

Holzeinsparung und Dekarbonisierung durch Rauchgaskondensation

Potential anhand eines Fallbeispiels

Timotheus Zehnder

Technik & Architektur

3. März 2026

FH Zentralschweiz

*Quelle: KI-Collage aus Bildern von proImageHub
(proimagehub.ch) und saveenergy (greenbusinessaward.ch)*



«Schweizer Energieholz»: 2022 sogar ein Fall für die Wirtschaftliche Landesversorgung

WALD: Brennholz ist ein gefragtes Gut, die Preise steigen

Der Run auf Brennholz

Die Nachfrage nach Brennholz ist angesichts einer möglichen Energiekrise heuer aussergewöhnlich hoch.



Bereits gibt es Lieferstopps: Holz wird wegen der Energiekrise in allen Formen gehamstert wie WC-Papier während Corona

Der Ukraine-Krieg, die drohende Energiekrise und die weltweiten Lieferengpässe schüren die Angst vor einem kalten Winter. Der Kampf für ein warmes Wohnzimmer hat begonnen.

Daniel Gerny, Erich Aschwanden

06.08.2022, 05.30 Uhr

Anteil Holz am Wärmemarkt lässt sich steigern

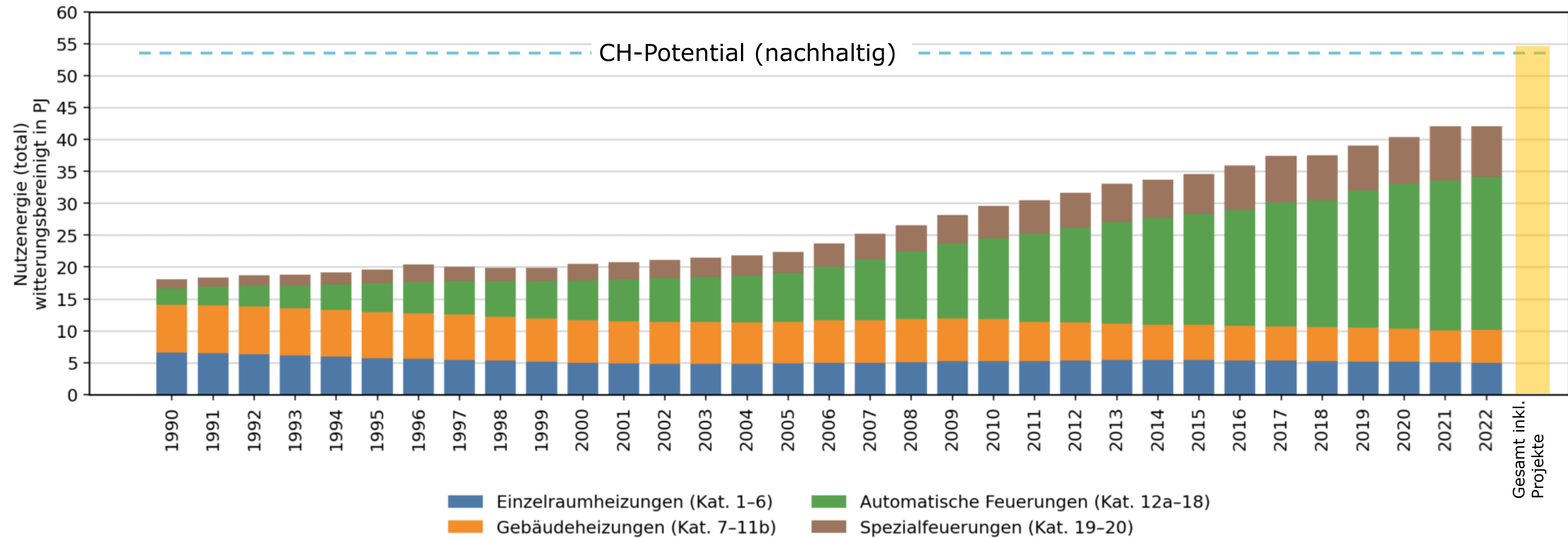
Laut einem Strategiepapier von Holzenergie Schweiz lässt sich die aktuelle Energieholznutzung noch um rund einen Drittel erhöhen. Der Anteil der

Preise werden nicht sinken

Beispielsweise Holzschnitzel und -pellets, die als Heizmaterial in den letzten Jahren immer beliebter geworden sind. Der Verkauf von Pelletfeuerungen mit einer Leistung von 5 bis 350 kW Leistung ist allein im ersten Quartal 2022 gegenüber demselben Zeitraum im Vorjahr um 80 Prozent gestiegen. «Warnung vor steigenden Pelletpreisen! **Füllen Sie die Lager jetzt!**», rät der



«Schweizer Energieholz» ist eine wertvolle und knappe Ressource



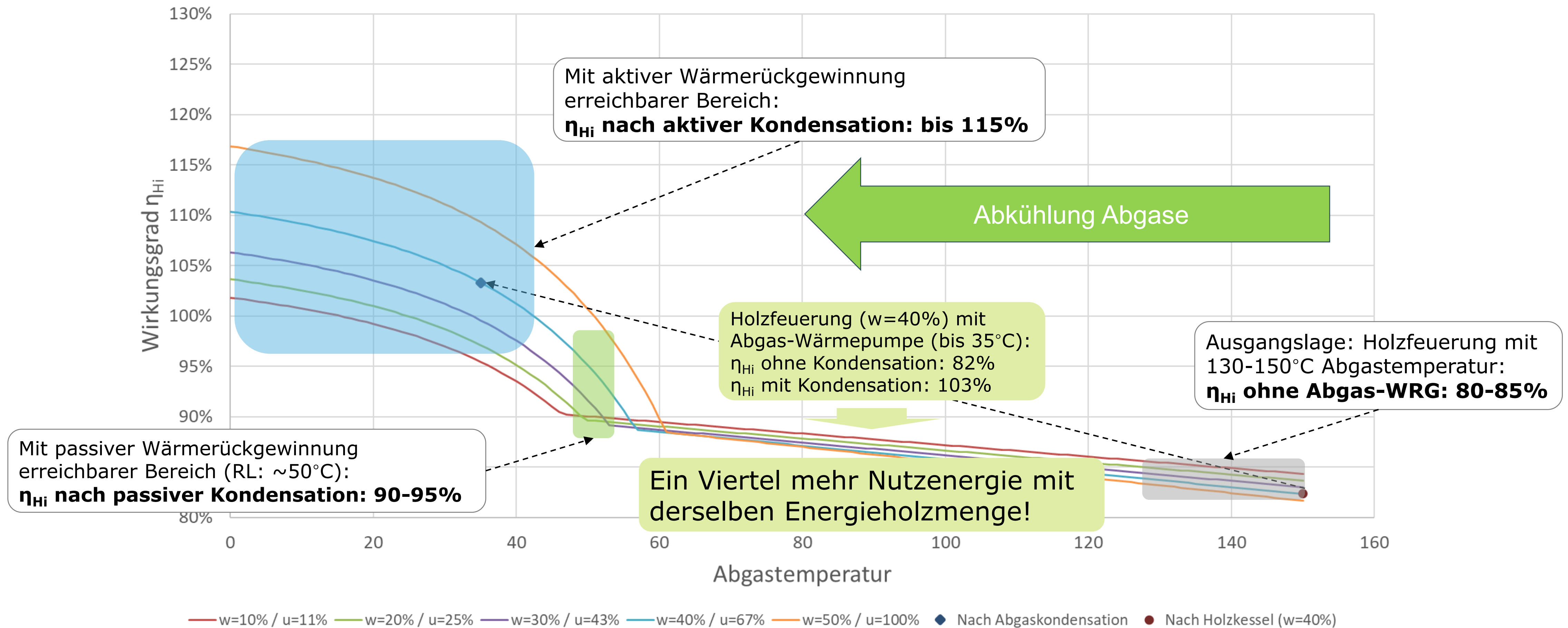
Quelle: BFE (2023) – Schweizerische Holzenergiestatistik, Erhebungsjahr 2022
Abschätzung Potential und Projekte Holzenergieschweiz (A. Keel (2022))

➤ Erhöhung Effizienz bestehender Feuerungen essenziell!

