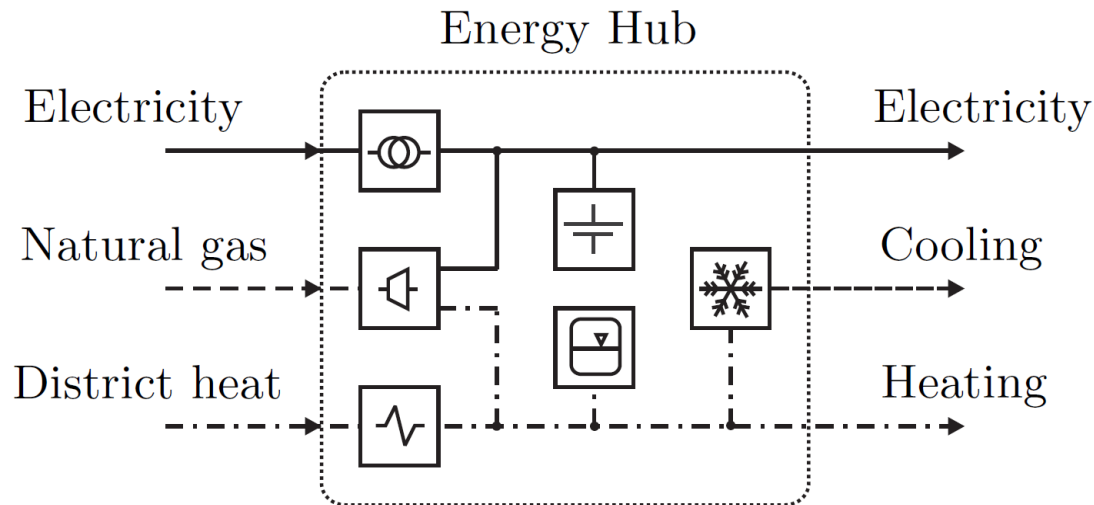


Energy Hubs und Multi-energy Systems

Seminar Energieinformatik
Roland Frieß

Institut für Angewandte Informatik und Formale Beschreibungsverfahren (AIFB)



Was sind Multienergiesysteme?

In MES werden die **verschiedenen Energiesektoren** (Strom, Wärme, Kühlung, Kraftstoffe, Verkehr) so **gekoppelt**, das sie auf **verschiedenen Ebenen** (ein Viertel, eine Stadt oder eine Region) **optimal miteinander agieren**. [7]

Gliederung

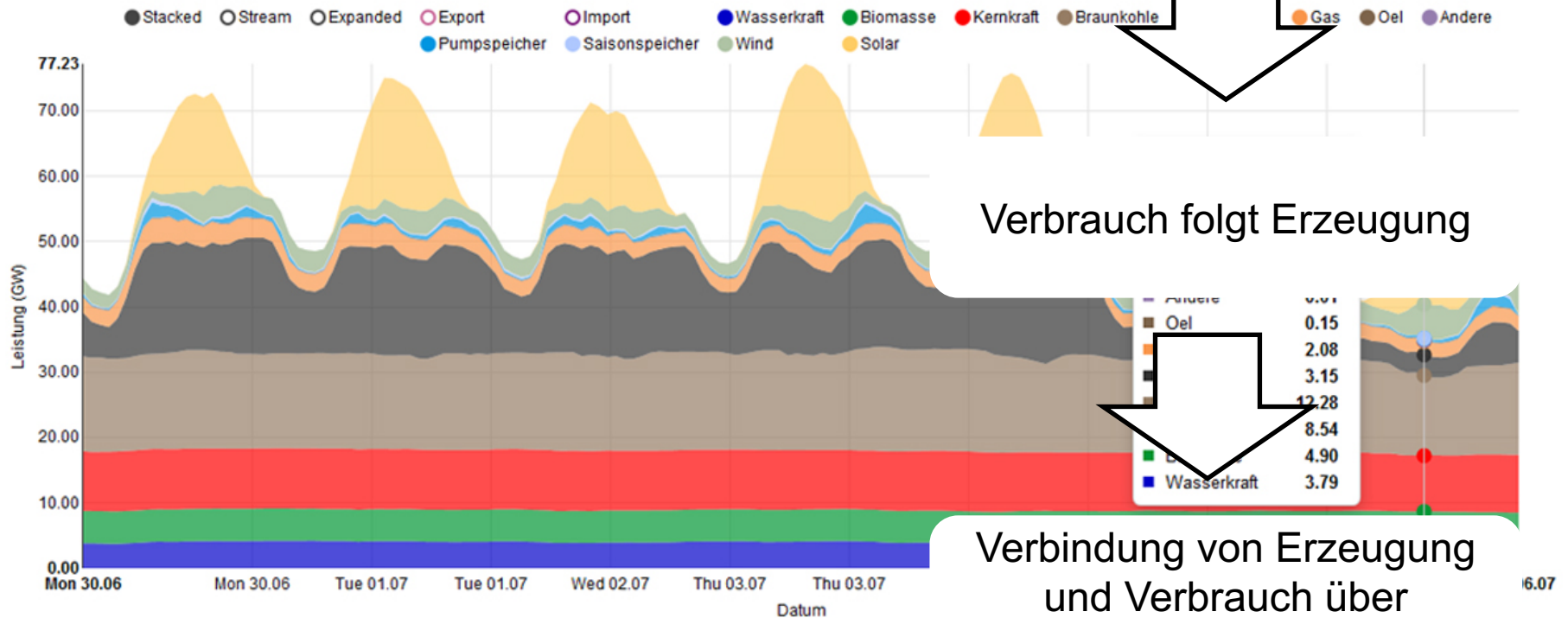
- Warum Multi-energy Systems
- Energy Hubs
- Modell von Lui und Mancarella

Gliederung

- **Warum Multi-energy Systems**
- Energy Hubs
- Modell von Lui und Mancarella

Warum Multi-energie Systems?

Stromproduktion in Deutschland in Woche



Erzeugung folgt Verbrauch

Verbrauch folgt Erzeugung

Verbindung von Erzeugung und Verbrauch über Systemgrenzen hinweg

Gliederung

- Warum Multi-energy Systems
- **Energy Hubs**
- Modell von Lui und Mancarella

Was ist ein Energy Hub?

„Ein Energy Hub ist ein **Modul**, in dem verschiedene Energieträger **umgewandelt**, **weitergeleitet** und **gespeichert** werden können.“ [2]

Umwandlung: Umwandlung der Energieform z.B. Gas in Strom

Weiterleitung: Es ist auch möglich, dass ein Teil der Energie unverändert durch den Energy Hub fließt

Speicherung: Der Energy Hub hat die Möglichkeit Energie zu speichern. Zum Beispiel in Gastanks

Elemente eines Energy Hubs

■ Direkte Verbindungen

- Verbinden die einzelnen Komponenten mit der Umwelt und miteinander



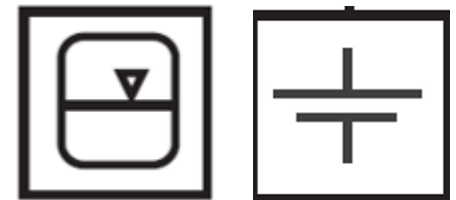
■ Umwandler

- Wandeln Energie in eine andere Form um z.B. Gas in Wärme und Strom

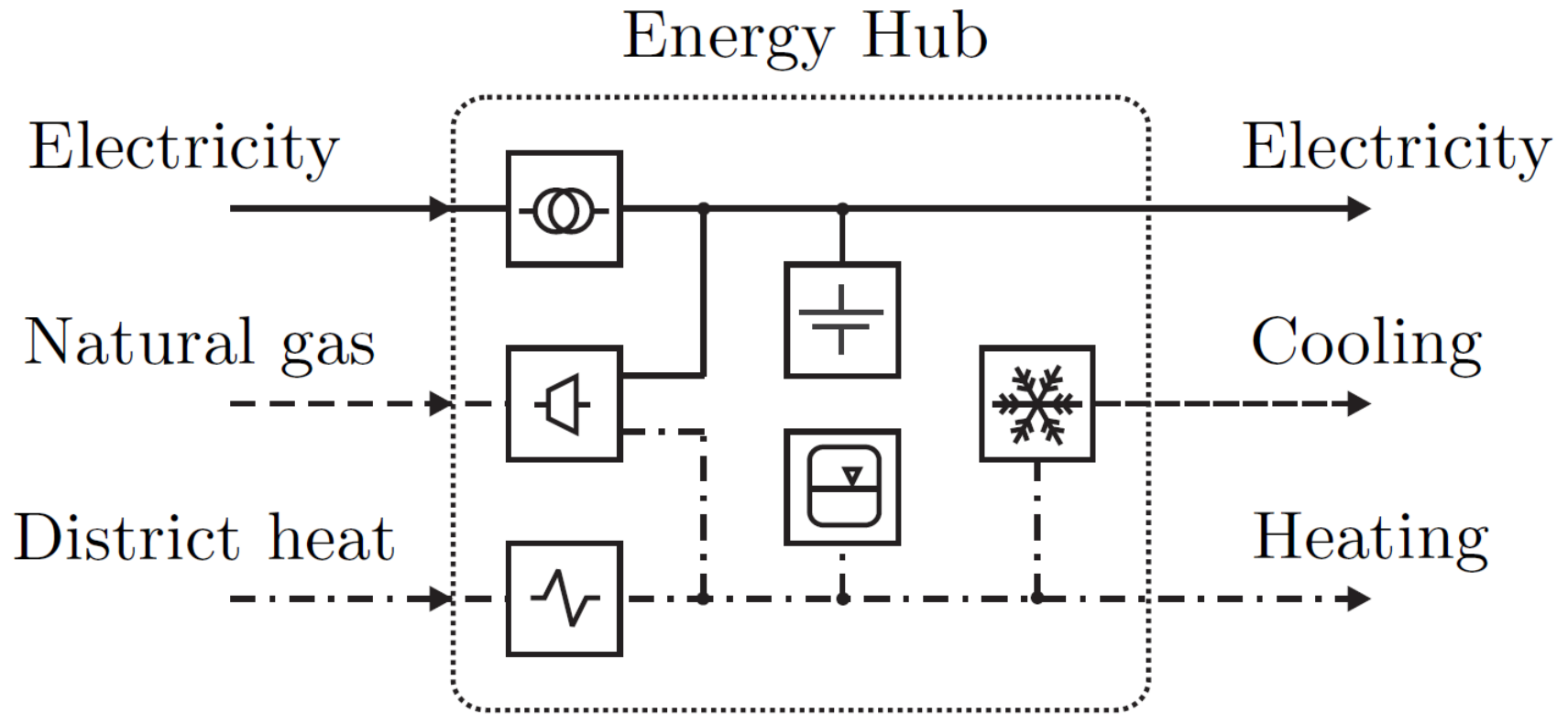


■ Speicher

- Speichert die Energie in einer bestimmten Form z.B. Gastanks



Beispiel für einen Energy Hub



[2]

Vorteile eines Energy Hubs

Zuverlässigkeit

Lastflexibilität

Optimierungspotential

Synergieeffekte

Besser Kompensation von Ausfällen
einzelnen Komponenten des Systems

Vorteile eines Energy Hubs

Zuverlässigkeit

Lastflexibilität

Optimierungspotential

Synergieeffekte

Der Energy Hub kann durch die unterschiedlichen Energiebereitstellungstypen den Stromverbrauch anpassen und somit Regelleistung zur Verfügung stellen

Vorteile eines Energy Hubs

Zuverlässigkeit

Lastflexibilität

Optimierungspotential

Synergieeffekte

Da Energie von unterschiedlichen Formen umgewandelt werden kann, ist ein hohes Optimierungspotential vorhanden

