



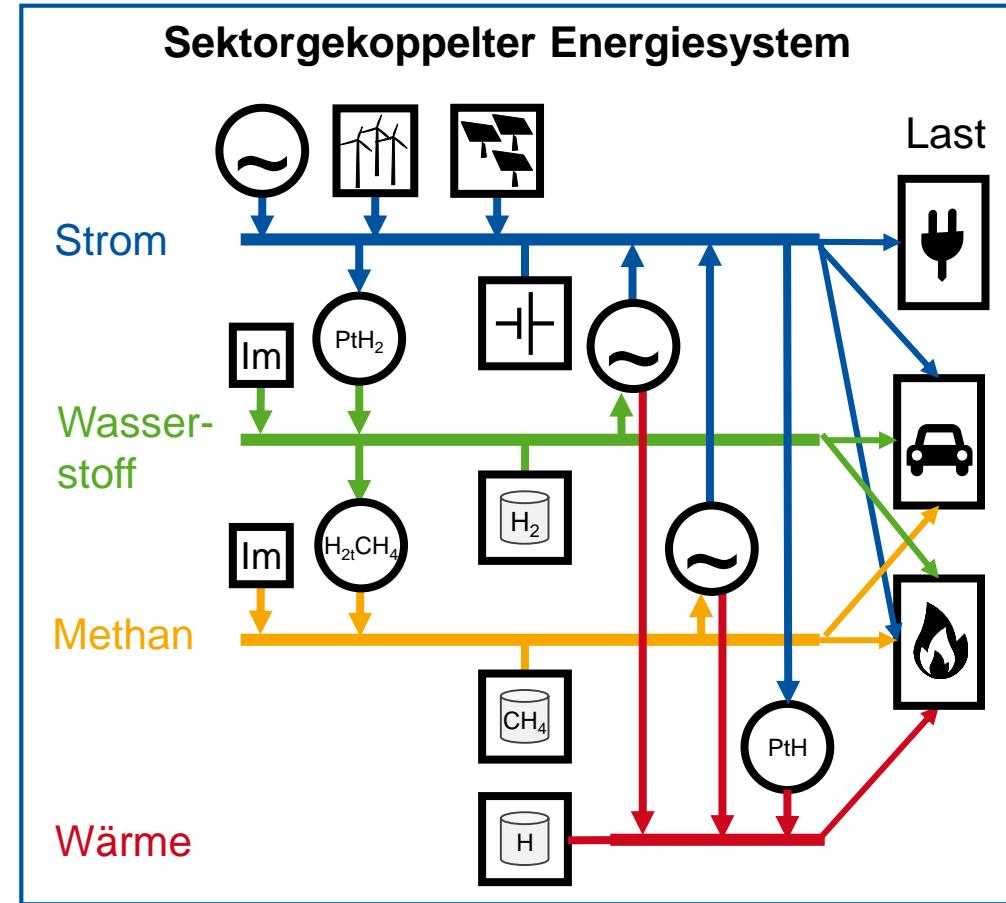
Integrierte Simulation und Optimierung des Betriebs von Strom- und Gastransportinfrastrukturen: Ein Modellvergleich

Lukas LÖHR*, Ziyi JIA, Albert MOSER

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

Betriebsoptimierung sektorkoppelter 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
 - Betriebssimulationsverfahren iGENeo für sektorkoppelte 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

Linear Dynamic Constraints	<p>Modellierung von Betriebsrestriktionen erfordert binär- VARIABLEN für Anlagenzustand (Mixed-integer Problem, MIP)</p> $p^{\min} \cdot P_t^{\max} \cdot e_t \leq P_t \leq P_t^{\max}$ $e_t = \begin{cases} 1, & \text{Betrieb} \\ 0, & \text{Stillstand} \end{cases}$	<p>Einführung linearer Hilfsvariablen und linearer dynamische Nebenbedingungen (LDC) zur Approximation binärer Variablen → LP</p> $p^{\min} \cdot P_t^{RC} \leq P_t \leq P_t^{RC}$ $0 \leq P_t^{RC} \leq P_t^{\max}$
Wirklast- flussapprox- imation	<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> $P_{ij,t} = 3 U^2 \cdot \sum_{j=1}^N Y_{ij} \cdot (\theta_{i,t} - \theta_{j,t}) \quad \text{mit } Y_{ij} = X_{ij} / \sqrt{X_{ij}^2 + R_{ij}^2}$ $Q_{ij,t} = 0$
Quasi- stationärer Gasfluss	<p>Transiente Gasflüsse stellen System partieller Differentialgleichungen auf:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Massenerhaltung (Netzinhalt) • Impulserhaltung (Druckverlust) • Energieerhaltung (Temperatur) 	<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
Urheber	 IAEW Elektrische Anlagen & Netze, Digitalisierung & Energiewirtschaft RWTH AACHEN UNIVERSITY		 encord Coupling Energy Networks
Energieträger	Strom, Gase, Wärme	Strom, Gase, Wärme	Strom, Gase
Fähigkeiten	Einsatzoptimierung Netzoptimierung	Einsatzoptimierung <i>Netzoptimierung</i>	Netzsimulation <i>Einsatzoptimierung</i>
Lösungsalgorithmen	Sukzessiv lineare Optimierung	Lineare Optimierung, Mixed-Integer Optimierung	Vergleichbar mit Newton-Raphson Algorithmus
Gasfluss	quasi-stationär (isotherm)	–	stationär, transient (isotherm, nicht-isotherm)
Stromfluss	DC-Lastfluss	DC-Lastfluss	AC-Lastfluss
Betriebsrestriktionen	LP (LDC)	MIP	MIP ¹