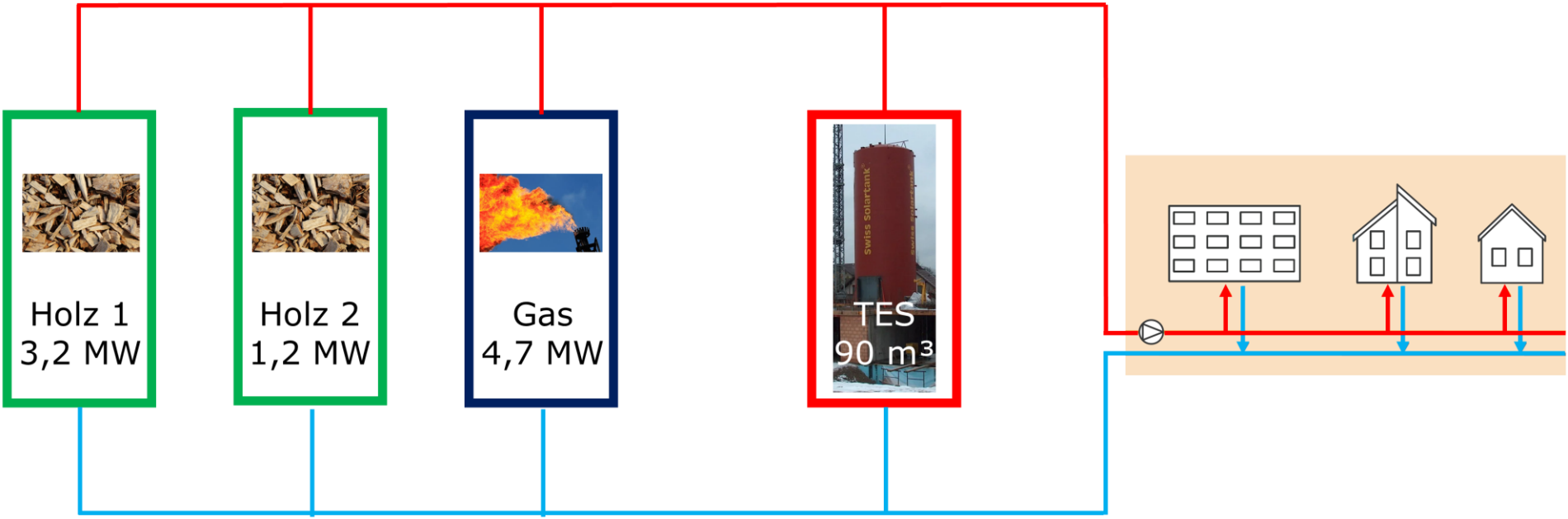
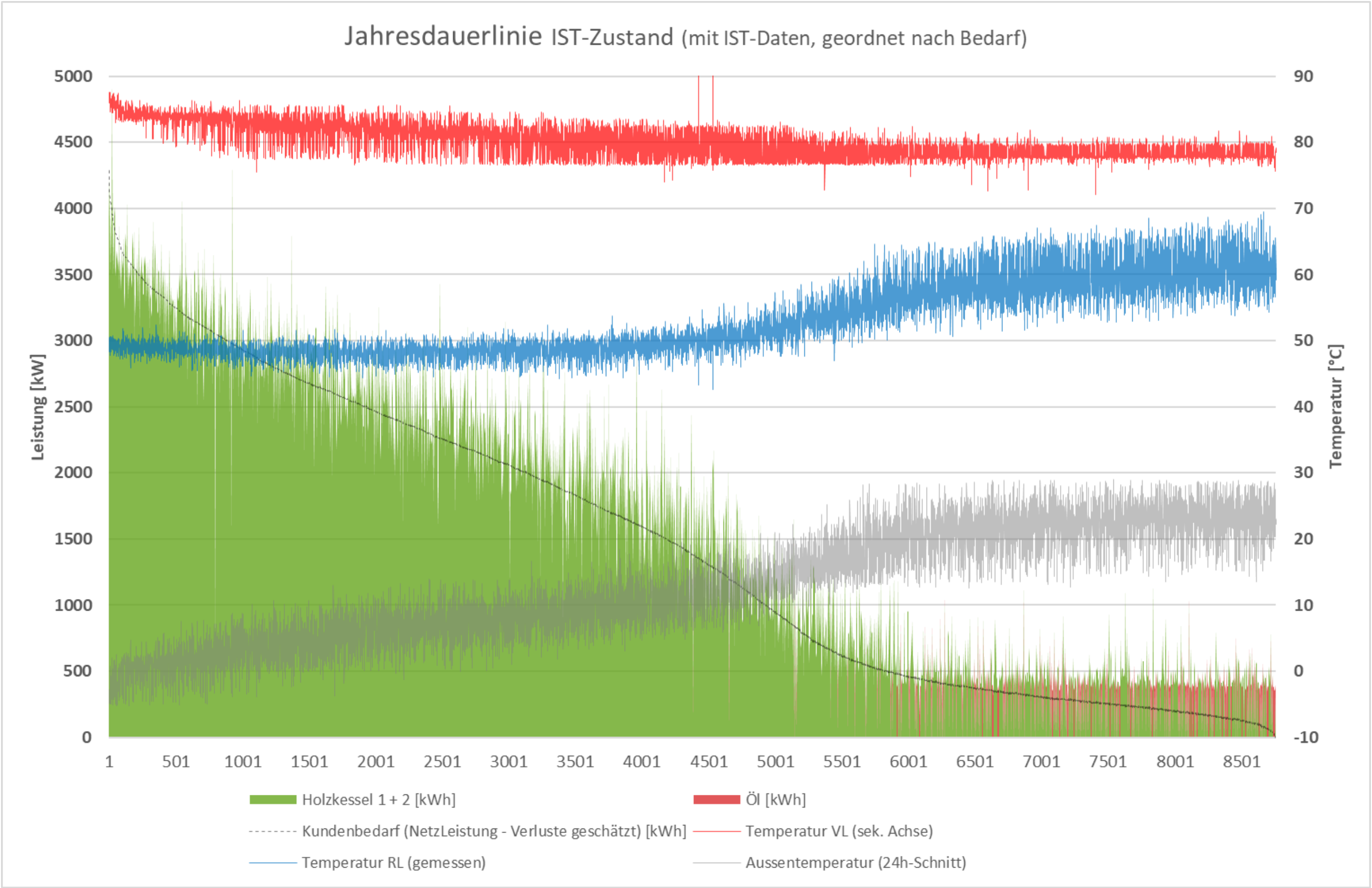
Potential der Rauchgasabkühlung und -kondensation

Wirkungsgradsteigerung Holzkessel in Funktion der Abgastemperatur und der Holzfeuchte

Verglichen mit Wirkungsgrad bez. H_i bei 150°C Abgastemperatur
(Lambda 1.6, Umgebungstemperatur 0°C, Luftdruck 950mbar, Holz: $C_6H_9O_4$)