Vorteile eines Energy Hubs

Zuverlässigkeit

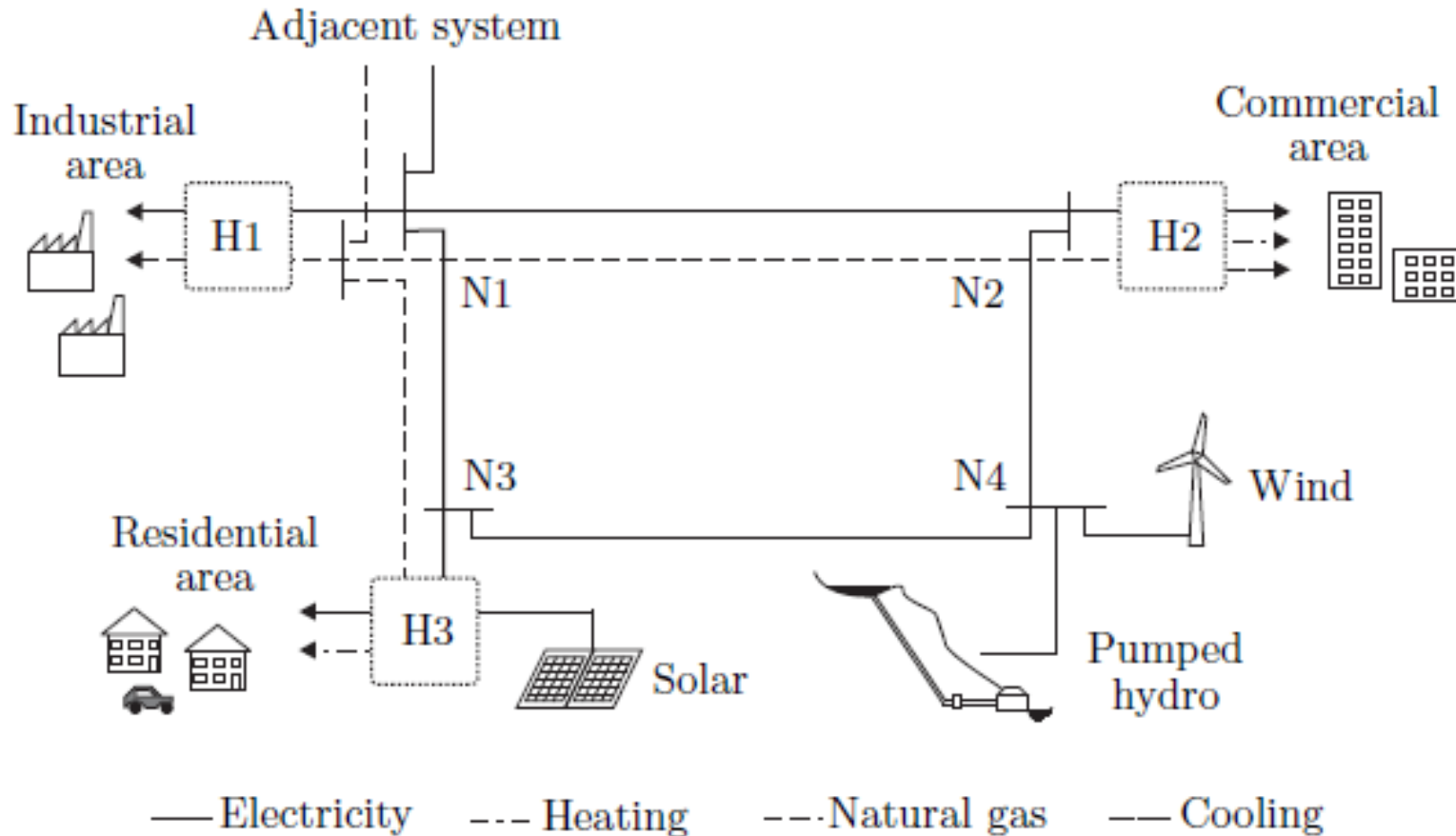
Lastflexibilität

Optimierungspotential

Synergieeffekte

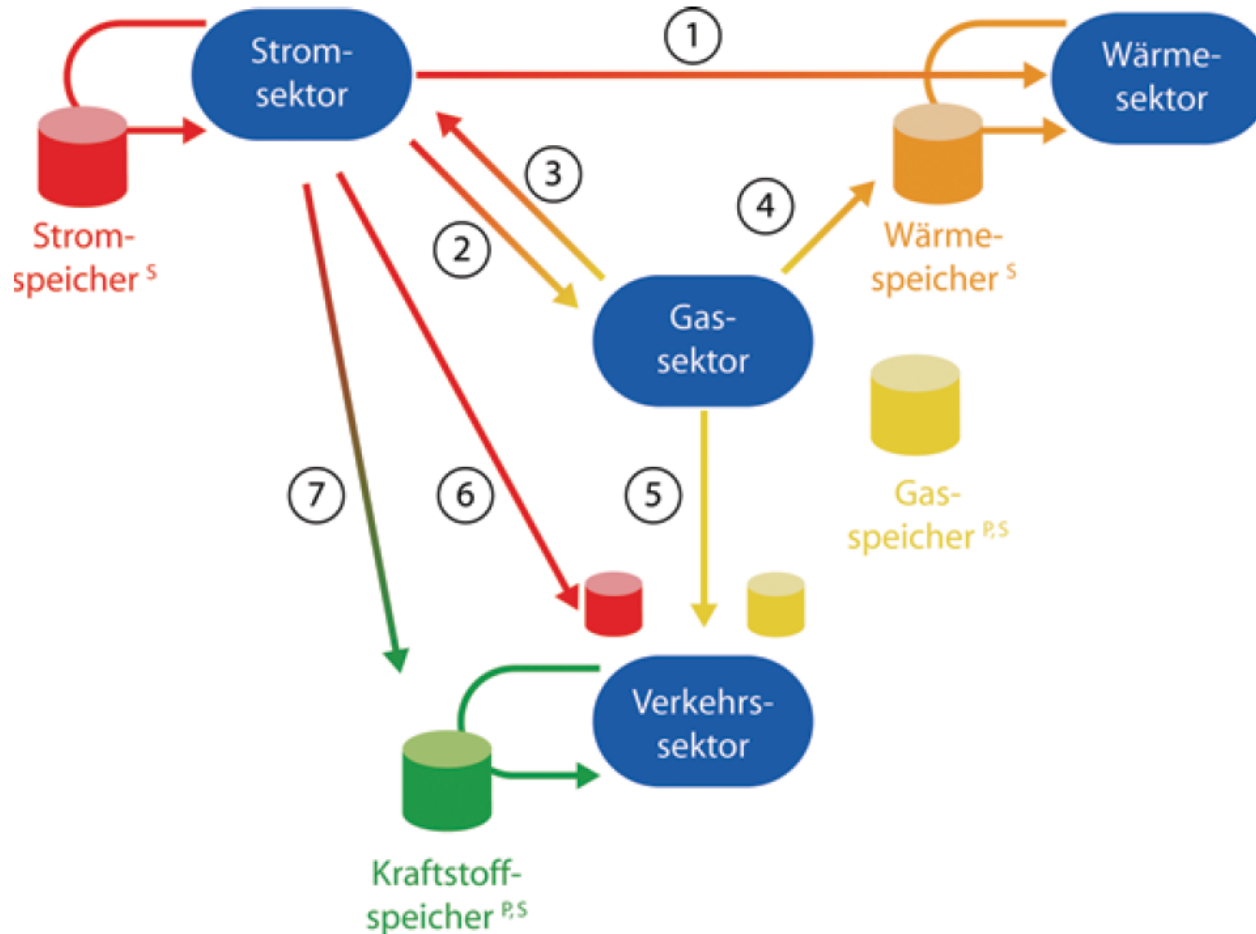
Die verschiedenen Eigenschaften der Energieträger können genutzt werden: Strom zum transportieren, Gas zum speichern

Beispiel: Einbindung von Energy Hubs



[2]

Übersicht der verschiedenen Sektoren



- ① Power-to-Heat
Flexible KWK
- ② Einspeichertechnologie
Power-to-Gas
- ③ Power-to-Gas als
Stromspeicher
- ④ Power-to-Gas als
Wärmespeicher
- ⑤ Power-to-Gas als
Stromkraftstoff
- ⑥ Elektromobilität
- ⑦ Power-to-Liquid als
Stromkraftstoff
- P Primärer
Energiespeicher
- S Sekundärer
Energiespeicher

[3]

Matrixdarstellung der Energieumwandlung nach Geidl 2007

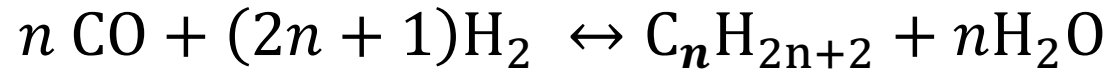
$$\underbrace{\begin{bmatrix} L_\alpha \\ L_\beta \\ \vdots \\ L_\omega \end{bmatrix}}_{\mathbf{L}} = \underbrace{\begin{bmatrix} c_{\alpha\alpha} & c_{\beta\alpha} & \cdots & c_{\omega\alpha} \\ c_{\alpha\beta} & c_{\beta\beta} & \cdots & c_{\omega\beta} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{\alpha\omega} & c_{\beta\omega} & \cdots & c_{\omega\omega} \end{bmatrix}}_{\mathbf{C}} \underbrace{\begin{bmatrix} P_\alpha \\ P_\beta \\ \vdots \\ P_\omega \end{bmatrix}}_{\mathbf{P}}$$

L_i = Die Last an der Stelle i

c_{ij} = Kopplungsfaktor von j nach i

P_j = Der Input an der Stelle j

Exkurs: Fischer-Tropsch-Synthese



Es entstehen aliphatische Kohlenwasserstoffe und Wasser

Produkte sind schwefelfrei

Können auch Grundlage für chemische Industrie bilden

Einzigste wirtschaftliche Anlage produziert aktuell 140000 bpd

Ausgründung des KIT's

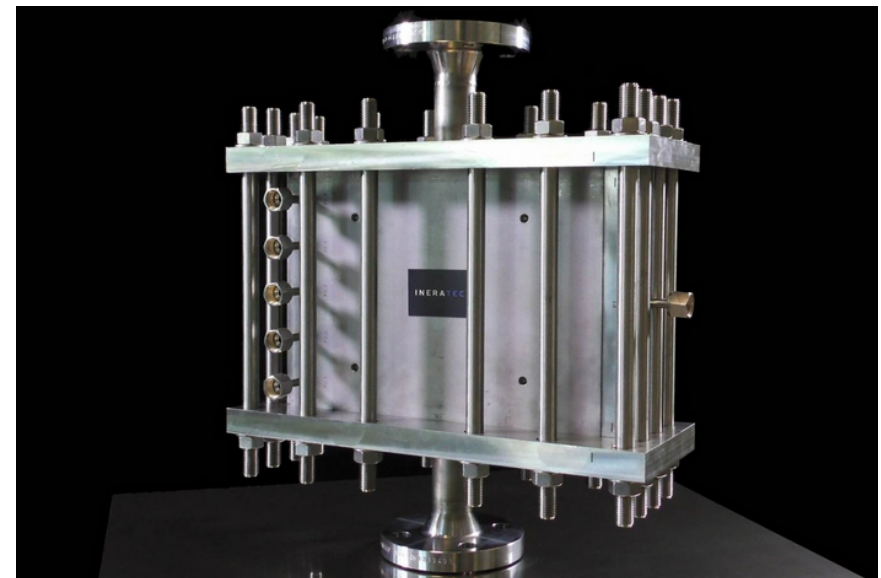
Mikrostrukturreaktor ermöglicht
kleinere Skalierung