Modellvergleich 1: Integrierte Einsatzoptimierungen mit **PLEXOS**

1.1 LP

1.2 LDC vs. MIP

Modellvergleich 2: Integrierte Lastflussberechnungen mit **SAInt**

2.1 Stationär

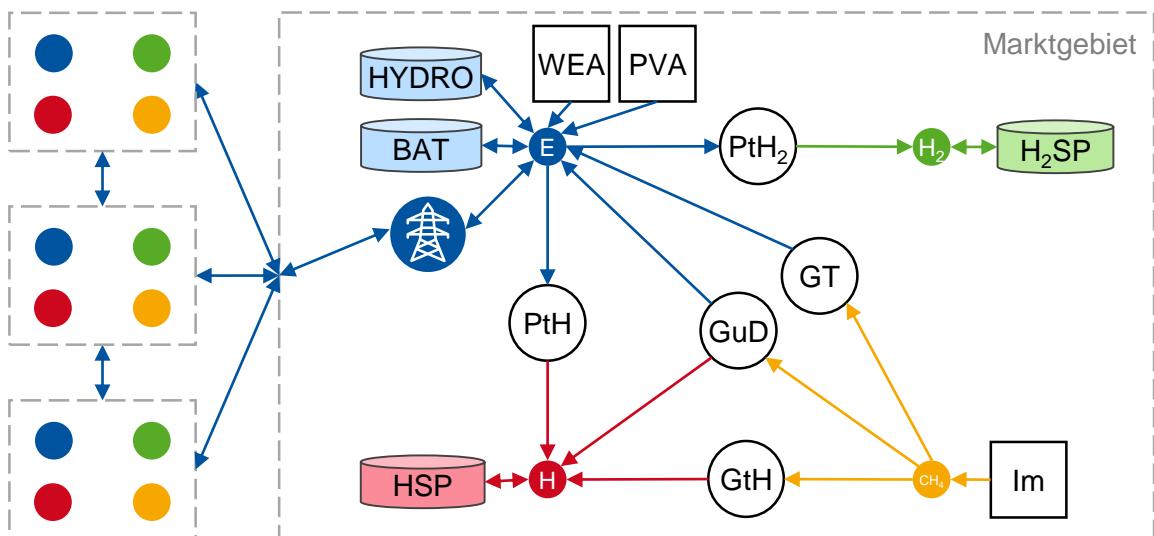
2.2 Quasi-stationär vs. transient

Modellvergleich 1: Integrierte Einsatzsimulation



Modellvergleich 1.1: Lineare Einsatzsimulation

- MODEX FlexMex Testsystem 3c¹
- 8760 h, 11 Marktgebiete für Strom, Wasserstoff, Methan und Wärme gekoppelt durch el. Transportkapazitäten
- Minimierung der Betriebskosten: rein lineare Betriebsrestriktionen