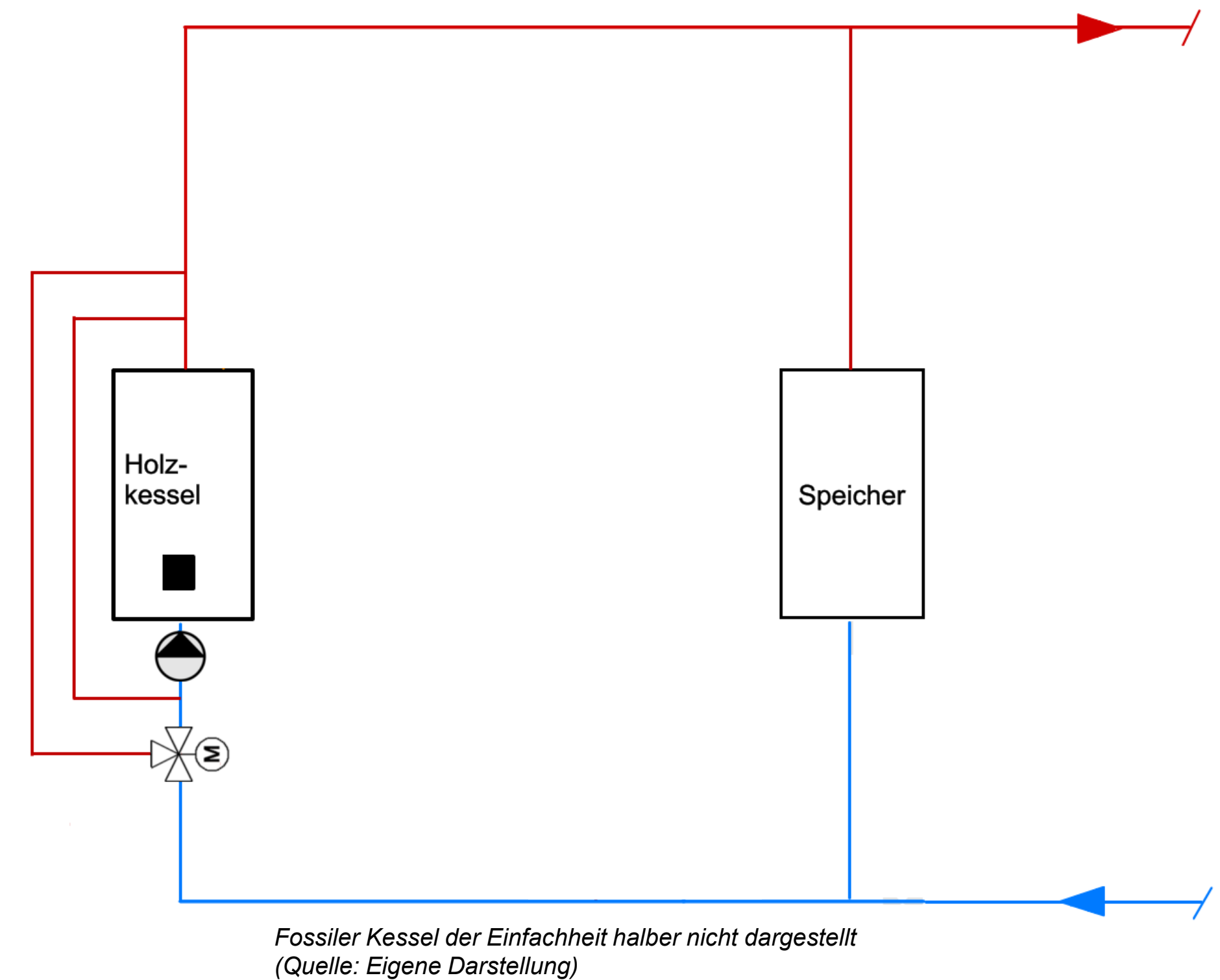
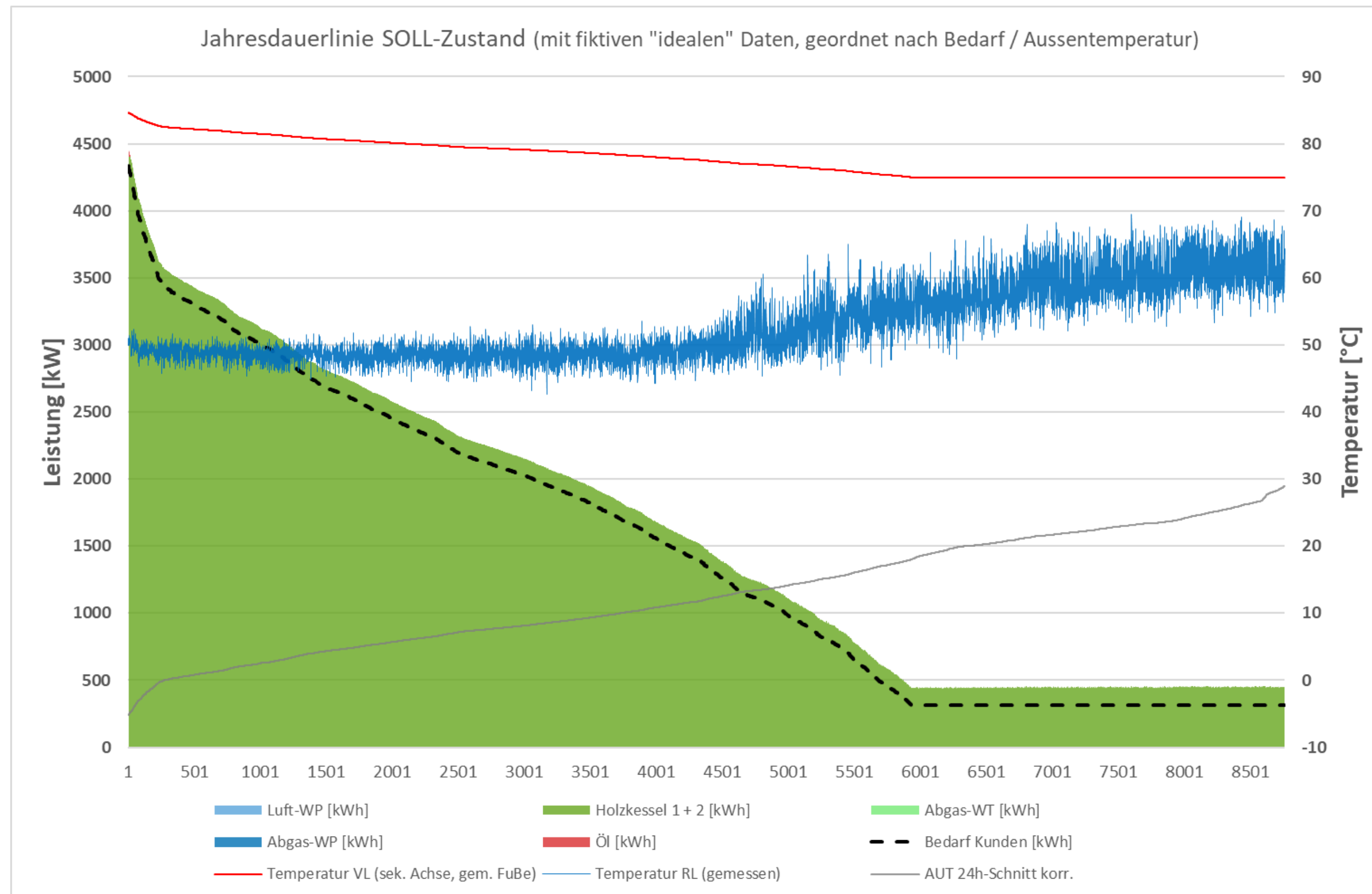
Fallbeispiel: Wie präsentiert sich die Ausgangslage (Messdaten 2023)?



