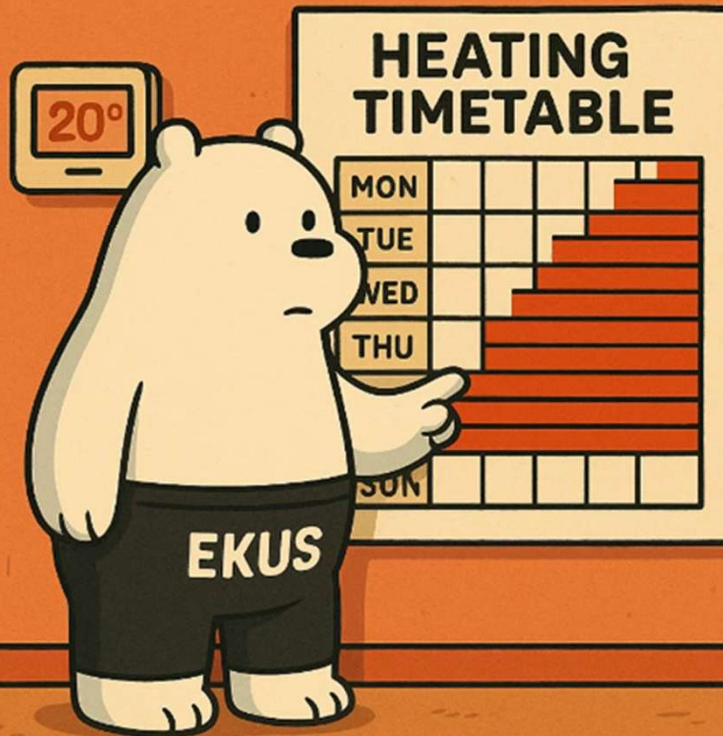




Universität Stuttgart
IER Institut für Energiewirtschaft
und Rationelle Energieanwendung

EKUS hoch i

Energieeinsparung & Klimaschutz an der Universität Stuttgart –
Intelligente, interdisziplinäre & integrative Transformation im Reallaborformat



UNTERSUCHUNG DER EFFIZIENZSTEIGERUNG VON RAUMWÄRMEBEREITSTELLUNG IN NICHTWOHNGBÄUDEN DURCH PRÄSENZABHÄNGIGE EINZELRAUMREGELUNG

*Peter Lierhammer, Pascal Häbig, Raffaella
Goldschmidt, Jens Ullmann, Matthias Leger, Ludger
Eltrop, Kai Hufendiek*

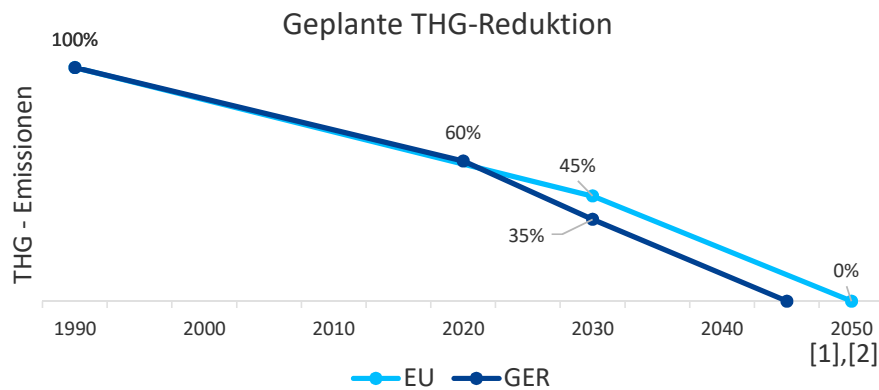
EnInnov2026 –
19. Symposium Energieinnovation

Agenda

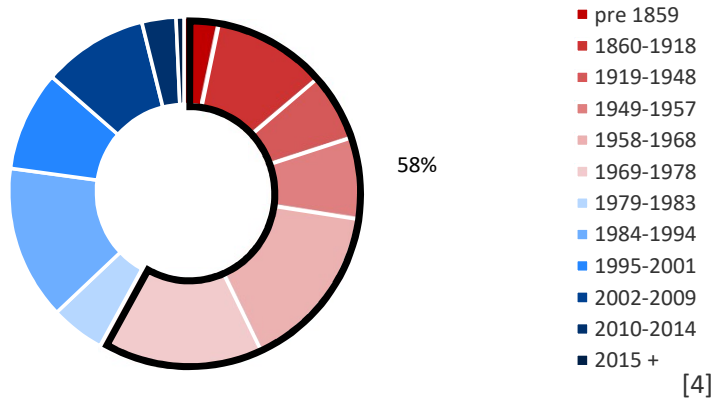
- **Motivation**
- **Systemüberblick**
- **Experimentelles Design**
- **Messergebnisse**
- **Finanzielle Bilanzierung**
- **Fazit**

Motivation

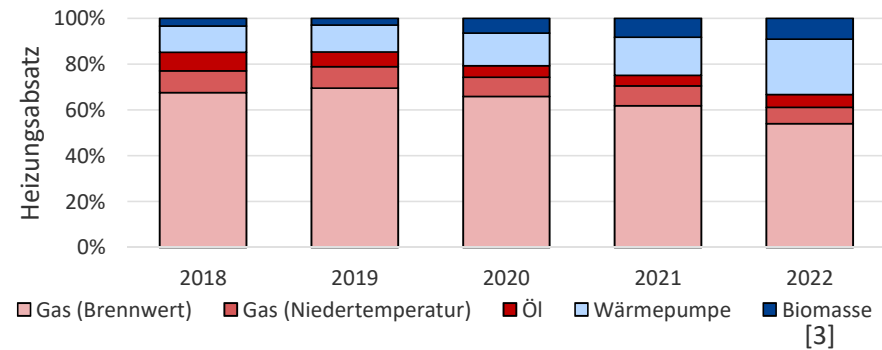
Einleitung



Baujahr von Nichtwohngebäuden in Deutschland



Marktentwicklung im Heizungssektor



- Gaskrise 22/23 erschütterte Vertrauen in Energiepreisstabilität (Verdreifachung Gaspreis 2023 im Vergleich zu 2020) [5]
 - Durch EU ETS2 könnte sich Erdgas allein durch CO₂-Bepreisung bis 2035 um 32% verteuern [6]
- Großer Bedarf an schnell umsetzbaren, skalierbaren (Heiz-)Energieeffizienzmaßnahmen

Motivation

Forschungsfragen

Niederschwellige Ansätze zur intelligenten (bedarfsgeführten) Einzelraumregelung stellen eine wirksame Maßnahme zur Erhöhung der Energieeffizienz von Gebäudeheizsystemen dar.

Insbesondere für Bestandsgebäude könnten intelligente Regelungsansätze einerseits eine Brückentechnologie auf dem Weg zur THG - Neutralität darstellen und bieten andererseits als technologieagnostische No-Regret-Measure eine rentable ökonomische Alternative zu umfangreicheren Sanierungsmaßnahmen.

Gerade die empirische Forschung mit Systemen zur Intelligenten Einzelraumregelung unter der Berücksichtigung von Nutzendenkomfort stellt hierbei eine Forschungslücke dar.

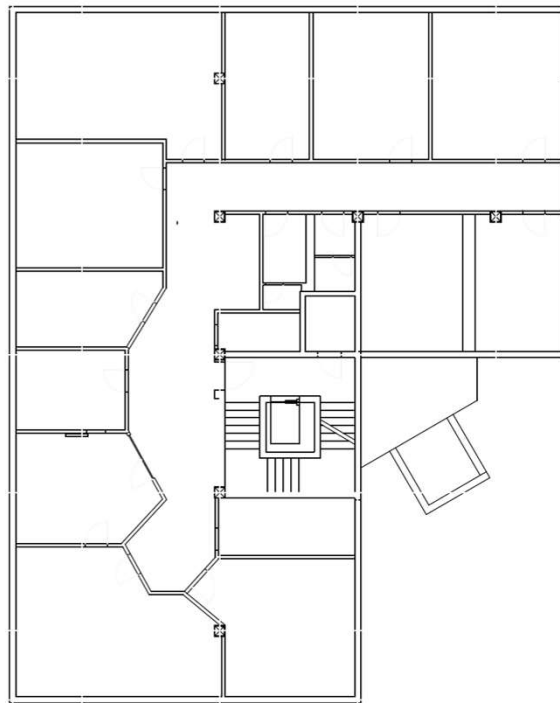
Welche (niederschweligen) Regelungsansätze sind prinzipiell geeignet, um den Nutzendenkomfort im Vergleich zur Referenzbeheizung weitestgehend zu erhalten?