Erste Power-to-liquid (PTL) Anlage
steht in Finnland

Könnte in Zukunft PTL dezentral
ermöglichen



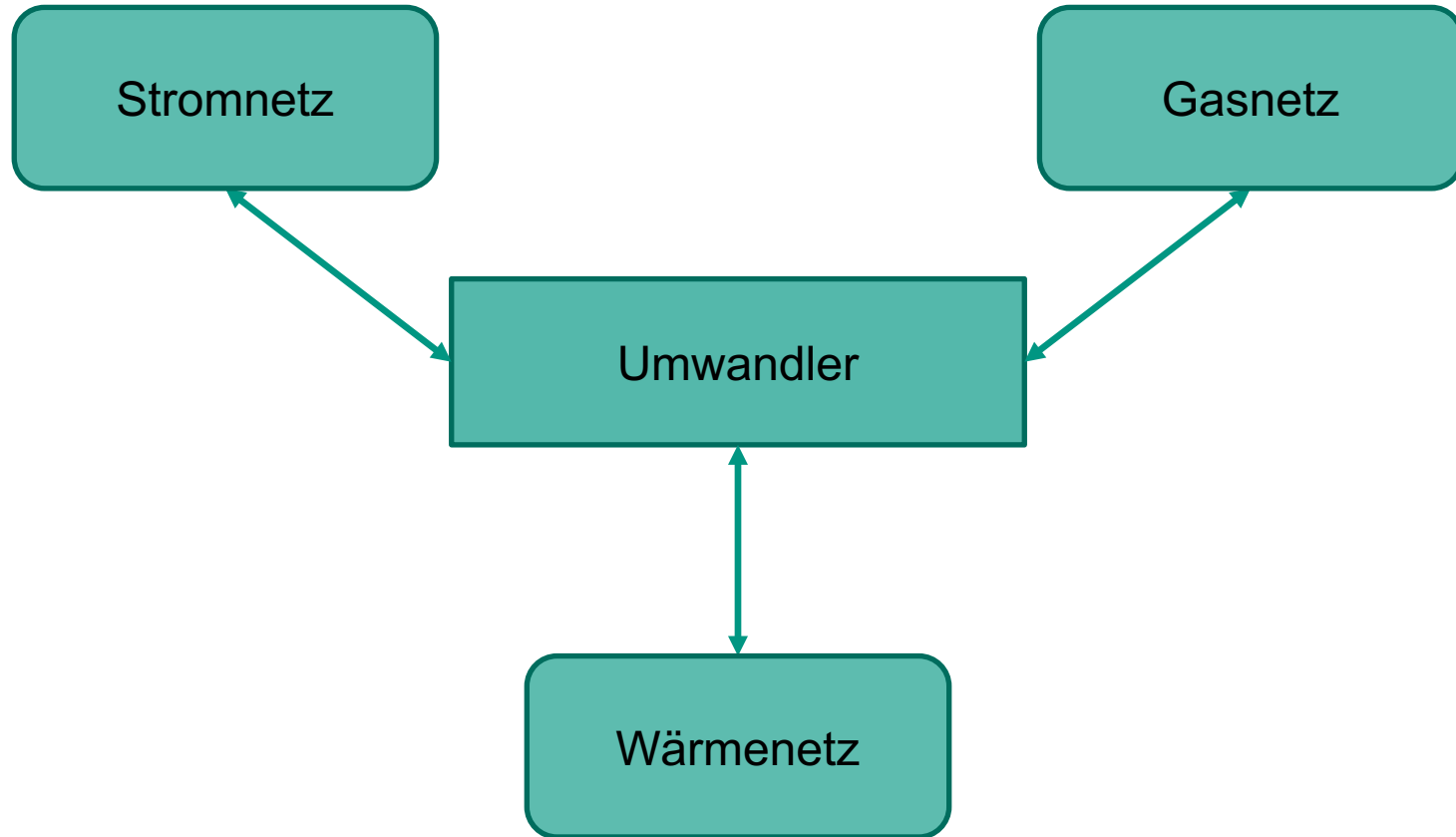
[9]



Gliederung

- Warum Multi-energy Systems
- Energy Hubs
- **Modell von Lui und Mancarella**

Aufbau eines Multienergiesystems nach Lui und Mancarella



Input ins System

- Parameter des elektrischen Netzes
- Parameter des Wärmenetzes
- Parameter des Gasnetzes
- Übergangparameter
- Benötigten Strom zu jeder Zeit
- Benötigte Wärme zu jeder Zeit

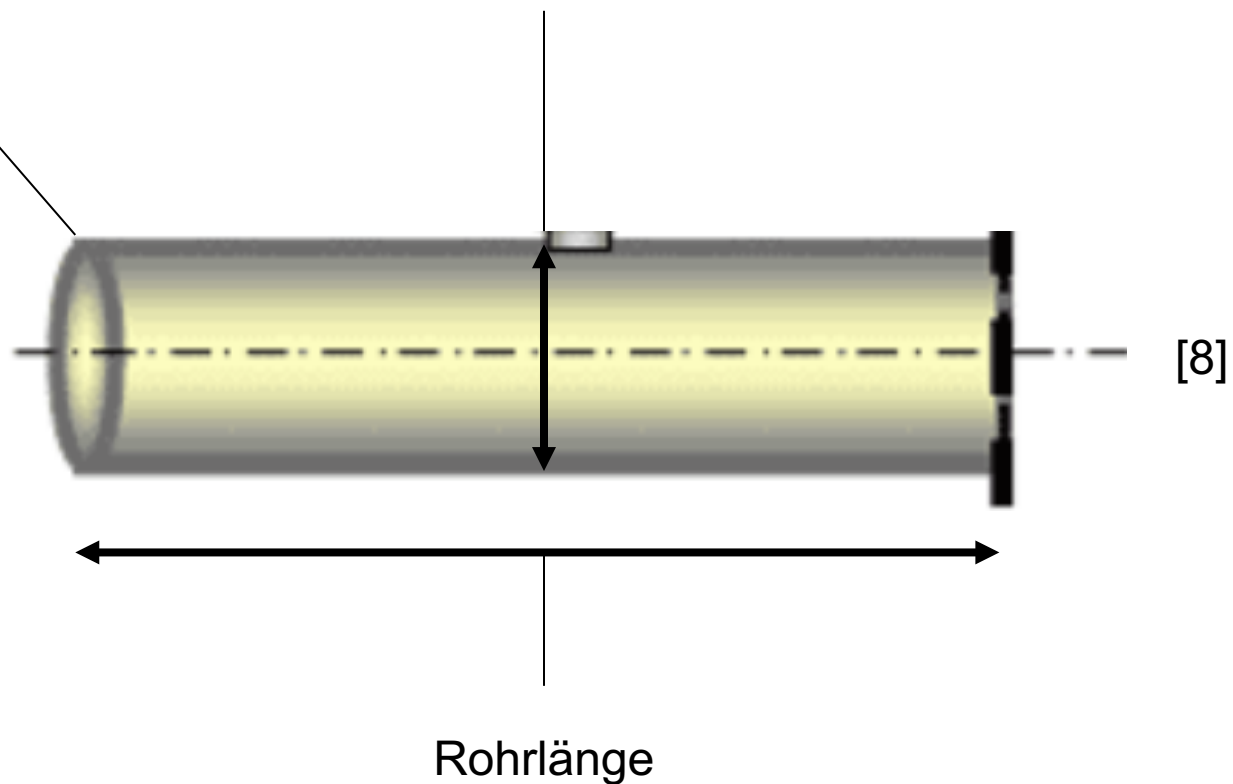
Parameter des elektrischen Netzes

- Widerstand und Blindwiderstand an jeder Leitung und jedem Transformator
- Wirkleistung und Blindleistung an den verschiedenen Nodes
- Magnitude der Spannung an jeder Stromquelle

Parameter des Gasnetzes

Rauheit

Rohrdurchmesser



Parameter des Wärmenetzes

- Rohrlänge
- Rohrdurchmesser
- Rauheit
- Wärmeübertragungskoeffizient
- Bereitstellungstemperatur
- Rückgabetemperatur

Output des Systems

■ Elektrizitätsnetz:

- Spannung
- Wirkleistung
- Blindleistung
- Verluste im Elektrizitätsnetz

■ Wärmenetz:

- Massenflüsse
- Bereitstellungs- und Rückgabetemperaturen
- Wärmeenergie
- Verluste im Wärmenetzwerk

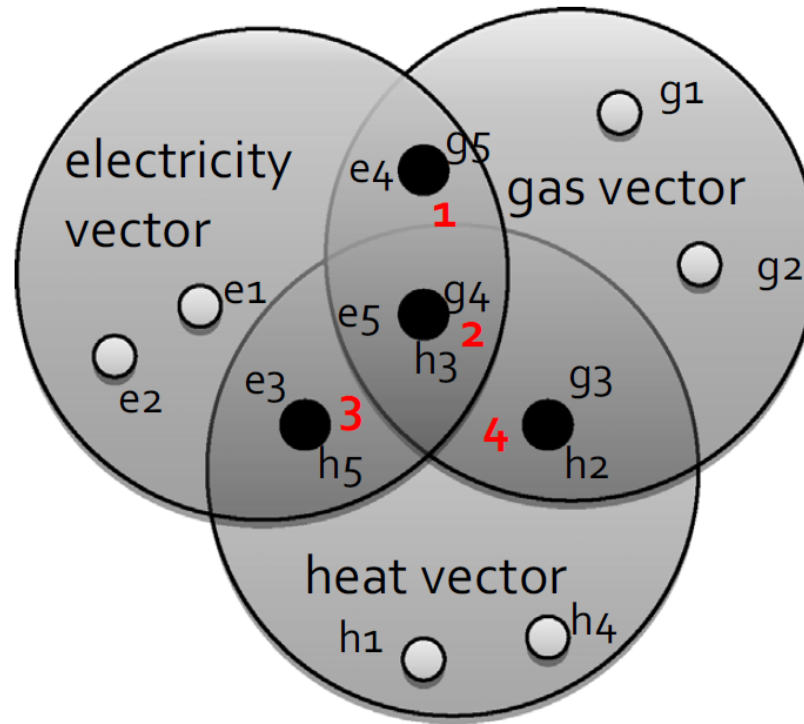
Output des Systems

- Gasnetz
 - Gasflüsse
 - Druck
 - Verluste im Gasnetz

- Sonstiges
 - CO₂-Emission
 - Laufende Kosten

Darstellung der Kopplung der Energienetze

- Aufteilung in 3 Energieformen Hitze, Elektrizität und Gas



- conversion component nodes
- nodes in each energy vector

[1]

