



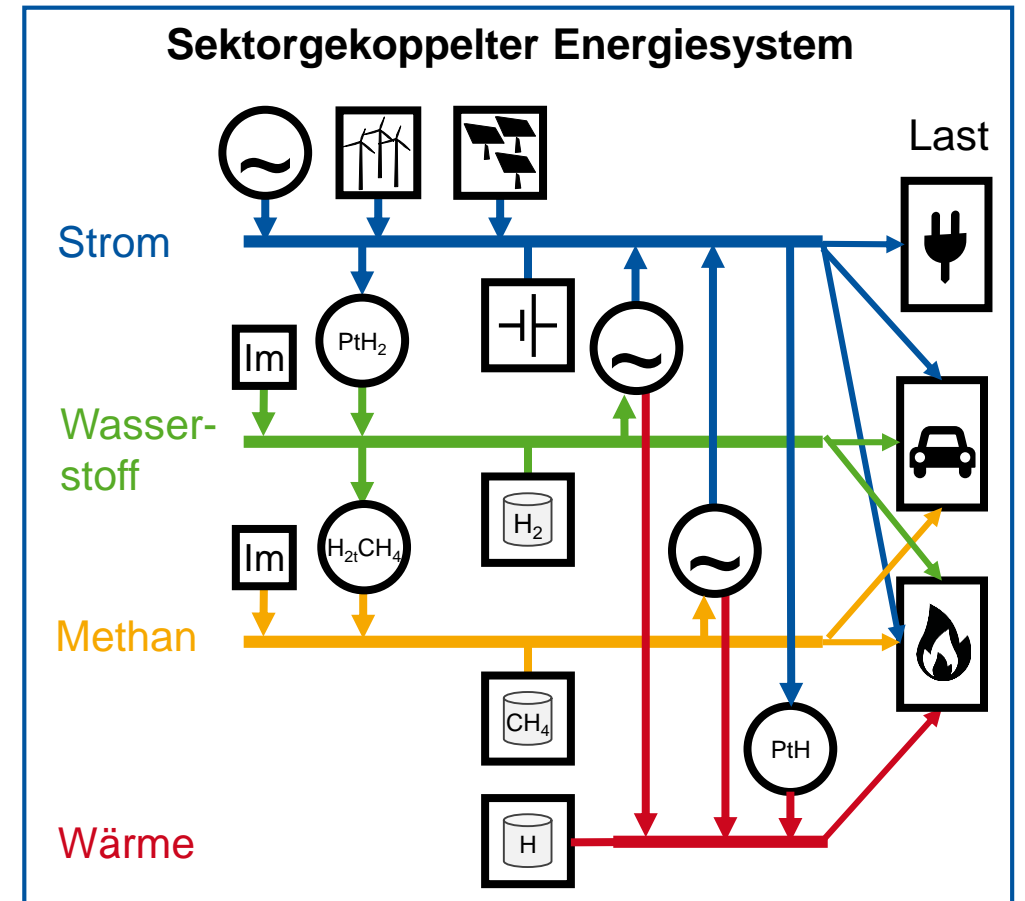
# Integrierte Simulation und Optimierung des Betriebs von Strom- und Gastransportinfrastrukturen: Ein Modellvergleich

Lukas LÖHR\*, Ziyi JIA, Albert MOSER

17. Symposium Energieinnovation, 16.-18.02.2022, Graz/Austria

## Betriebsoptimierung sektorgekoppelter Energiesysteme







- Anforderungen an die Energiesystemanalyse steigen:
    - Integrierte Betrachtung der Systeme Strom, Gas und Wärme zur Hebung von sektorübergreifenden Optimierungspotentialen
    - Detaillierte Modellierung von Energietransporten durch steigenden Transportbedarf lastferner Erzeugung
  - Betriebssystemverfahren iGENeo für sektorgekoppelte Strom-, Methan-, Wasserstoff- und Wärmesysteme
    - 1) Integrierte Optimierung des Anlageneinsatzes
    - 2) Abbildung physik. Strom- und Gasflüsse sowie Netzverluste
  - iGENeo nutzt verschiedene Modellreduktionstechniken zur Anwendbarkeit auf großskalige Energiesysteme
- **Validierung von iGENeo durch Modellvergleiche mit kommerziellen Softwaretools**