Inwieweit besteht eine Abhängigkeit von der bereitgestellten Vorlauftemperatur?
Welche (Brutto-)Energieeinsparung ist damit im Gebäudesystem möglich?

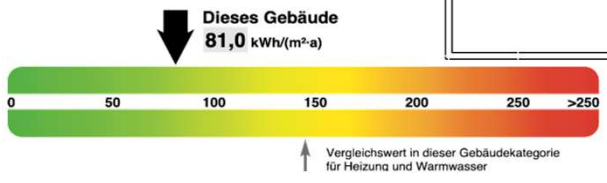
Kann die ökonomische Rentabilität bestätigt werden?

Systemüberblick

IER - Gebäude



- Baujahr: 1989
 - Nettogröße: 1.801 m² ~ 350 m² beheizte Fläche pro Stockwerk
 - Feuerung: Gasheizkessel
 - Heizenergieverbrauchskennwert: 81 kWh/m²a (Stand 2009)
 - ≙ 145MWh oder ca. 15k€ p.A.
 - Umfassende Nachdämmung
 - Entspricht bei Wohngebäuden Effizienzklasse B/C
 - Mitarbeiter: ca. 50 Personen, teils in mobilem Arbeiten
 - Nutzung: Büros, Seminarräume
 - Kesselseitige Nacht- und Wochenendabsenkung
- Betriebszeiten Mo: 04:30-18:00 Di-Fr: 05:00-18:00



Systemüberblick

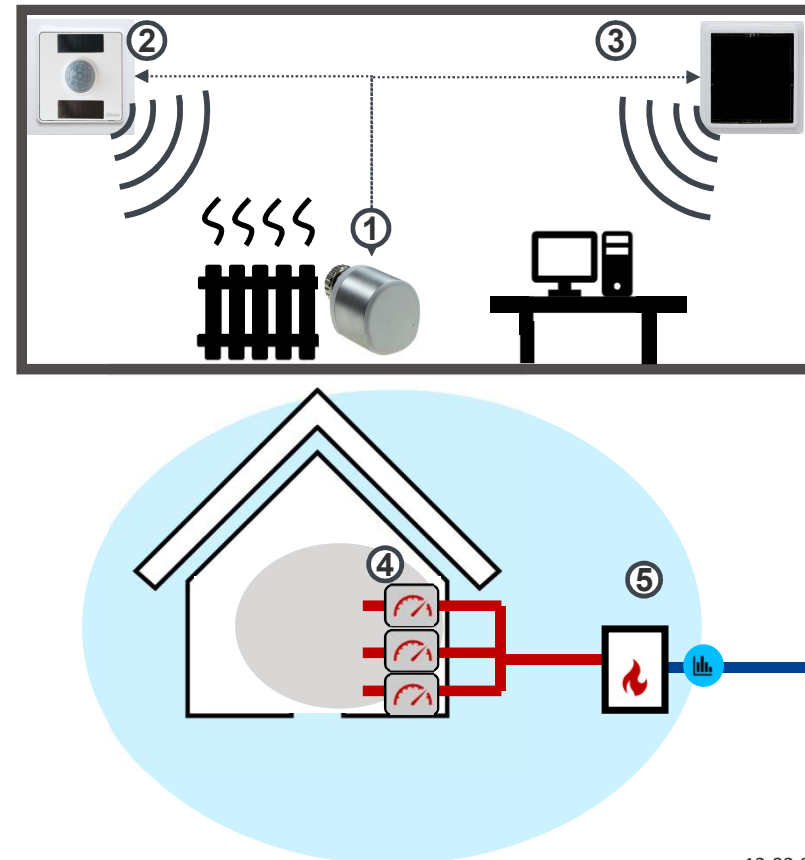
Mess- Steuerungs- Regelungskonzept

Ausstattung pro Raum:

- Funk-Klein-Stellantrieb ①
→ *Smarte Thermostate*
- Funk-Bewegungs-Helligkeitssensor ②
→ *Bewegung / Nicht Bewegung*
- Funk-Mini-Multisensor ③
→ *Temperatur, Helligkeit, Feuchtigkeit*

Weitere Messeinrichtungen:

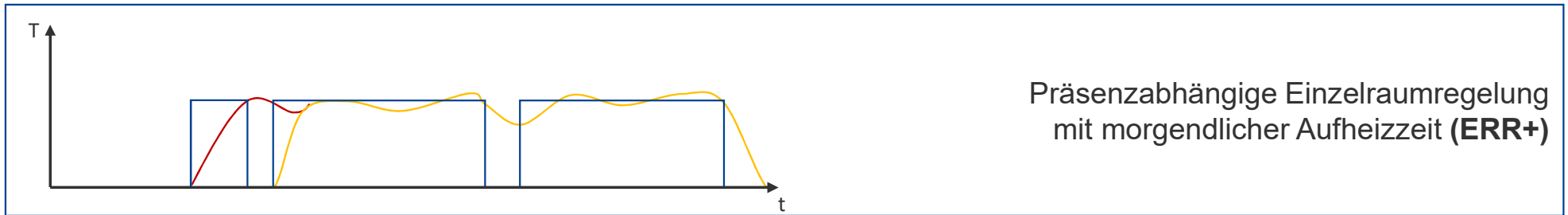
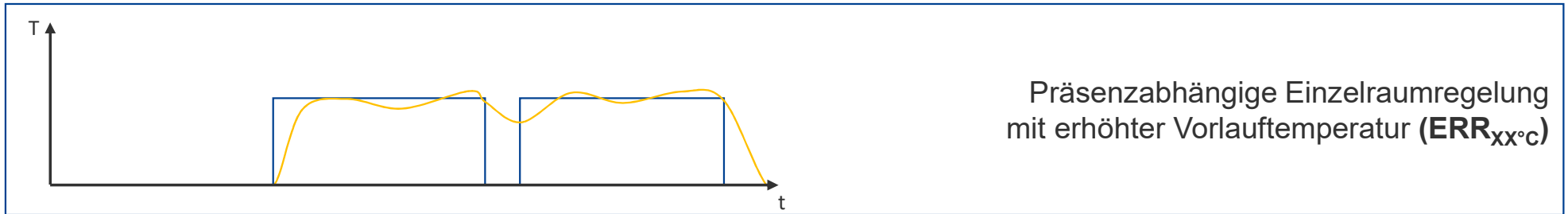
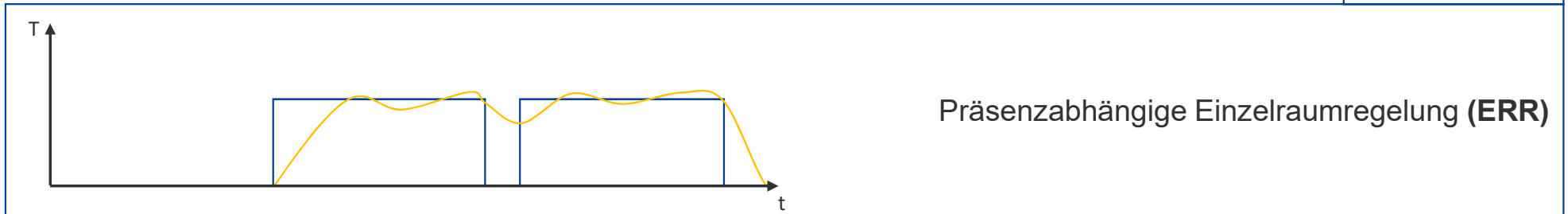
- Wärmemengenzähler ④
→ *Kumulierte thermische Energiemenge*
- Gaszähler ⑤
→ *Brutto-Energiemenge*
- Gateways zur lokalen Kommunikation
→ *Lokaler Datentransfer*