Multi-energy conversation efficiency Matrix

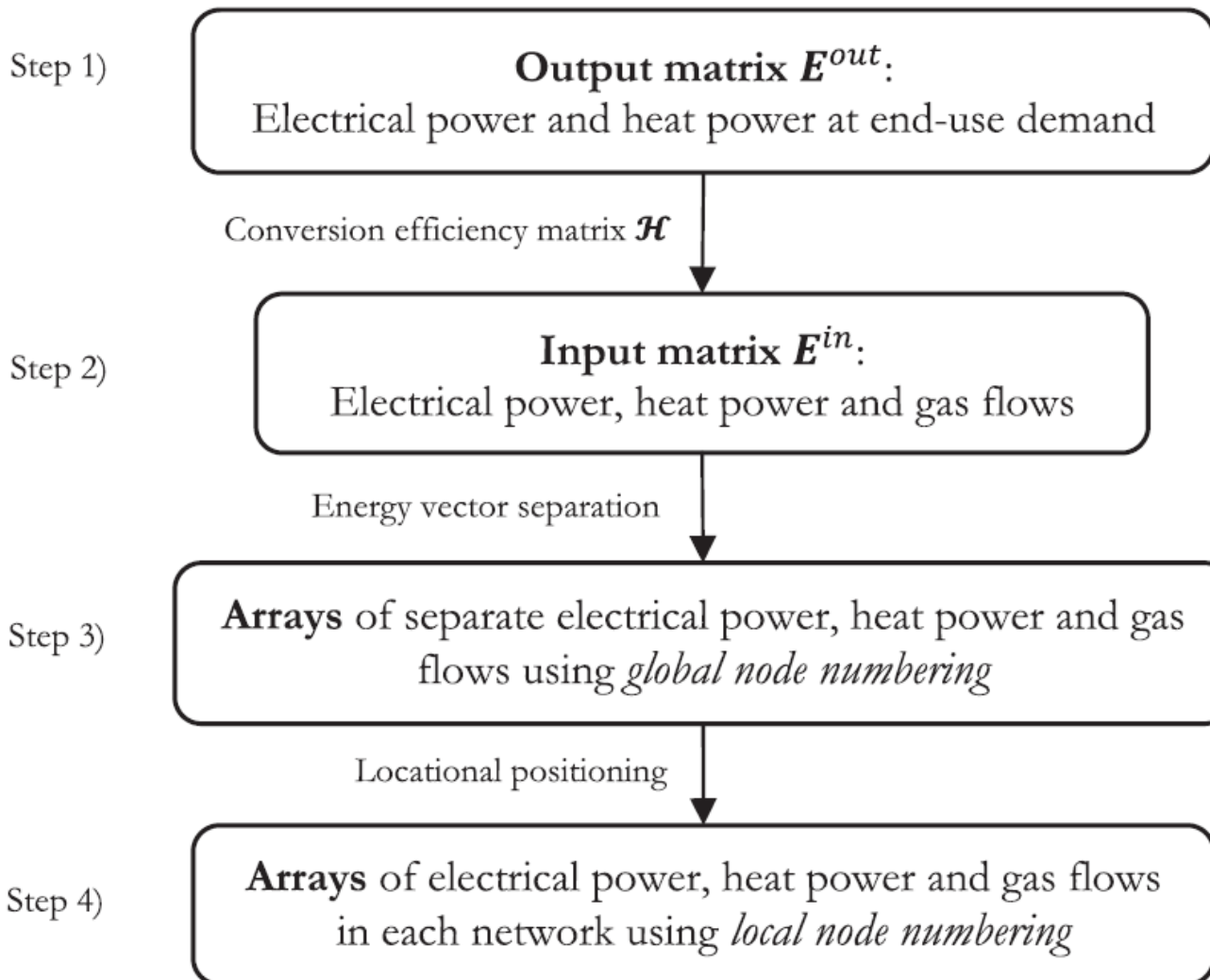
- Eine Zeile für jede Umwandlungskomponente
- H_g entspricht hier Heizwert des Gases
- η entspricht hier dem Wirkungsgrad der Umwandlung

An example of an efficiency matrix of conversion components.

Global node numbering	Type	Gas to electricity	Gas to heat	Electricity to heat
1	CHP (large scale)	$H_g \eta_{ge}^1$	$H_g \eta_{gh}^1$	
2	CHP (building 1)	$H_g \eta_{ge}^2$	$H_g \eta_{gh}^2$	
3	Gas generator (building 2)	$H_g \eta_{ge}^3$		
4	Heat pump (building 3)			η_{eh}^4

[1]

Bestimmung der Gas-, Strom- und Wärmeflüsse



[1]

Bestimmung der Gas-, Strom- und Wärmeflüsse

Step 1: Die Outputmatrix, also der Bedarf wird bestimmt

$$E^{out} = \begin{array}{c} \begin{array}{ccc} elec. & heat & heat \end{array} \\ \begin{bmatrix} E_{1,ge}^{out} & E_{1,gh}^{out} & 0 \\ E_{2,ge}^{out} & E_{2,gh}^{out} & 0 \\ 0 & 0 & E_{3,eh}^{out} \\ 0 & E_{4,gh}^{out} & 0 \end{bmatrix} \end{array}$$
$$H = \begin{bmatrix} H_g \eta_{ge}^1 & H_g \eta_{gh}^1 & 0 \\ H_g \eta_{ge}^2 & H_g \eta_{gh}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \eta_{eh}^3 \\ 0 & H_g \eta_{gh}^4 & 0 \end{bmatrix}$$

H_g = Heizwert von Gas = 39 MJ/m³

$E_{i,jk}^{out}$ = Energieoutput an der Stelle i ; Transformation von j nach k

η_{jk}^i = Wirkungsgrad der Umwandlung von j nach k

Bestimmung der Gas-, Strom- und Wärmeflüsse

Step 2: Die Matrix des benötigten Inputs wird bestimmt

$$E_{ij}^{in} = (H_{ij})^{-1} * E_{ij}^{out}$$

$$E^{in} = \begin{bmatrix} (H_g \eta_{ge}^1)^{-1} E_{1,ge}^{in} & (H_g \eta_{gh}^1)^{-1} E_{1,gh}^{in} & 0 \\ (H_g \eta_{ge}^2)^{-1} E_{2,ge}^{in} & (H_g \eta_{gh}^2)^{-1} E_{2,gh}^{in} & 0 \\ 0 & 0 & (\eta_{eh}^3)^{-1} E_{3,eh}^{in} \\ 0 & 0 & (H_g \eta_{gh}^4)^{-1} E_{4,eh}^{in} \end{bmatrix} = \begin{matrix} \text{gas} & \text{gas} & \text{elec.} \\ \begin{bmatrix} E_{1,ge}^{in} & E_{1,gh}^{in} & 0 \\ E_{2,ge}^{in} & E_{2,gh}^{in} & 0 \\ 0 & 0 & E_{3,eh}^{in} \\ 0 & 0 & E_{4,eh}^{in} \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Bestimmung der Gas-, Strom- und Wärmeflüsse

Step 3: Bestimmung der einzelnen Energievektoren der Energieformen

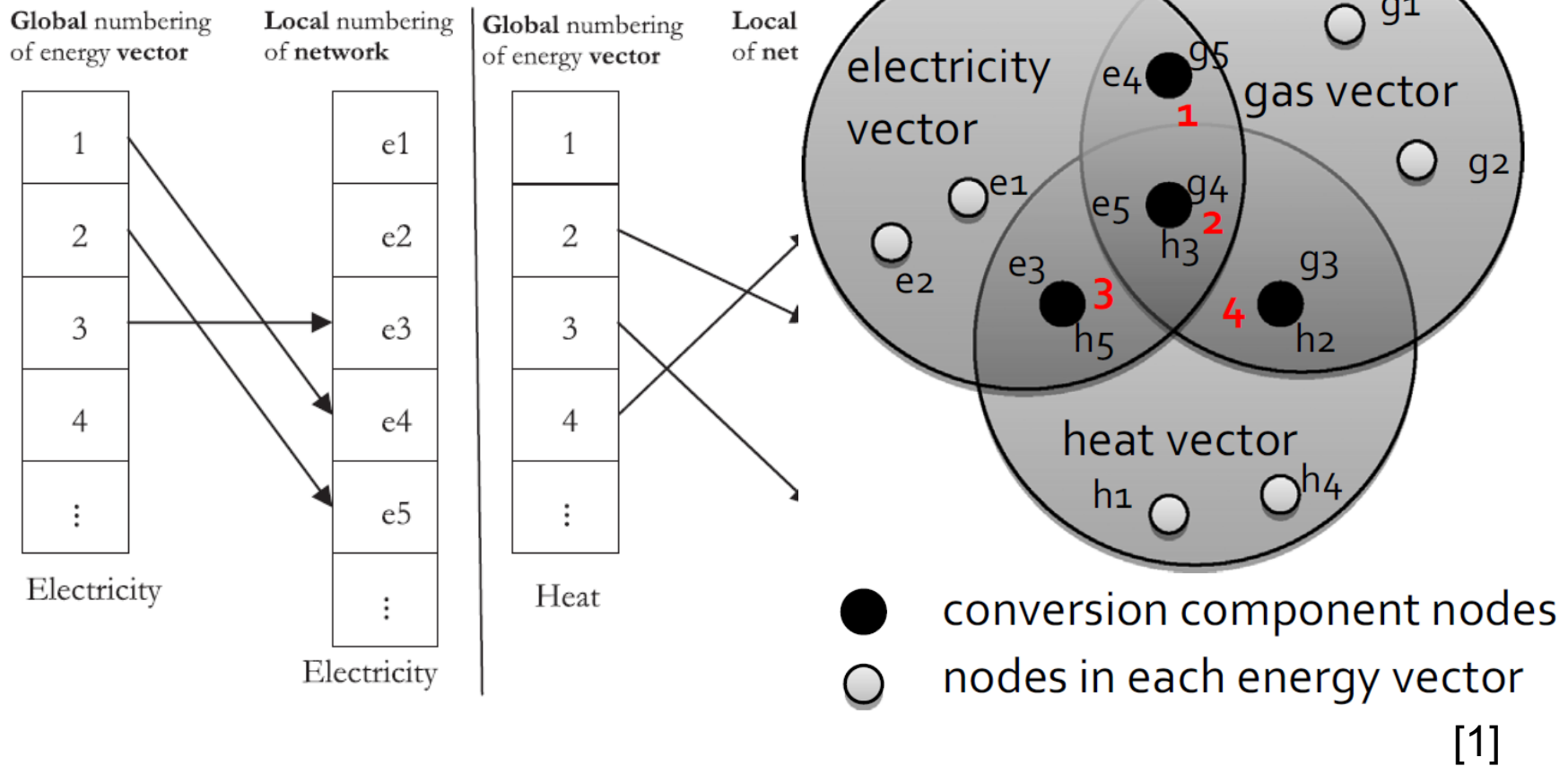
$$p_i^{con} = E_{i,ge}^{out} - E_{i,eh}^{in} \quad i = 1, 2, \dots, N_{con}$$

$$\phi_i^{con} = E_{i,gh}^{out} + E_{i,eh}^{out} \quad i = 1, 2, \dots, N_{con}$$

$$v_{q_i}^{con} = -E_{i,ge}^{in} - E_{i,gh}^{in} \quad i = 1, 2, \dots, N_{con}$$