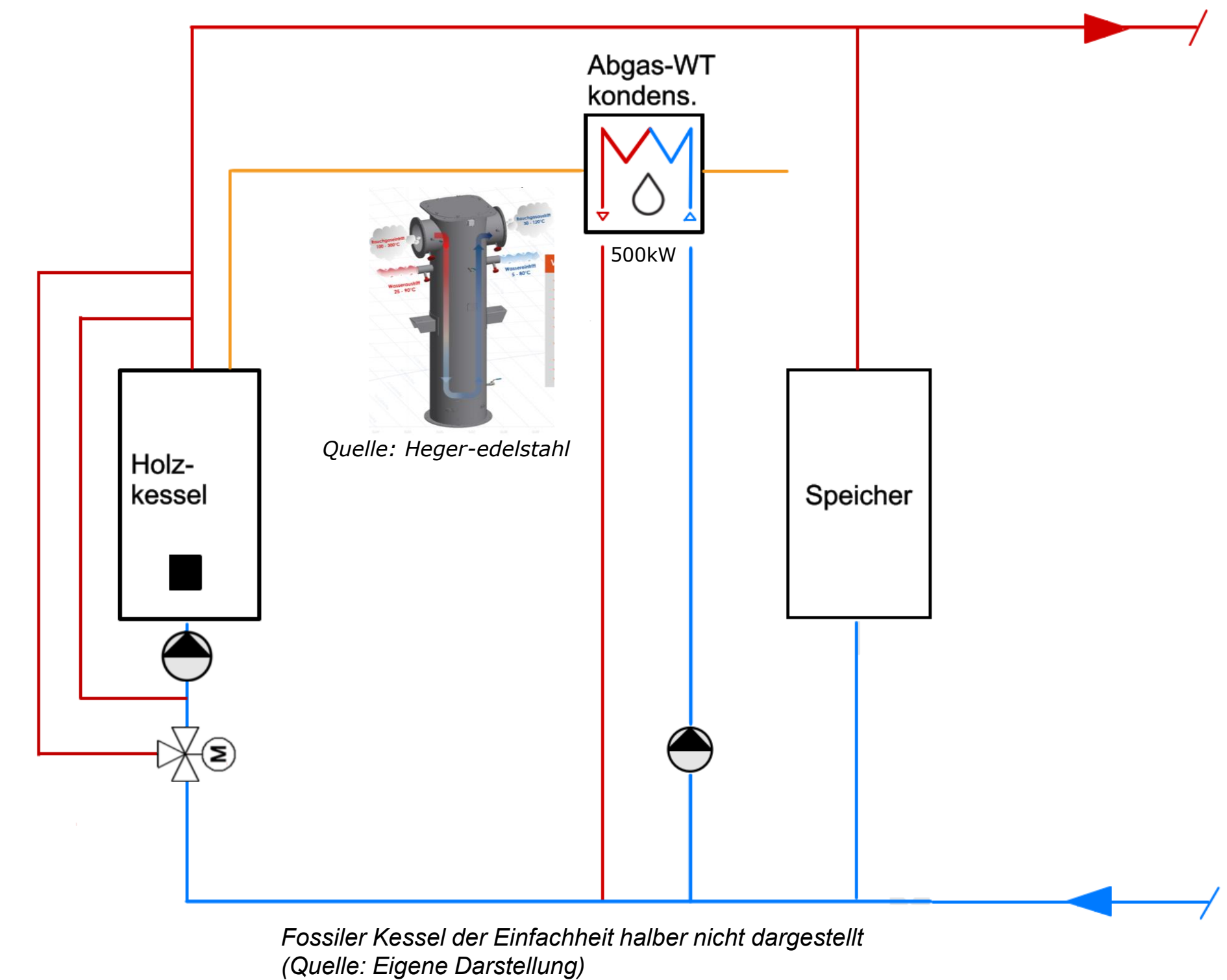
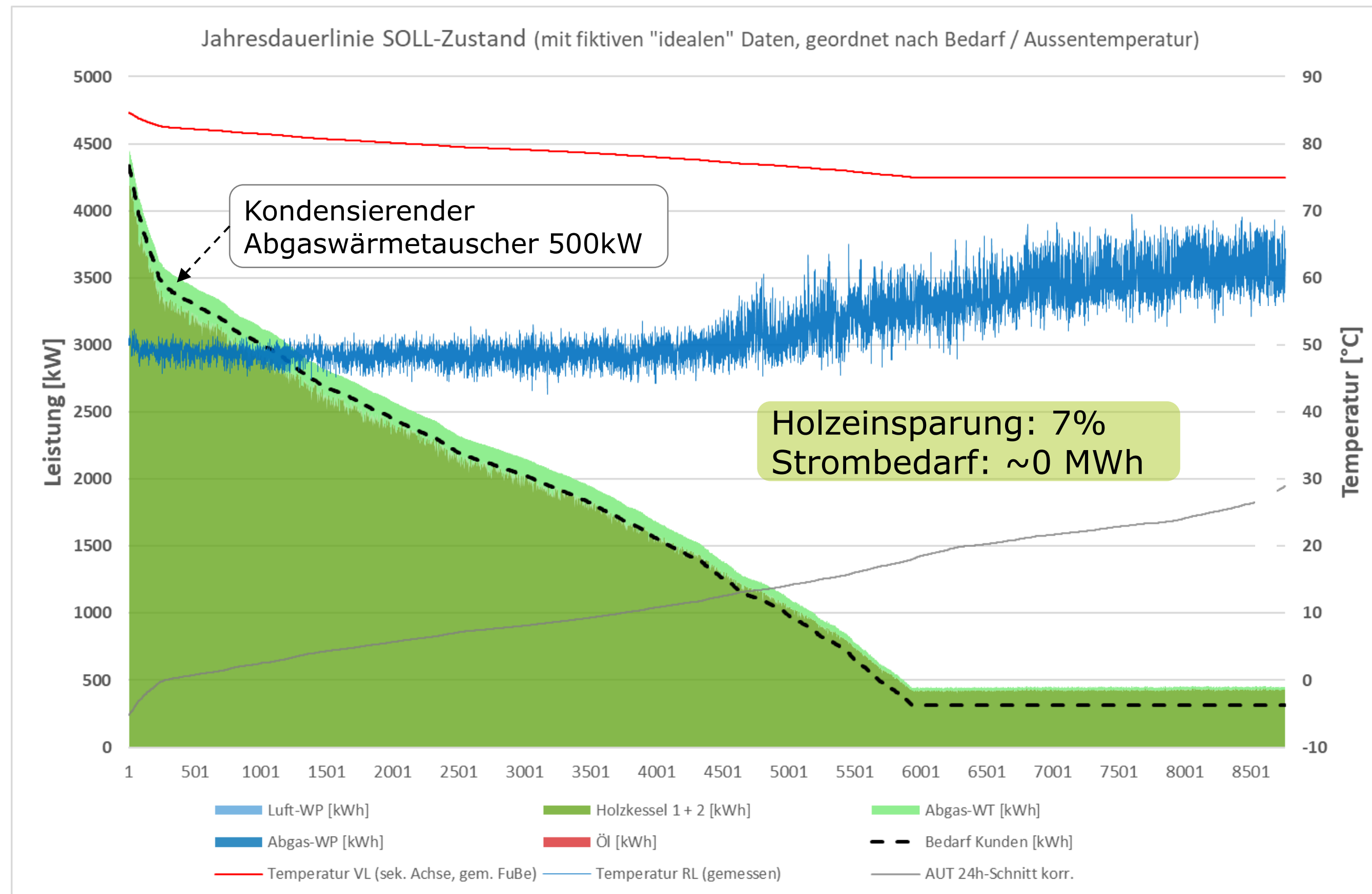
- Produktion ~14 GWh
- Bedarfsspitze 4,3 MW
- Holzbedarf ~6'000 t/a (98%)
- Ölbedarf ~19'000 l/a (2%)

IST-Daten 2023 (mit «idealer» Wärmeproduktion)