Systemüberblick

Regelungsansätze - Skizze

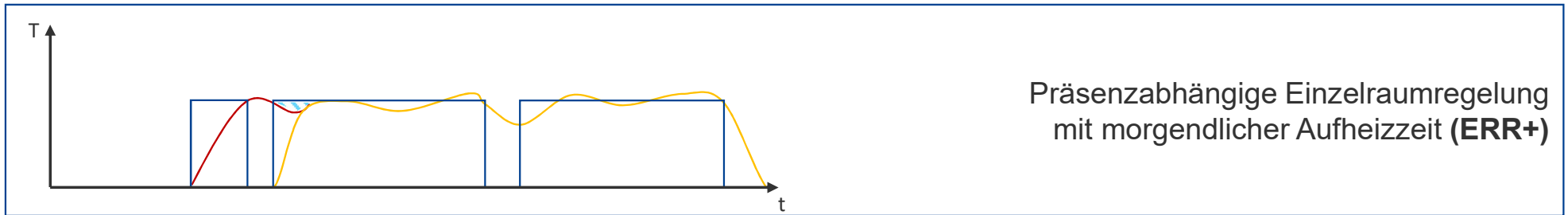
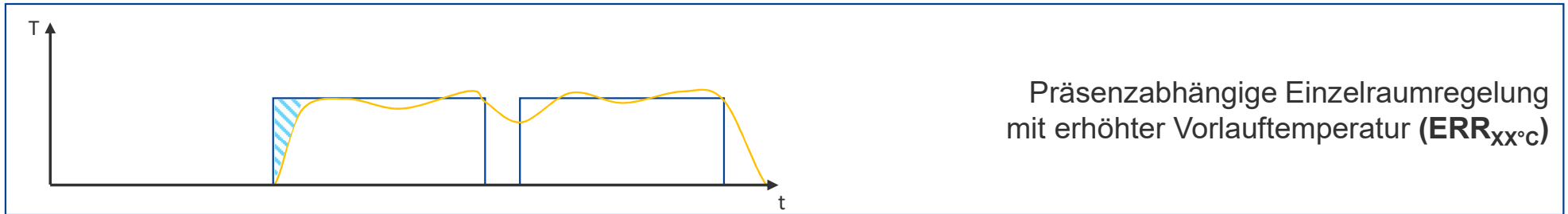
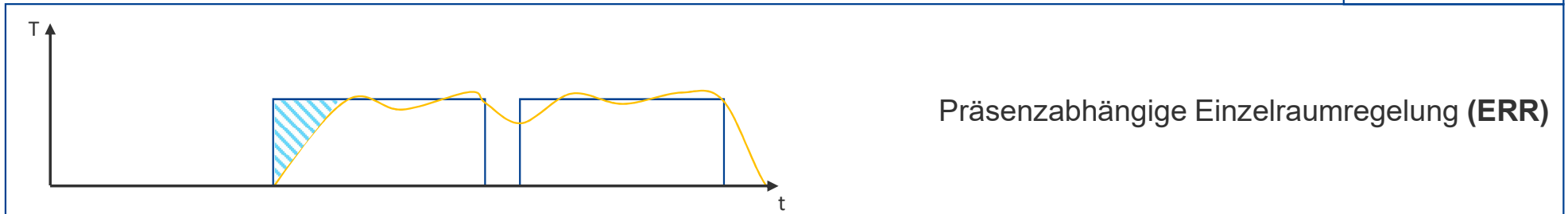
Legende:
Soll-Temperatur
Raumtemperatur



Systemüberblick

Regelungsansätze - Skizze

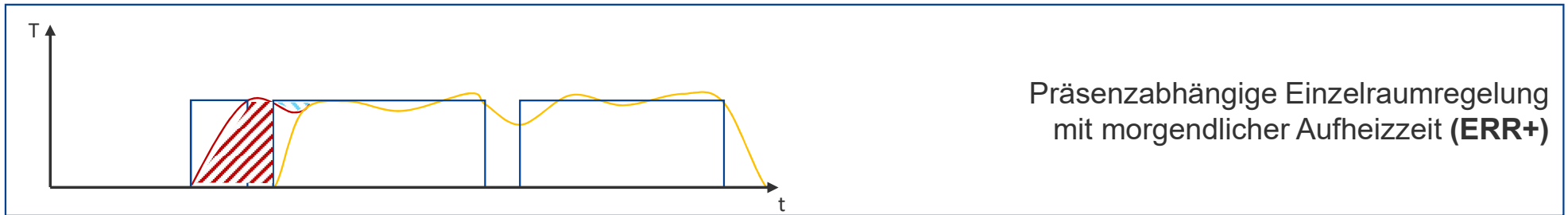
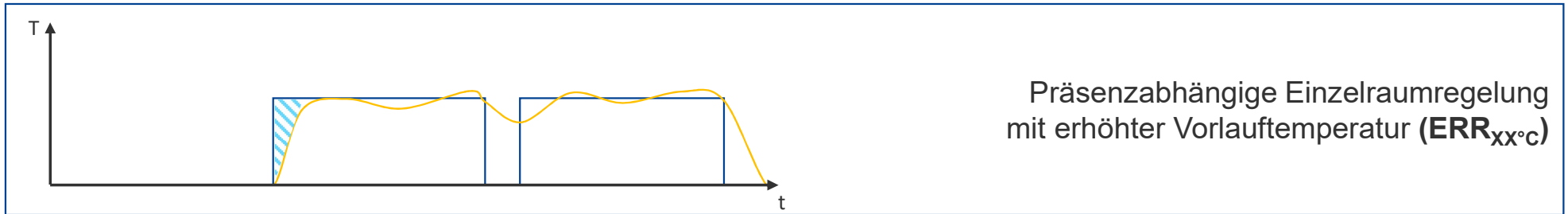
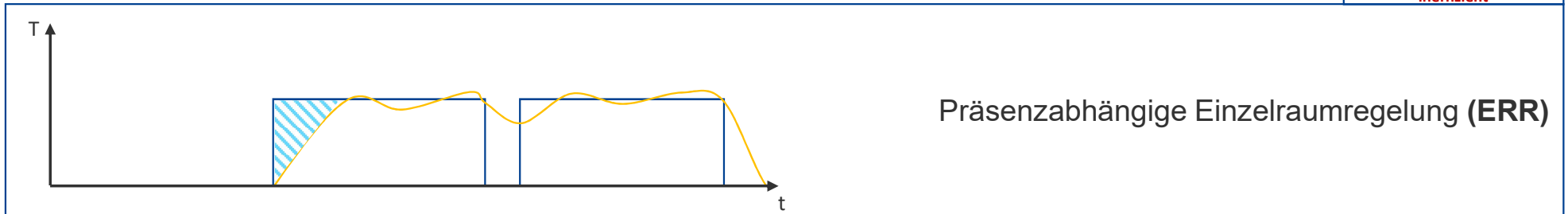
Legende:
Soll-Temperatur
Raumtemperatur
ggf. zu kalt