Bestimmung der Gas-, Strom- und Wärmeflüsse

Step 4: Zuordnen der globalen Variablen zu den lokalen Variablen



Bestimmung der Gas-, Strom- und Wärmeflüsse

$$\begin{bmatrix} P_{e1}^{sp} \\ P_{e2}^{sp} \\ P_{e3}^{sp} \\ P_{e4}^{sp} \\ P_{e5}^{sp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{non,e1}^{sp} \\ P_{non,e2}^{sp} \\ P_3^{con} + P_{non,e3}^{sp} \\ P_1^{con} + P_{non,e4}^{sp} \\ P_2^{con} + P_{non,e5}^{sp} \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} \Phi_{h1}^{sp} \\ \Phi_{h2}^{sp} \\ \Phi_{h3}^{sp} \\ \Phi_{h4}^{sp} \\ \Phi_{h5}^{sp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_{non,h1}^{sp} \\ \Phi_4^{con} + \Phi_{non,h2}^{sp} \\ \Phi_2^{con} + \Phi_{non,h3}^{sp} \\ \Phi_{non,h4}^{sp} \\ \Phi_3^{con} + \Phi_{non,h5}^{sp} \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} v_{q-g1}^{sp} \\ v_{q-g2}^{sp} \\ v_{q-g3}^{sp} \\ v_{q-g4}^{sp} \\ v_{q-g5}^{sp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{q_{non},g1}^{sp} \\ v_{q_{non},g2}^{sp} \\ v_{q4}^{con} + v_{q_{non},g3}^{sp} \\ v_{q2}^{con} + v_{q_{non},g4}^{sp} \\ v_{q1}^{con} + v_{q_{non},g5}^{sp} \end{bmatrix}$$

$$p_i^{con} = E_{i,ge}^{out} - E_{i,eh}^{in}$$

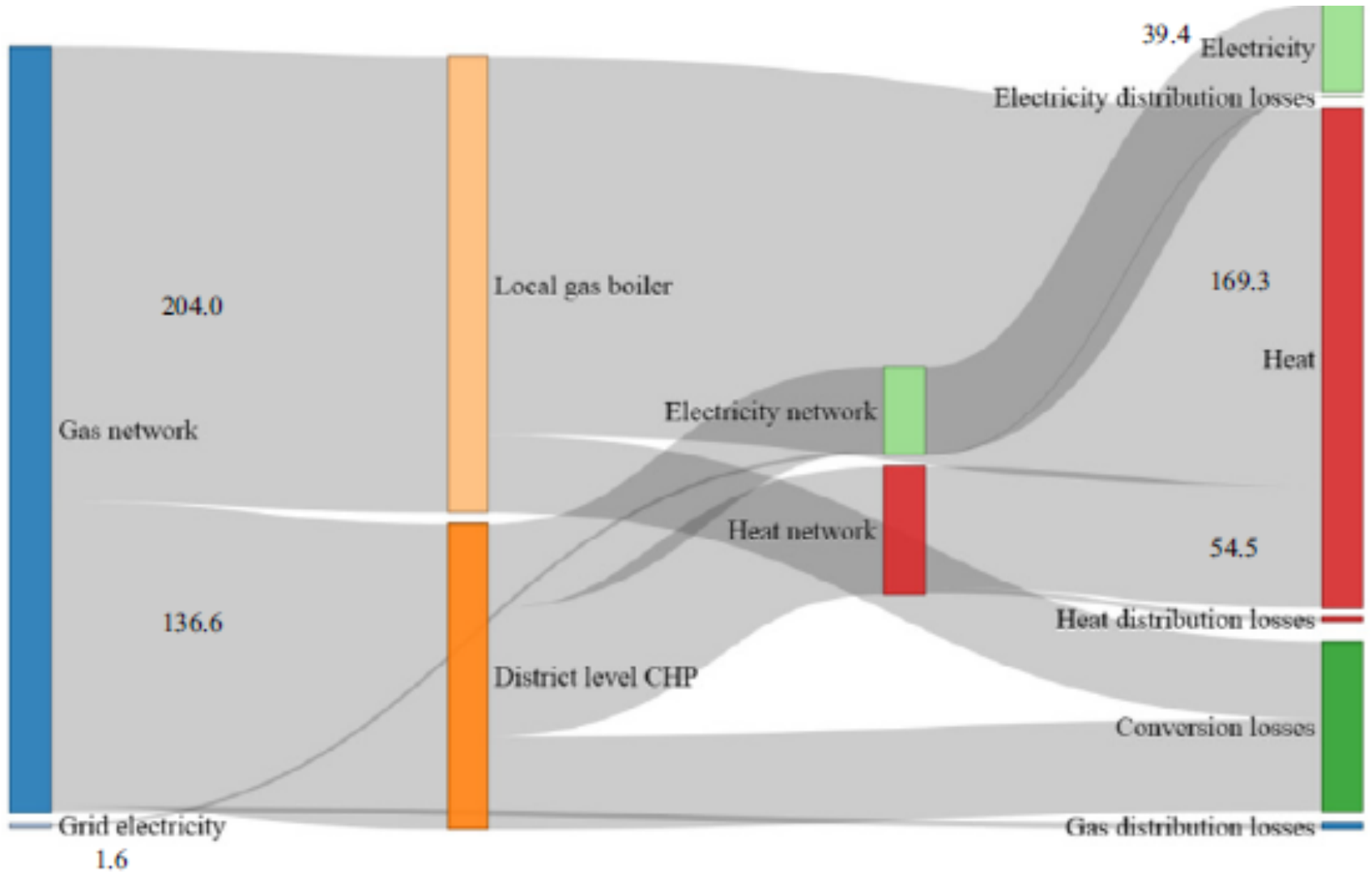
$$\phi_i^{con} = E_{i,gh}^{out} + E_{i,eh}^{out}$$

$$v_{q_i}^{con} = -E_{i,ge}^{in} - E_{i,gh}^{in}$$

Das Subskript non steht für den Anteil, der nicht durch Umwandlung erzeugt wurde

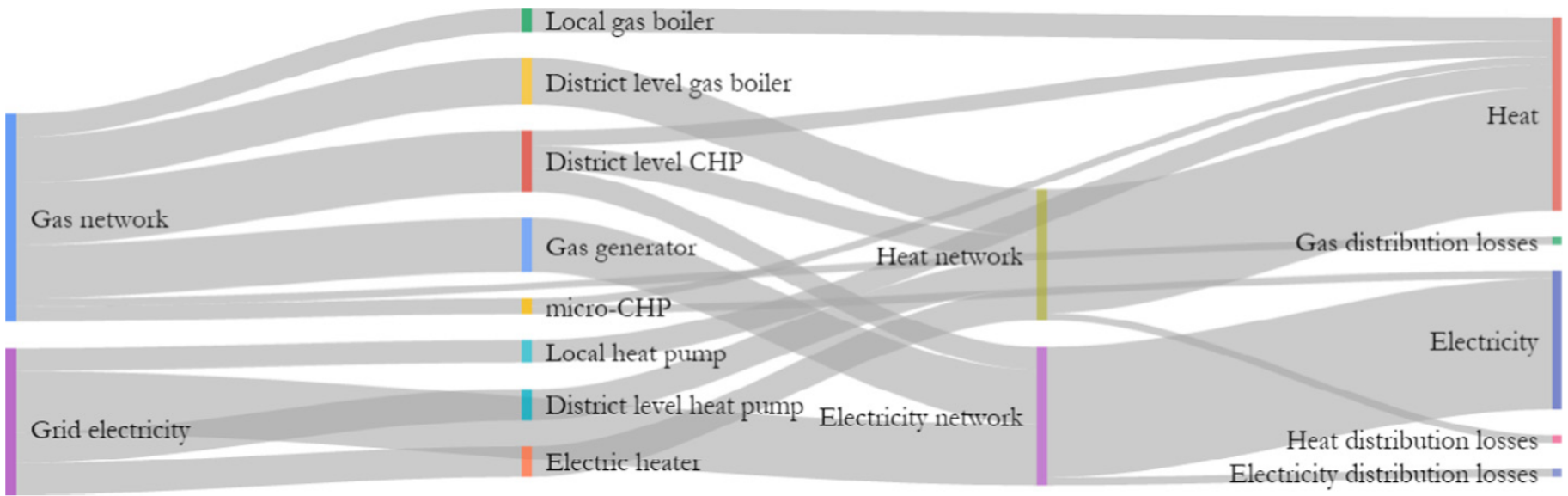
[1]

Sankey Diagramm Beispiel



[1]

Sankey Diagramm zur Darstellung der Energieflüsse



[1]

Zusammenfassung

- Energy Hubs
 - Vorteile von Energy Hubs sind Zuverlässigkeit, Lastflexibilität, das vorhandene Optimierungspotential und Synergieeffekte der Netze
 - Energy Hubs sind eine dezentrale kombinierte Lösung zur Herstellung, Speicherung und Verteilung von Energie
- Multienergiesystem modelliert durch Lui und Mancarella
 - Wärme-, Strom und Gasnetz separat modelliert
 - Verknüpfung der Netze über Umwandlungskomponenten die als Zeilen in der Matrix implementiert werden
 - Berechnung der Strom-, Gas-, und Wärmeflüsse

Fazit

- Das Konzept der Energy Hubs stellt eine neue Herangehensweise an „multiple energy carrier systems“ dar
- Die flexible Kombination verschiedener Energieträger ermöglicht großes Verbesserungspotential in der Speicherung und dem Transport von Energie
- Die Gesamteffizienz eines Systems kann noch deutlich verbessert werden und der Ausstoß des Treibhausgases CO₂ kann deutlich verringert werden
- Das Modell von Lui und Mancarella ist für eine erste Modellierung der Sektorenkopplung gut und wechselnde Bedingungen wie Umwandlungskomponenten können einfach integriert werden

Fazit

- Die Darstellung in Sankey Diagrammen für die Energieflüsse ist sehr gut geeignet
- Bis jetzt noch keine Lösung für nichtlineare Wirkungsgrade

Quellen

- [1] X. Lui and P. Mancarella. Modelling, Assessment and Sankey Diagrams of Integrated Electricity-heat-gas Networks in Multi-vector District Energy Systems. Applied Energy, 167:336–352, 2016
- [2] M. Geidl, G. Koeppel, P. Favre-Perrod, B. Klöckl, G. Andersson, K. Fröhlich: ENERGY HUBS FOR THE FUTURE, 2007
- [3] M. Sterner, Ingo Stadler: Energiespeicher Bedarf, Technologien, Integration, 2014
- [4] <http://www.erneuerbare-energien-info.net/wp-content/uploads/2011/07/banner-erneuerbare-energien.jpg>
- [5] http://www.et-energie-online.de/Portals/0/Bilder/Ausgabe2013-04/etredaktion_abb1_gross.jpg
- [6] <http://www.seilnacht.com/Lexikon/foss02.JPG>
- [7] Mancarella, P. (2014). MES (multi-energy systems): An overview of concepts and evaluation models. Energy, 65, 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.10.041>
- [8] http://regelwerke.vbg.de/vbg_dguvr/br500/figures/g2.31.2.gif
- [9] <http://www.ineratec.de>