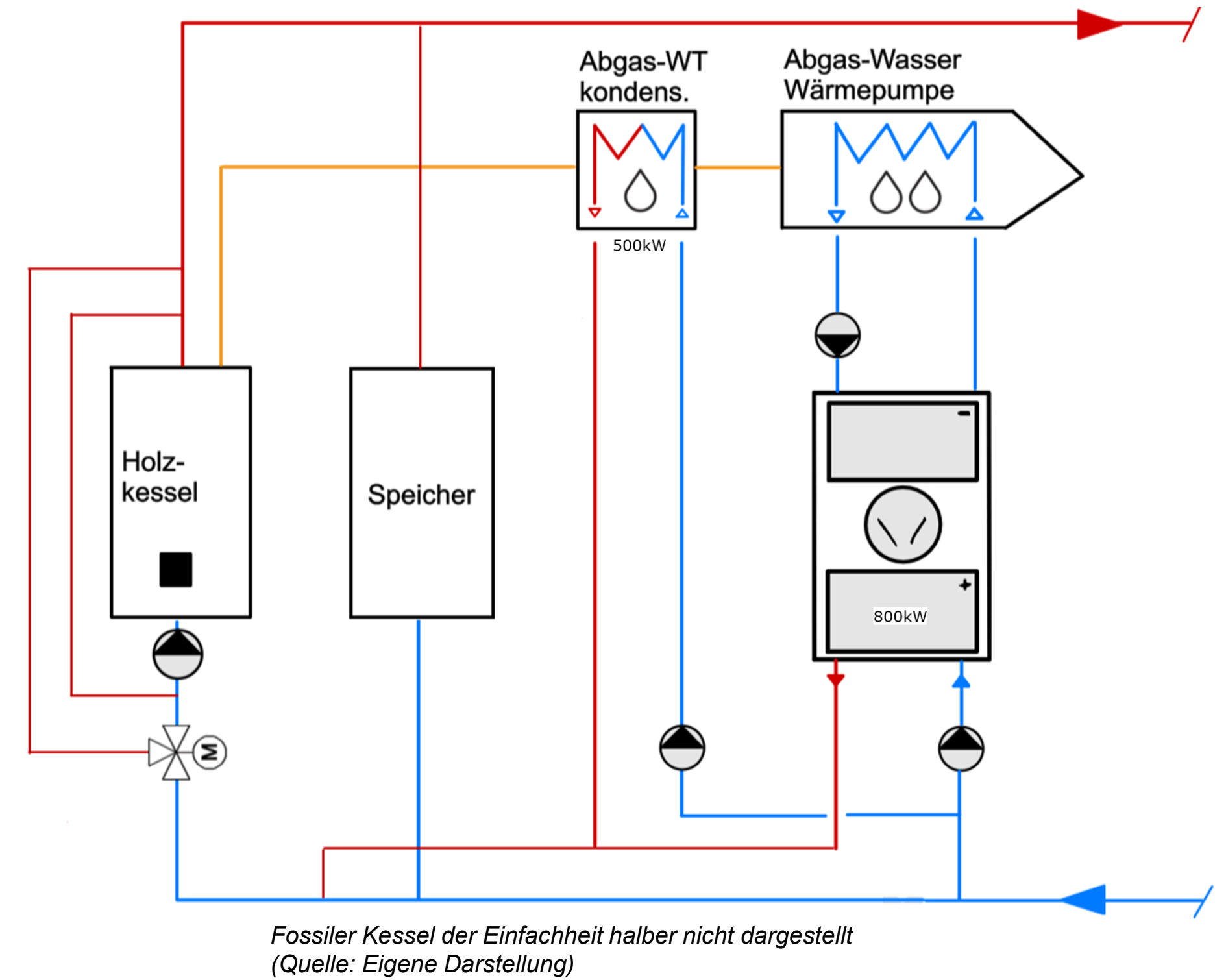
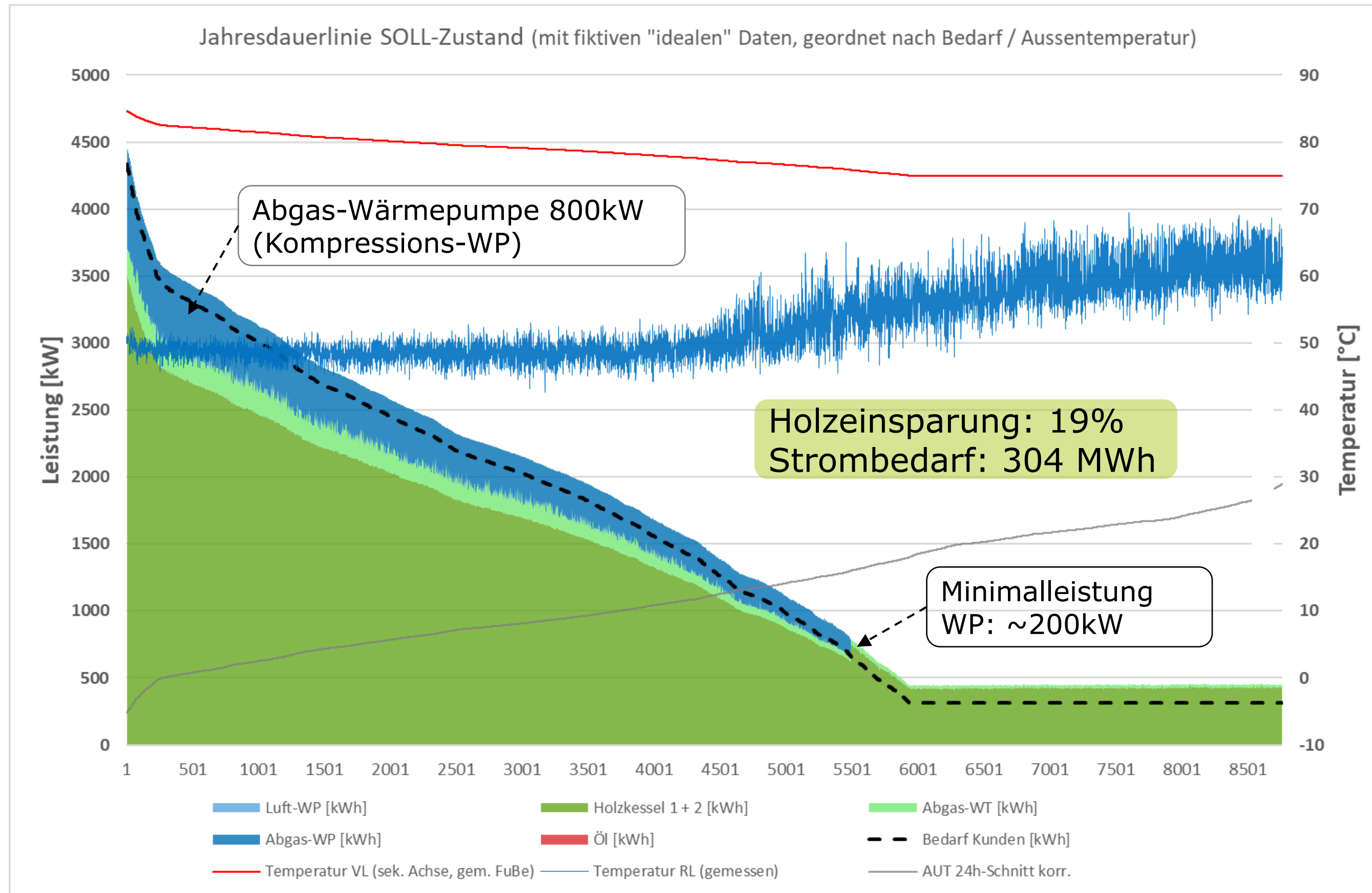
Kalibriert auf 14GWh gem. IST-Daten, geordnet nach Bedarf