## Angewendete Modellreduktionstechniken

<b>Linear Dynamic Constraints</b>	<p>Modellierung von Betriebsrestriktionen erfordert binär-Variablen für Anlagenzustand (Mixed-integer Problem, MIP)</p> $p^{\min} \cdot p^{\max} \cdot e_t \leq P_t \leq p^{\max} \quad e_t = \begin{cases} 1, & \text{Betrieb} \\ 0, & \text{Stillstand} \end{cases}$	<p>Einführung linearer Hilfsvariablen und linearer dynamische Nebenbedingungen (LDC) zur Approximation binärer Variablen → LP</p> $p^{\min} \cdot p_t^{RC} \leq P_t \leq p_t^{RC} \quad 0 \leq p_t^{RC} \leq p^{\max}$
<b>Wirklast- flussapprox- imation</b>	<p>AC-Lastflussgleichungen sind quadratisch, trigonometrisch</p> $P_{i,t} = 3 U_{i,t}^2 \cdot Y_{ii} \cdot \cos(\alpha_{ii}) + 3 U_{i,t} \cdot \sum_{j=1}^N U_{j,t} \cdot Y_{ij} \cdot \cos(\theta_{i,t} - \theta_{j,t} + \alpha_{ij})$ $Q_{i,t} = 3 U_{i,t}^2 \cdot Y_{ii} \cdot \sin(\alpha_{ii}) + 3 U_{i,t} \cdot \sum_{j=1}^N U_{j,t} \cdot Y_{ij} \cdot \sin(\theta_{i,t} - \theta_{j,t} + \alpha_{ij})$	<p>Wirklastflussapproximation für Übertragungsnetze mit geringem Fehler</p> $P_{ij,t} = 3 U^2 \cdot \sum_{j=1}^N Y_{ij} \cdot (\theta_{i,t} - \theta_{j,t}) \quad \text{mit } Y_{ij} = X_{ij} / \sqrt{X_{ij}^2 + R_{ij}^2}$ $Q_{ij,t} = 0$
<b>Quasi- stationärer Gasfluss</b>	<p>Transiente Gasflüsse stellen System partieller Differentialgleichungen auf:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Massenerhaltung (Netzinhalt)</li> <li>• Impulserhaltung (Druckverlust)</li> <li>• Energieerhaltung (Temperatur)</li> </ul>	<p>Stationärer Druckabfall und Zeitkopplung über Leitungsinhalt, isotherm</p> $ \dot{V}_{n,ij,t}  \cdot \dot{V}_{n,ij,t} = \frac{\pi^2 d^5 T_n}{16 \lambda_m \rho_n p_n T_m K_m l} \cdot (p_{i,t}^2 - p_{j,t}^2)$ $LI_{ij,t} = LI_{ij,t-1} + (\dot{V}_{n,ij,t}^{ein} - \dot{V}_{n,ij,t}^{aus}) \quad LI_{ij,t} = \frac{\pi d^2 l T_n}{4 T_m p_n K_m} p_{m,ij,t}$

# Modellvorstellung

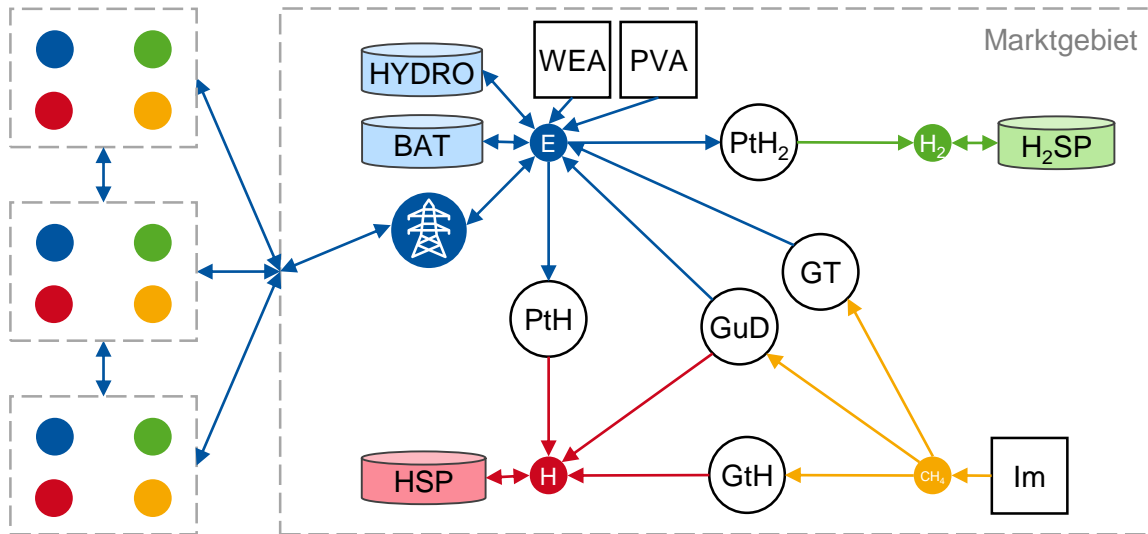
	iGENeO	PLEXOS	SAInt
<b>Urheber</b>	 	 	 
<b>Energieträger</b>	Strom, Gase, Wärme	Strom, Gase, Wärme	Strom, Gase
<b>Fähigkeiten</b>	<b>Einsatzoptimierung</b> <b>Netzoptimierung</b>	<b>Einsatzoptimierung</b> <i>Netzoptimierung</i>	<b>Netzsimulation</b> <i>Einsatzoptimierung</i>
<b>Lösungsalgorithmen</b>	Sukzessiv lineare Optimierung	Lineare Optimierung, Mixed-Integer Optimierung	Vergleichbar mit Newton-Raphson Algorithmus
<b>Gasfluss</b>	quasi-stationär (isotherm)	–	stationär, transient (isotherm, nicht-isotherm)
<b>Stromfluss</b>	DC-Lastfluss	DC-Lastfluss	AC-Lastfluss
<b>Betriebsrestriktionen</b>	LP (LDC)	MIP	MIP <sup>1</sup>
<b>Modellvergleich 1: Integrierte Einsatzoptimierungen mit PLEXOS</b>		1.1 LP	1.2 LDC vs. MIP
<b>Modellvergleich 2: Integrierte Lastflussberechnungen mit SAInt</b>		2.1 Stationär	2.2 Quasi-stationär vs. transient

