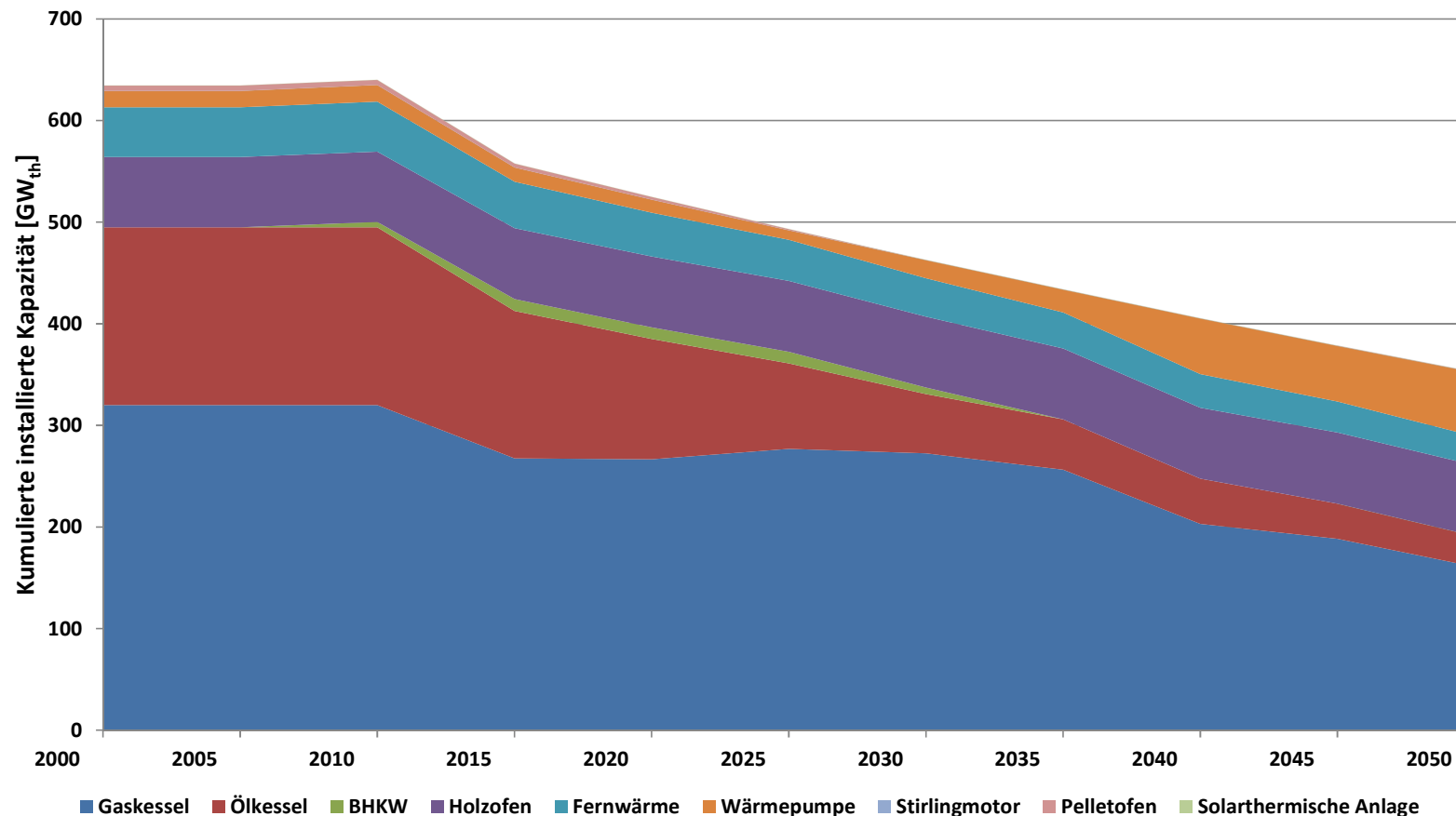
Beispielhafte Ergebnisse

Rahmendaten und Annahmen

- Absenkung des jährlichen Bedarfs an RW und TWW von ca. 2100 PJ im Jahr 2010 auf 1600 PJ im Jahr 2050 im Sektor der privaten Haushalte
- konstante Stromnachfrage über alle Sektoren bis 2050
- Vorgegebener Ausbaupfad von Kraftwerken auf Basis erneuerbarer Energieträger
- Energieträgerpreisentwicklung gemäß BMWi (2010)
- Keine Investitionsreduktionen der Energieumwandlungstechniken des Wärmesystems im Zeitverlauf („Technikoptimismus“-Szenarien vorbehalten)

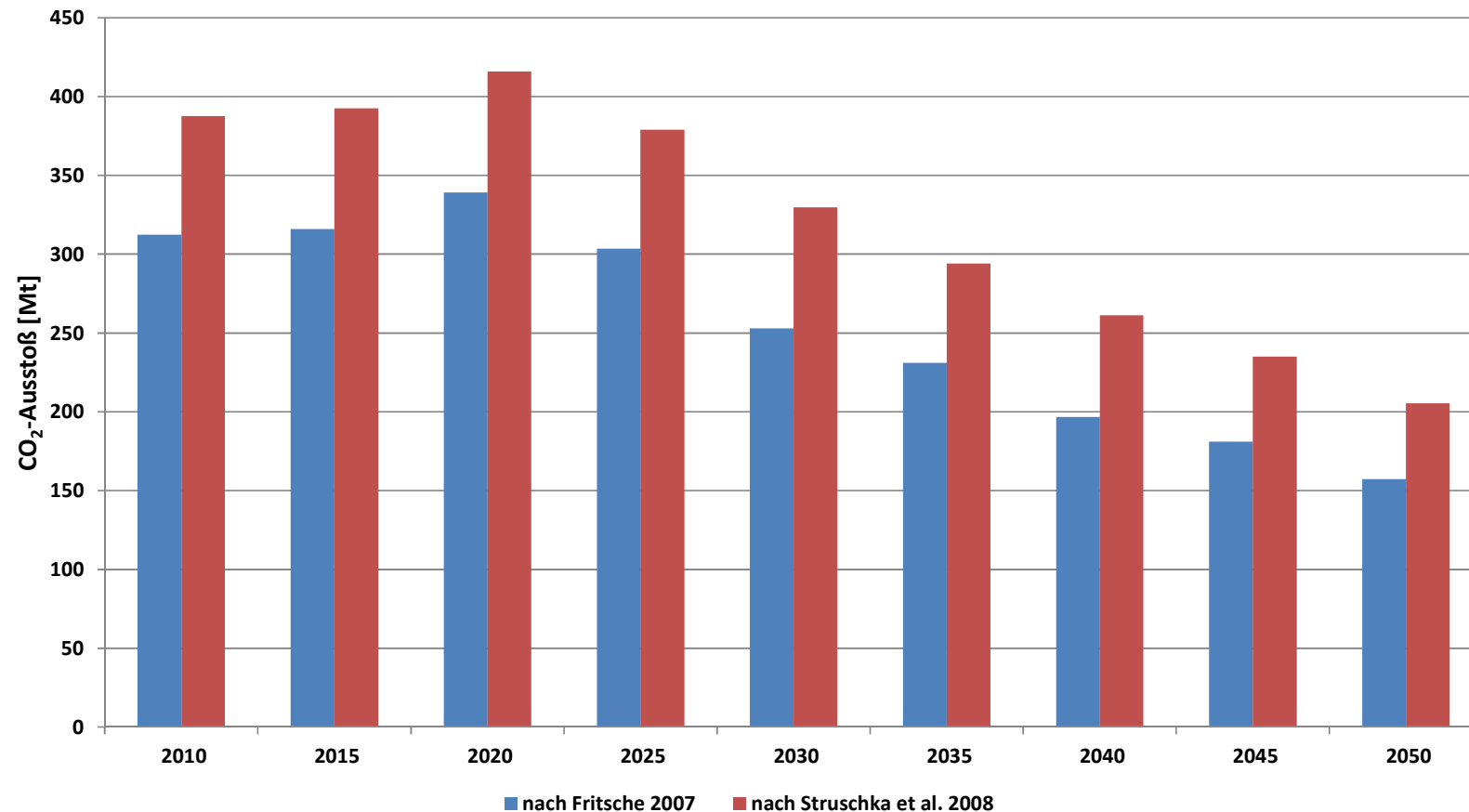
Beispielhafte Ergebnisse

Kapazität von Energiewandlungstechniken des Wärmesystems bis 2050



Beispielhafte Ergebnisse

CO₂-Ausstoß bis 2050



Fazit/Ausblick

Fazit

- Integriertes Modell der Wärme- und Elektrizitätsversorgung des deutschen Wohngebäudesektors
- Zubau von Mikro-KWK von ca. 11 GW_{th} (überwiegend bei MFH)
- Zubau von Wärmepumpen von ca. 50 GW_{th}

Ausblick

- Integration weiterer Teilsysteme (GHD, Industrie)
- Implementierung leitungsgebundener Wärmeversorgung
- Untersuchung des Verbundsystems von KWK, Wärmepumpen und thermischer Speicher hinsichtlich dessen Potenzial zum Lastmanagement fluktuierender Energieeinspeisung

Vielen Dank für die Aufmerksamkeit

Literaturverzeichnis

- BMWi BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND TECHNOLOGIE UND BMU BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (HRSG.): *Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung*; BMWi, Berlin 2010.
- BMWi BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND TECHNOLOGIE: *Energiedaten - nationale und internationale Entwicklung (Gesamtausgabe)*; Zahlen und Fakten; BMWi Referat III C 3, 2010.
- STATISTISCHES BUNDESAMT (HRSG.): *Bautätigkeit und Wohnungen: Mikrozensus - Zusatzerhebung 2006 Bestand und Struktur der Wohneinheiten, Wohnsituation der Haushalte*; Fachserie 5, Heft 1; Statistisches Bundesamt, Wiesbaden 2008.
- STATISTISCHES BUNDESAMT (HRSG.): *Gebäude und Wohnungen - Bestand an Wohnungen und Wohngebäuden, Abgang von Wohnungen und Wohngebäuden, Lange Reihen ab 1969 - 2009*; Statistisches Bundesamt, Wiesbaden 2010.
- AGFW ARBEITSGEMEINSCHAFT FERNWÄRME E.V.: *Strategien und Technologien einer pluralistischen Fern- und Nahwärmeversorgung in einem liberalisierten Energiemarkt unter besonderer Berücksichtigung der Kraft-Wärme-Kopplung und regenerativer Energien*, Hauptstudie, zweiter Bearbeitungsschritt, Band 1; AGFW, Frankfurt am Main 2004.

Back up

Objectives of the German government in the buildings sector:

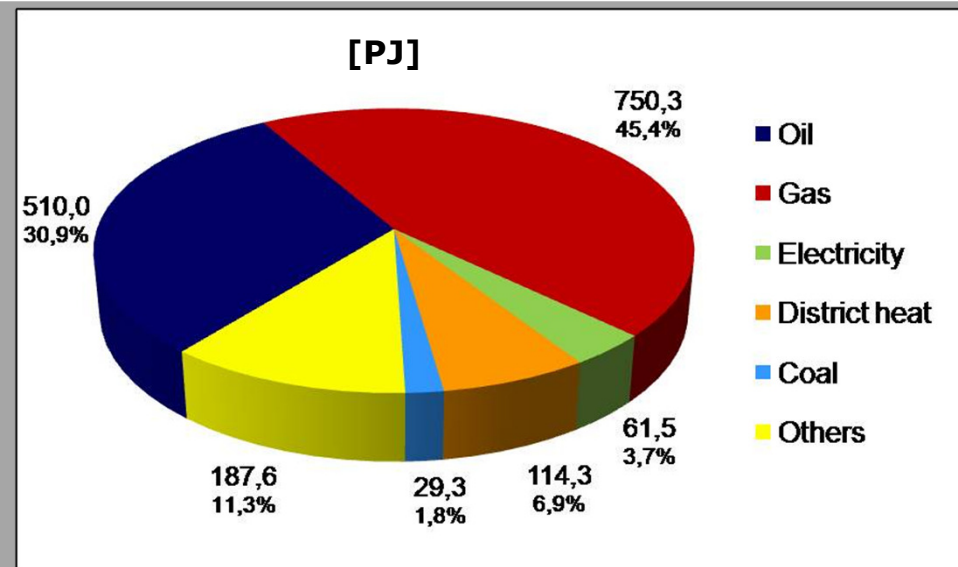
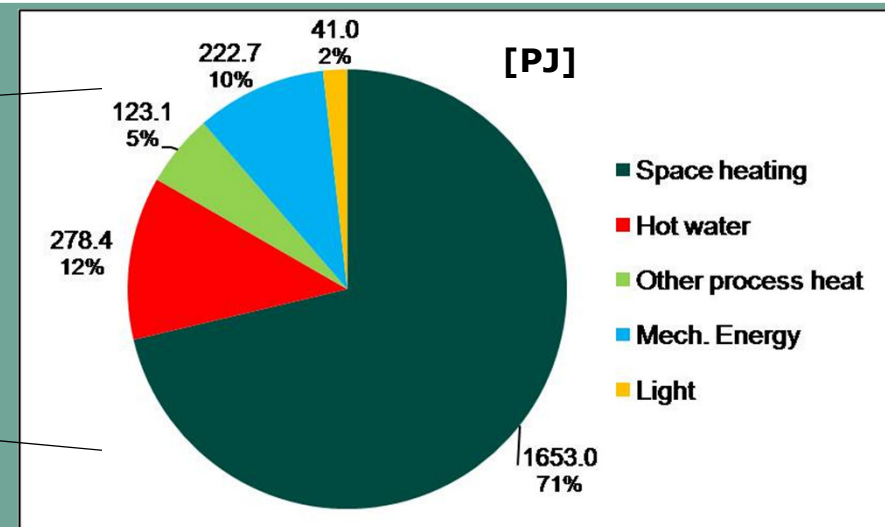
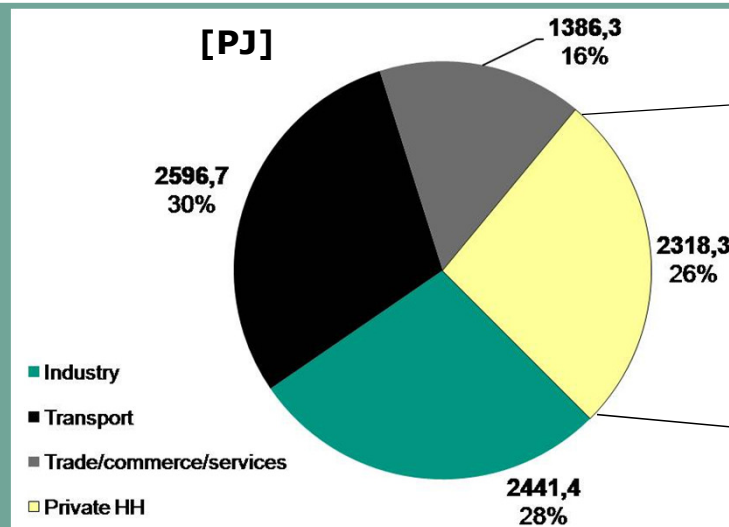
- **Until 2050: Reduction of primary energy needs by 80%
→ almost climate-neutral building portfolio**
- **Doubling of the energy-saving renovation rate
(from 1% to 2%)**
- **Until 2020: Reduction of heat requirement in buildings by 20%**
- **CHP share of electricity of 25% until 2020**