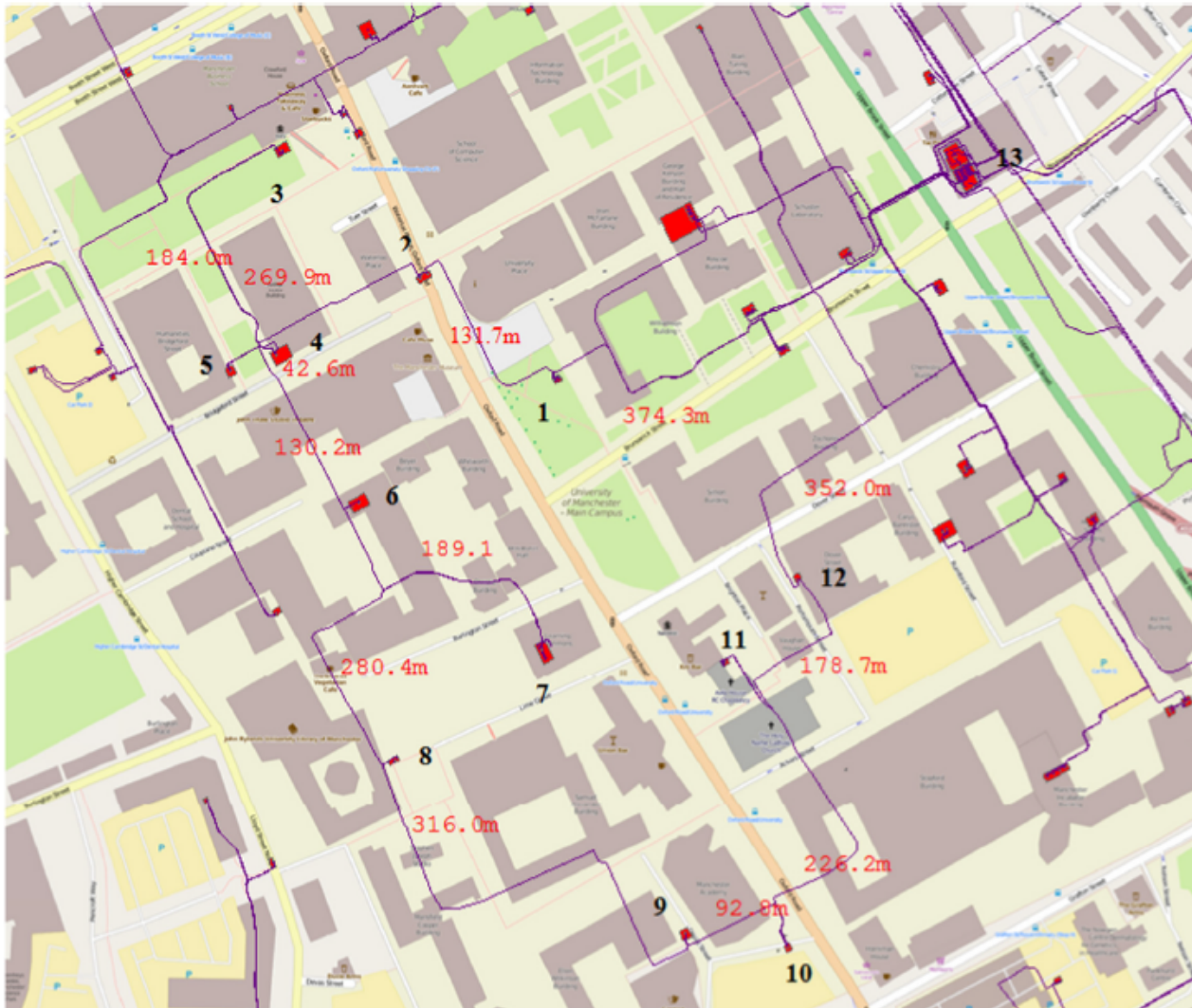
Backup

Newton-Raphson-Verfahren

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)}$$

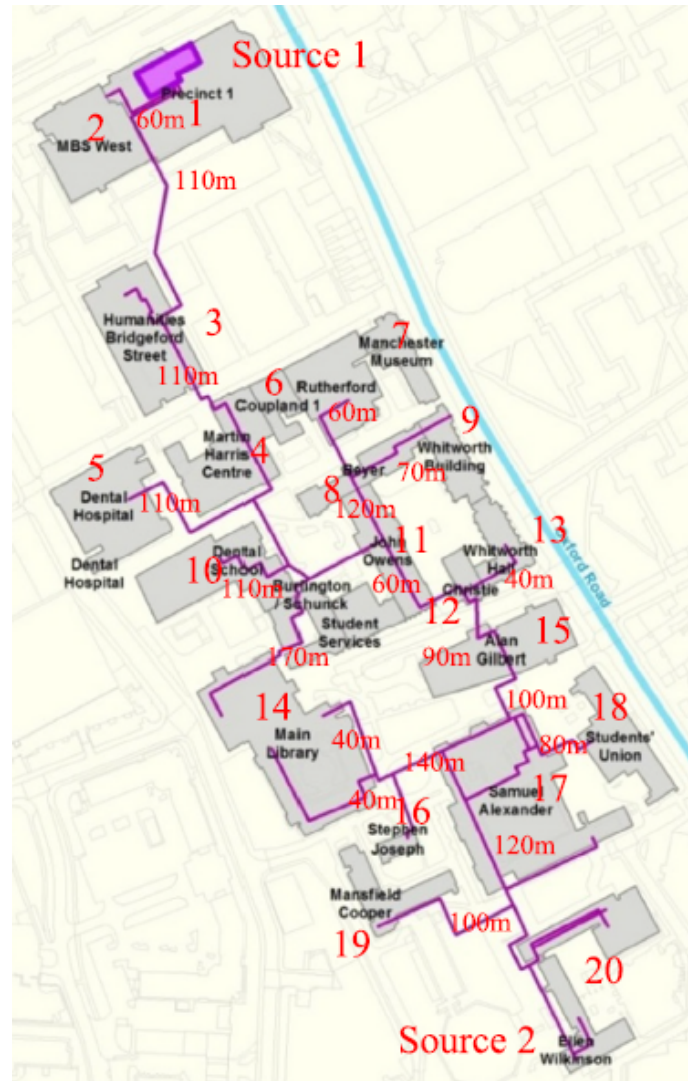
Numerisches Lösungsverfahren zur Lösung nicht-linearer Gleichungen

Beispiel für das Stromnetz



[1]

Beispiel für das Gasnetz



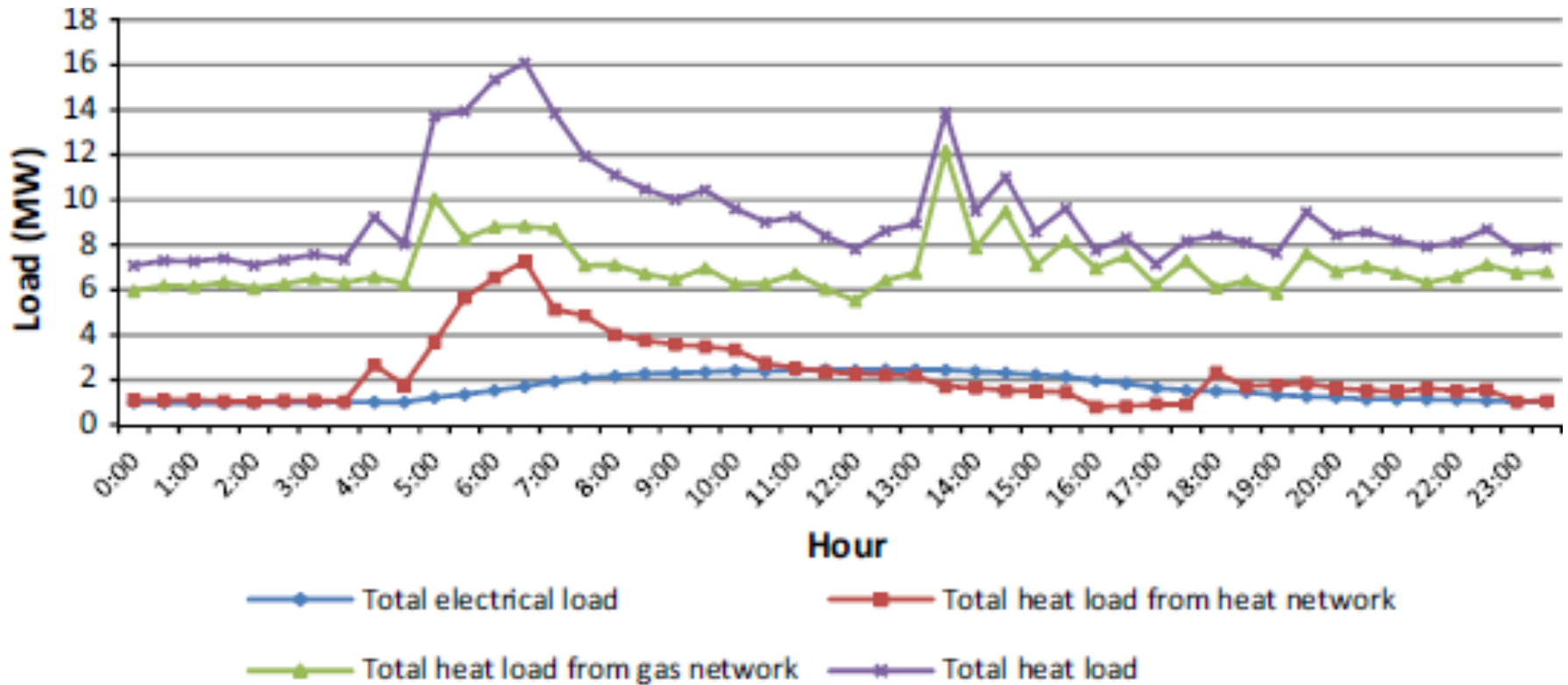
[1]

Beispiel für das Gasnetz



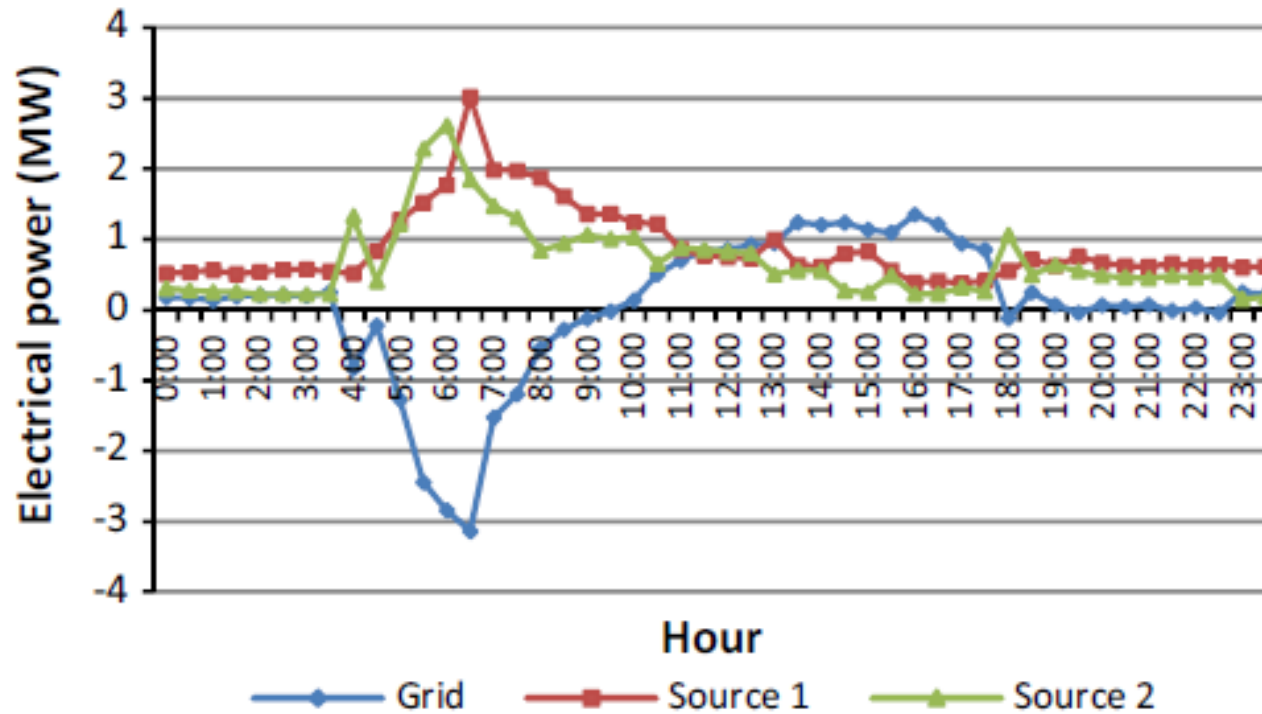
[1]

Verschiedene Lasten im Beispiel



[1]