# Modellvergleich 1: Integrierte Einsatzsimulation



## Modellvergleich 1.1: Lineare Einsatzsimulation

- MODEX FlexMex Testsystem 3c<sup>1</sup>
- 8760 h, 11 Marktgebiete für Strom, Wasserstoff, Methan und Wärme gekoppelt durch el. Transportkapazitäten
- Minimierung der Betriebskosten: rein lineare Betriebsrestriktionen



Typ	PLEXOS	iGENeO	Differenz absolut	Differenz relativ
GT	644 035 886 €	644 033 020 €	2 866 €	0.00045%
GuD	13 348 803 662 €	13 348 800 398 €	3 264 €	0.00002%
GtH	4 175 682 280 €	4 175 682 225 €	54 €	0.00000%
PtH <sup>2</sup>	271 310 914 €	271 310 914 €	0 €	0.00000%
PtH <sub>2</sub> <sup>2</sup>	294 652 822 €	294 652 853 €	31 €	0.00001%
<b>SUMME</b>	<b>18 734 485 564 €</b>	<b>18 734 479 410 €</b>	<b>6 153 €</b>	<b>0.00003%</b>

→ Abweichungen im Bereich numerischer Ungenauigkeiten von Datenmanagement und Solvern

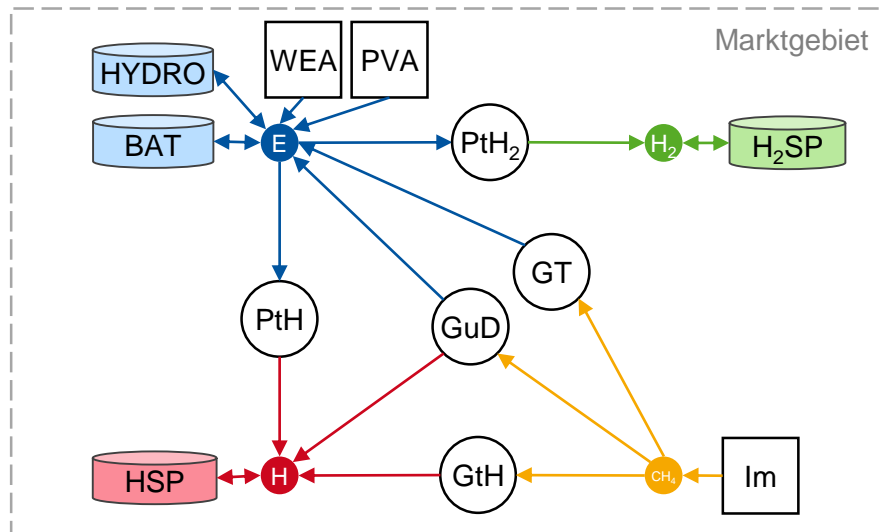
# Modellvergleich 1: Integrierte Einsatzsimulation



## Modellvergleich 1.2: Gemischt-ganzzahlige Betriebsrestriktionen

- MODEX FlexMex Testsystem 3c<sup>1</sup>
- 720 h, 1 Marktgebiete (Deutschland) für Strom, Wasserstoff, Methan und Wärme
- Minimierung der Betriebs- und Anfahrtskosten: gemischt-ganzzahlige Betriebsrestriktionen (50% Mindestleistung)

\*beinhaltet keine Brennstoffkosten



Parameter Typ	PLEXOS	GT iGENeO	Differenz	
			absolut	relativ
Rel. Mindestleistung		30%	50%	
GT Betrieb	73 015 776 €	73 001 471 €	14 305 €	0.0196%
GT Anfahrtskosten	536 860 €	1 h 537 403 €	543 €	0.1011%
Mindestbetriebszeit		1 h	2 h	
GuD Betrieb	874 690 134 €	874 707 287 €	17 153 €	0.0020%
GuD Anfahrtskosten	154 660 €	1 h 154 309 €	10 351 €	0.2008%
GuD Leistungsgradienten		100 %/h	3 €	0.0000%
GtH Betrieb	350 555 860 €	350 548 531 €	7 329 €	0.0021%
PtH <sub>2</sub> Betrieb <sup>2</sup>	5 604 656 €	5 604 627 €	29 €	0.0005%
Anfahrtskosten		31 €/MW	81 €/MW	
<b>SUMME</b>	<b>1 322 293 710 €</b>	<b>1 322 279 389 €</b>	<b>14 321 €</b>	<b>0.0011%</b>