Source: German Government's Energy Concept 2010

Objectives

- Extension of existing electricity system models to include a detailed mapping of heat supply
- Analyze the possible future development of the national heat supply system to reach national energy policy targets
- Determine economic potential for technologies at the heat/power interface
 - Here: micro-CHP, heat pumps and heat storage devices
- Identify suitable areas of application for heat technologies, depending on:
 - Existing infrastructure
 - Types of buildings
 - Building sizes
 - Regions

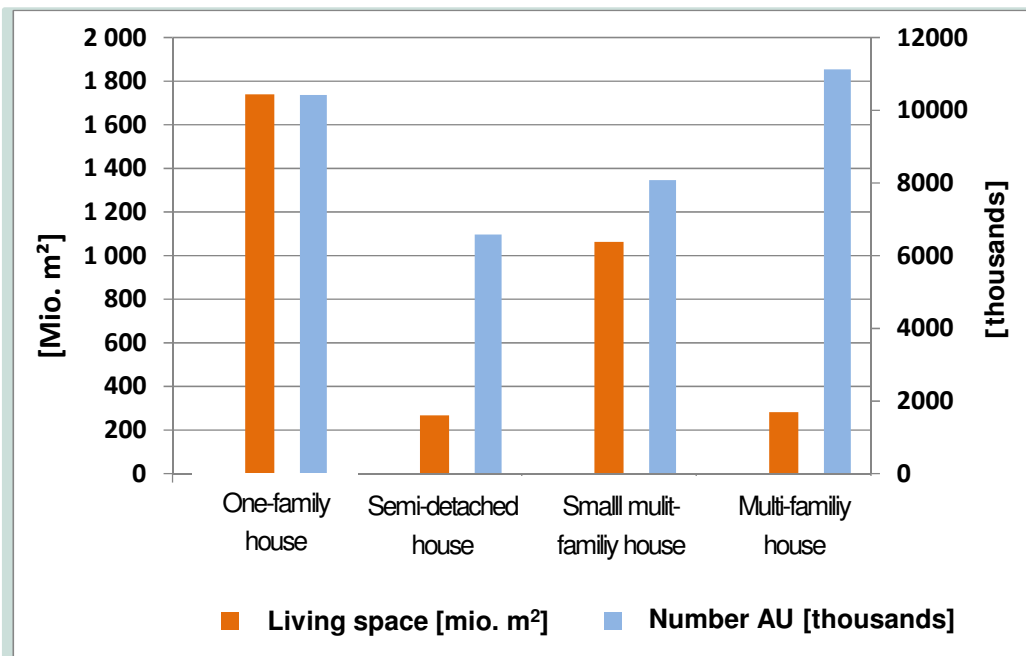
Status quo of heat requirement in buildings (1)



Source: BMWi 2007

Status quo of heat requirement in buildings (2)

- Important factors for heat demand in households:
 - Building size (GGK) and floor space in m^2
 - Age of buildings > Insulation > Specific consumption in kWh/m^2
 - (User behaviour, owner/tenant)



Source: IWU 2007

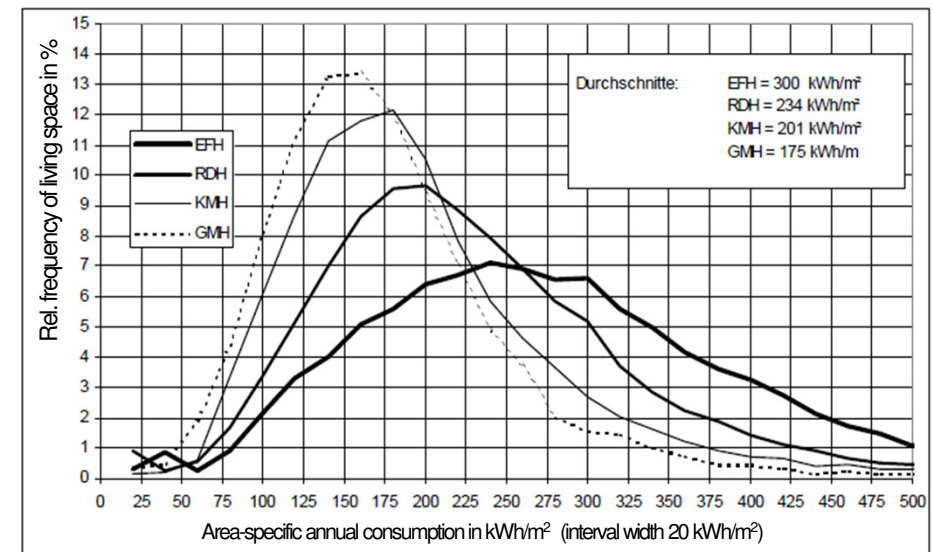
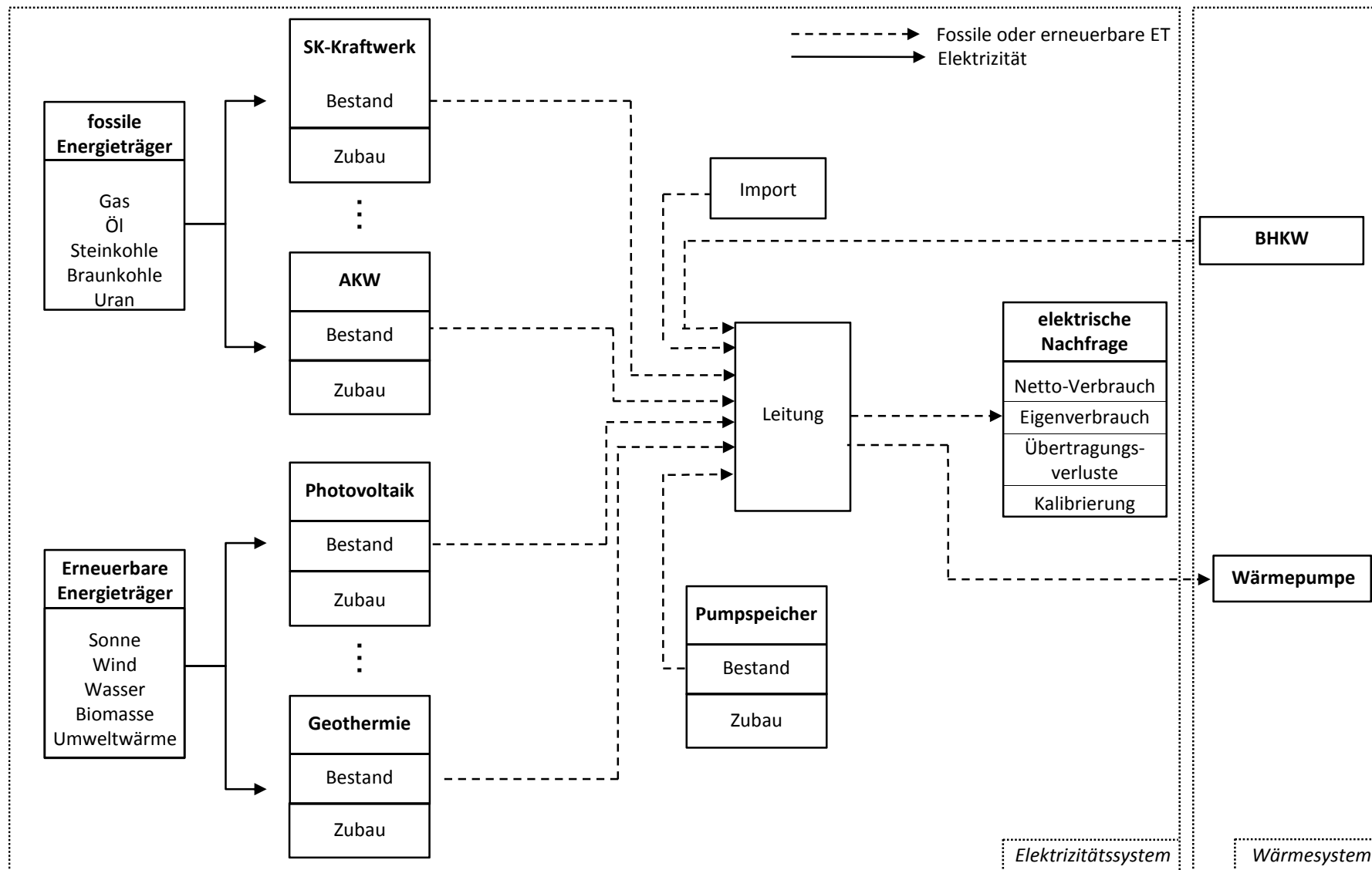


Figure 6: Area-specific annual consumption for space heating and hot water (mere residential buildings and mixed use, all ages)

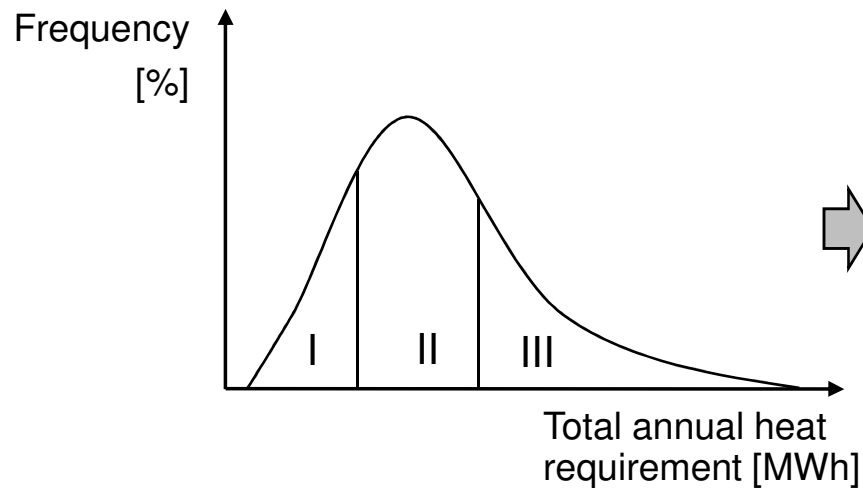
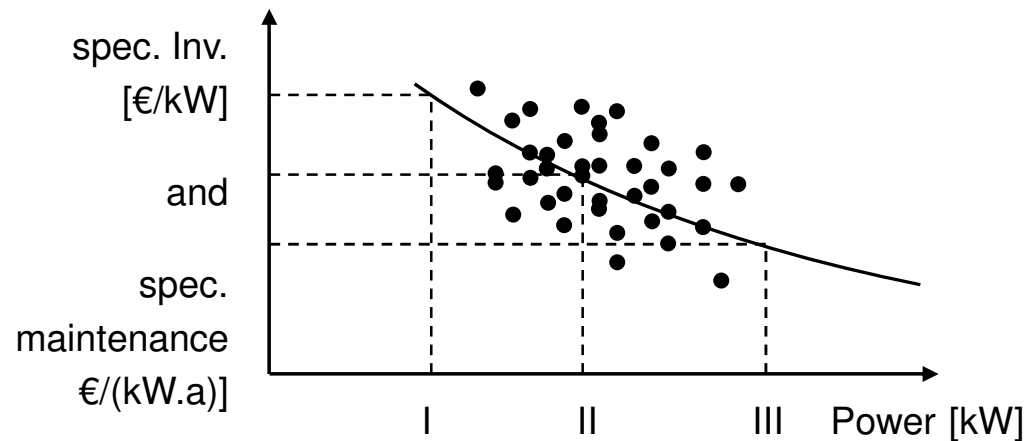
Source: AGFW 2004

➔ actually a continuous distribution

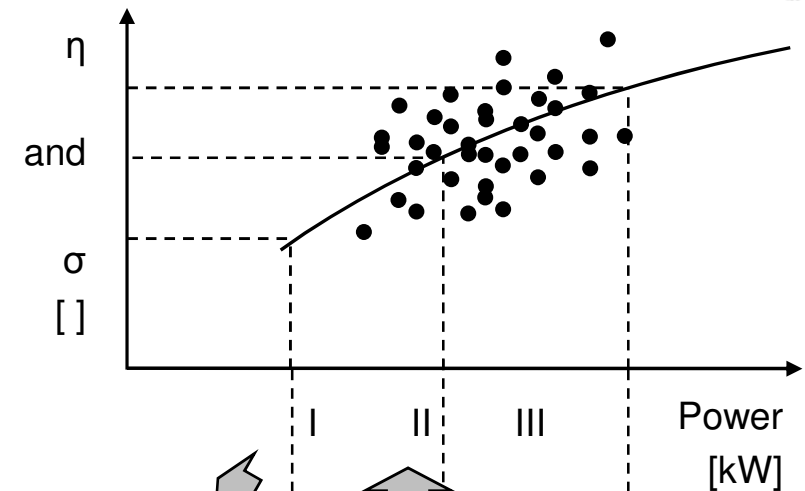
Modellaufbau - Gesamtsystem



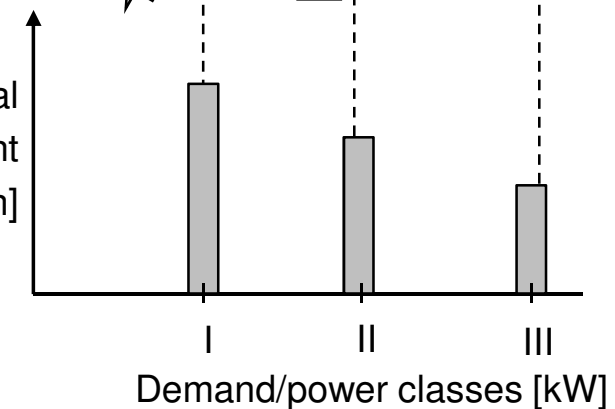
General modelling approach



Idealised class formation according to distribution of total annual heat requirement per building