Systemüberblick

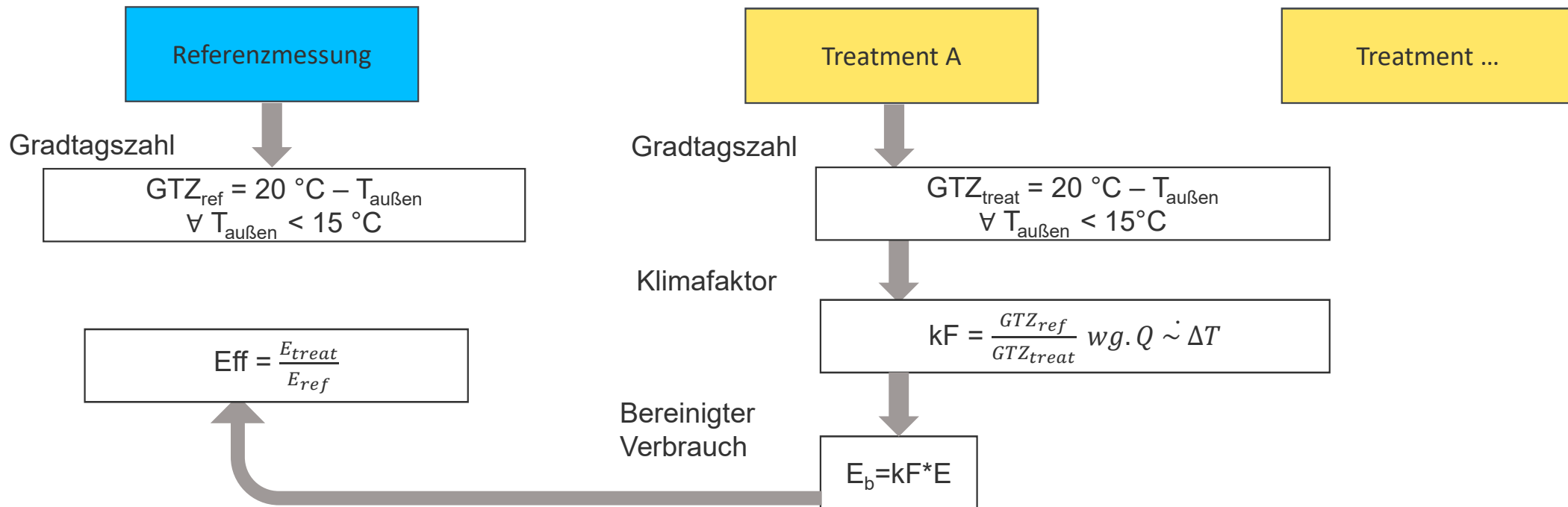
Regelungsansätze - Skizze

Legende:
Soll-Temperatur
Raumtemperatur
ggf. zu kalt
ineffizient



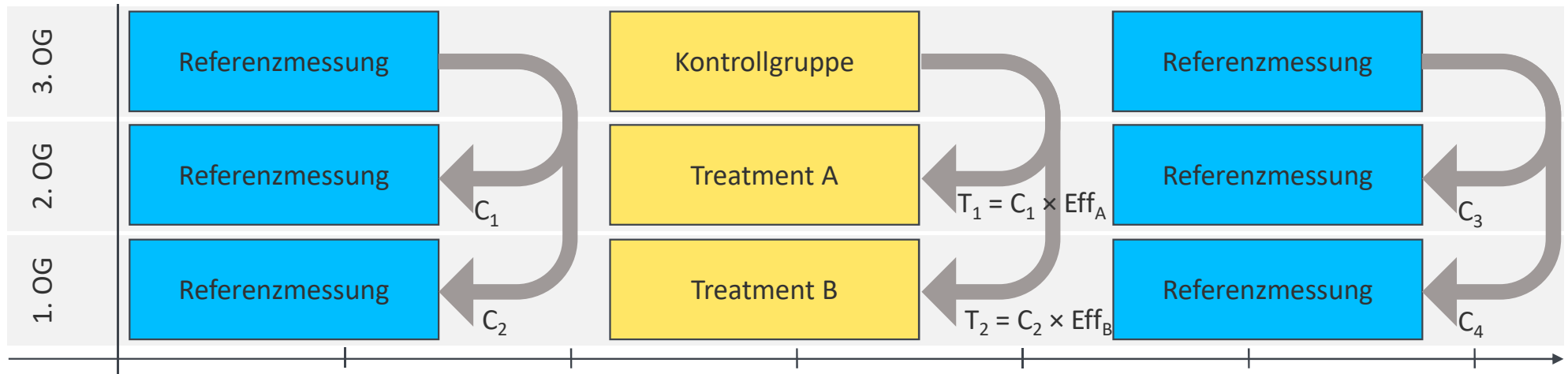
Experimentelles Design

Witterungsbereinigung vs. Treatment-/Kontrollgruppe



Experimentelles Design

Witterungsbereinigung vs. Treatment-/Kontrollgruppe



These:

Bei Normalbetrieb verhalten sich die Verhältnisse Energieverbräuche der Stockwerke konstant

$$C_1 = C_3$$

$$C_2 = C_4$$

Abweichungen der Energieverhältnisse während der Treatmentphase lassen sich auf das jeweilige Treatment zurückführen.

$$\rightarrow \text{Eff}_A = T_1 / C_1$$

$$\rightarrow \text{Eff}_B = T_2 / C_2$$

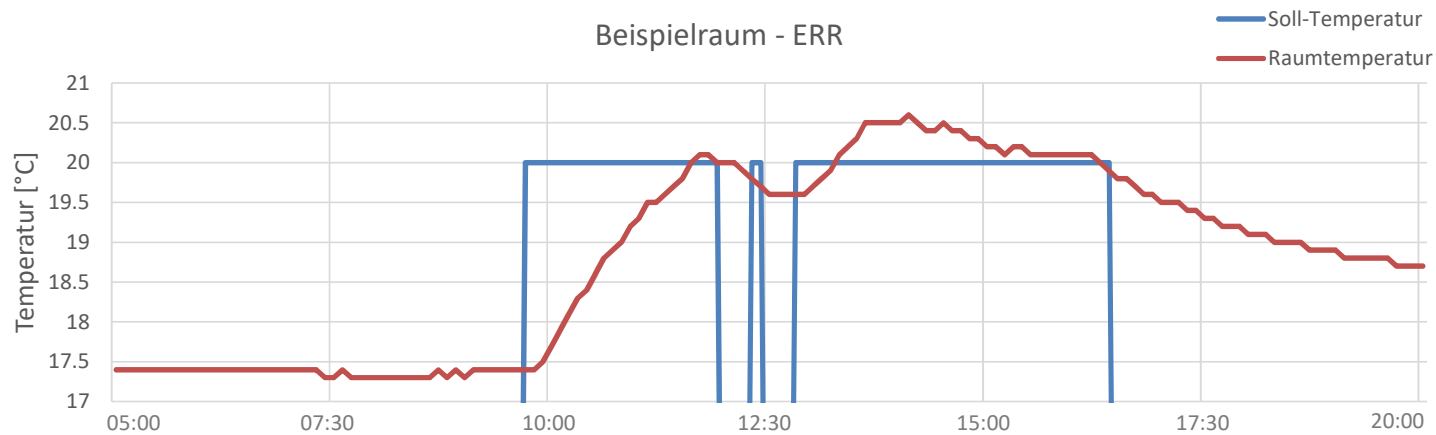
Experimentelles Design

Messkampagnen - Überblick

Benennung	Zeitraum (Arbeitstage)	Vorlauftemperatur	(Auf-)Heizzeit		
			OG1	OG2	OG3
Referenz (1)	04.11. – 01.12.24 (20)	50 °C	Konstantbeheizung 05:00 – 18:00		
ERR	02.12. – 20.12.24 (15)	50 °C	Rein präsenzabhängig		05:00 – 18:00
Winterpause					
Referenz (2)	27.01. – 03.02.25 (4)	50 °C	Konstantbeheizung 05:00 – 18:00		
ERR(+)	03.02. – 25.02.25 (16)	(+ 0 K) → 50 °C	90 min + präsenzabhängig	Rein präsenzabhängig	05:00 – 18:00
ERR(+) ₆₀	25.02. – 18.03.25 (15)	(+ 10 K) → 60 °C	60 min + präsenzabhängig	Rein präsenzabhängig	05:00 – 18:00
ERR(+) ₇₀	18.03. – 31.03.25 (9)	(+ 20 K) → 70 °C	30 min + präsenzabhängig	Rein präsenzabhängig	05:00 – 18:00

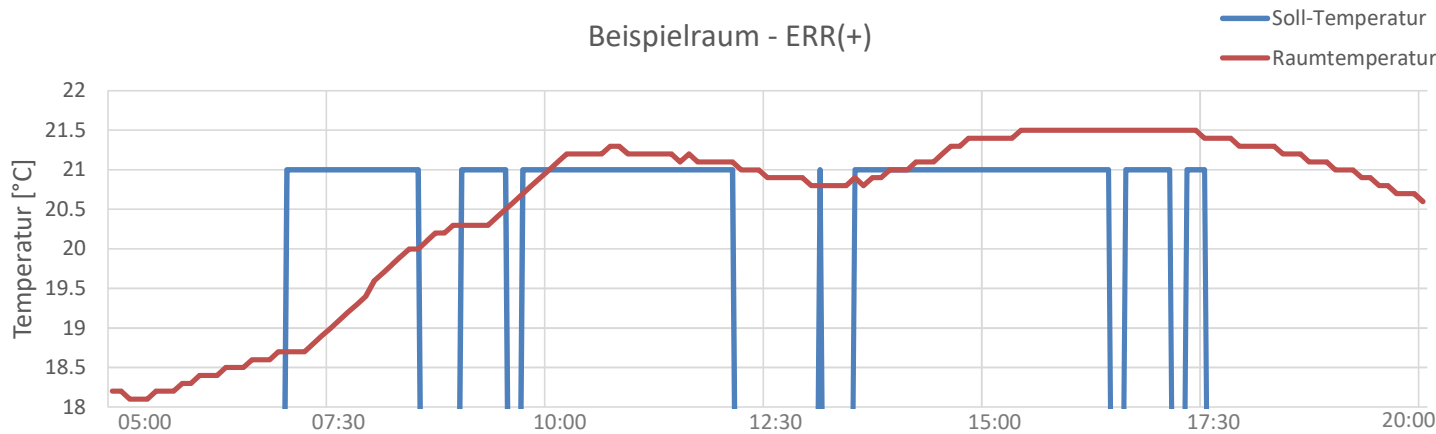
Ergebnisse

...auf Raumebene



ERR

- Heizzeit:
4 h 55 min
(bei 4h 55 min Anwesenheit)
- Zeitliche Absenkung:
62 % im vgl. zu Referenz