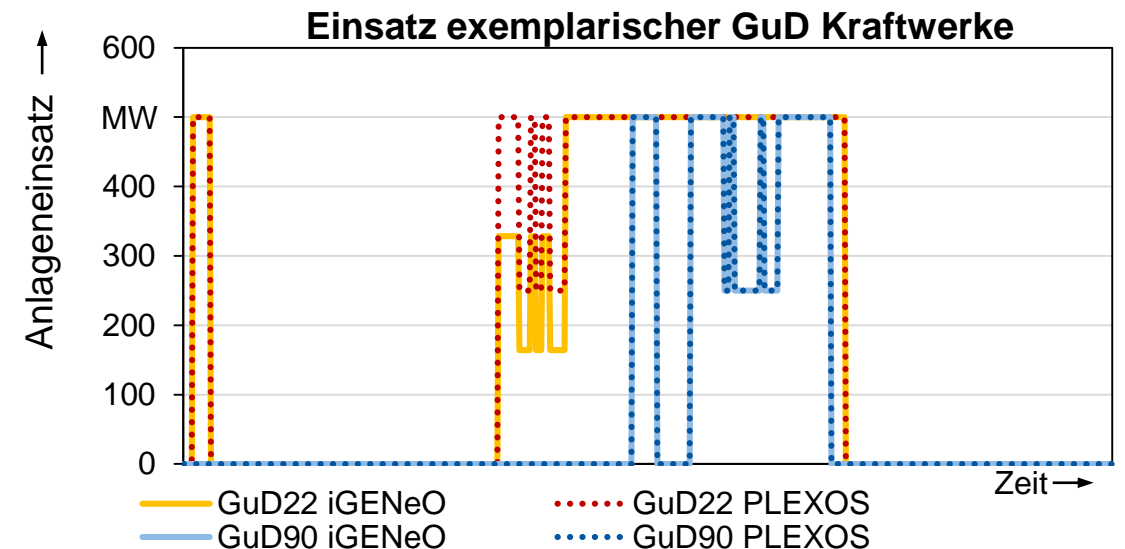
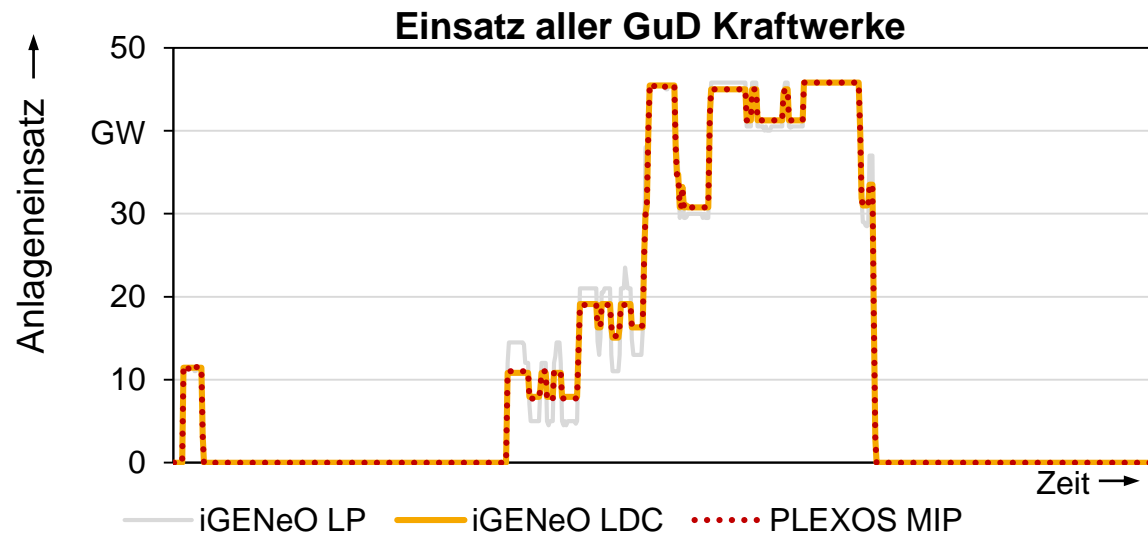


## Modellvergleich 1: Integrierte Einsatzsimulation



### Modellvergleich 1.2: Gemischt-ganzzahlige Betriebsrestriktionen

- MODEX FlexMex Testsystem 3c<sup>1</sup>
- 720 h, 1 Marktgebiete (Deutschland) für Strom, Wasserstoff, Methan und Wärme
- Minimierung der Betriebs- und Anfahrtskosten: gemischt-ganzzahlige Betriebsrestriktionen (50% Mindestleistung)