Total annual Heat requirement [MWh]



Practical implementation by means of building size and average requirement values

General modelling approach

Distribution of Building Specific Heat Demand

MWh/ (B*a)	Average Building consumption		
	1CnCIL	2CnCIM	3CnCIH
1SFH	16.1	29.7	51.6
2TFH	17.2	32.3	61.6
3SMH	26.0	46.6	88.5
4LMH	48.4	86.4	155.8

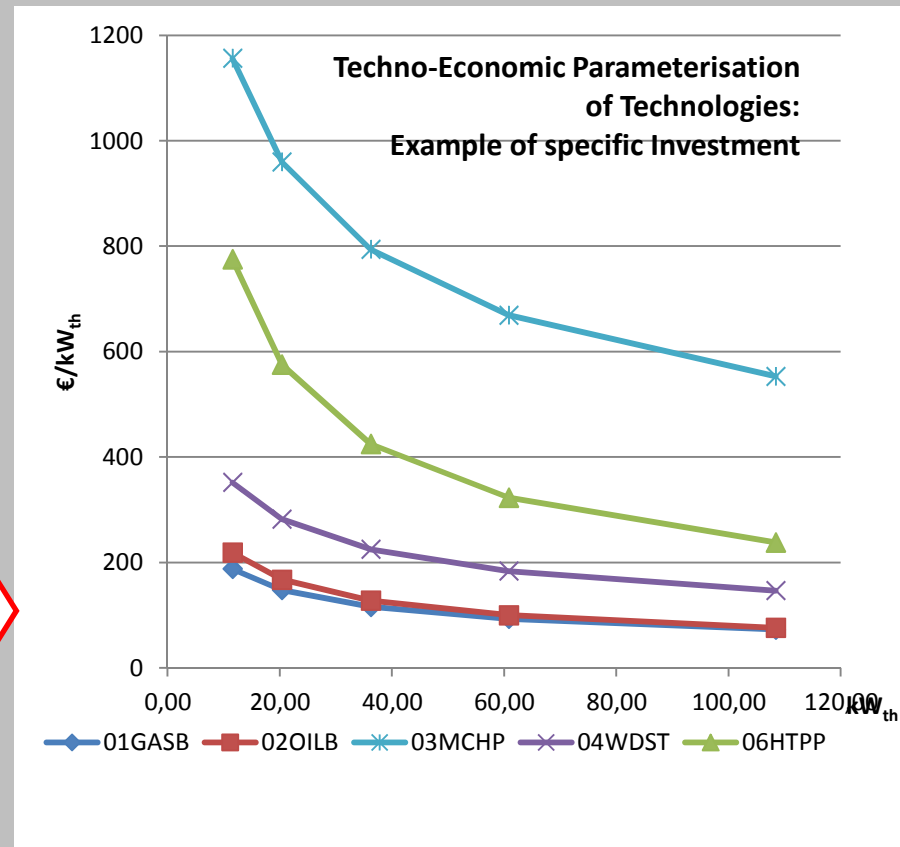


Allocation to Power classes

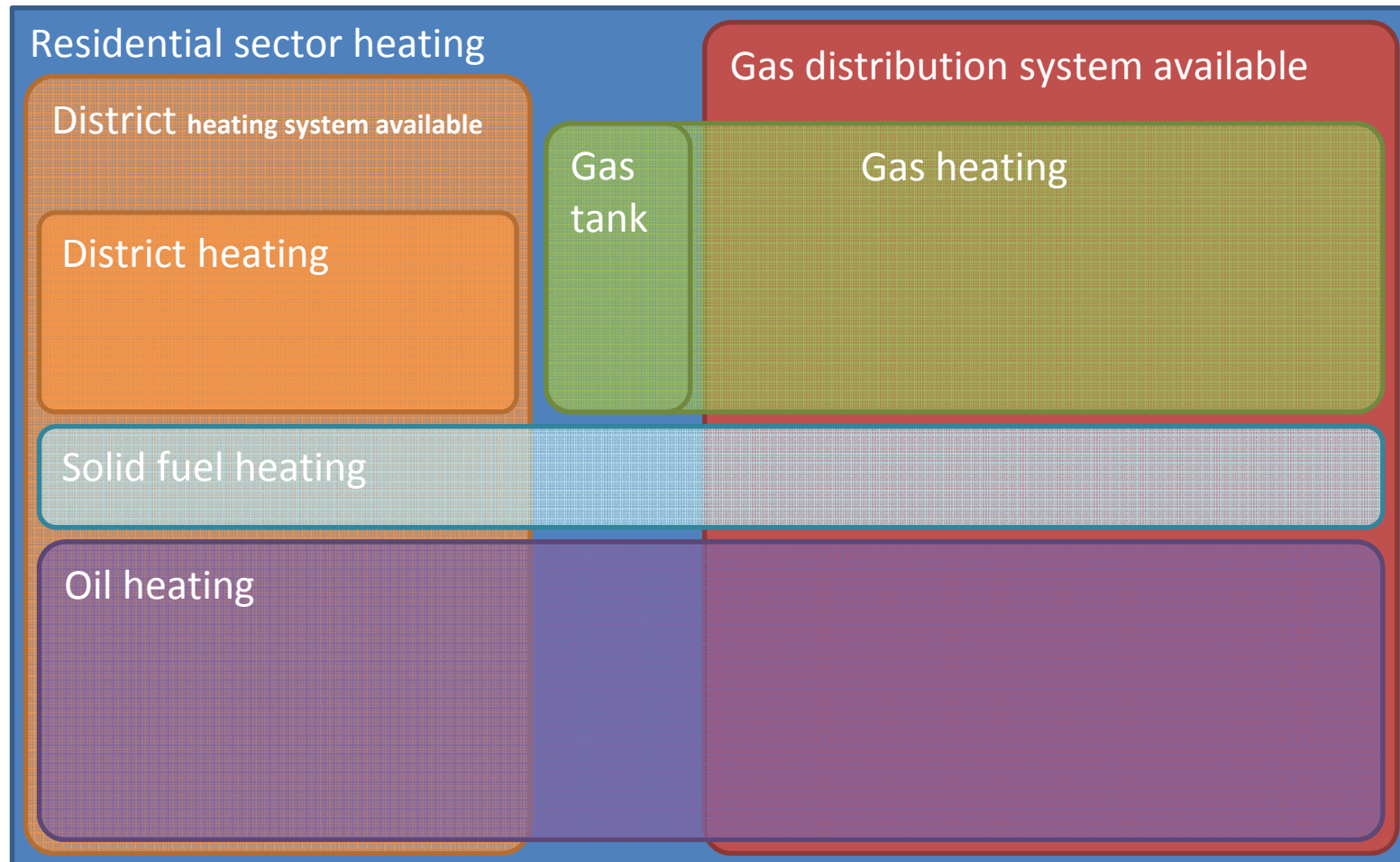
PCI	BHtCn [MWhth]	PCI [kWth]
PCI1	16.7	11.6
PCI2	29.3	20.4
PCI3	52.1	36.2
PCI4	87.4	60.8
PCI5	155.8	108.4



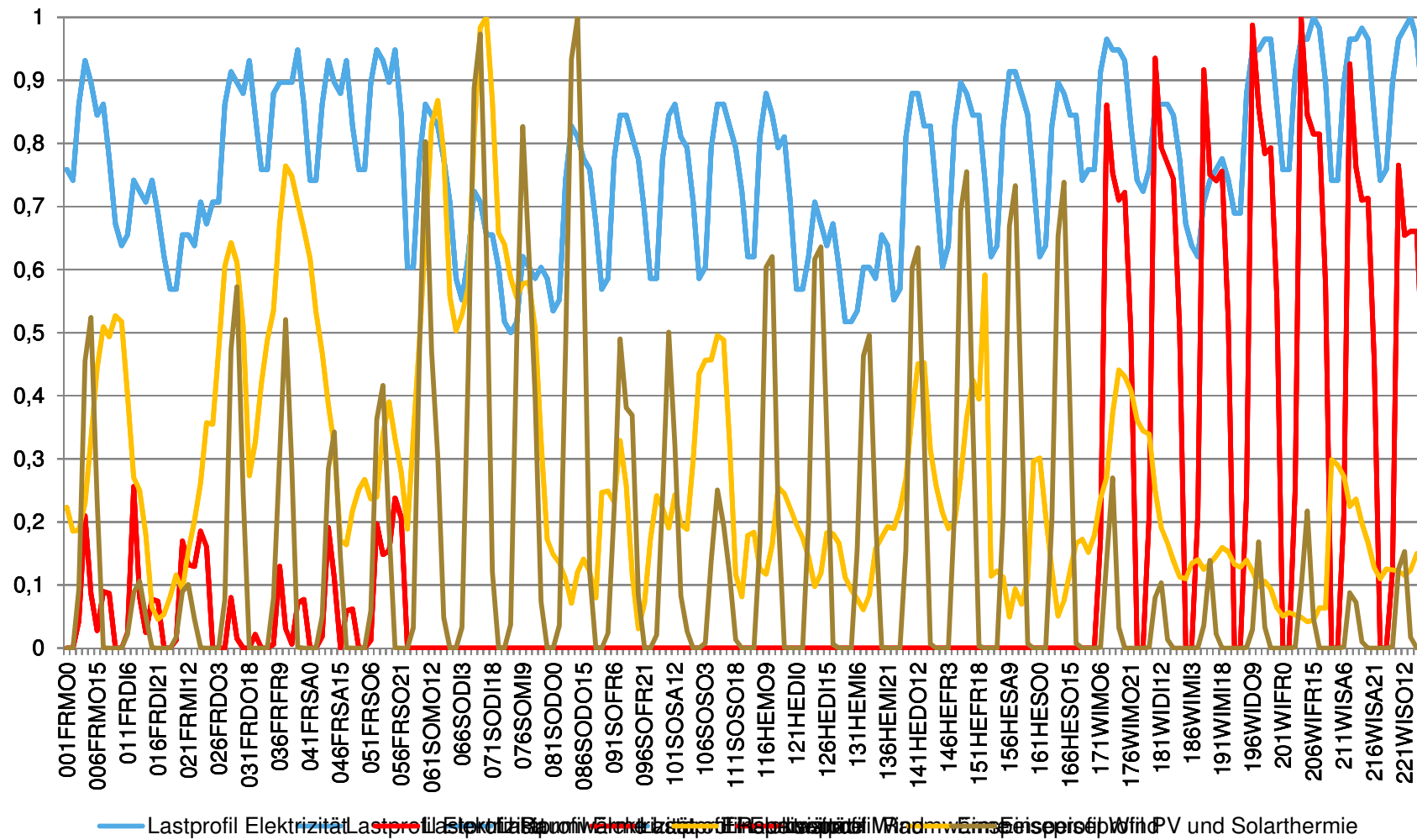
Parameterisation of Power Classes



Motivation for infrastructure classes



Zeittypisierung: Mittelung vs. Stichprobe



Quelle:
Eigene Berechnungen
auf Datenbasis von
Trnsys, Amprion,
ENBW, Transpower,
50 Hertz, ENTSO-E

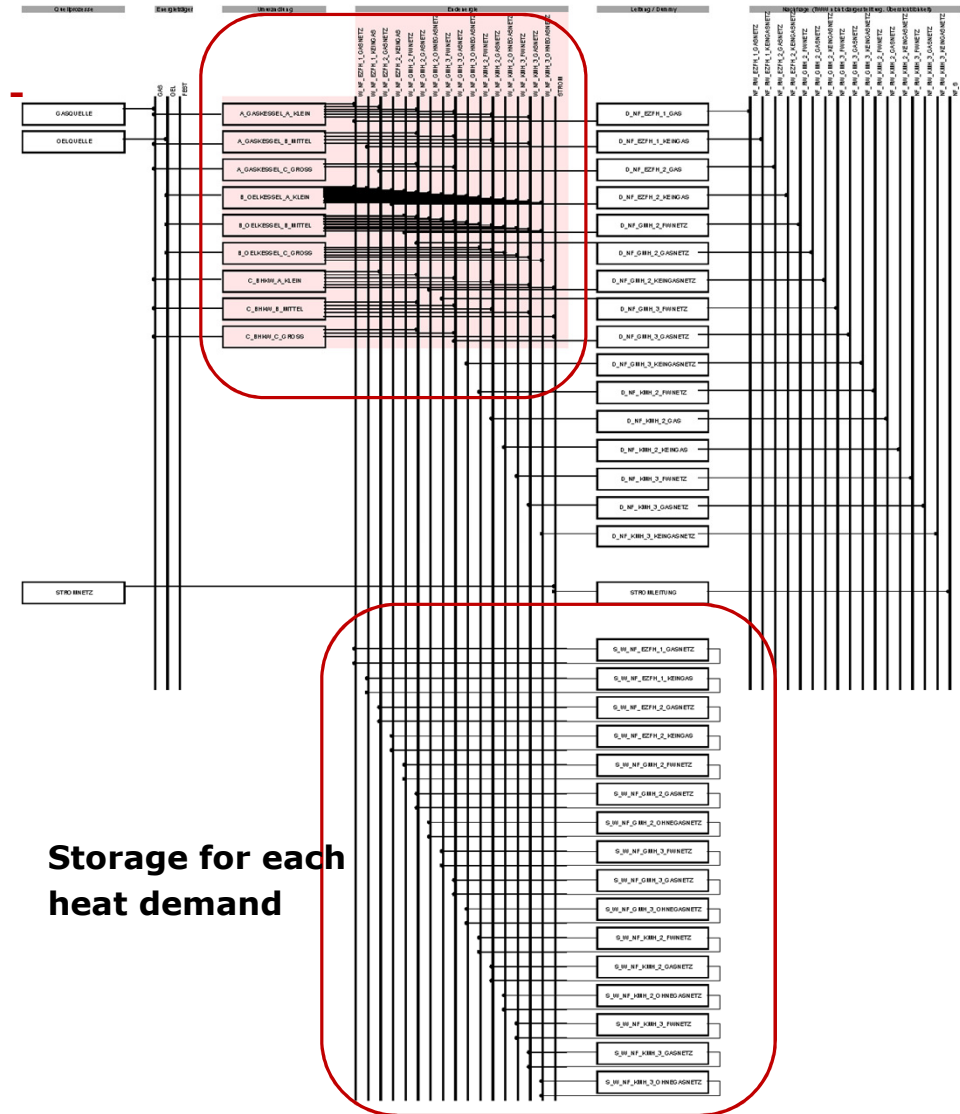
Formation of infrastructure-related demand classes