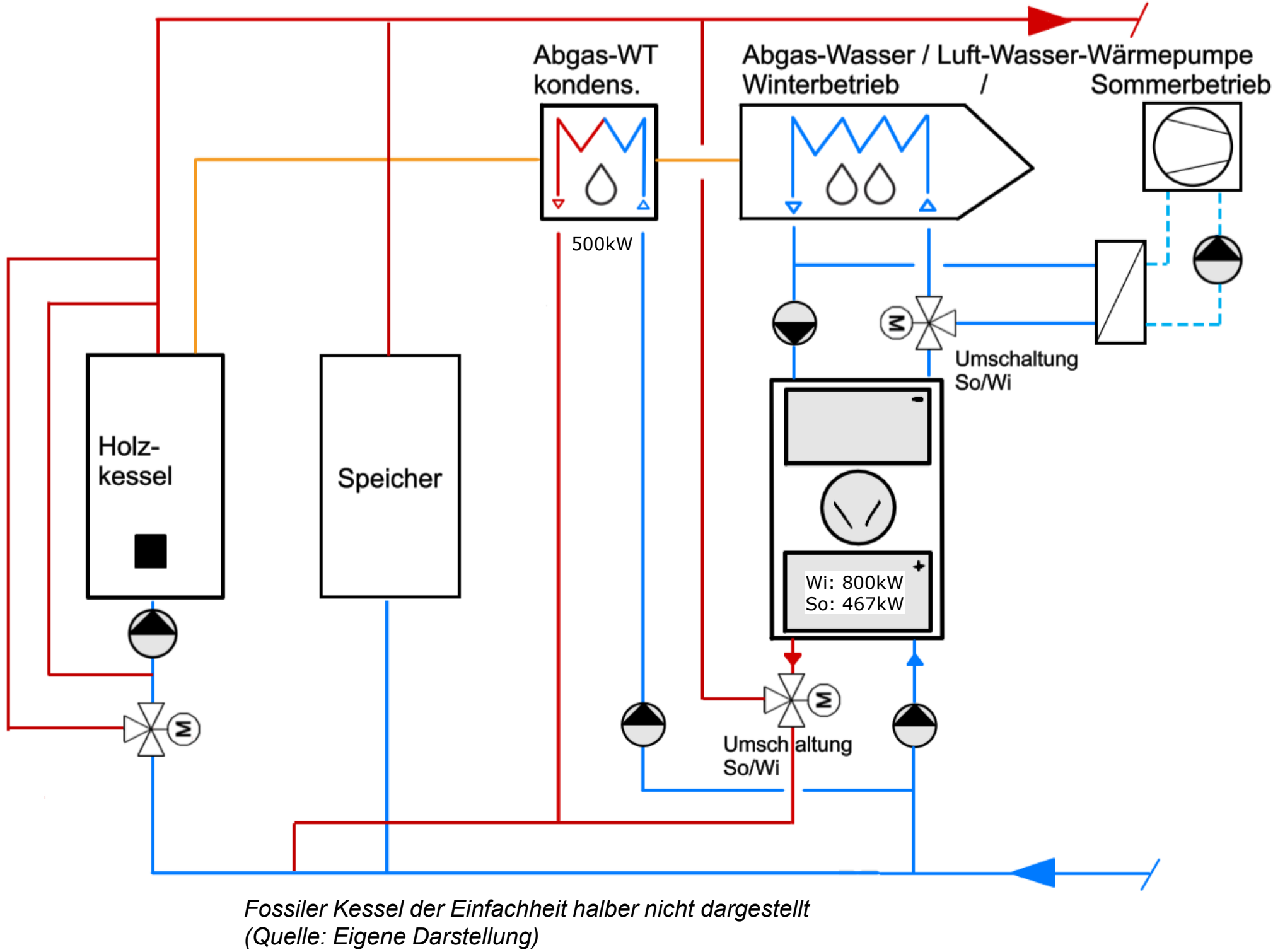
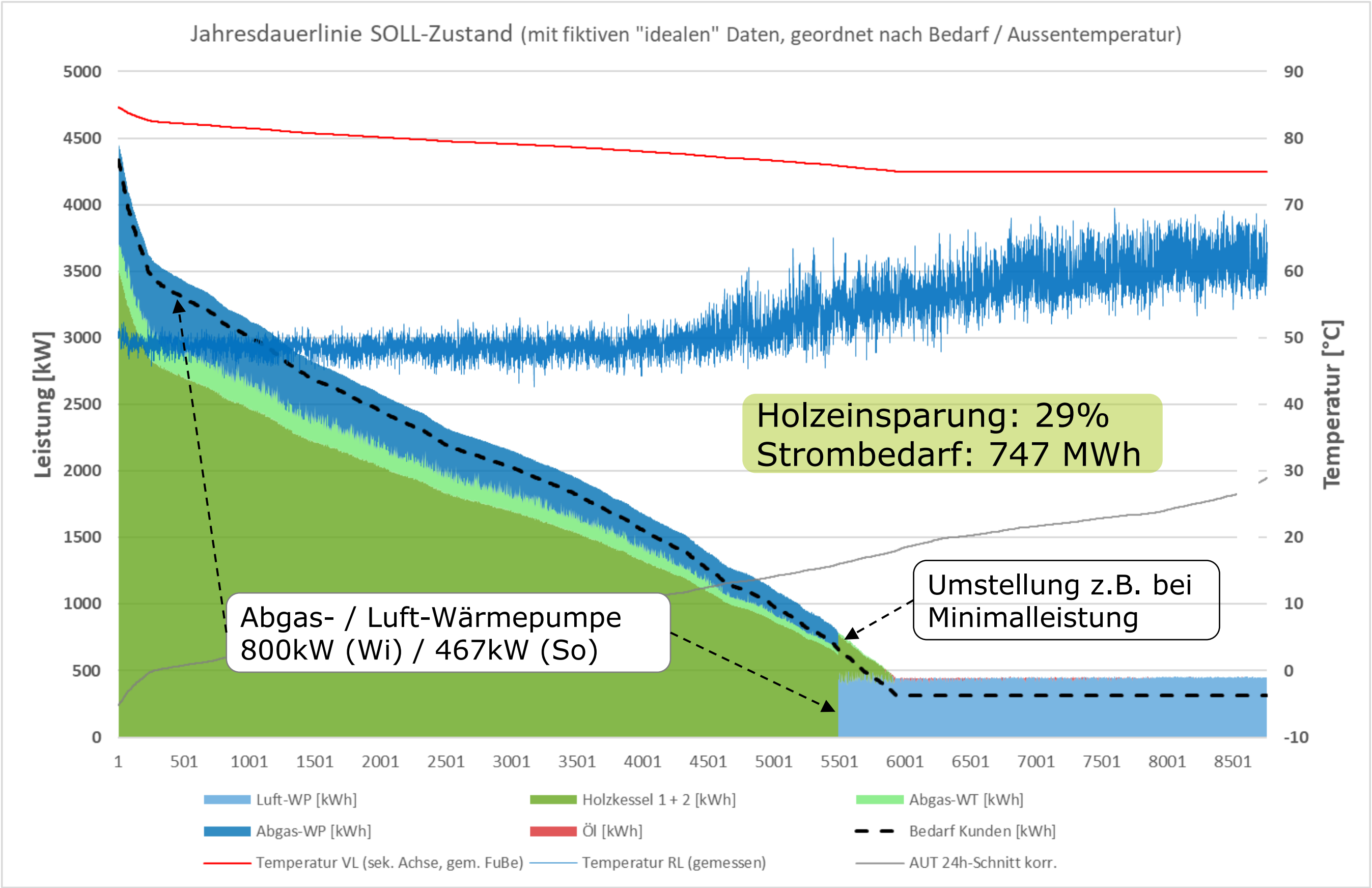
Eingriff (tief): Kondensierender Abgaswärmeübertrager, direkte Nutzung Rücklauf