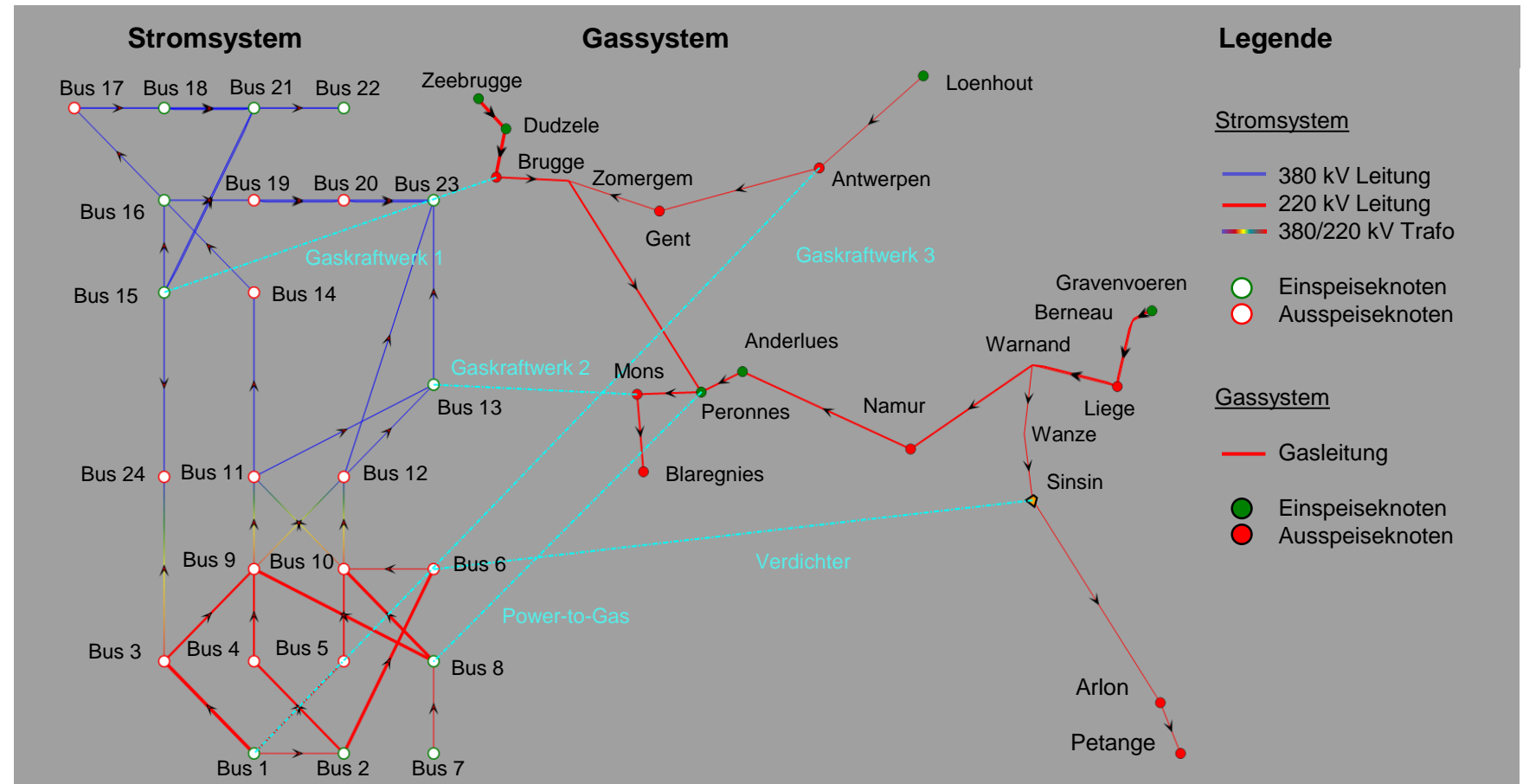


→ **Abweichungen durch LDC Formulierung gering: Modellvergleich 1 erfolgreich**

# Modellvergleich 2: Integrierte Lastflussberechnung

## Modellvergleich 2.1: Stationäre Lastflussanalyse

- 24 Knoten IEEE Testsystem
- 21 Knoten Gas Testsystem
- Kopplung durch
  - 3 Gaskraftwerke
  - 1 Power-to-Gas Anlage
  - 1 Elektrischer Verdichter
- Regelung von Ein- und Ausspeisungen sowie Druck auf Sollgrößen
- Analyse von einem stationären Netznutzungsfall





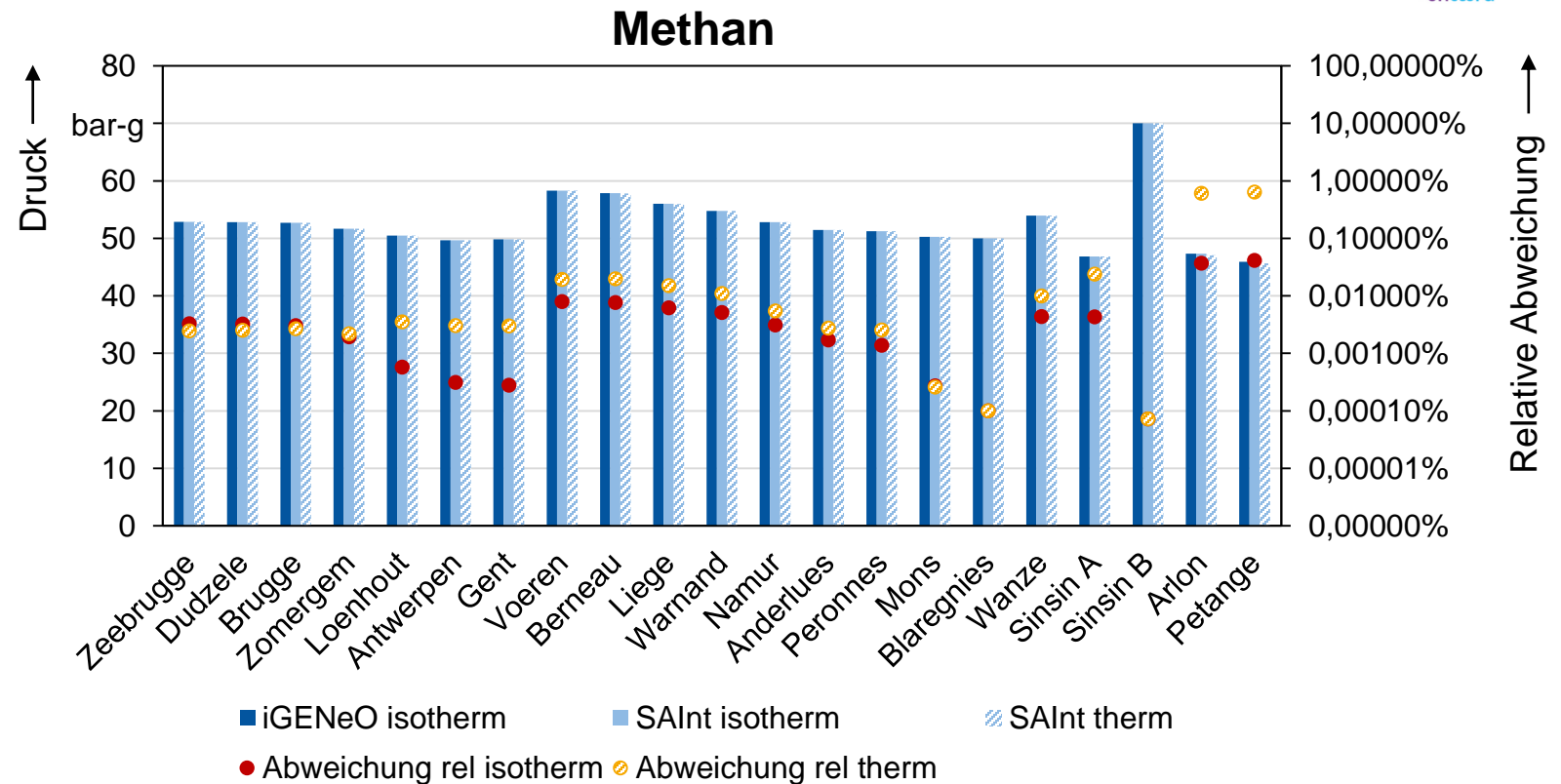
# Modellvergleich 2: Integrierte Lastflussberechnung