**Demand classes –
Technology options –
matrix**

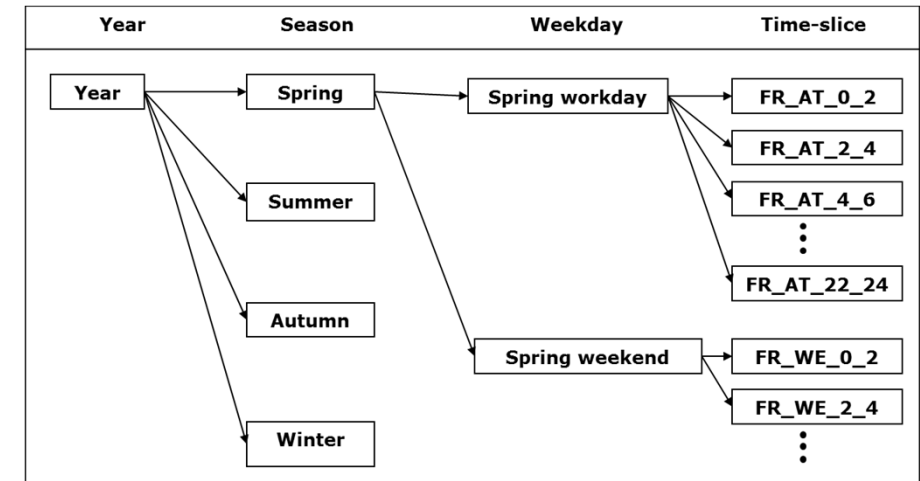
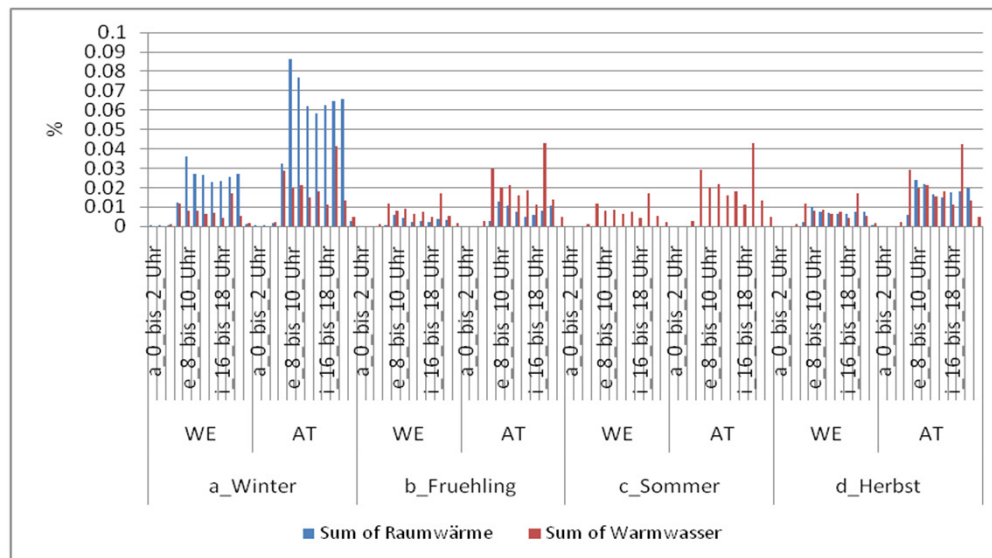
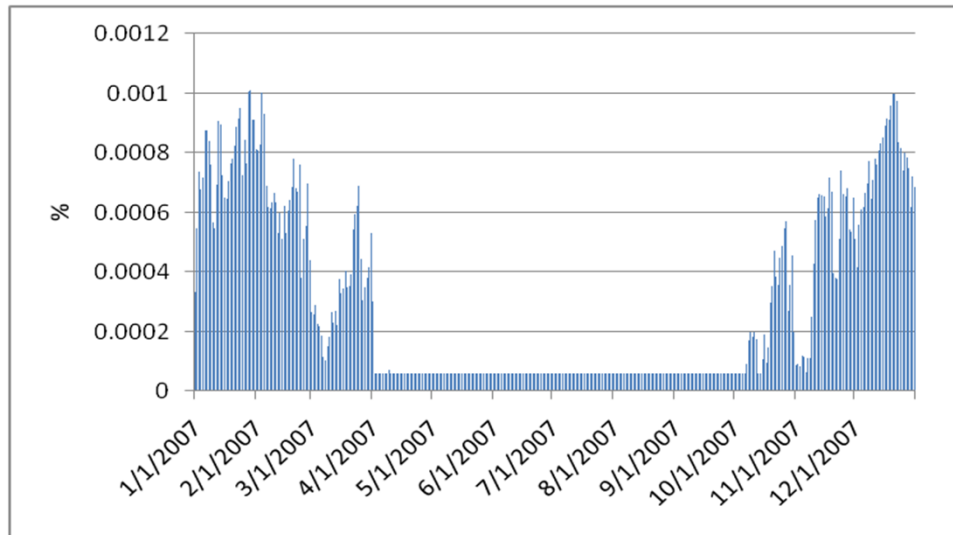
m Technology options classes
=
m₁ Technology classes
x
m₂ Power classes

n Demand classes
=
n₁ Building size classes
x
n₂ Infrastructure classes

**Demand classes/
Technology options -matrix**
[n x m]
(binary)



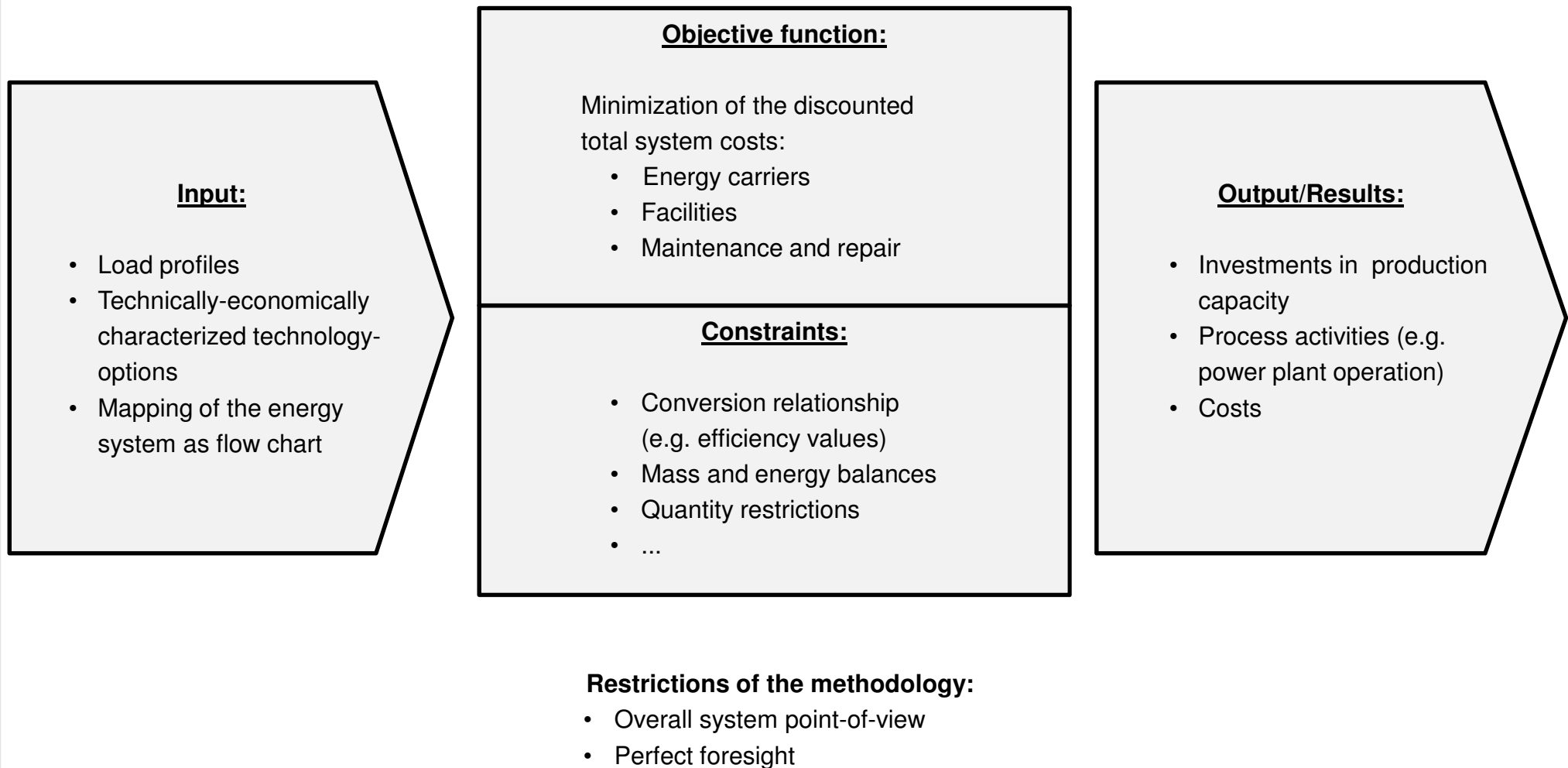
Load curve structure



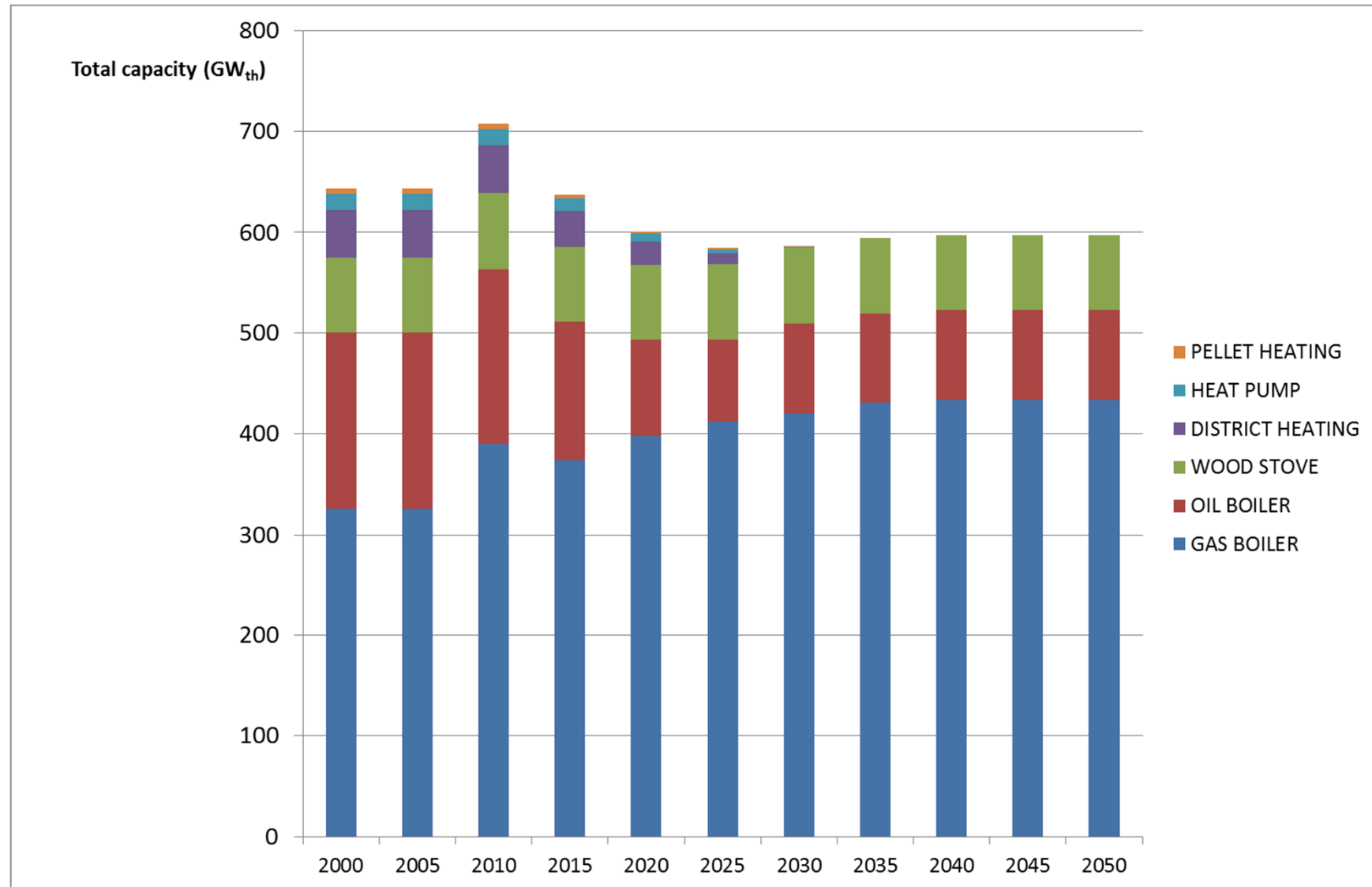
Level	Season	Day	2-hourly timeslice
No. of time slices at this level	4	2	12
Cum. no of timeslices	4	8	96

8760 chronological values are allocated to 96 time-slices

Method: linear optimization under constraints (LP)