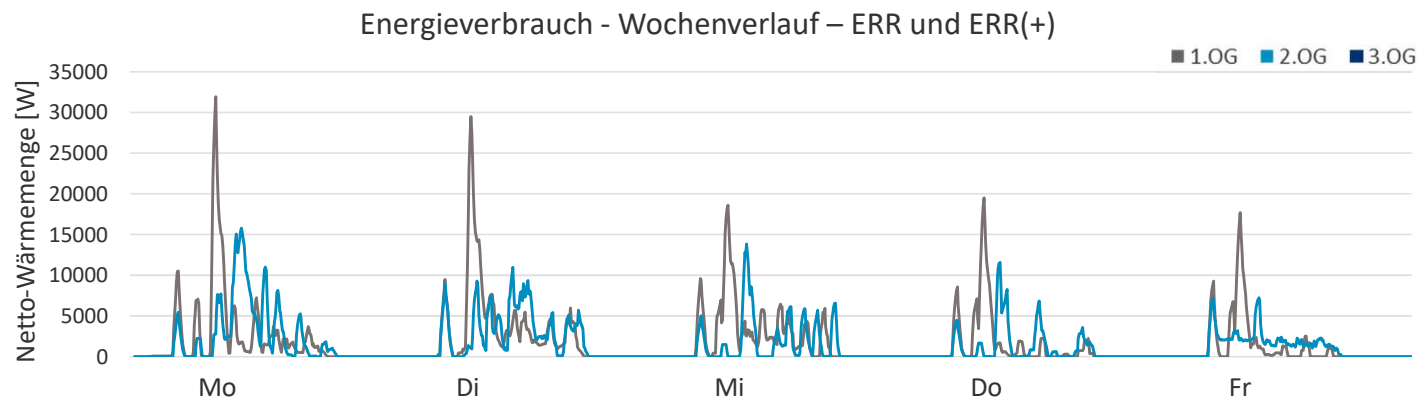
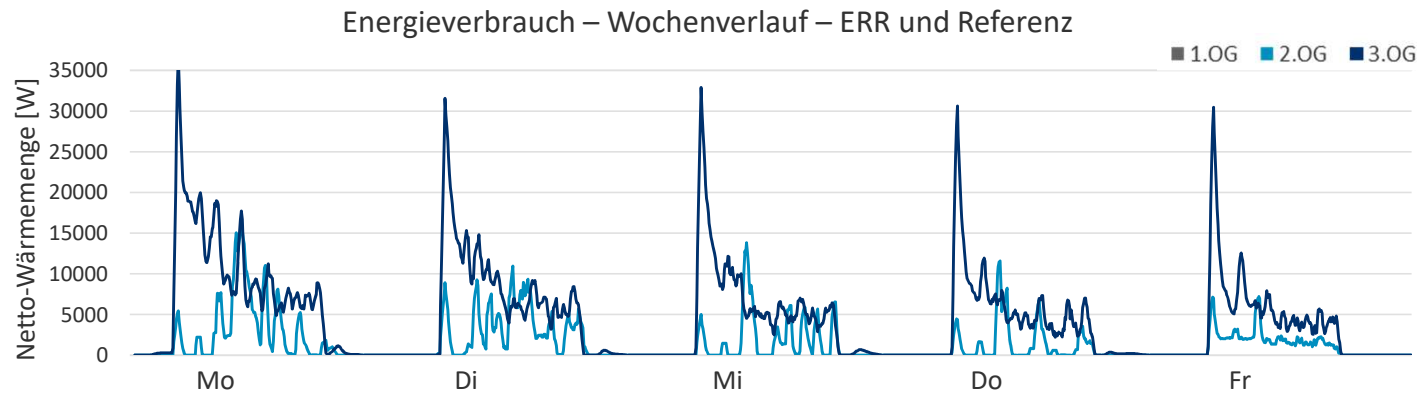


ERR(+)

- Heizzeit:
7h 10 min
(bei 6:10 Anwesenheit)
- Zeitliche Absenkung:
45 % im vgl. zu Referenz

Ergebnisse

...auf Stockwerksebene

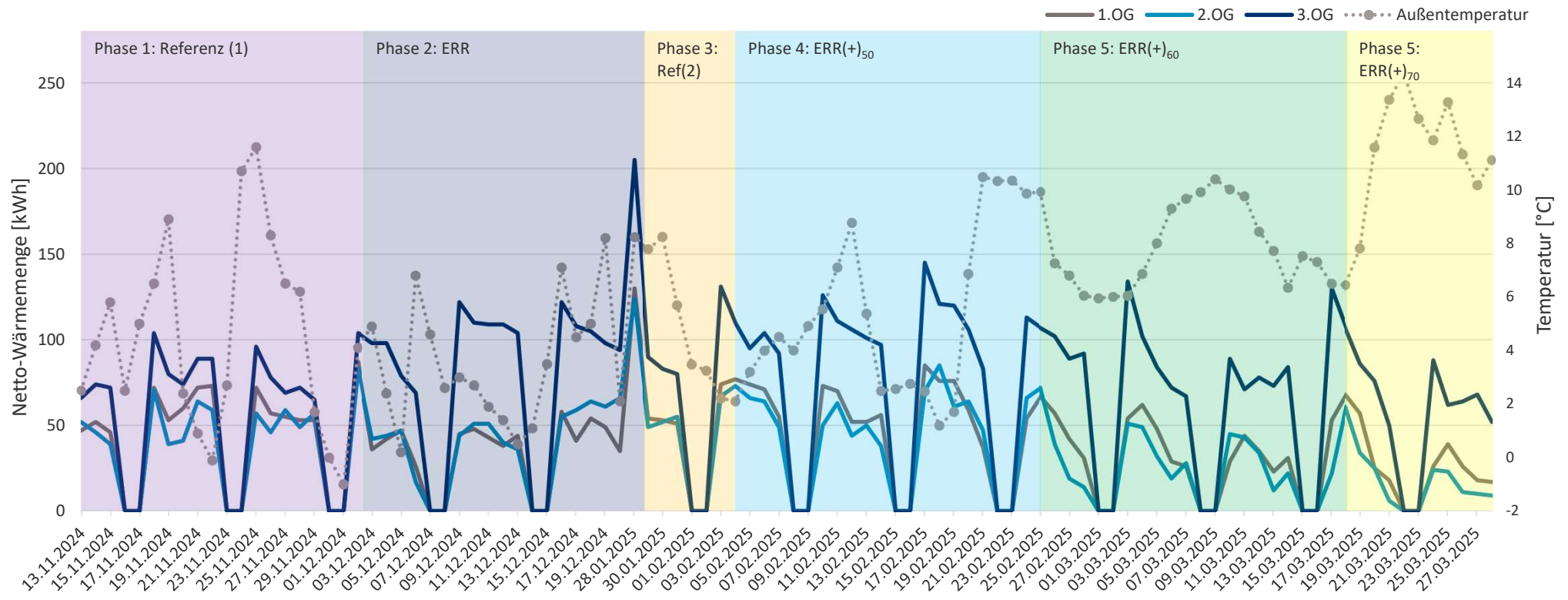


- 1.OG: ERR(+)
- 2.OG: ERR
- 3.OG: Referenz
- ERR – Varianten weisen auch Tagsüber Zeiten mit Nullanforderung auf
- **Unterschiedliche Verteilung der Lastspitzen**
Referenz: Zu Betriebsstart
ERR(+): Aufheizstart (08:00)
ERR: Eintreffen der Nutzer (09:00)
- Ebenso geringere Amplitude bei ERR
- Zum Nachmittag **abflachendes Tagesprofil** von ERR(+) verglichen mit ERR

Ergebnisse

Absoluter Verbrauch (explizite Witterungsberreinigung)