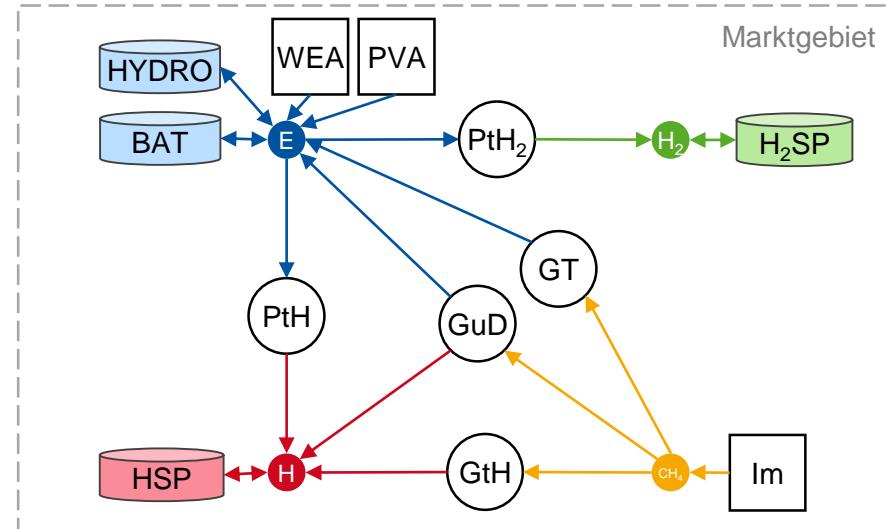
Typ	PLEXOS	iGENeO	Differenz absolut	Differenz relativ
GT	644 035 886 €	644 033 020 €	2 866 €	0.00045%
GuD	13 348 803 662 €	13 348 800 398 €	3 264 €	0.00002%
GtH	4 175 682 280 €	4 175 682 225 €	54 €	0.00000%
PtH ²	271 310 914 €	271 310 914 €	0 €	0.00000%
PtH ₂ ²	294 652 822 €	294 652 853 €	31 €	0.00001%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

→ Abweichungen im Bereich numerischer Ungenauigkeiten von Datenmanagement und Solvern

Modellvergleich 1: Integrierte Einsatzsimulation

Modellvergleich 1.2: Gemischt-ganzzahlige Betriebsrestriktionen

- MODEX FlexMex Testsystem 3c¹
- 720 h, 1 Marktgebiete (Deutschland) für Strom, Wasserstoff, Methan und Wärme
- Minimierung der Betriebs- und Anfahrtskosten: gemischt-ganzzahlige Betriebsrestriktionen (50% Mindestleistung)

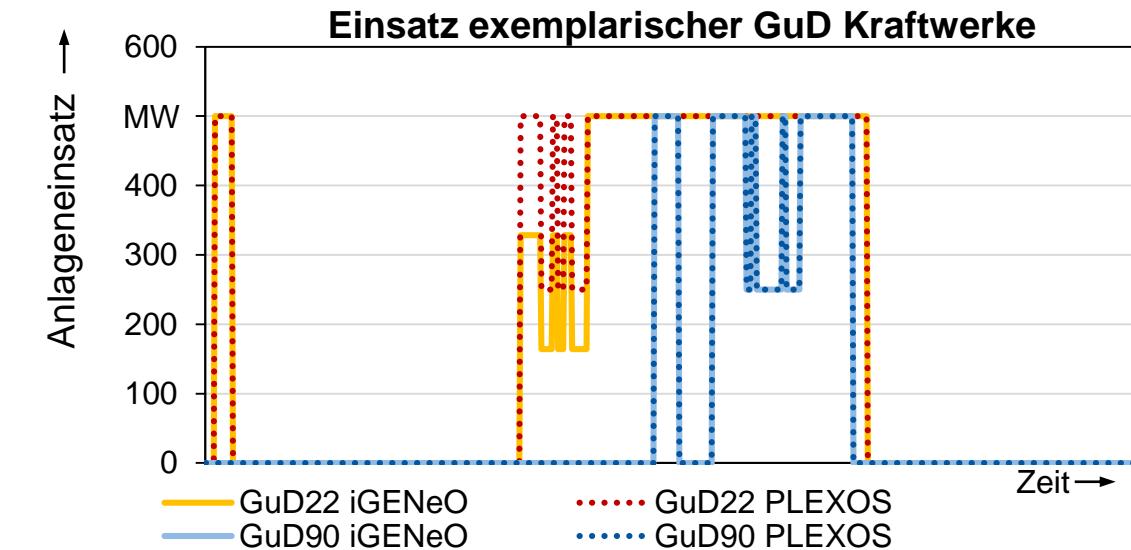
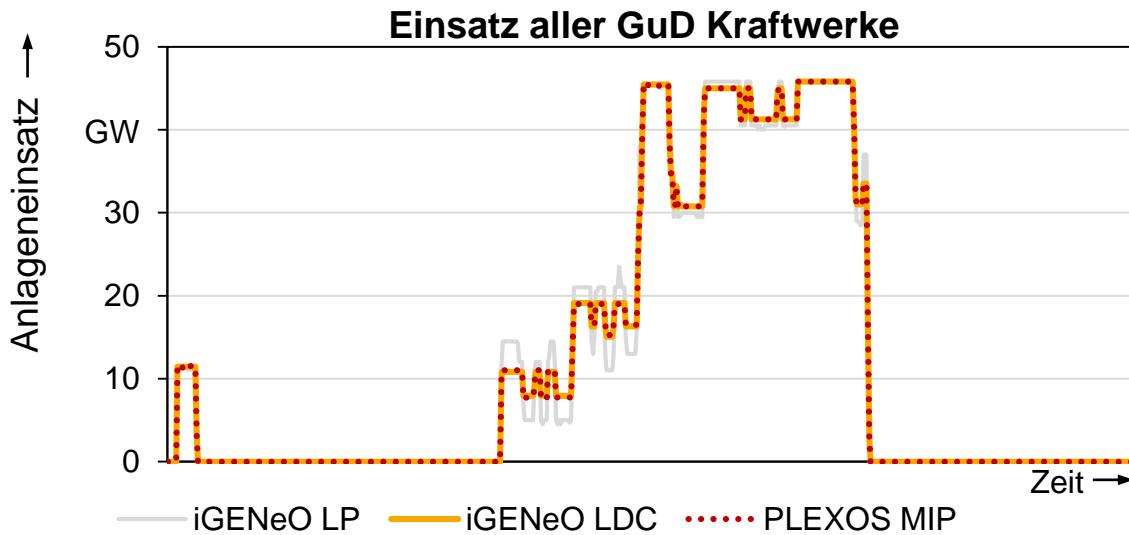