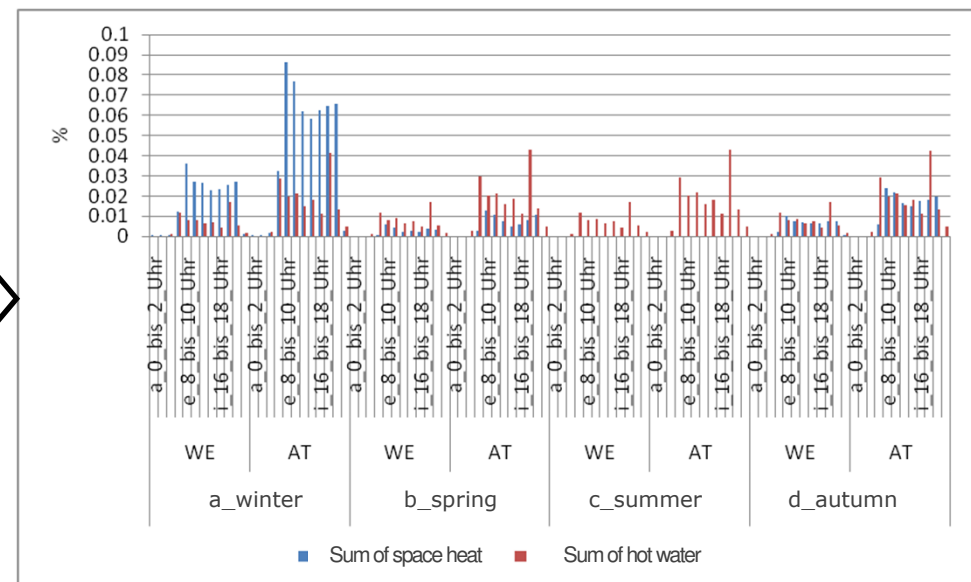
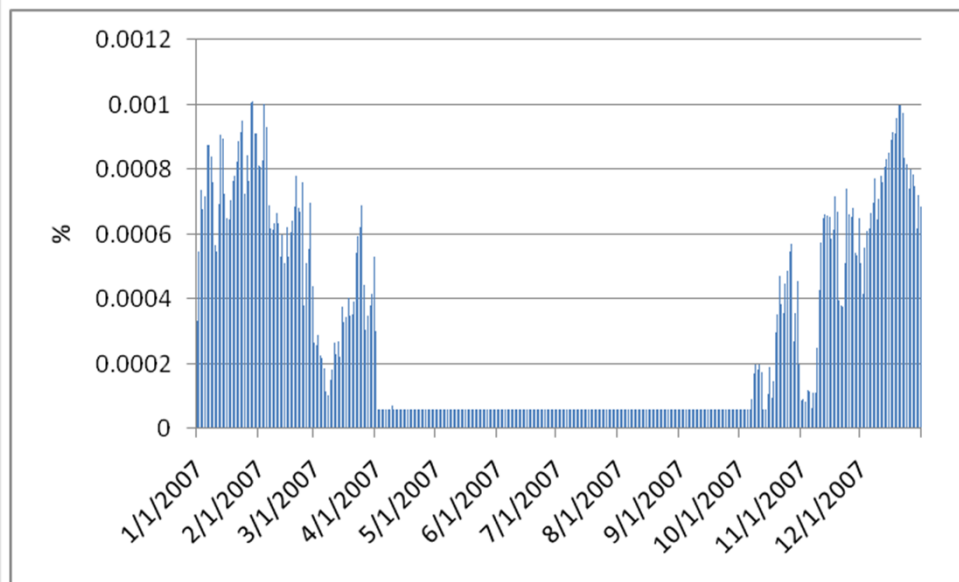


First results



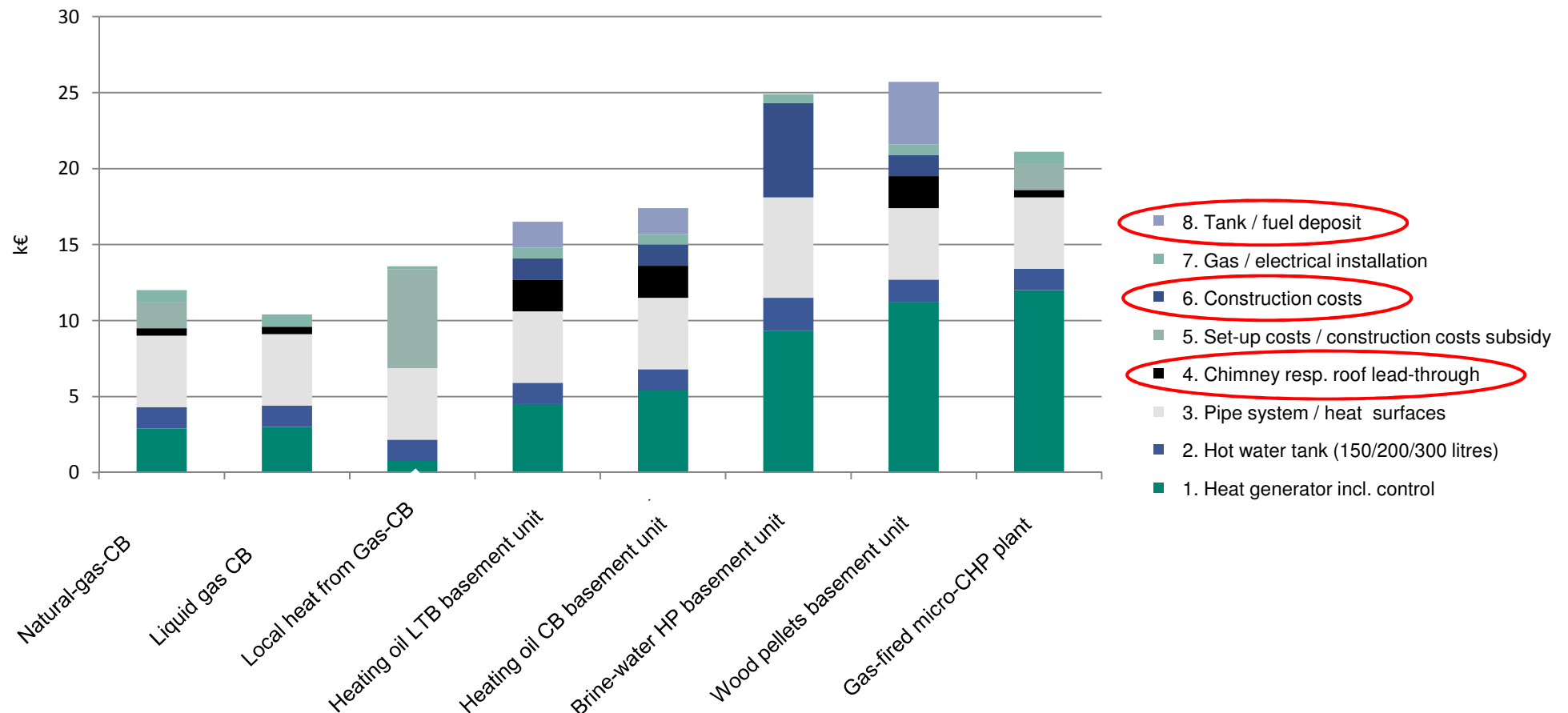
Critical reflection of the approach

- Temporal standardisation >> Undersizing >> Peaking factors
- Factors that influence the specific heat demand: user behaviour, building stock, age of buildings
- But demand classes overlook these aspects
- System perspective overlooks subsidies and thus operator motivation
- Constant demands and building stock >> under development



Techno-economic characterisation

Investment proportions

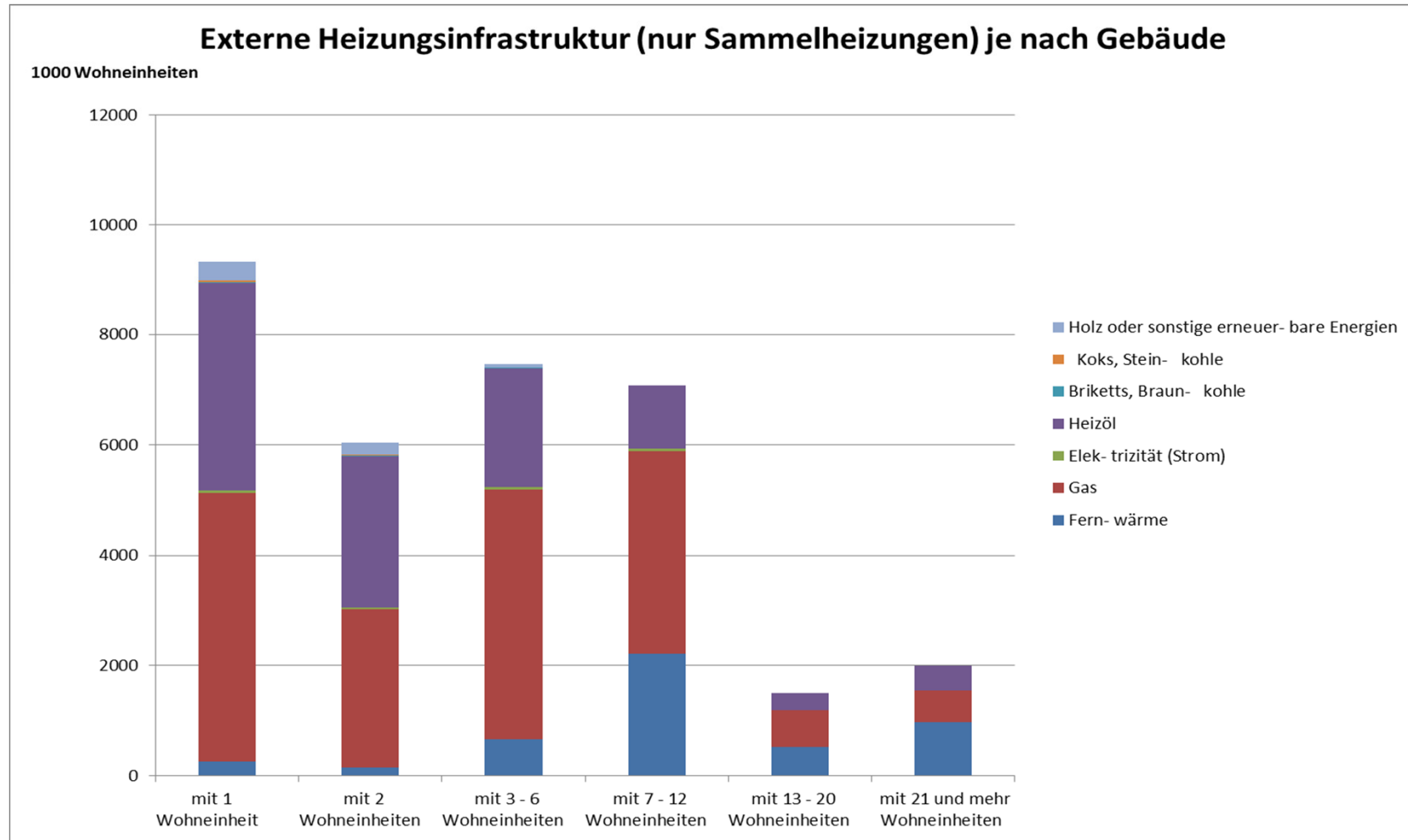


CB: Condensing boiler ; LTB: Low-temperature boiler ; HP: heat pump

Source: IER Heizkostenvergleich, 2008

Externe Infrastruktur = Brennstoff

- Systemgrenze entspricht Gebäudehülle:



Source: ...

Externe Infrastrukturabhängigkeiten und Wechselmöglichkeiten

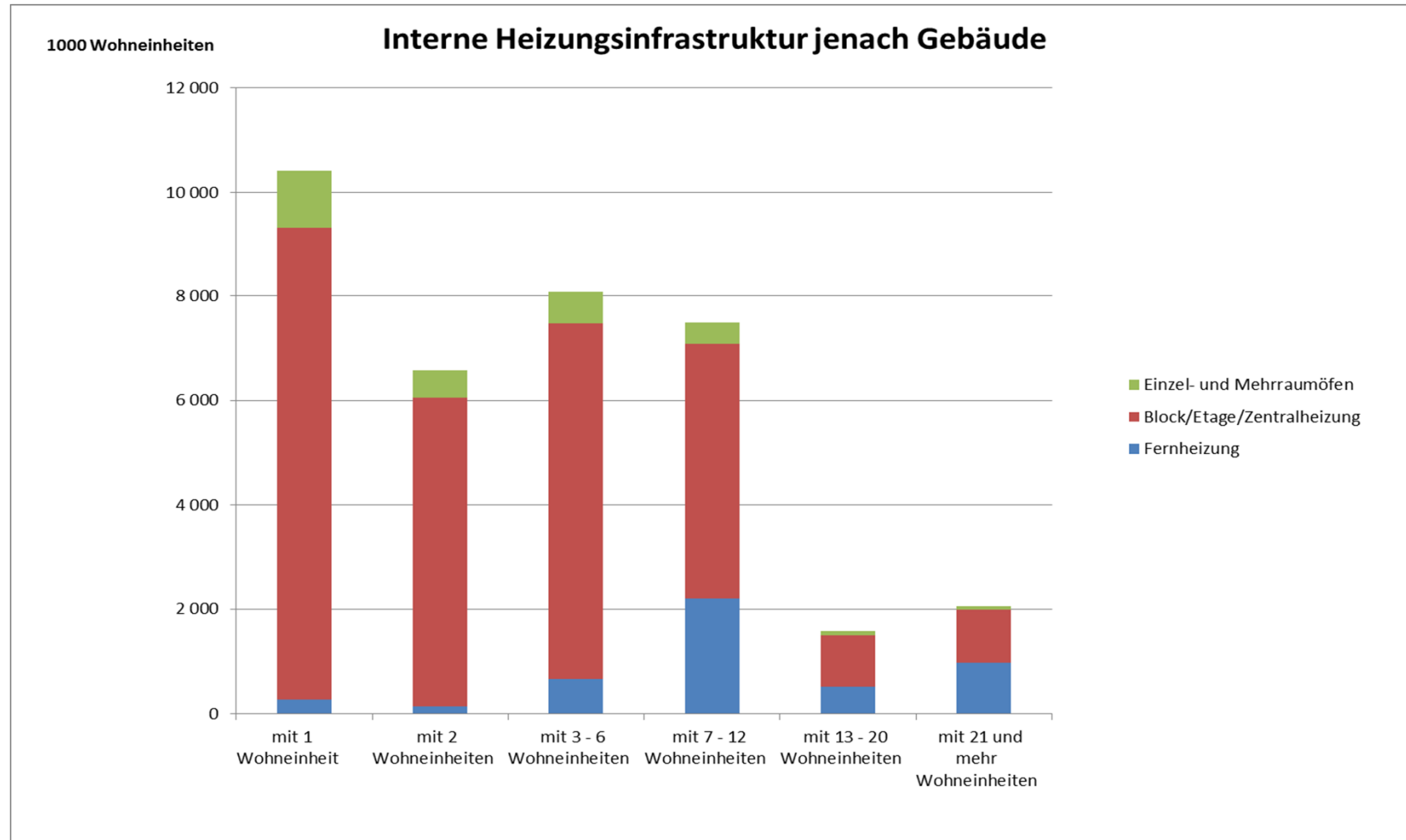
- Ableitung Wechselmatrizen für externe Infrastruktur
- Logik: alles möglich aber mancher Wechsel sind unwahrscheinlich

Externe Infrastruktur (Brennstoff) und Wechselkostenanteile								
Zu >>	Gas		Öl		Andere (inkl. Fest und Erneuerbare)		Fernwärme	
Voraussetzung	Nur wo Gasnetz liegt, oder Tank						Fernwärme liegt (Verdichtung) od. ausgebaut werden könnte (Erweiterung)	
Von								
Gas	✓		✓	Unwahrscheinlich	✓	ggf. Tankentsorgung, Brennstofflagerung	✓	Anschluss, Übergabestation
Öl	✓	Tankentsorgung, Gasanschluss oder Tank	✓		✓	ggf. Tankentsorgung, Brennstofflagerung	✓	Anschluss, Übergangsstation
Andere (inkl. Fest und Erneuerbare)	✓	ggf. Tankentsorgung, Gasanschluss oder Tank	✓	Tankanschaffung	✓	Brennstofflagerung (Wechsel)	✓	Anschluss, Übergangsstation
Fernwärme	✓	Gasanschluss oder Tank	✓	Unwahrscheinlich	✓	Unwahrscheinlich	✓	

Source: ...