## Modellvergleich 2.1: Stationäre Lastflussanalyse

### Methan

- Abweichungen Druck isotherm unterhalb von 0.05%
- Abweichungen Druck therm. unterhalb von 0.7%
- Abweichung Verluste durch Verdichtung 0.06% / 0.3 %



# Modellvergleich 2: Integrierte Lastflussberechnung



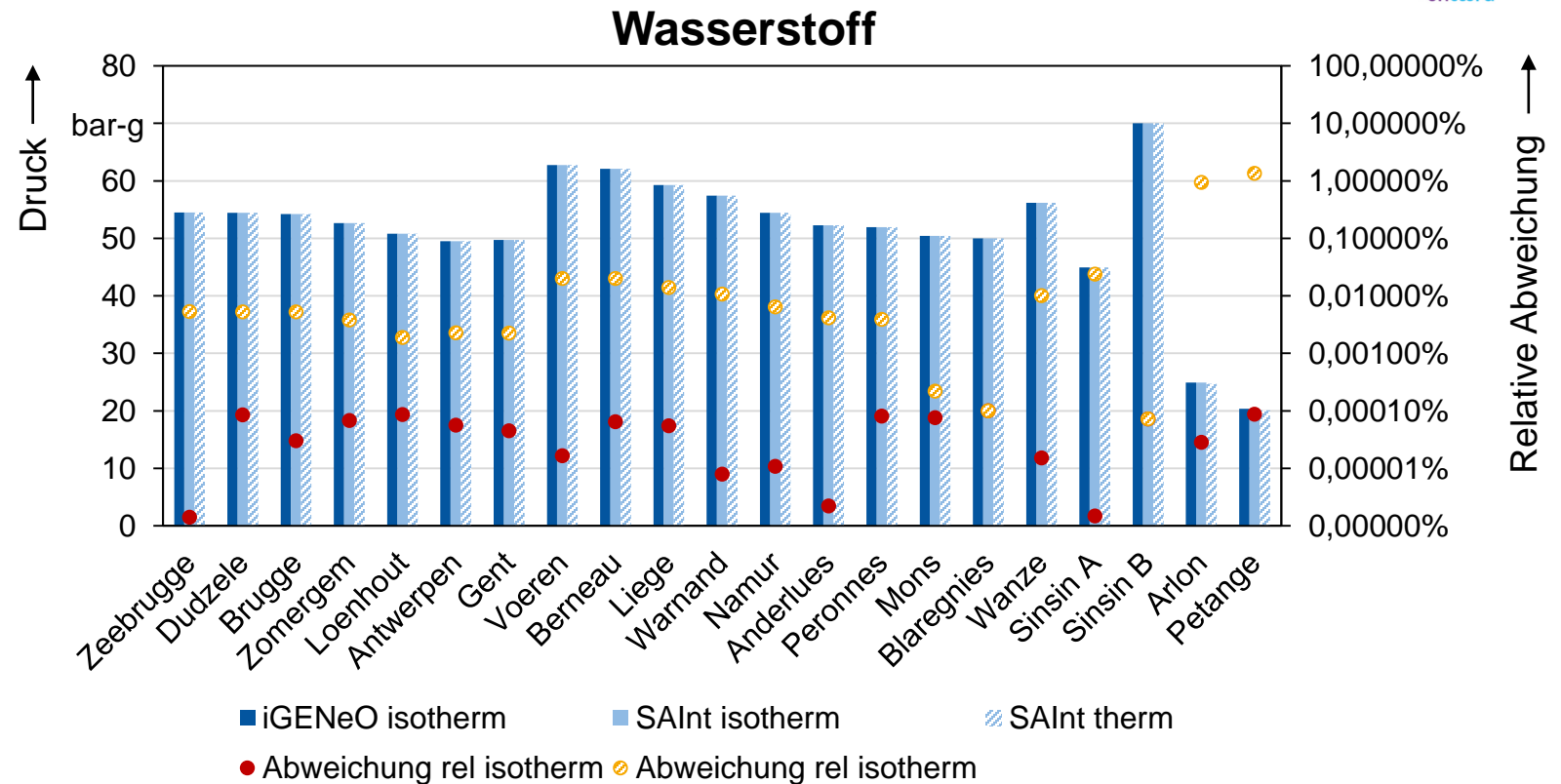
## Modellvergleich 2.1: Stationäre Lastflussanalyse