Parameter Typ	PLEXOS	GT iGENeO	Differenz absolut	Differenz relativ
Rel. Mindestleistung GT Betrieb	73 015 776 €	30% 73 001 471 €	14 305 €	50% 0.0196%
GT Anfahrt Mindestbetriebszeit	536 860 €	1 h 537 403 €	543 €	2 h 0.1011%
GuD Betrieb	874 690 134 €	874 707 287 €	17 153 €	0.0020%
GuD Anfahrt Mindeststandzeitszeit	154 660 €	1 h 15 144 309 €	10 351 €	2 h 0.2008%
GtH Betrieb	350 555 860 €	350 548 531 €	7 329 €	0.0021%
PtH Betrieb	12 735 764 €	100 %/h 12 735 761 €	3 €	100 %-h 0.0000%
PtH Betrieb ² Anfahrtskosten	5 604 656 €	31 €/MW 5 604 627 €	29 €	81 €/MW 0.0005%
SUMME	1 322 293 710 €	1 322 279 389 €	14 321 €	0.0011%

Modellvergleich 1: Integrierte Einsatzsimulation

Modellvergleich 1.2: Gemischt-ganzzahlige Betriebsrestriktionen

- MODEX FlexMex Testsystem 3c¹
- 720 h, 1 Marktgebiete (Deutschland) für Strom, Wasserstoff, Methan und Wärme
- Minimierung der Betriebs- und Anfahrtskosten: gemischt-ganzzahlige Betriebsrestriktionen (50% Mindestleistung)