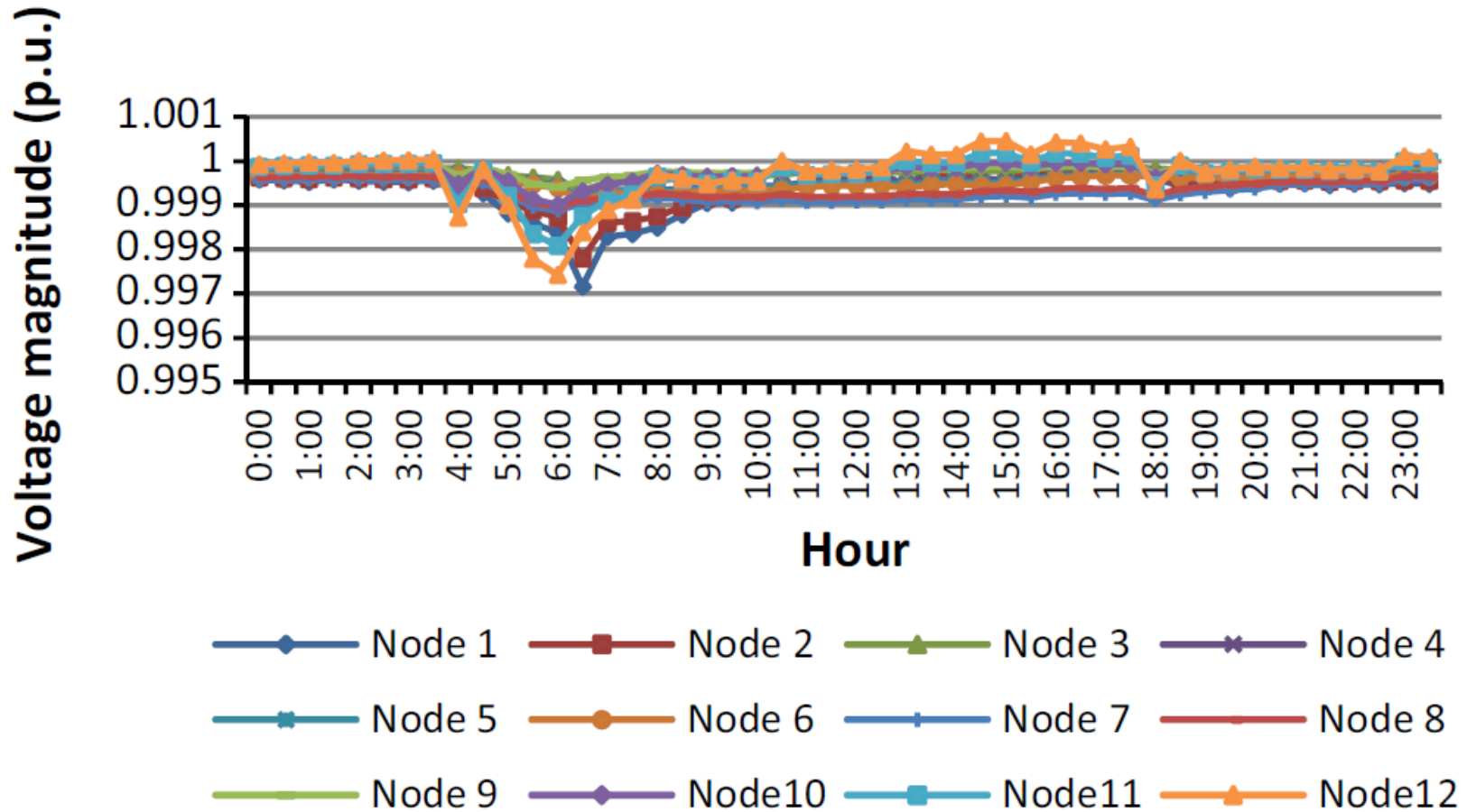
CHP + lokale Gaskessel Strombereitstellung



(c) Scenario 3: District level CHP + local gas boilers

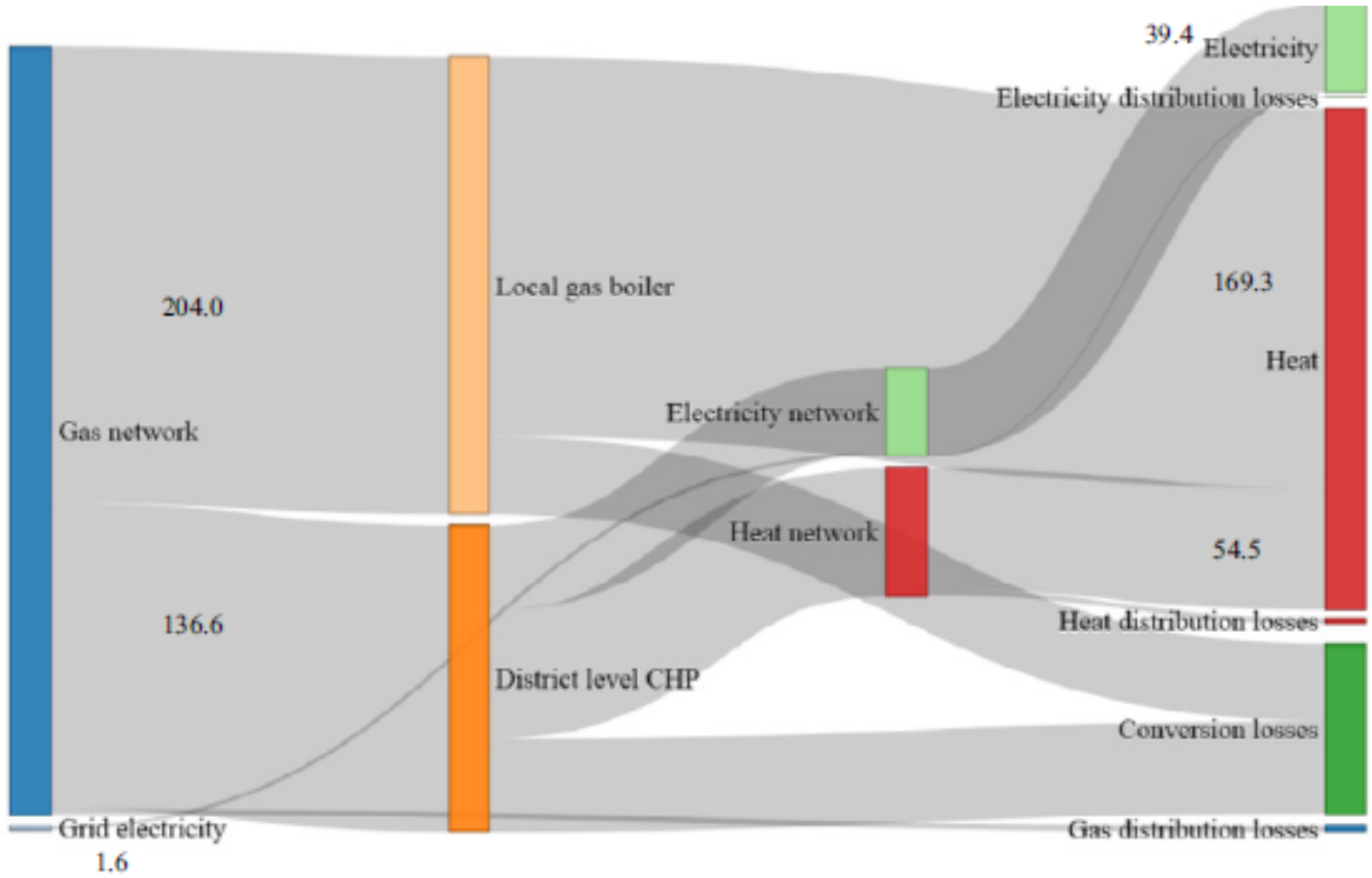
[1]

CHP + lokale Gaskessel Magnitude



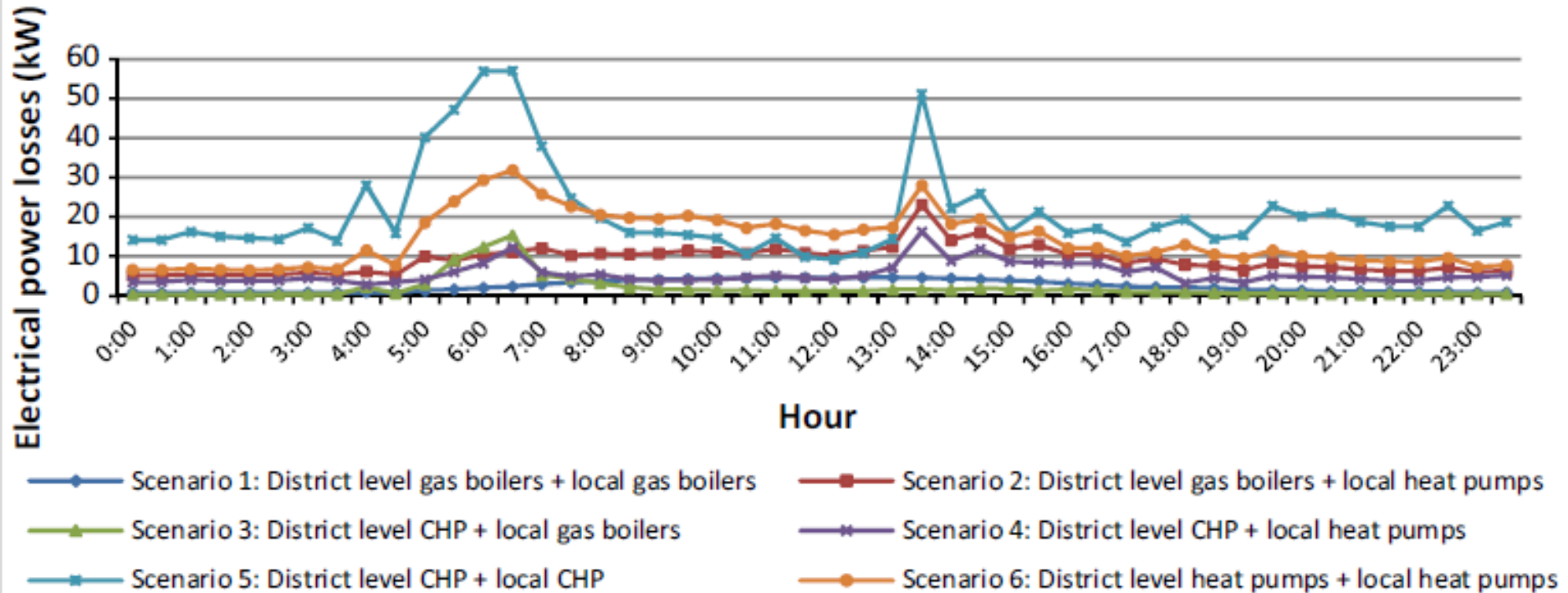
[1]