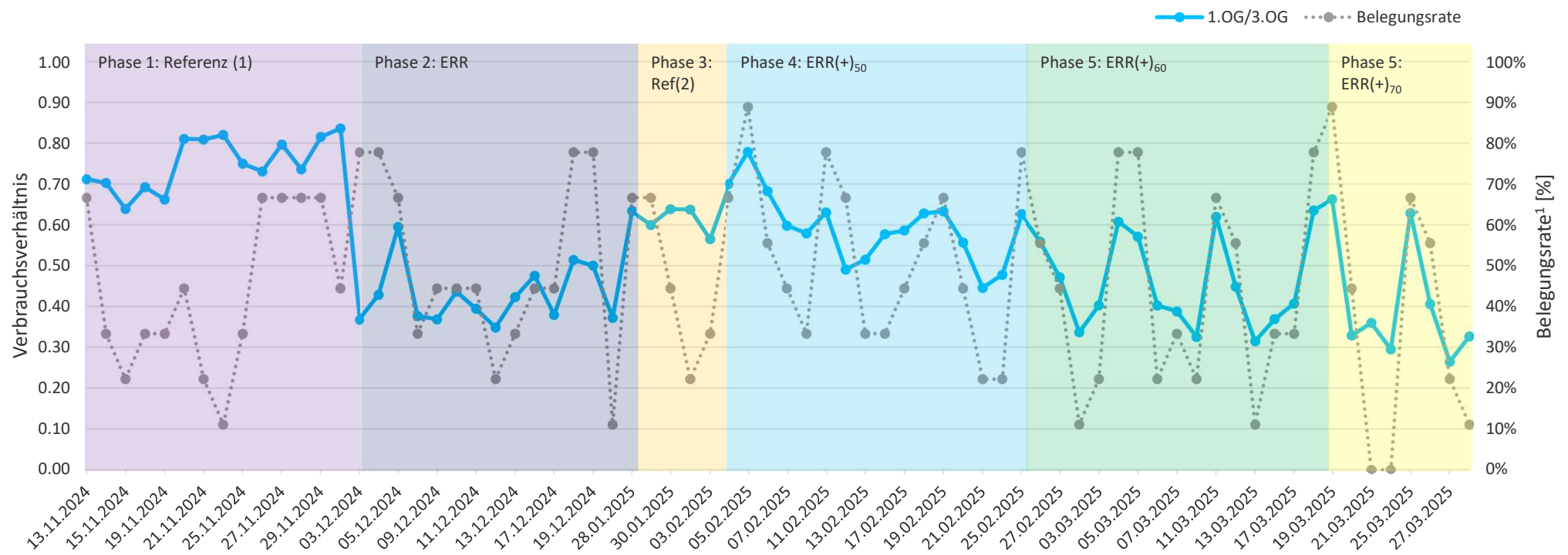
Absoluter Energieverbrauch, witterungsberreigt



Ergebnisse

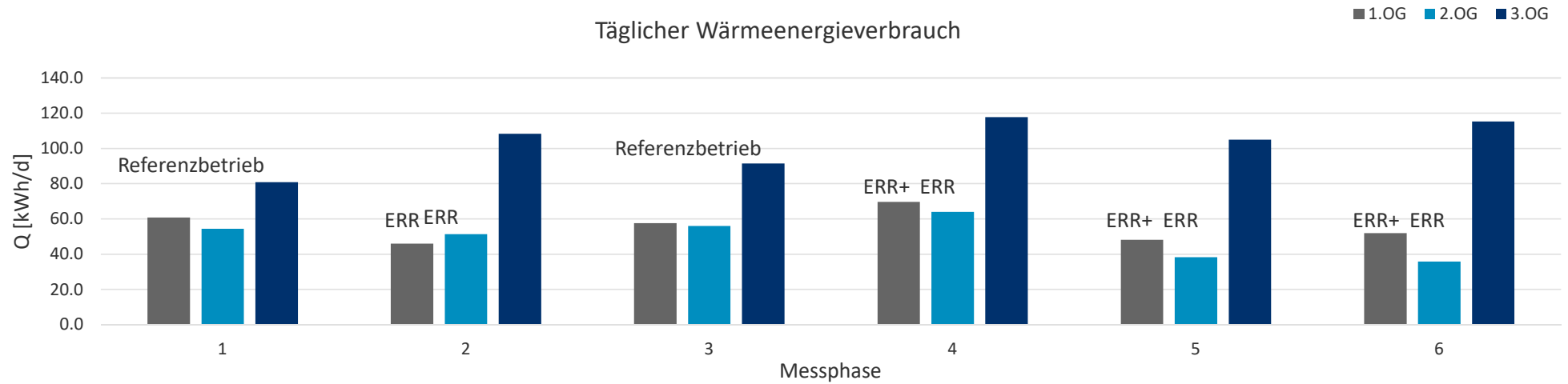
Verbrauchsverhältnisse (implizite Witterungsberreinigung)

Verbrauchsverhältnis E01/E03 über Belegungsrate



Ergebnisse

Zusammenfassung



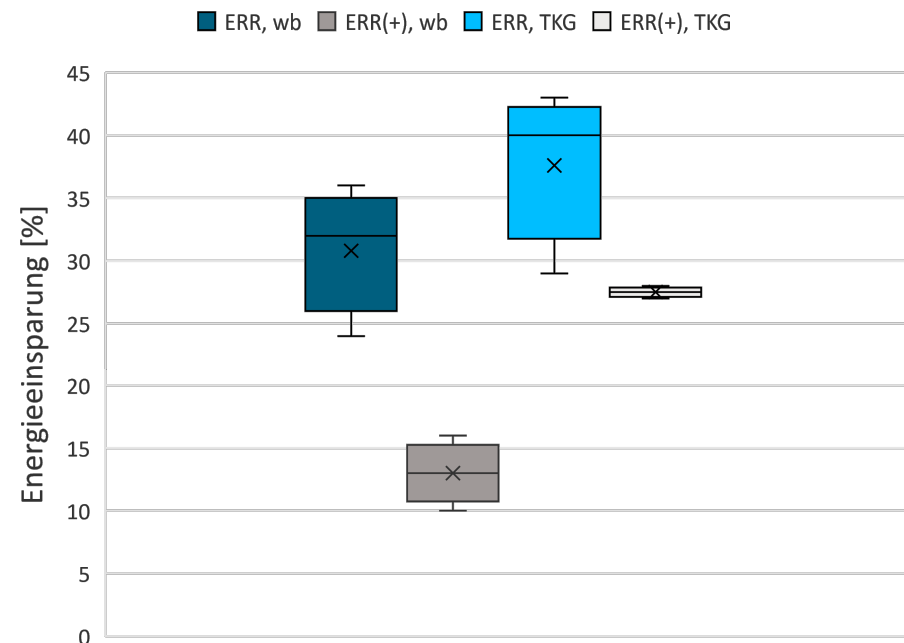
	1 - Referenz (1)			2 - ERR			3 - Ref(2)			4 - ERR(+) ₅₀			5 - ERR(+) ₆₀			6 - ERR(+) ₇₀		
Q [kWh/d]	60,9	54,4	80,9	46,1	51,5	108,3	57,6	56,0	91,6	69,7	64,1	117,9	48,3	38,3	105,1	52,0	35,9	115,4
Einsparung[%] WB/TKG	-	-	-	24 43	5 29	-	-	-	-	-21 6	-14 11	-	16 27	32 40	-	10 28	36 49	-
Mittlere Außentemp. [°C]	5,0			3,6			7,5			4,9			7,9			10,8		
Anwesenheit [% von 8h] nach [7]	30	31	39	37	43	42	35	23	40	36	28	37	30	32	37	28	32	42
Belegungsrate [% der Räume]	44	52	56	50	70	58	51	47	57	49	48	50	43	50	48	41	49	56

Ergebnisse

Aggregation der Energiedaten

- Nach Aggregation der Daten konnte mit der Regelstrategie ERR zwischen 24 % und 36 % (Witterungsbereinigt) bzw. zwischen 29 % und 49 % (Treatment- & Kontrollgruppe) des Netto-Wärmeverbrauchs eingespart werden
 - Die Einsparungen mit ERR(+) (morgendlicher Aufheizung) lagen zwischen 10 % und 16 % (Witterungsbereinigt) bzw. zwischen 27 % und 28 % (Treatment- & Kontrollgruppe)
- Insgesamt liegen die Treatment- & Kontrollgruppe - Berechnungen etwas höher, zurückzuführen u.a. auf den Mehrverbrauch im 3. OG
- **Eine tägliche morgendliche Aufheizung reduziert die potentielle Einsparung der Komplettabsenkung teilweise um mehr als die Hälfte!**