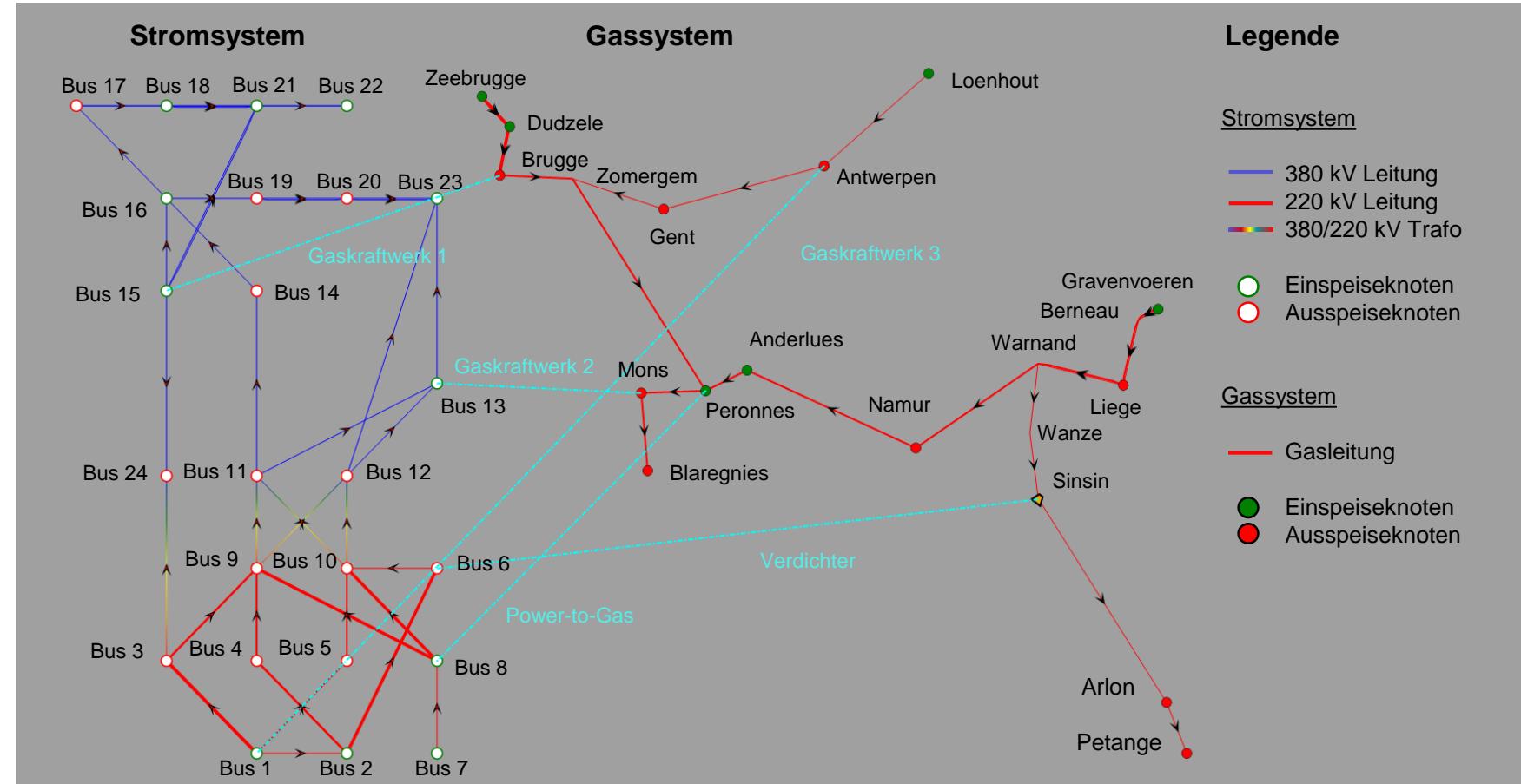


→ Abweichungen durch LDC Formulierung gering: Modellvergleich 1 erfolgreich