Interne Infrastruktur = Art der Technik (Zentralitätsgrad)

- Systemgrenze entspricht Gebäudehülle:



Source: ...

Infrastrukturabhängigkeiten und Wechselmöglichkeiten

Karlsruhe Institute of Technology

Ableitung Wechselmatrizen – interne Infrastruktur

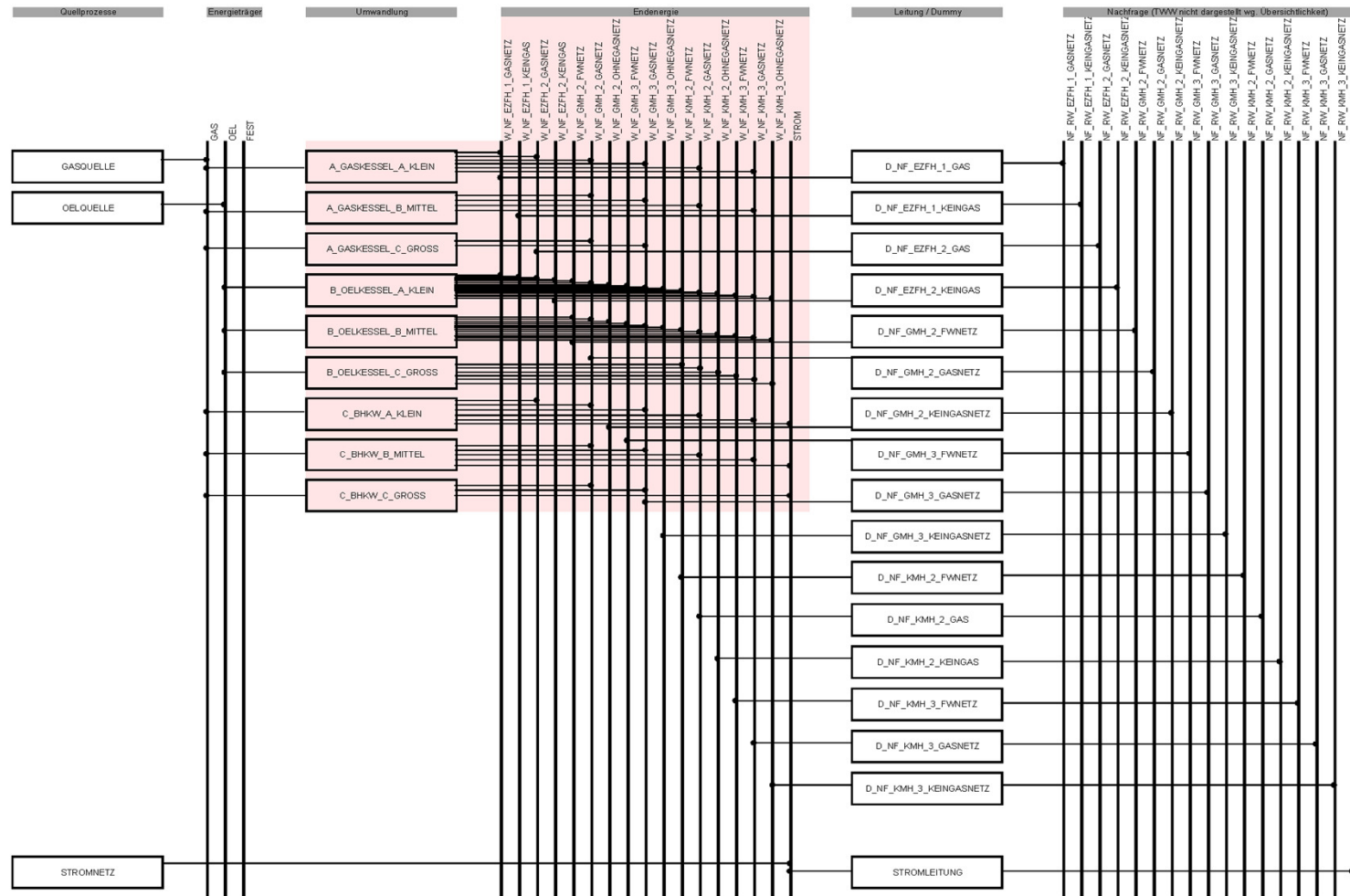
Logik: nur Zentralisierung möglich

Interne Infrastruktur (Technik) und Wechselkostenanteile								
Zu >>	Fernwärme		Block/Etage/Zentral		Einzel- u. Mehrraumöfen		Stromheizung	
Voraussetzung	Nur wo Fernwärme liegt (Verdichtung) oder ausgebaut werden könnte (Erweiterung)							
Von								
Fernwärme	✓		✓	Schornstein, Gas/Öl Anschluss oder Tank, Raum usw.	X		X	
Block/Etage/Zentral	✓	Entsorgung vorhandener Anlage	✓	ggf. Brennstoffwechselkosten	x		X	
Einzel- u. Mehrraumöfen	✓	Entsorgung vorhandener Anlage	✓	Schornstein, Gas/Öl Anschluss oder Tank, Raum, ggf. Brennstoffwechsel usw.	✓	ggf. Brennstoffwechselkosten	X	
Stromheizung	✓	Anschluss, Entsorgung Stromheizung	✓	Schornstein, Gas/Öl Anschluss oder Tank, Raum, ggf. Brennstoffwechsel usw.	✓	Schornstein, Gas/Öl Anschluss oder Tank, Raum, ggf. Brennstoffwechsel usw.	x	

Source: ...

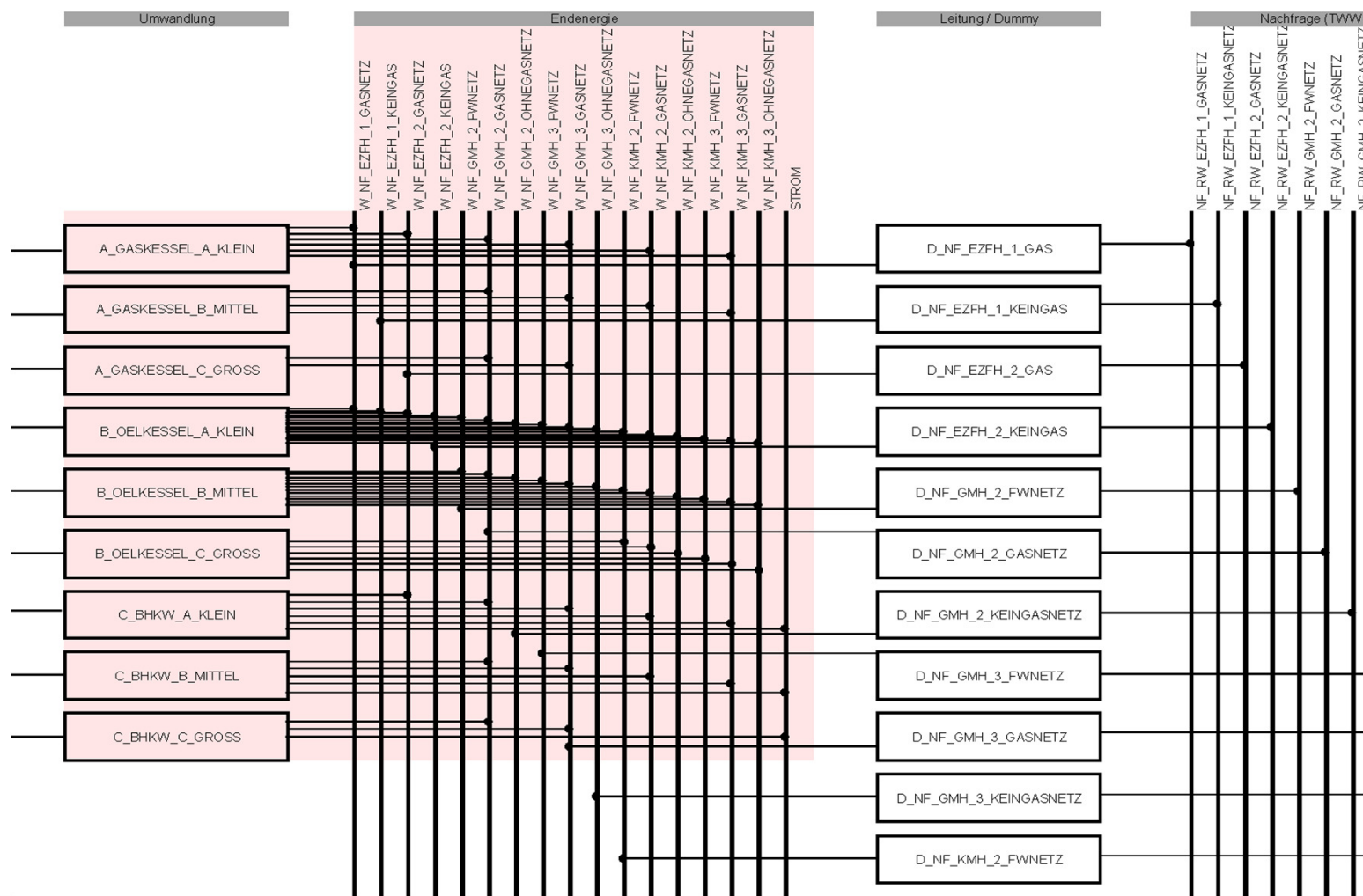
Reference Energy System Graph

Source: ...

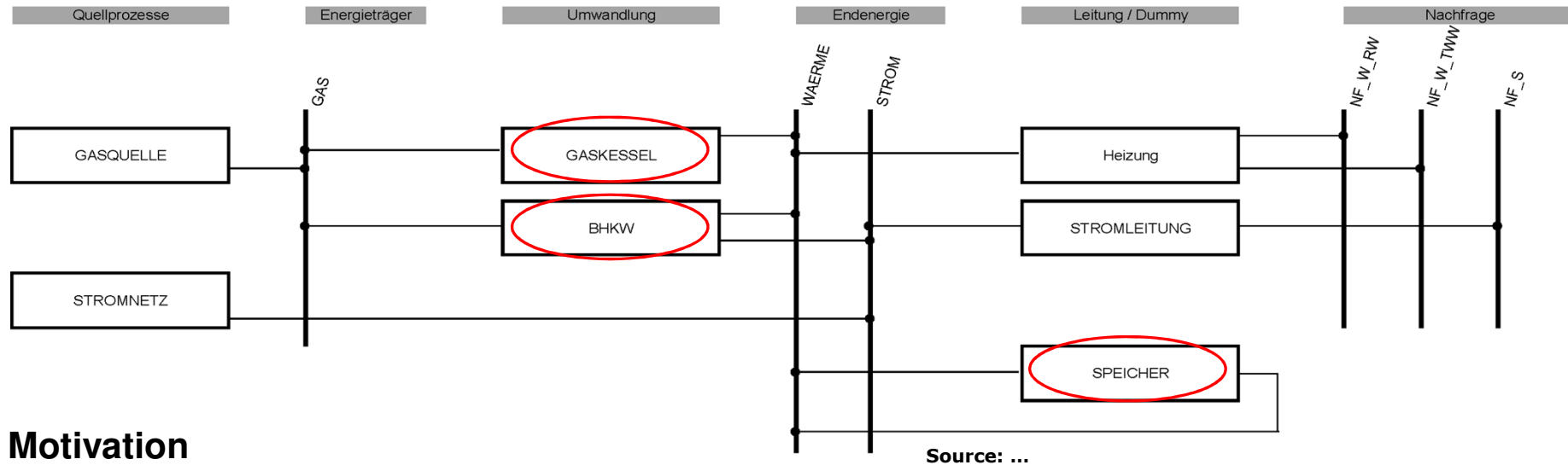


Reference Energy System Graph

Source: ...