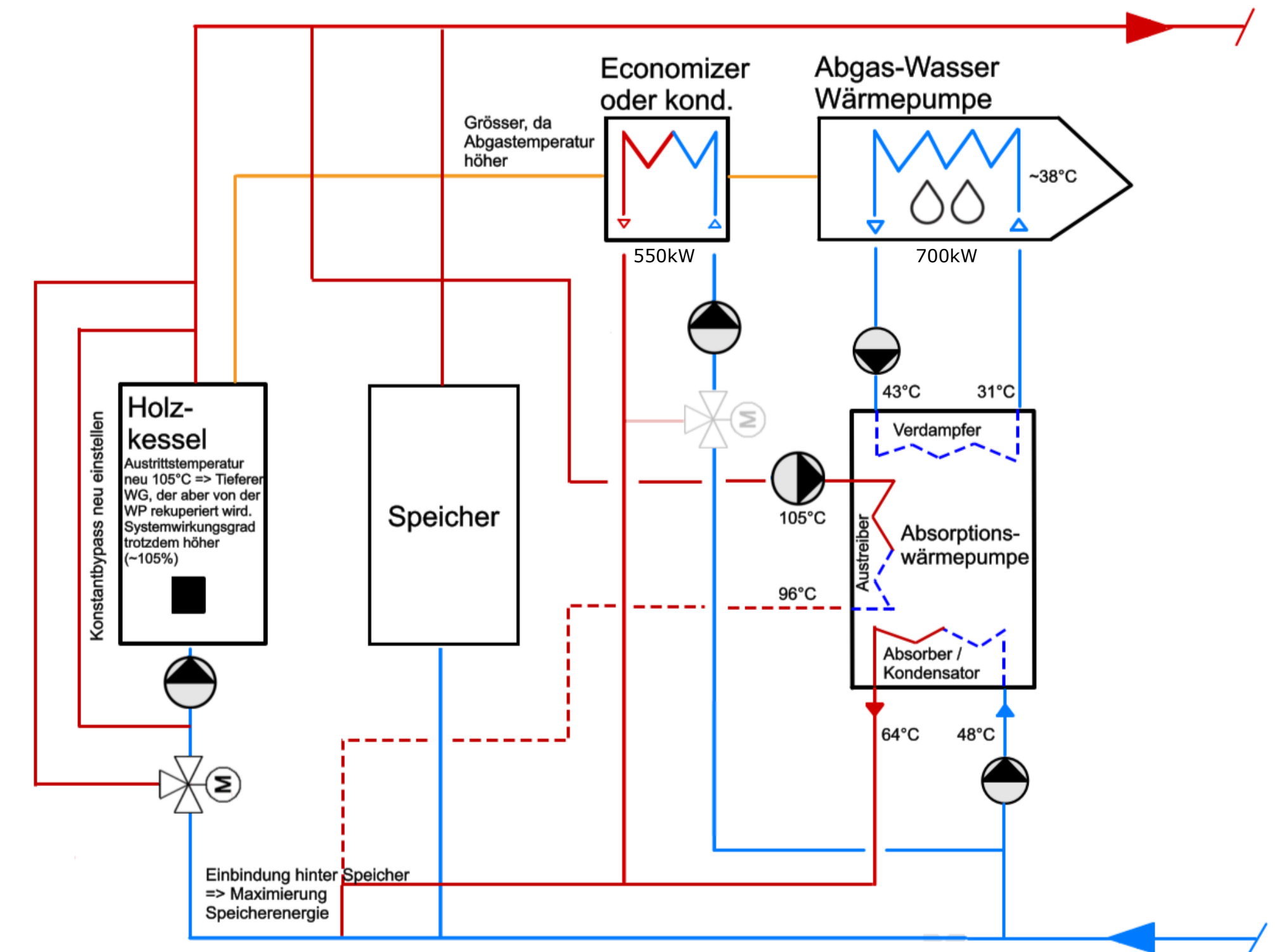
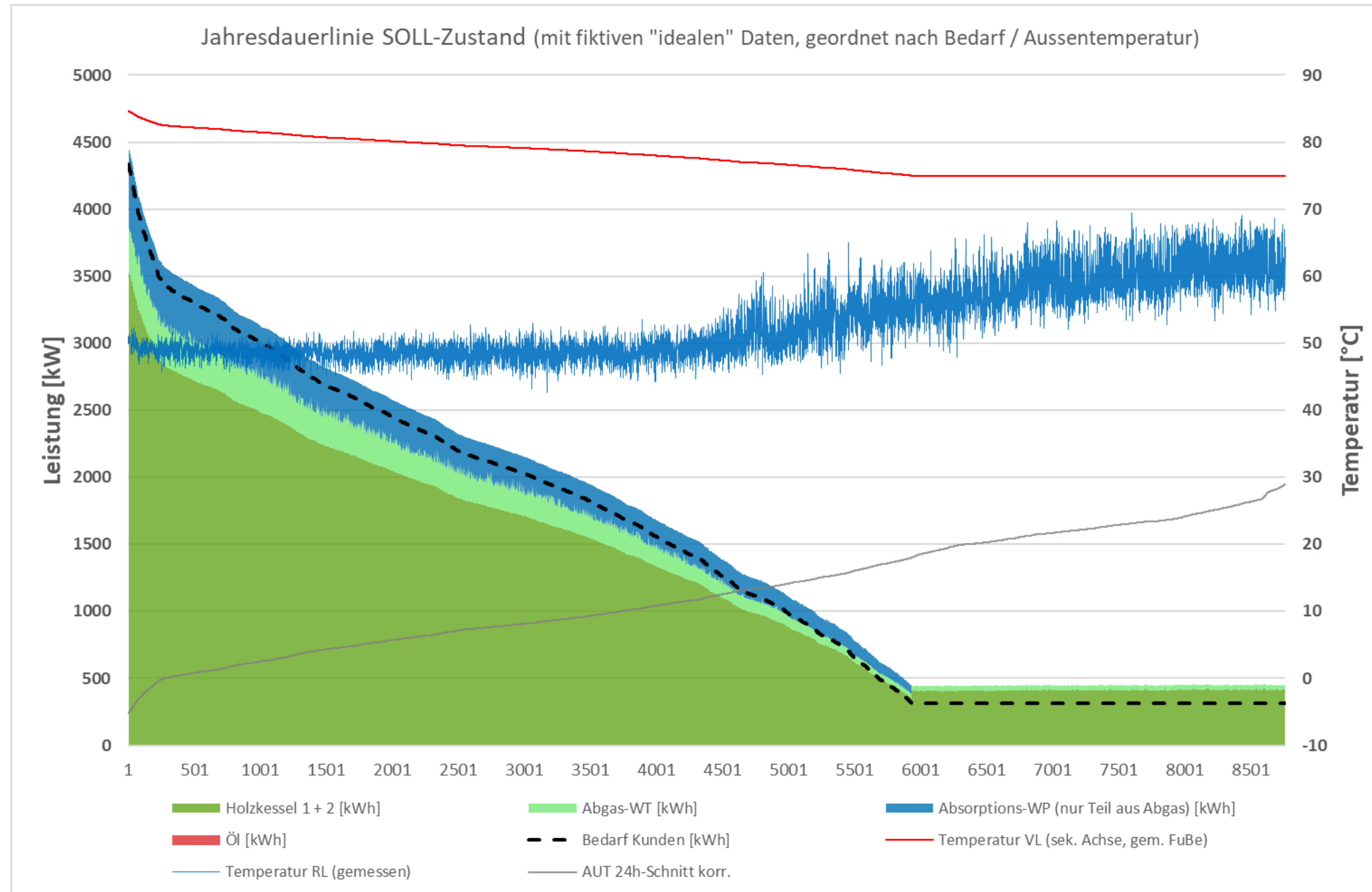
Eingriff (WP zusätzlich): Abgas aktiv über WP-Prozess kühlen