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



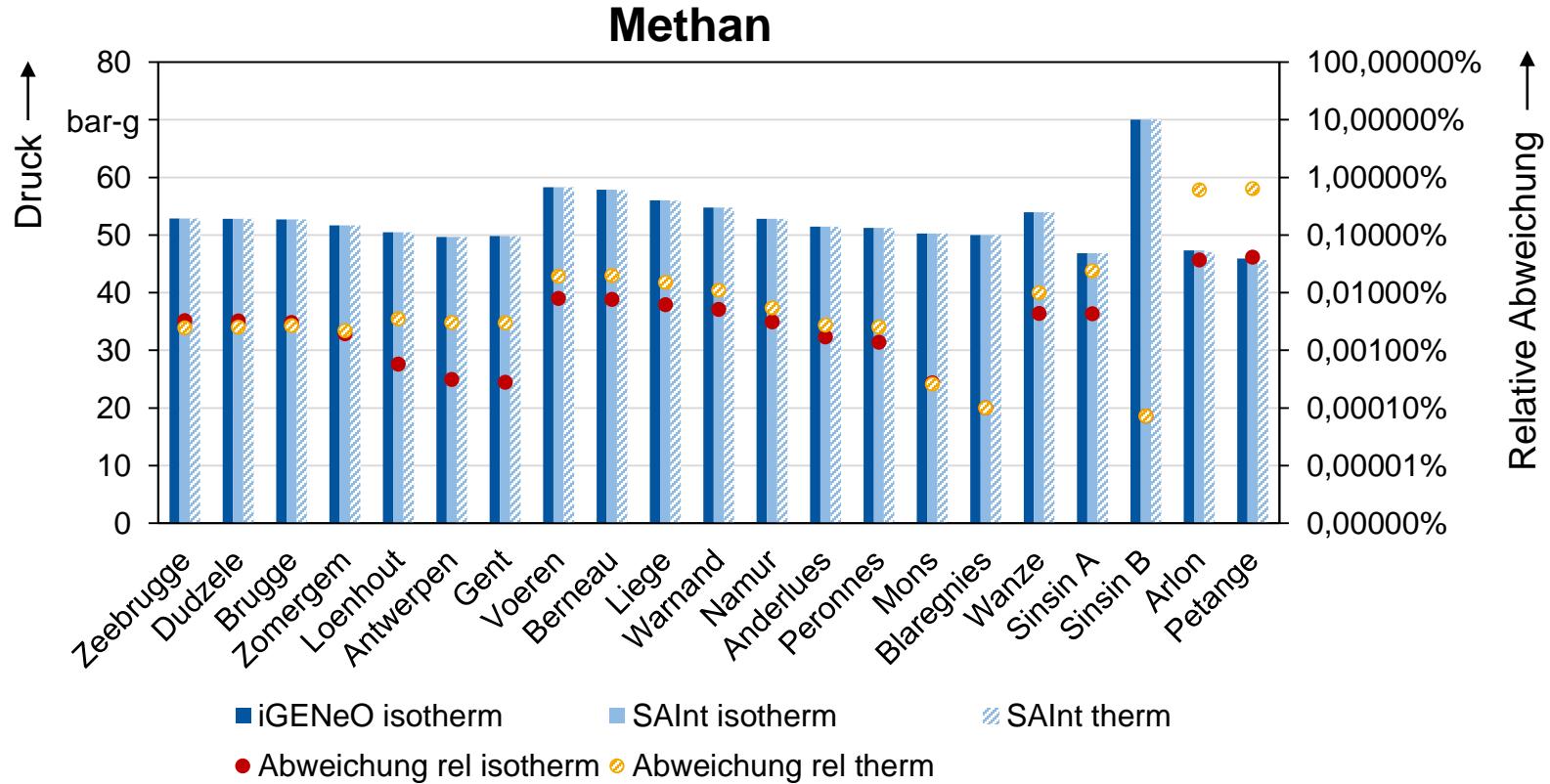
Modellvergleich 2: Integrierte Lastflussberechnung