Modellendogene Auslegung: Aufbau und Annahmen



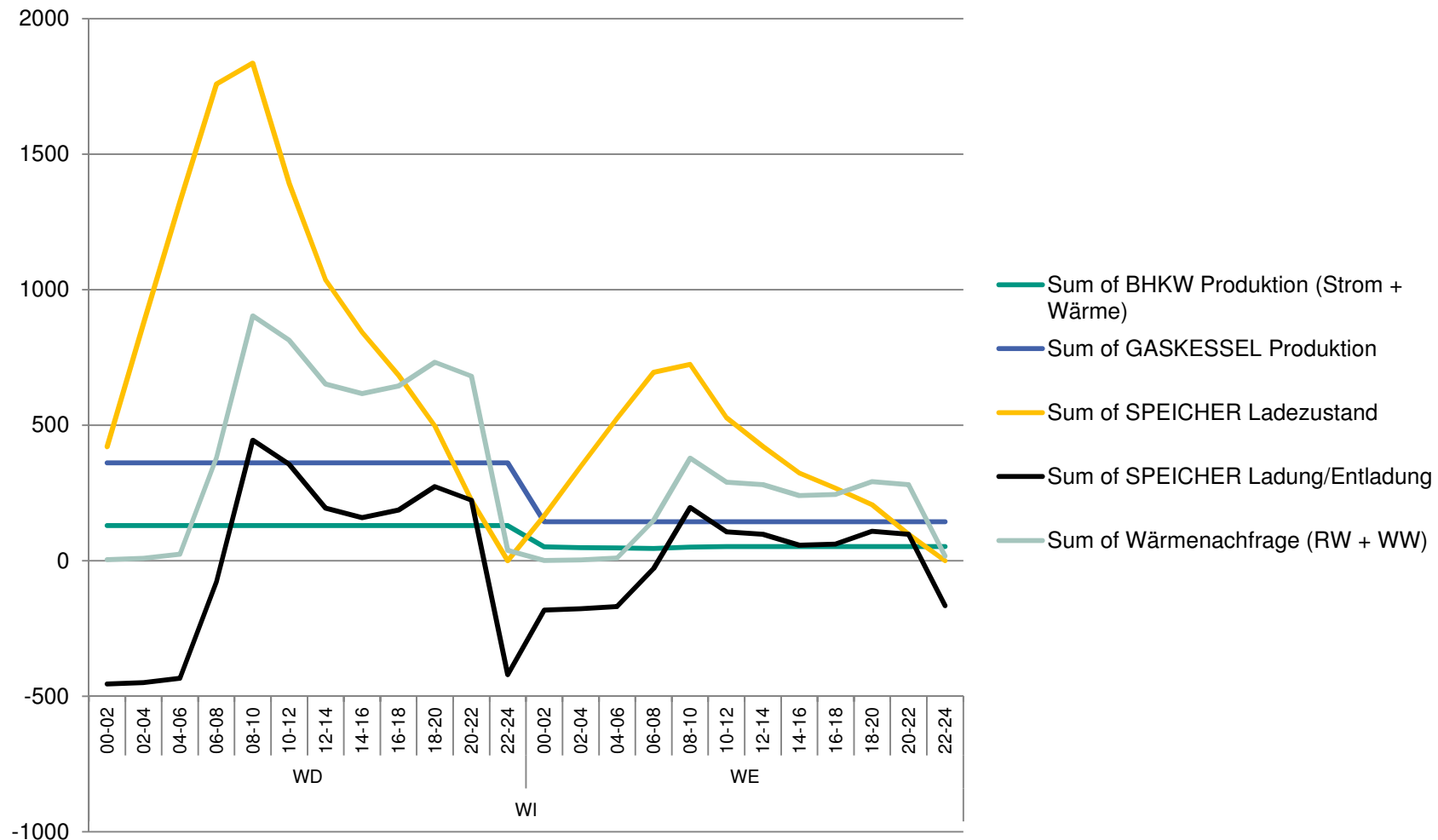
Motivation

- Optimierung des Wärmesystems im Zusammenhang mit dem Stromsystem

Annahmen

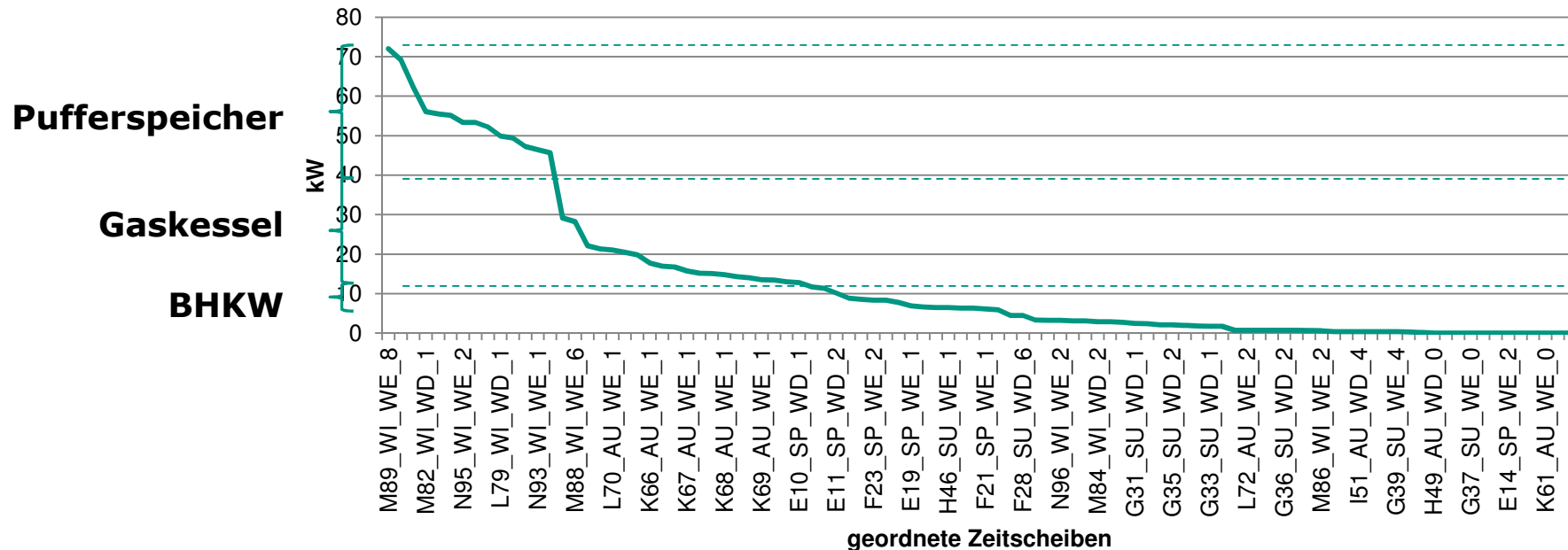
- Kleines Mehrfamilienhaus (ca. 6 Wohneinheiten)
- Wärmebedarf 120 MWh/a ($\triangleq$ 12000 Liter Heizöl) 100 MWh Raumwärme, 20 MWh Warmwasser
- Wärmelastkurven nach BTU Cottbus, 72 kW_{th} Spitzenlast
- Technisch-wirtschaftliche Eckdaten für Kessel, BHKW und Pufferspeicher
- Strombedarf 25000 kWh, Lastkurve nach UCTE, Möglichkeit des Stromfremdbezugs
- Strompreis, Gaspreis

Modellendogene Auslegung: Ergebnisse im Zeitverlauf



Source: ...

Modellendogene Auslegung: Ergebnisse und Erkenntnisse



Source: ...

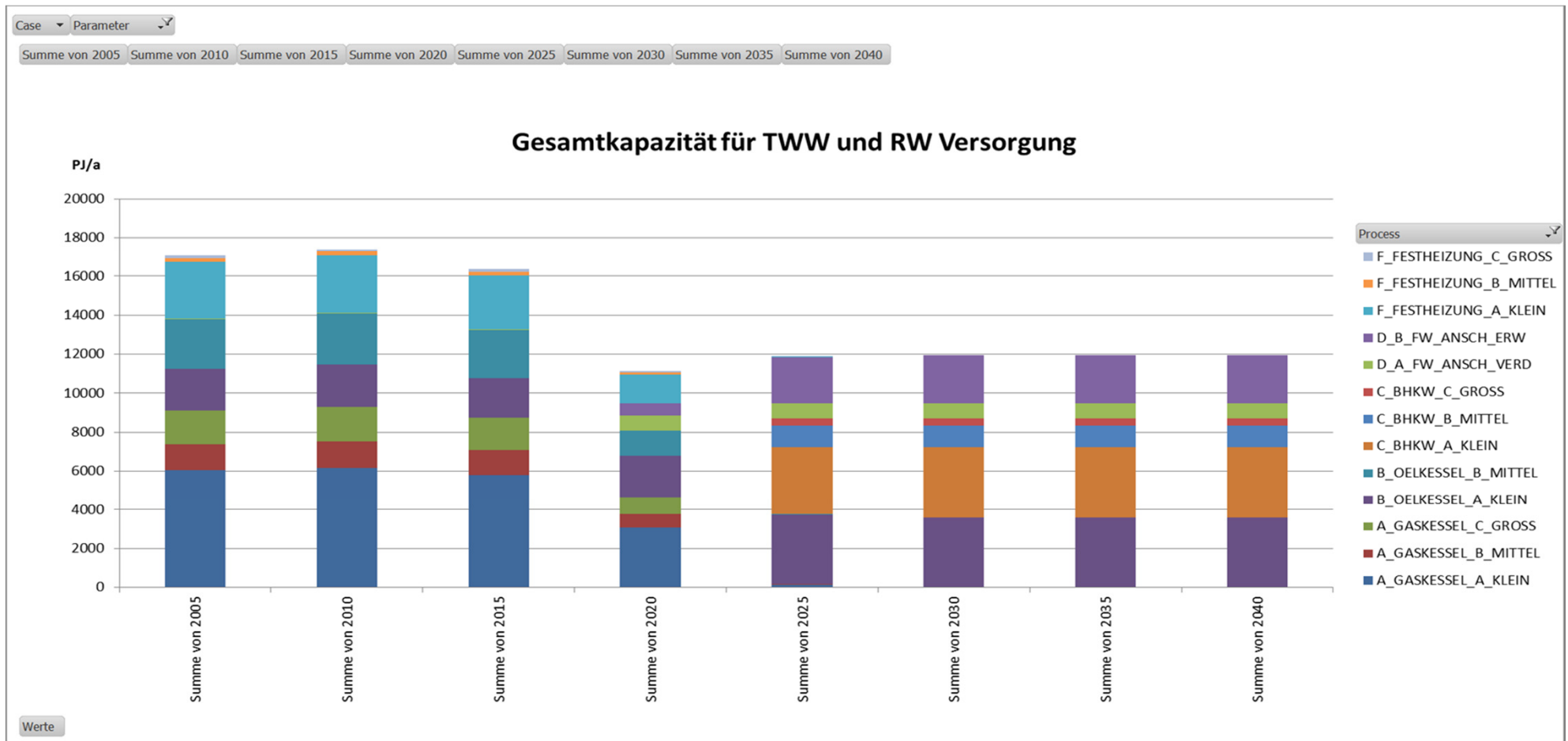
Ergebnisse

- Auslegung: Gaskessel 28 kW_{th}, BHKW 7,5 kW_{th}, Rest über Pufferspeicher
- Speichergröße: 6000 Liter ($\triangleq$ 280 kWh)
- Überhöhter Strompreis notwendig, damit BHKW einbezogen wird

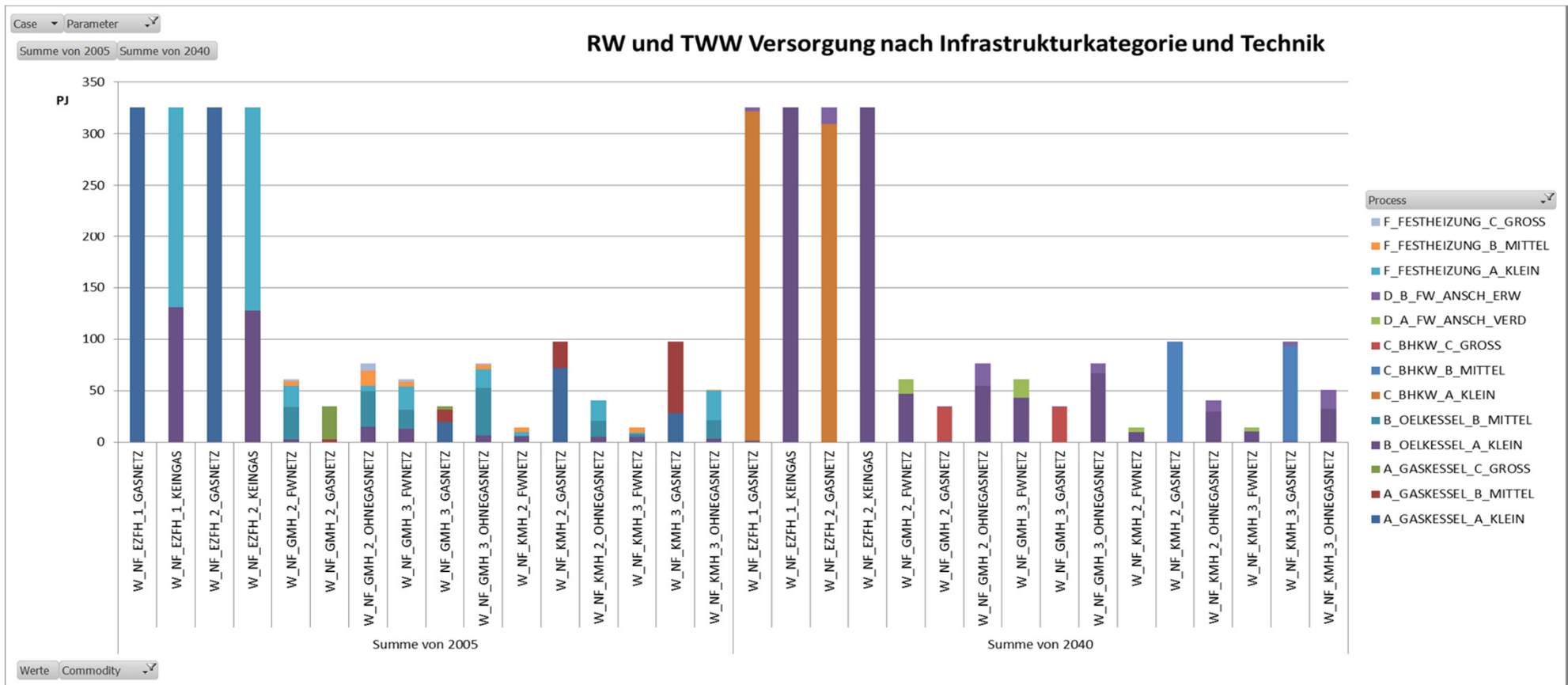
Erkenntnisse

- Einfluß der Zeittypisierung auf das Optimum?
- Widerspruch zwischen formaler technisch-wirtschaftlicher Optimierung und Auslegung in der Literatur