Potentielle Energieeinsparung verschiedener Regelungsstrategien



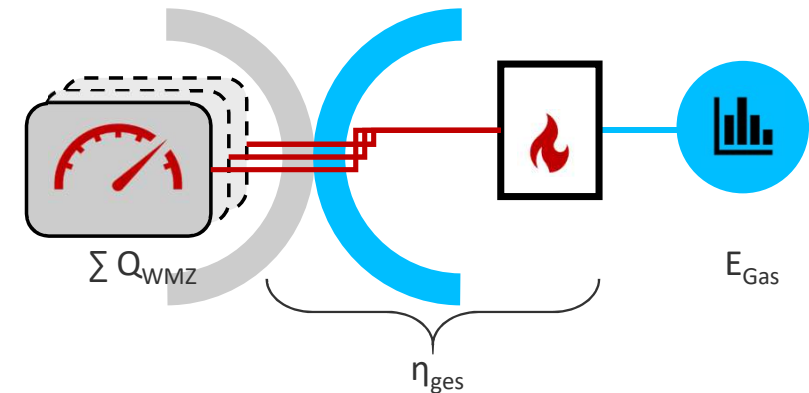
Ergebnisse

...unter Berücksichtigung des Kesselwirkungsgrads

- Mithilfe eines Gaszählers wird der Brutto-Energieverbrauch des Gebäudes erfasst
- Hierdurch können Rückschlüsse auf den Wirkungsgrad des Gaskessels (inkl. Leitungssystem) gezogen werden.

$$\eta_{\text{ges}} = \frac{\sum Q_{\text{WMZ}}}{E_{\text{Gas}}} \rightarrow \eta_{\text{ges}} = \eta_{\text{Kessel}} + \eta_{\text{Leitung}}$$

→ Es zeigt sich durch Erhöhung der Vorlauftemperatur eine Reduktion des Wirkungsgrads zwischen 7 % und 10 % (mit Annahme einer mittleren Reduktion von 9%)

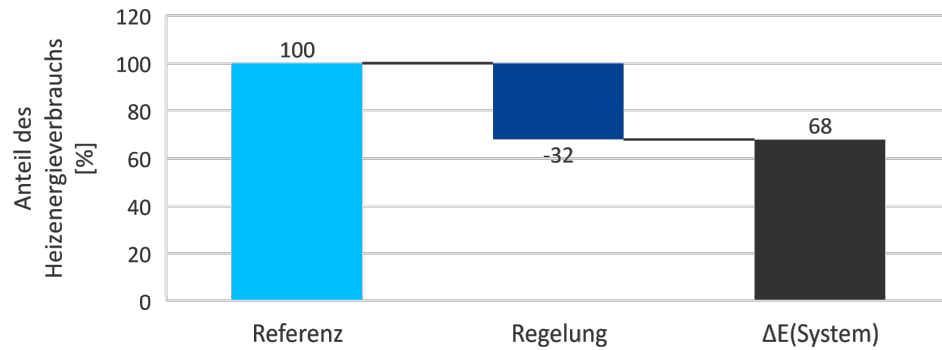


Phase	T_{Vorlauf}^1	$\sum Q_{\text{WMZ}}$ [kWh/d]	E_{Gas}^2 [kWh/d]	η_{ges}
4 – Baseline für T_{Vorlauf}	~50°C	395	464	85 %
5 ($T_{\text{Vorlauf}} + 10 \text{ K}$)	~60°C	339	432	78 %
6 ($T_{\text{Vorlauf}} + 20 \text{ K}$)	~70°C	297	389	75 %

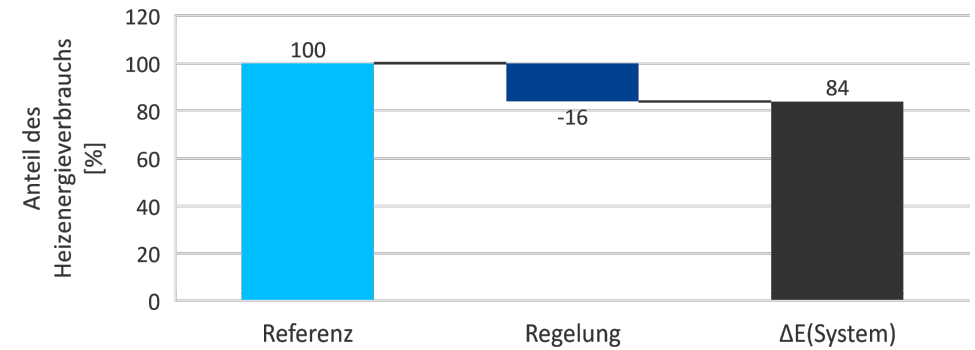
Ergebnisse

Vergleich der Methoden zur Komforterhöhung

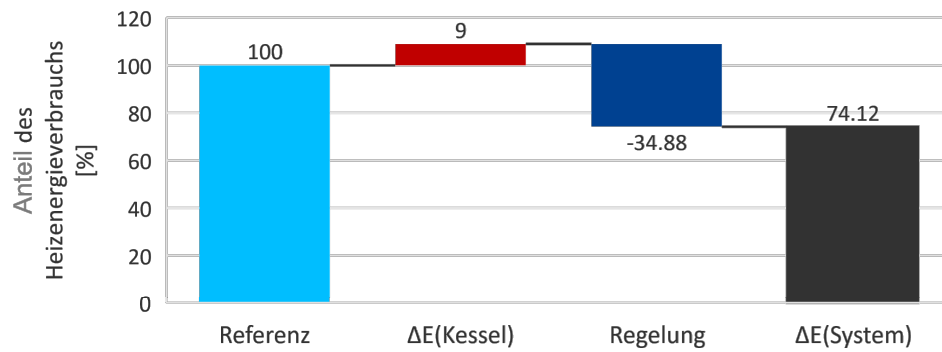
ERR



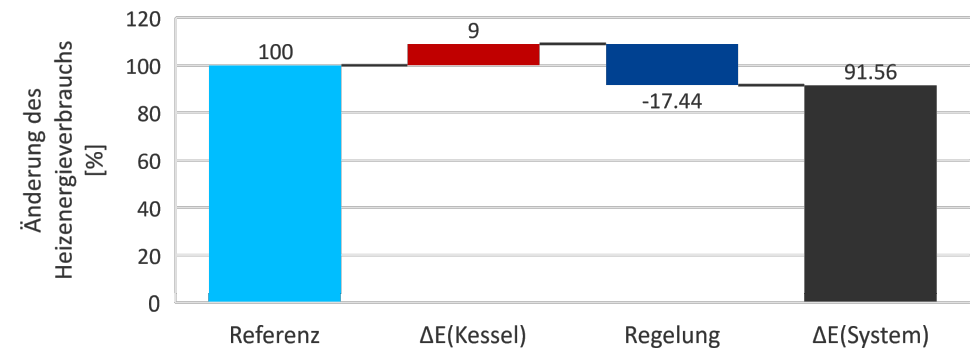
ERR(+)



ERR, T_{Vorlauf}



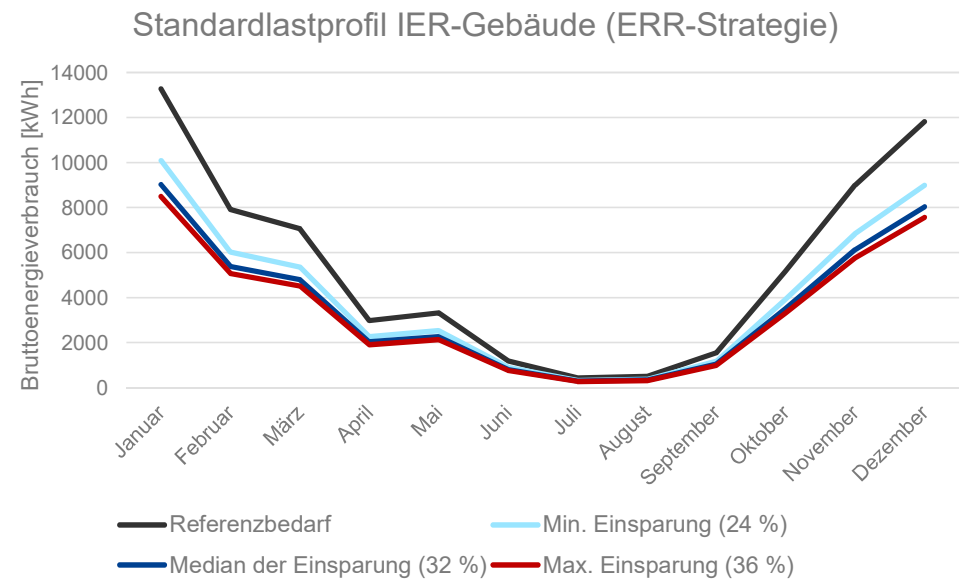
ERR(+), T_{Vorlauf}



Finanzielle Bilanzierung

Jahresenergiebedarf basierend auf skaliertem Standardlastprofil

Monat	Wärmebedarf [kWh]			
	Referenzbedarf ¹	Min. Einsparung (24 %)	Median (32 %)	Max. Einsparung (36 %)
Januar	13.271	10.086	9.024	8.494
Februar	7.924	6.022	5.388	5.071
März	7.061	5.367	4.802	4.519
April	2.981	2.265	2.027	1.908
Mai	3.330	2.531	2.265	2.131
Juni	1.193	907	811	764
Juli	430	327	293	275
August	495	376	337	317
September	1.553	1.181	1.056	994
Oktober	5.175	3.933	3.519	3.312
November	9.004	6.843	6.123	5.762
Dezember	11.820	8.983	8.038	7.565
Total	64.238	48.821	43.682	41.112
Gesamt-einsparung (kWh)		15.417	20556	23126