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

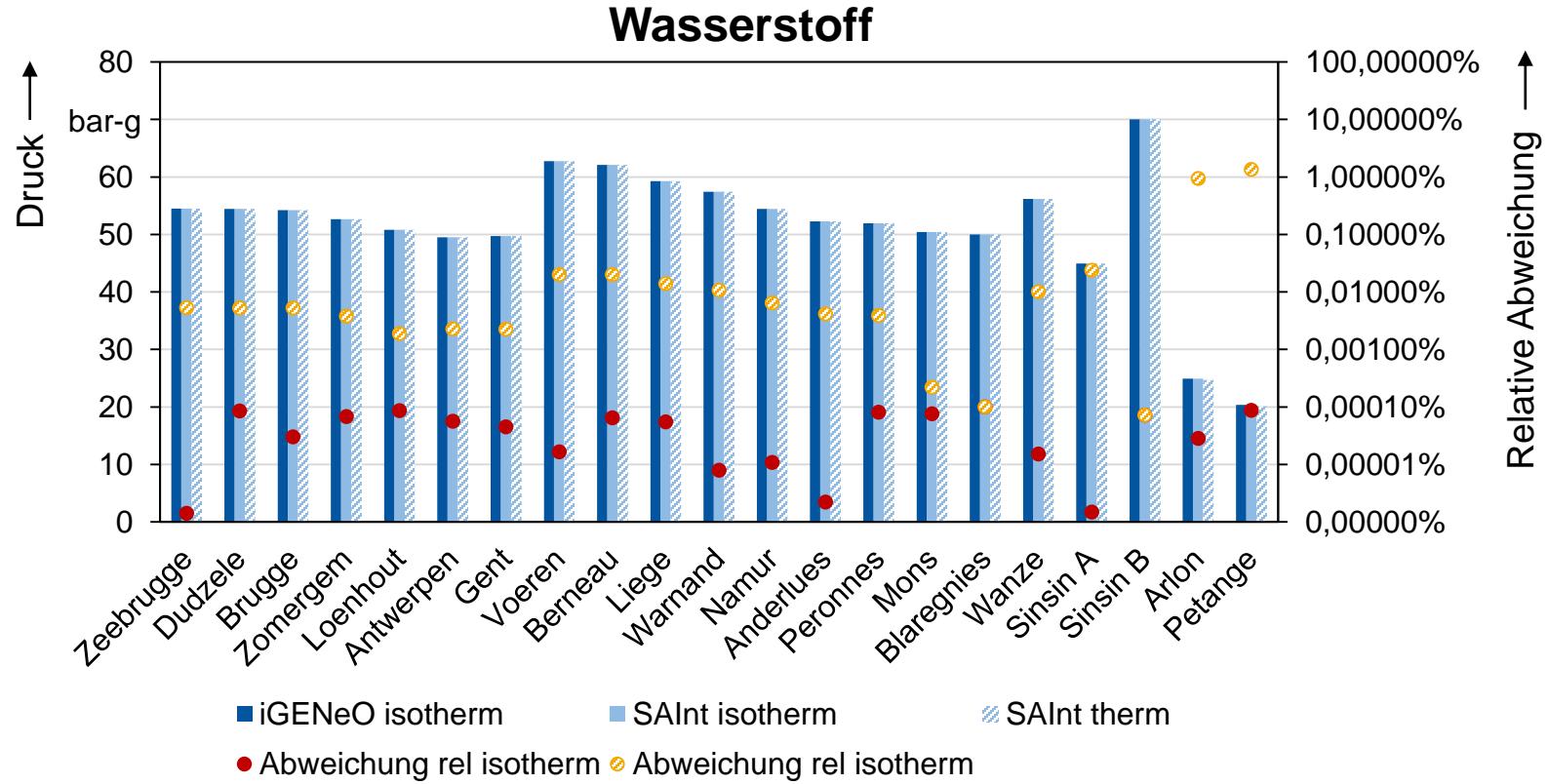


Methan

- 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 %

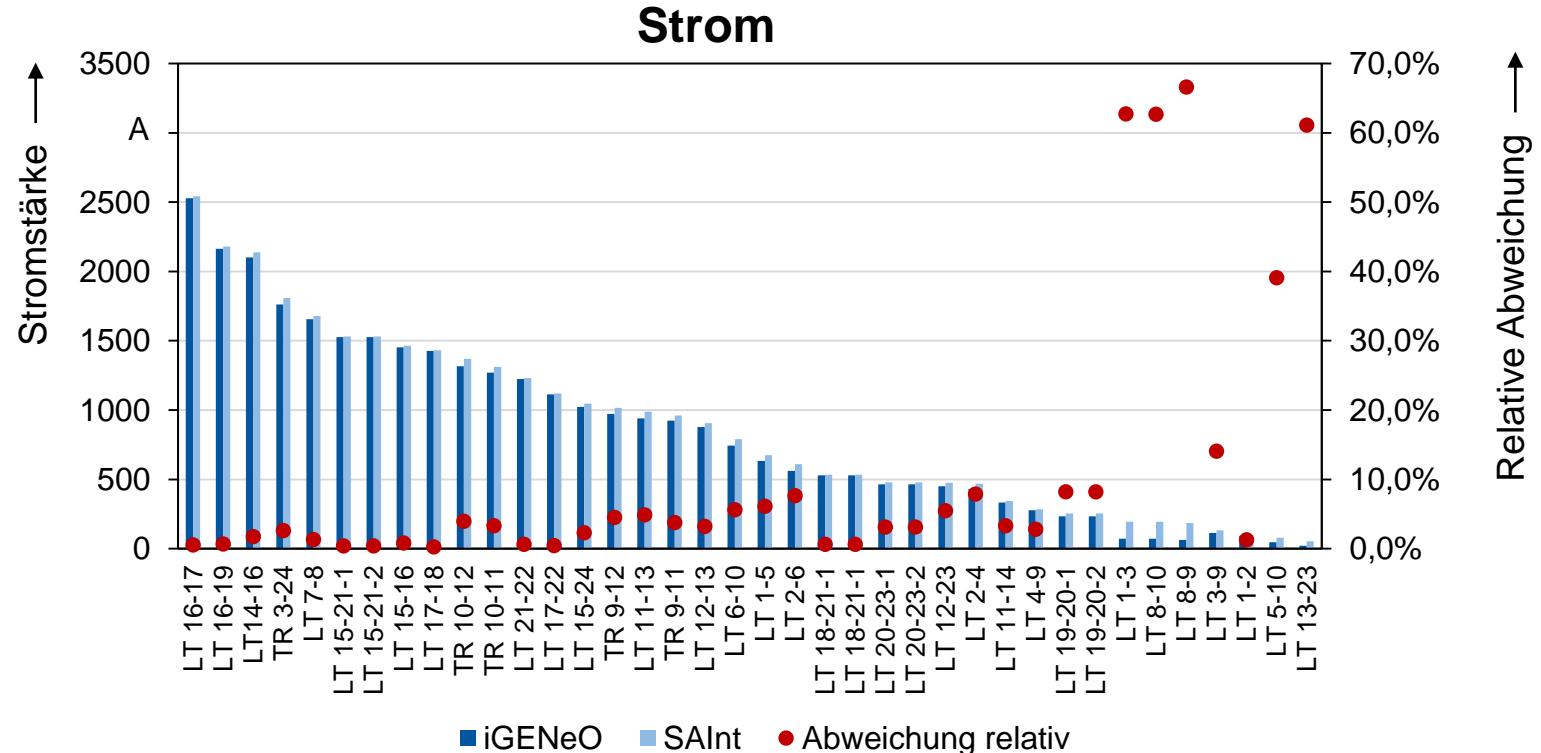


Modellvergleich 2: Integrierte Lastflussberechnung

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

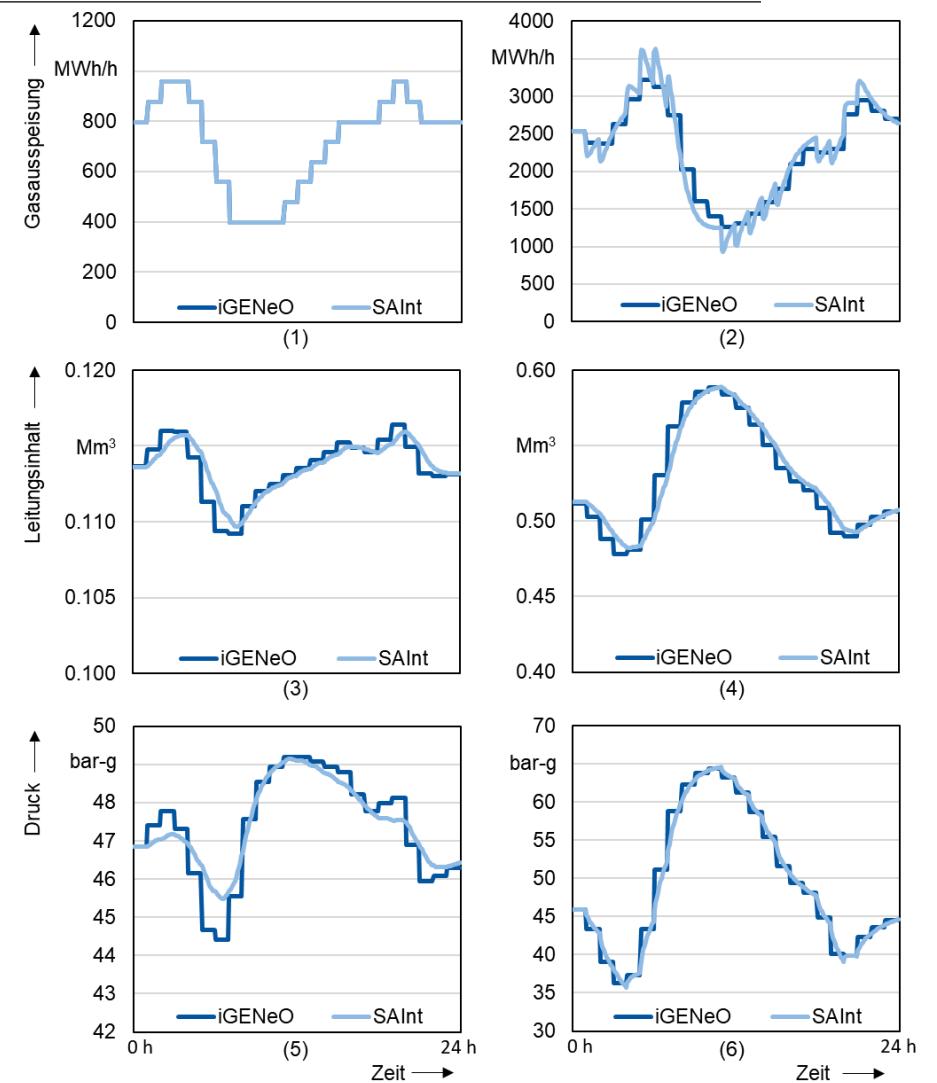
Modellvergleich 2.2: Transiente Lastflussanalyse

- 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 Leistungsinhalt und Druck mit Abweichungen von maximal 1 bar

→ Abbildung transienter Vorgänge durch quasi-stationäre Modellierung möglich

→ Ergebnisse für Wasserstoff analog

→ **Modellvergleich 2 erfolgreich**



Zusammenfassung

Validierung von iGENeO

- Betriebssimulationsverfahren 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
www.iaew.rwth-aachen.de

Danke!

❖ Energy Exemplar



❖ encoord