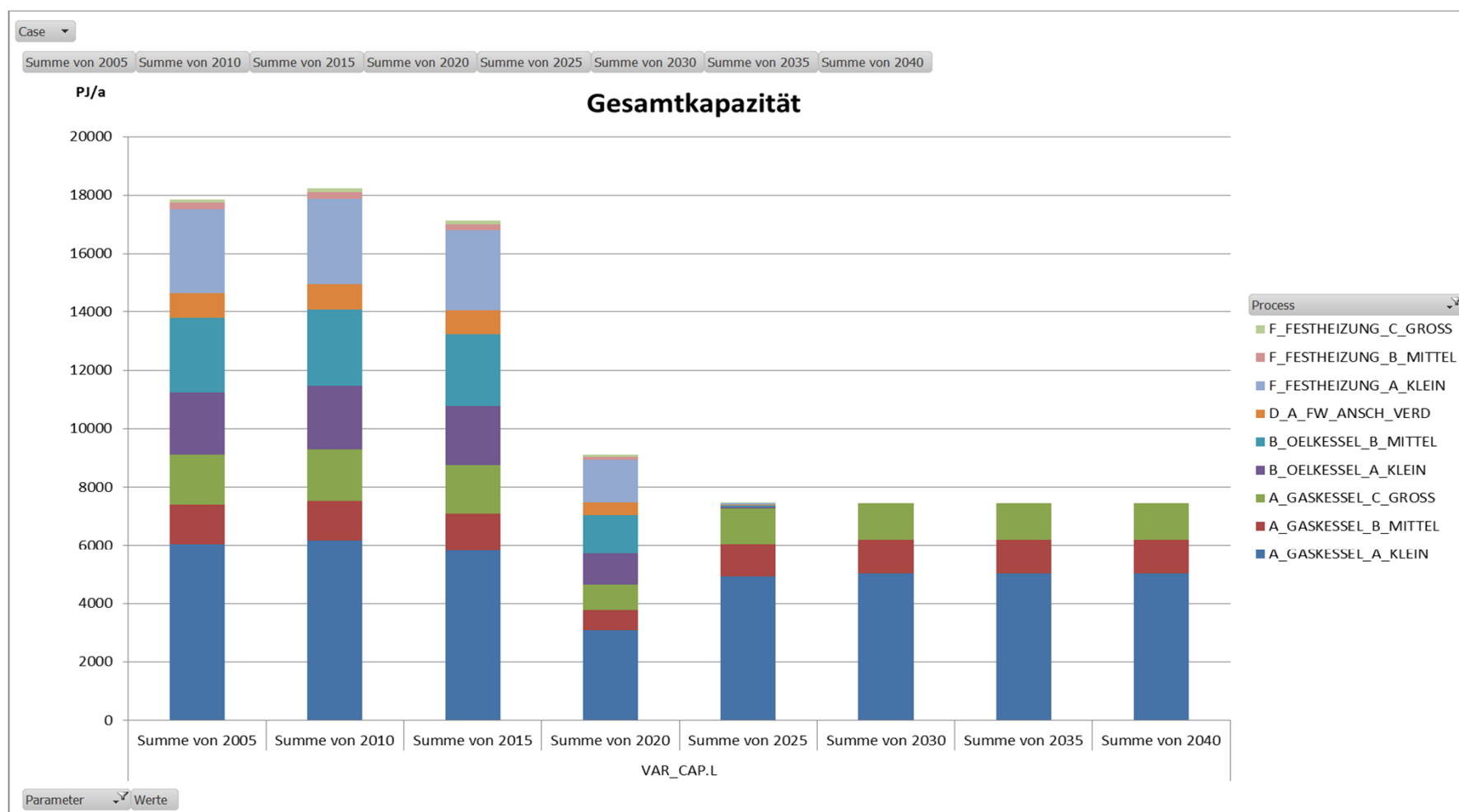
Erste Ergebnisse (1)



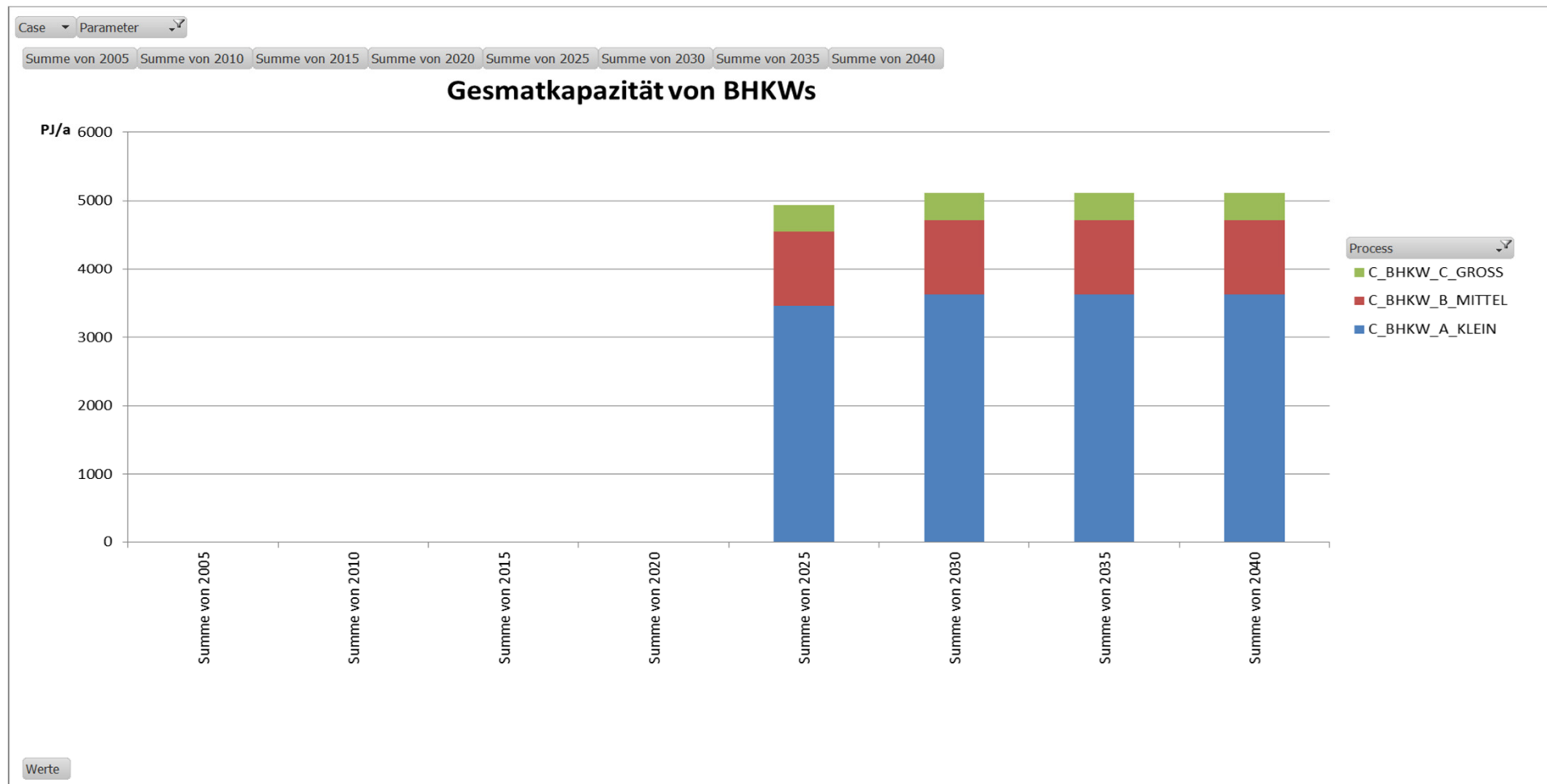
Erste Ergebnisse (2)



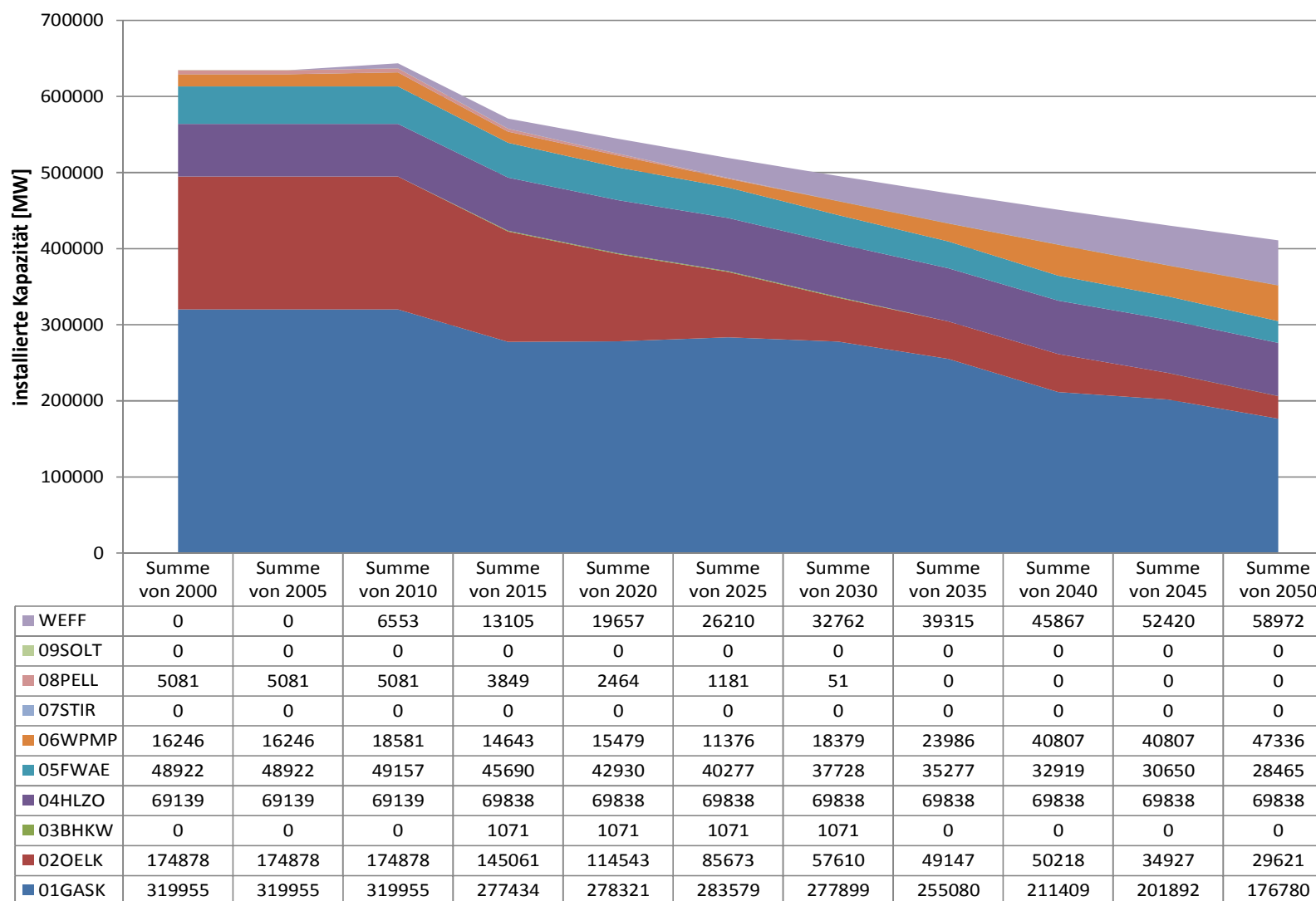
Weitere Ergebnisse (1)



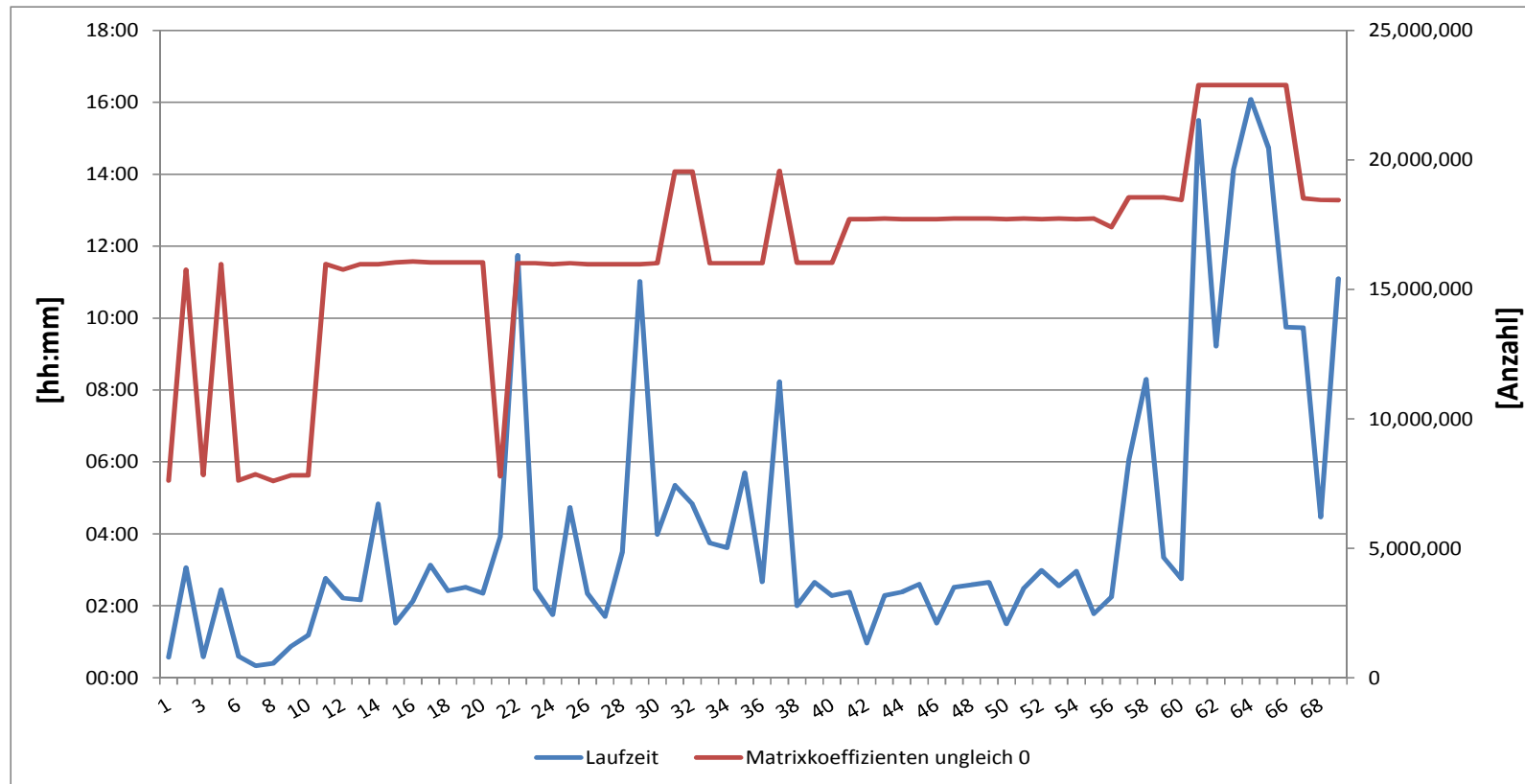
Weitere Ergebnisse (2)



Beispielhafte Ergebnisse



Komplexität



Modellerweiterung: Verfeinerung der zeitlichen Auflösung, Integration Teilsysteme...