Finanzielle Bilanzierung

Kapitalwertprognose

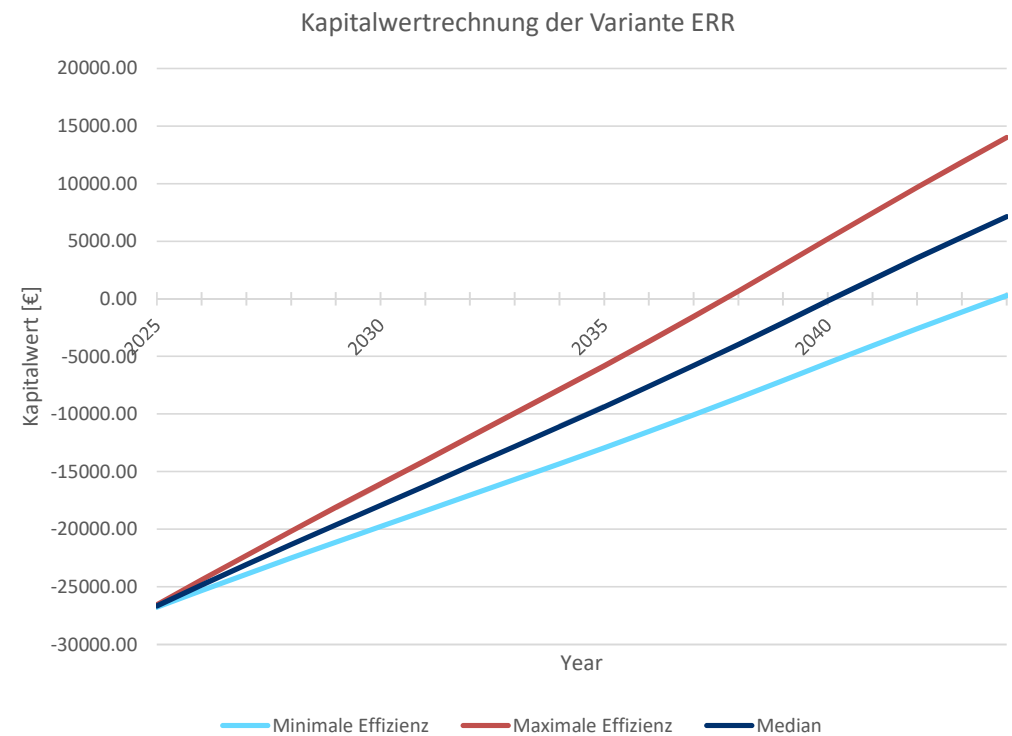
- Berechnung anhand des Kapitalwerts

$$NBV = -Z_0 \sum_{t=1}^T (1+i)^{-t} * Z_t$$

- mit
 $i=0.03$; $Z_0=28750\text{€}^1$
 $Z_t = C_{\text{gas}} * E_{\text{gespart}}$ mit C_{gas} basierend auf [8]

Jahr	2025	2030	2035	2040	2045
C_{gas} [€/kWh]	0.095	0.102	0.121	0.156	0.168

→ Amortisierung zwischen 2038 (maximale Effizienz) und 2044 (minimale Effizienz)



Fazit & Ausblick

FAZIT

- Mit präsenzabhängiger Einzelraumregelung können in einem typischen Bürogebäude zwischen 24 % und 36 % des Heizenergieverbrauchs eingespart werden
→ Mit einer Amortisationszeit von ~15 Jahren ist das System rentabel.
- Zur Reduktion unerwünschter Temperaturbereiche bei Eintreffen des Nutzers wurden zwei niederschwellige Regelungsvarianten untersucht:
 - Eine morgendliche Aufheizzeit wirkt Komfortbeeinträchtigungen entgegen
→ Reduziert jedoch potenzielle Einsparungen erheblich.
 - In Systemen mit steigerbaren Vorlauftemperatur kann eine damit verbundene Erhöhung der Systemdynamik Komforteinbußen potentiell verringern
→ In diesen Fällen trotz kesselseitiger Verluste effizientere Alternative zur Aufheizzeit

AUSBLICK

- Quantifizierung des Nutzendenkomforts durch Auswertung von unter verschiedenen Regelungsvarianten gestellten Umfragen
→ Im laufenden Projekt
- Aufheizzeit basierend auf Anwesenheitsprädiktion
→ Denkbare Variante insbesondere bei Systemen mit geringer Vorlauftemperatur
- Die Übertragbarkeit der Ergebnisse ist in großem Maße auch von Raumbelegung/Anwesenheit sowie Gebäudeertüchtigung abhängig
→ Wird noch genauer evaluiert



Universität Stuttgart

IER Institut für Energiewirtschaft
und Rationelle Energieanwendung

Vielen Dank!



*Peter Lierhammer, Pascal Häbig, Raffaela Goldschmidt, Jens
Ullmann, Matthias Leger, Ludger Eltrop, Kai Hufendiek*

E-Mail Peter.Lierhammer@ier.uni-Stuttgart.de

Telefon +49 (0) 711 685- 87825

Universität Stuttgart

Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung

Heißbrühlstr. 49A, 70565 Stuttgart

EKUS hoch i

Energieeinsparung & Klimaschutz an der Universität Stuttgart –
Intelligente, interdisziplinäre & integrative Transformation im Reallaborformat

Gefördert durch:



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR WISSENSCHAFT, FORSCHUNG UND KUNST

Quellen

[1]	European Parliament and Council of the European Union (2021): Establishing the framework for achieving climate neutrality and amending Regulations (EC) No 401/2009 and (EU) 2018/1999 ('European Climate Law'), revised 7/9/2021. Quelle: O.J. In : L 243, abgerufen am 01.02.2025
[2]	Bundestag/Bundesrat (2019): Federal Climate Action Act, revised 7/15/2024. In Federal Law Gazette I 2024 (235). Online verfügbar unter https://www.gesetze-im-internet.de/englisch_ksg/index.html .
[3]	Bundesverband der deutschen Heizungsindustrie. (2023, February). Marktentwicklung Wärmeerzeuger Deutschland 2013 2022. https://www.bdh-industrie.de/fileadmin/user_upload/Pressemeldungen/Marktstruktur_zehn_Jahre_2022_DE_022023b.pdf
[4]	Deutsche Energie Agentur (Hrsg.) (dena , 2022) „DENA GEBÄUDEREPORT 2023. Zahlen, Daten, Fakten zum Klimaschutz im Gebäudebestand.“
[5]	Verivox GmbH. (n.d.). Verivox Verbraucherpreisindex Gas (Verivox consumer price index gas). Retrieved Abgerufen am 01.02.2025, 2025, Online verfügbar unter https://www.verivox.de/gas/haushaltspreis/
[6]	EWI (2025): Auswirkungen und Preispfade des EU ETS2. Online verfügbar unter https://www.ewi.uni-koeln.de/cms/wp-content/uploads/2025/04/EU-ETS2_Endbericht.pdf .
[7]	DIN e.V. (Hrsg.) (DIN V 18599-10:2018-09, 2018): DIN V 18599-10:2018-09, Projektmanagement – Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten, Beuth-Verlag, Berlin, 2018.
[8]	Robert Meyer, Nicolas Fuchs, Jessica Thomsen, Sebastian Herkel, Christoph Kost (2024): Heizkosten und Treibhausgasemissionen in Bestandsgebäuden – Aktualisierung auf Basis der GEG-Novelle 2024. Kopernikus-Projekt Ariadne, Potsdam.