### Methan

- Abweichungen Druck isotherm unterhalb von 0.05%
- Abweichungen Druck therm. unterhalb von 0.7%
- Abweichung Verluste durch Verdichtung 0.06% / 0.3 %

### Wasserstoff

- Abweichungen Druck isotherm unterhalb von 0.0001%
- Abweichungen Druck therm. unterhalb von 1.4%
- Abweichung Verluste durch Verdichtung 0.02% / 0.2 %



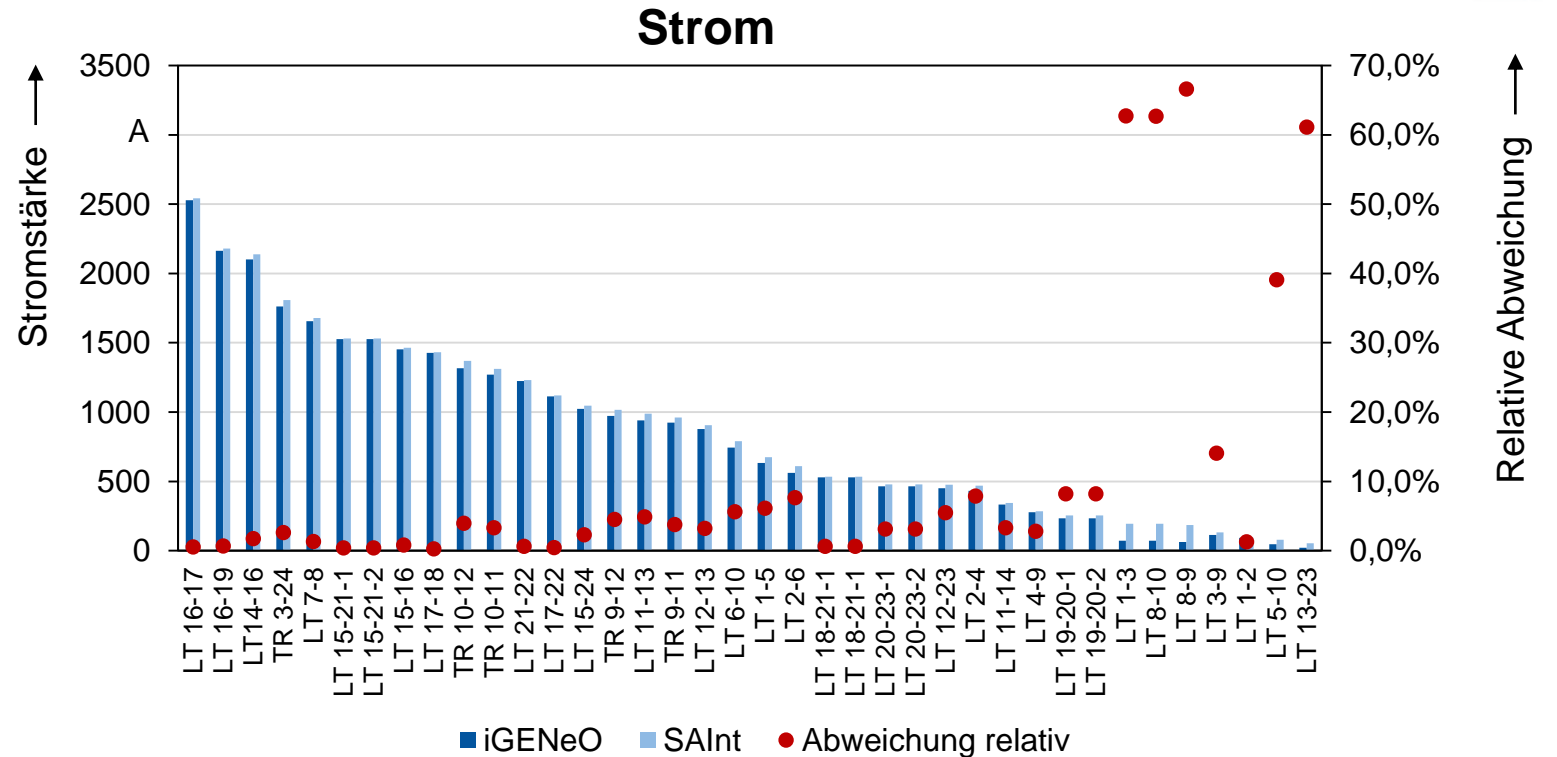
# Modellvergleich 2: Integrierte Lastflussberechnung



## Modellvergleich 2.1: Stationäre Lastflussanalyse

### Strom

- Abweichungen der Stromstärken von bis zu 70%
  - Abweichung stark ausgelasteter Leitungen unterhalb von 0-5%
  - Abweichung der Verluste 4.3 %
- Abweichungen durch Wirklastflussapproximation