CHP + lokale Gaskessel



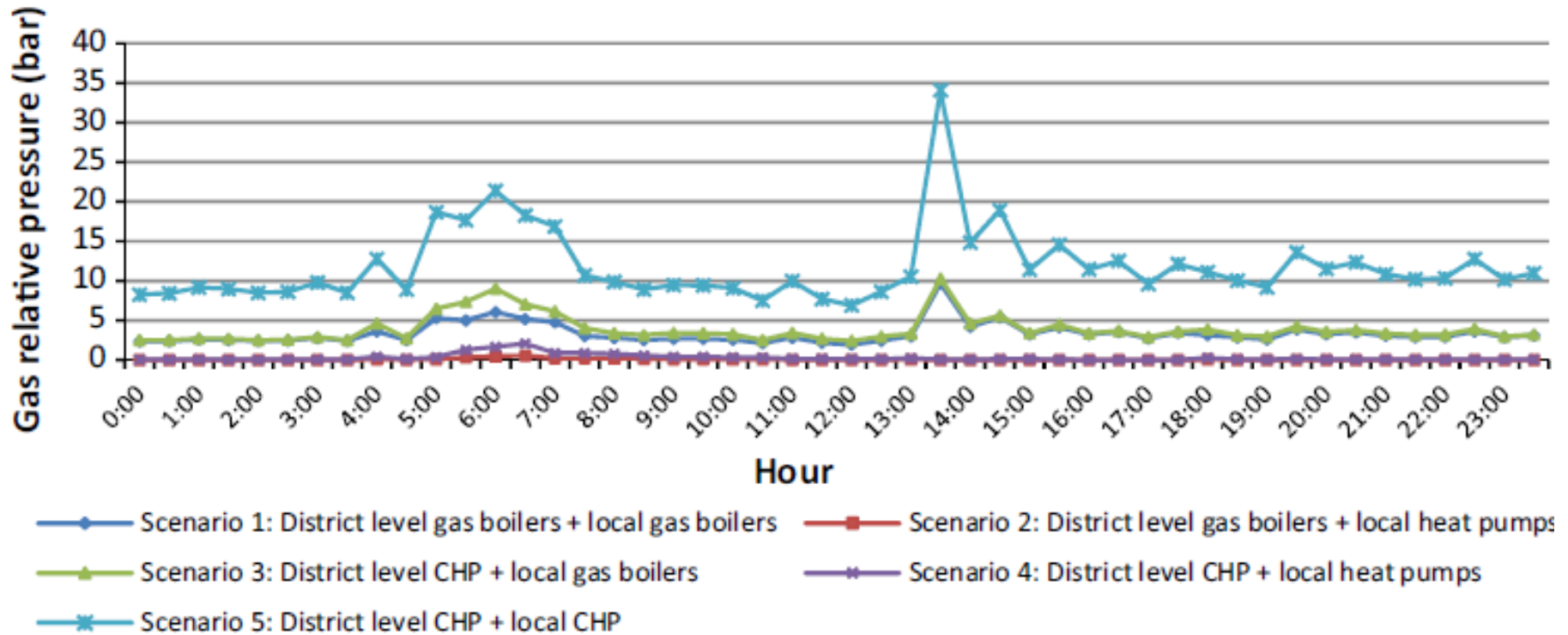
[1]

Verluste im elektrischen Netz



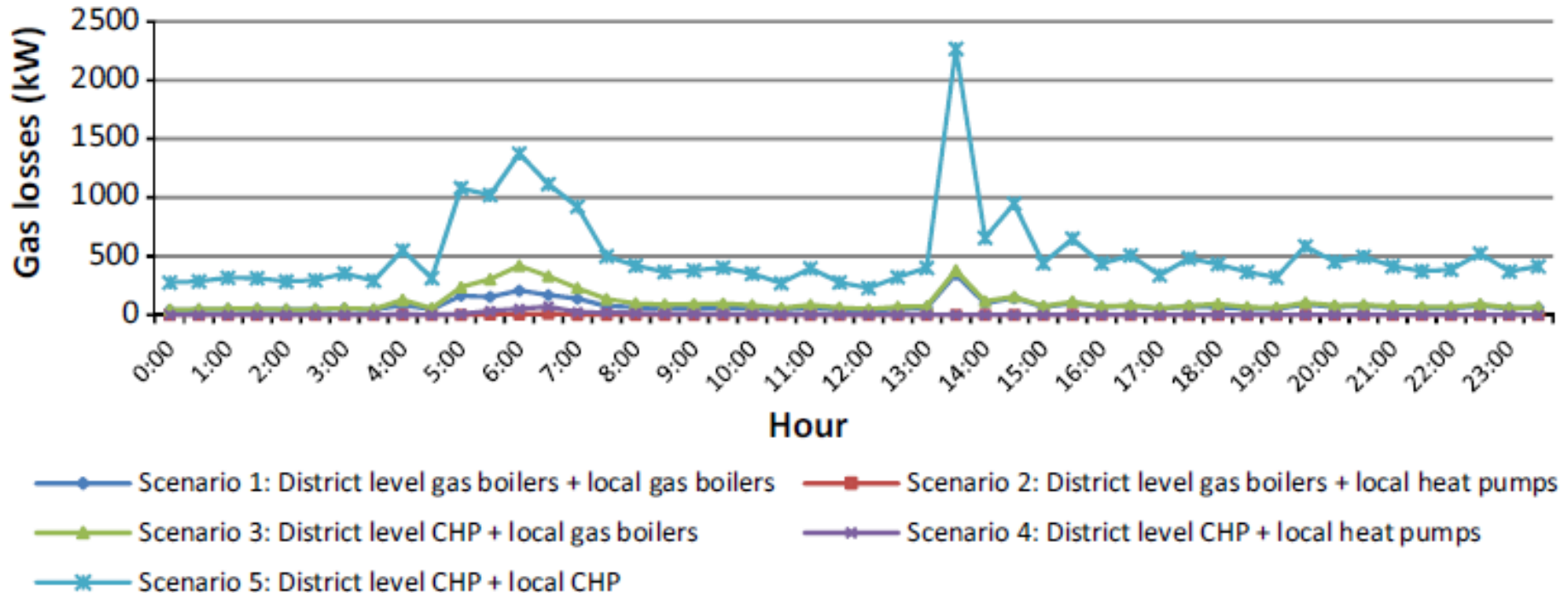
[1]

Druck im Gasnetzwerk

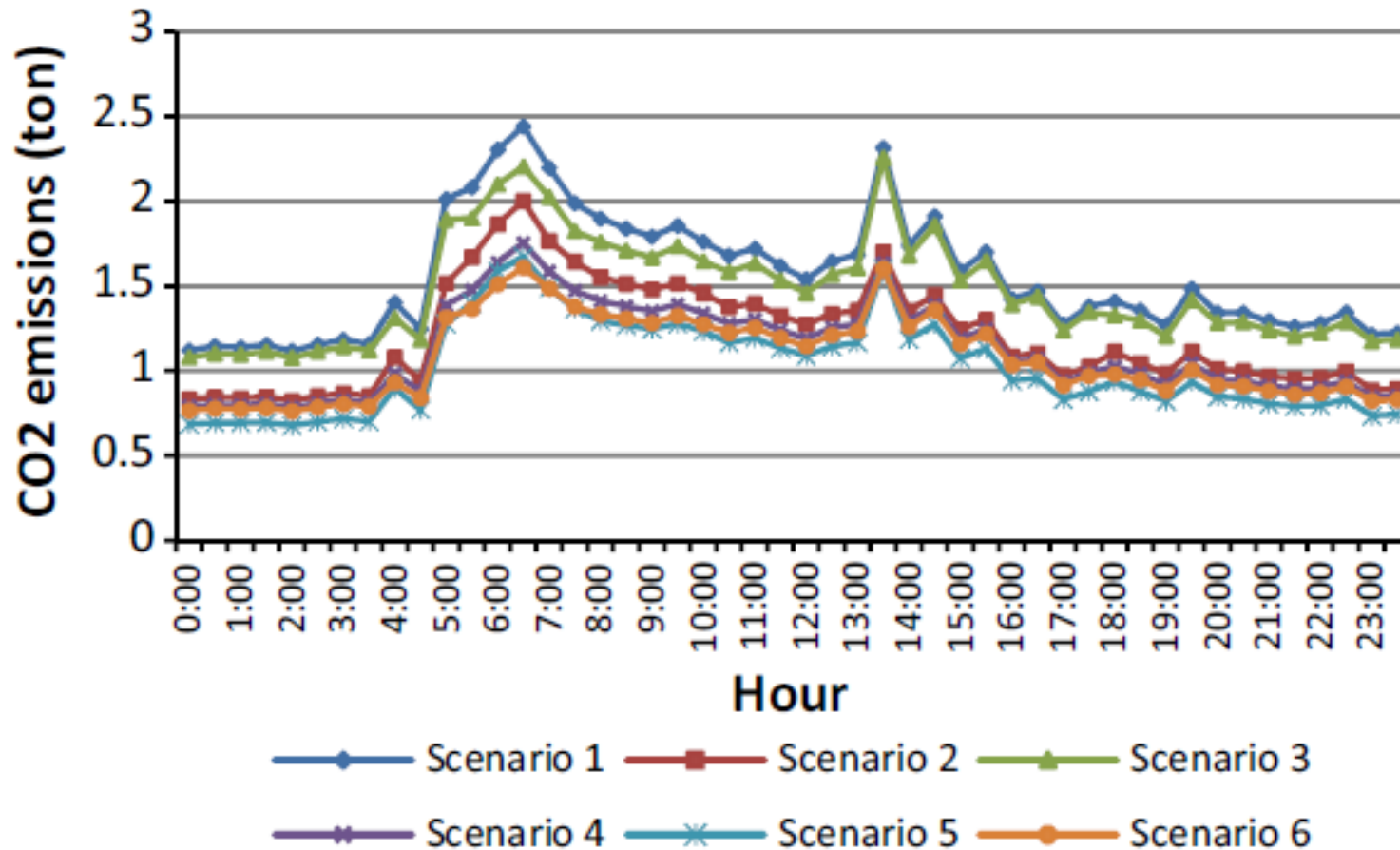


[1]

Verluste im Gasnetzwerk



CO2- Ausstoß



Energieflussgleichung

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}) = \mathbf{0} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{ll}
 \mathbf{P}^{SP} - \text{Real}\{\mathbf{V}(\mathbf{YV})^*\} = \mathbf{0} & \leftarrow \text{Active power} \\
 \mathbf{Q}^{SP} - \text{Imag}\{\mathbf{V}(\mathbf{YV})^*\} = \mathbf{0} & \leftarrow \text{Reactive power} \\
 C_p \mathbf{A}_h \dot{\mathbf{m}} (\mathbf{T}_s - \mathbf{T}_o) - \Phi^{SP} = \mathbf{0} & \leftarrow \text{Heat power} \\
 \mathbf{B}_h \mathbf{K}_h \dot{\mathbf{m}} |\dot{\mathbf{m}}| = \mathbf{0} & \leftarrow \text{Loop pressure - heat} \\
 \mathbf{C}_s \mathbf{T}_{s,load} - \mathbf{b}_s = \mathbf{0} & \leftarrow \text{Supply temperature} \\
 \mathbf{C}_r \mathbf{T}_{r,load} - \mathbf{b}_r = \mathbf{0} & \leftarrow \text{Return temperature} \\
 \mathbf{A}_g \mathbf{v}_g - \mathbf{v}_q^{SP} = \mathbf{0} & \leftarrow \text{Gas flow} \\
 \mathbf{B}_g \mathbf{K}_g \mathbf{v}_g |\mathbf{v}_g^{k-1}| = \mathbf{0} & \leftarrow \text{Loop pressure - gas}
 \end{array} \right. \quad \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \theta \\ |\mathbf{V}| \\ \dot{\mathbf{m}} \\ \mathbf{T}_{s,load} \\ \mathbf{T}_{r,load} \\ \mathbf{v}_g \end{bmatrix}$$

Network incidence matrices

- Für jedes Netzwerk eine Network incidence matrix
- Weisen die Branches den jeweiligen Nodes zu
- Element der Matrix wird:
 - +1, wenn der Fluss des Branches in den Node kommt
 - -1, wenn der Fluss des Branches vom Node weggeht
 - 0, wenn keine Verbindung zwischen dem Branch und dem Node ist