→ Stationäre Gasflüsse mit marginalen, Strom mit erwartbaren und vertretbaren Fehlern

## Modellvergleich 2: Integrierte Lastflussberechnung

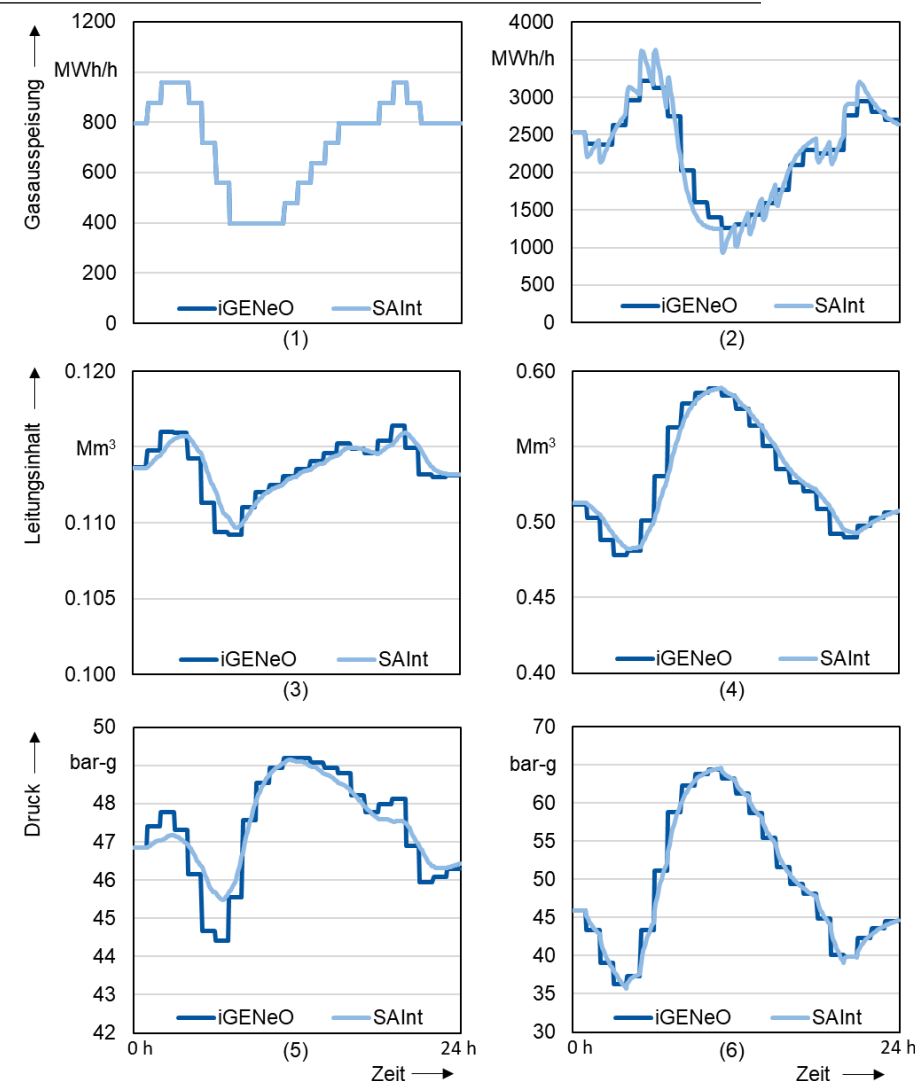
### Modellvergleich 2.2: Transiente Lastflussanalyse

- Betrachtung des Methansystems für 24 h
  - iGENeO: Stündliche Auflösung
  - SAInt: 5-minütige Auflösung
- Stündlich schwankendes Lastprofil (1)
- Ausgleich der Netzinhaltsänderungen durch Slackknoten (2)
- Gutes Abtasten von Leitungsinhalt und Druck mit Abweichungen von maximal 1 bar

→ Abbildung transienter Vorgänge durch quasi-stationäre Modellierung möglich

→ Ergebnisse für Wasserstoff analog

→ **Modellvergleich 2 erfolgreich**



## Validierung von iGENeO

- Betriebssystemungsverfahren für sektorgekoppelte Strom-, Methan-, Wasserstoff- und Wärmesysteme
  - 1) Integrierte Optimierung des Einsatzes verschiedener Anlagen
  - 2) Abbildung physikalischer Strom- und Gasflüsse sowie Netzverluste
- Modellvereinfachungen
  - LDC Betriebsrestriktionen
  - Wirklastflussapproximation Strom
  - Quasi-stationärer Gasfluss

**Modellvergleich 1: Integrierte Einsatzoptimierungen mit PLEXOS**

1.1 LP ✓

1.2 LDC vs. MIP ✓

**Modellvergleich 2: Integrierte Lastflussberechnungen mit SAInt**

2.1 Stationär ✓

2.2 Quasi-stationär vs. transient ✓

# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

## Kontakt:

Lukas Löhr

IAEW der RWTH Aachen University  
Schinkelstraße 6, 52056 Aachen  
+49 241 80-97651

[l.loehr@iaew.rwth-aachen.de](mailto:l.loehr@iaew.rwth-aachen.de)

[www.iaew.rwth-aachen.de](http://www.iaew.rwth-aachen.de)

## Danke!

❖ Energy Exemplar



❖ encoord