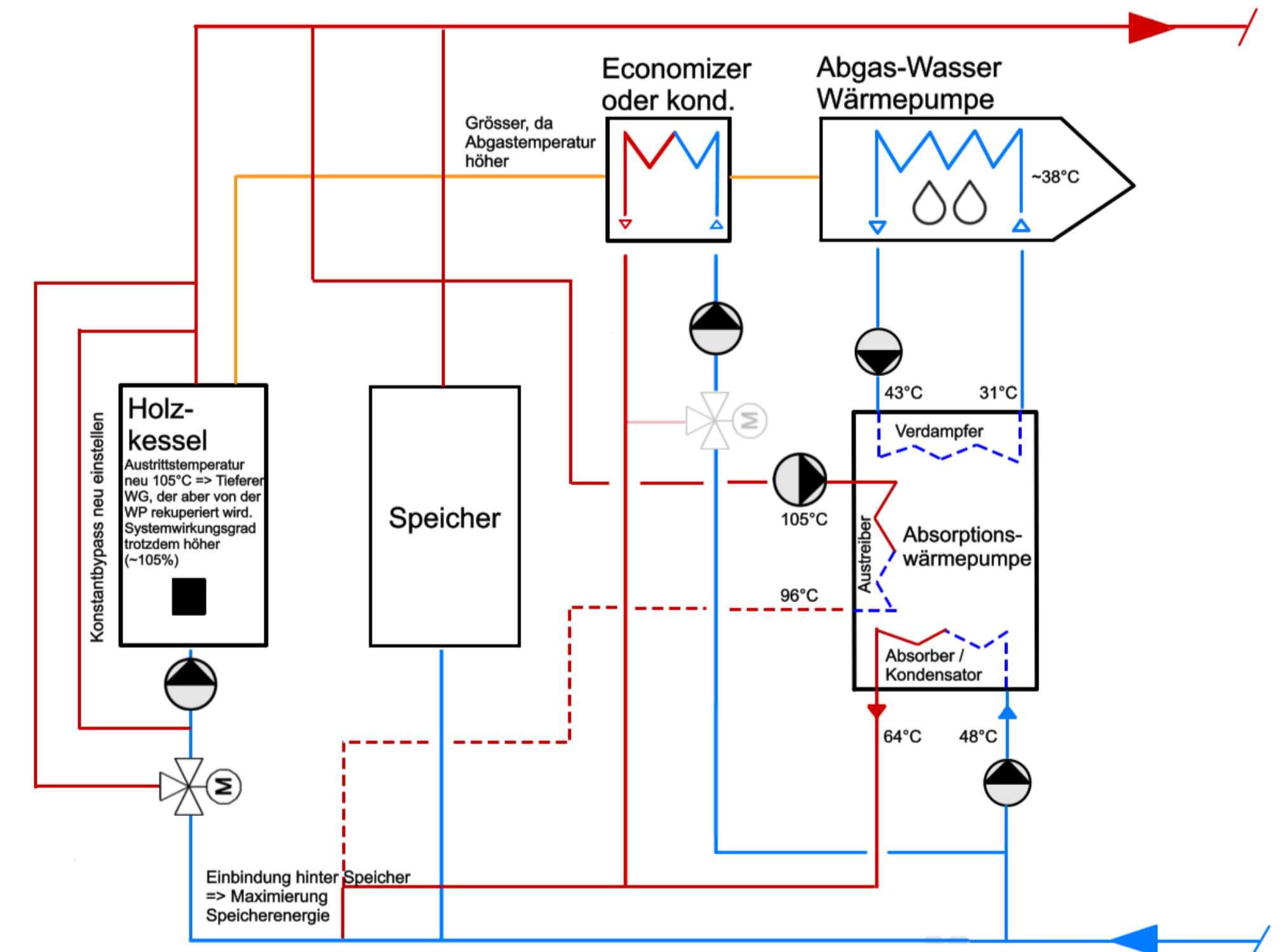
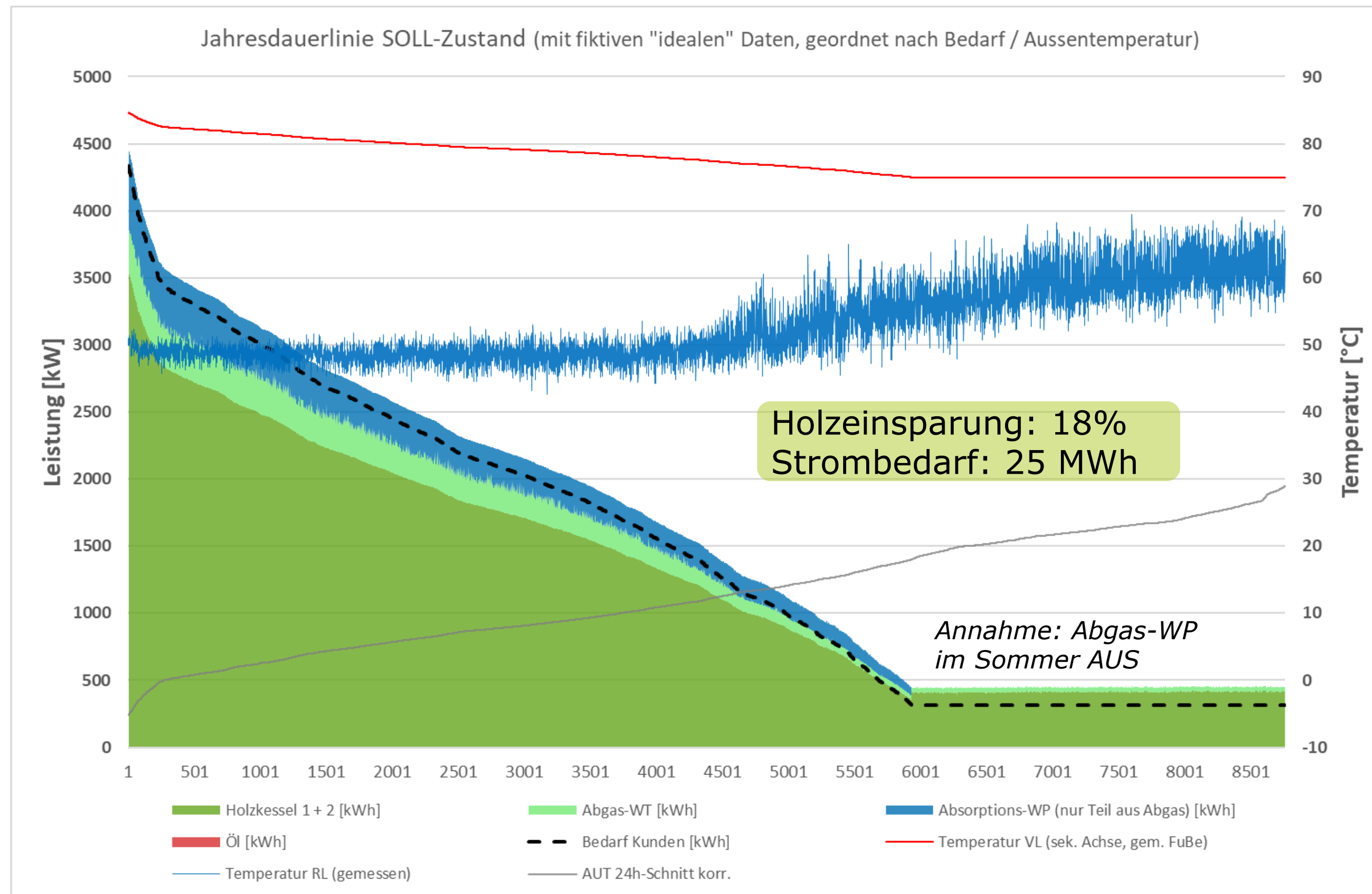
Grösster Eingriff (plus AUL-WP): Mehrquellen-Variante für Sommerbetrieb



Alternative ohne Mehrquelle: Absorptions-Wärmepumpe (Wärme treibt statt Strom)



Alternative ohne Mehrquelle: Absorptions-Wärmepumpe (Wärme treibt statt Strom)

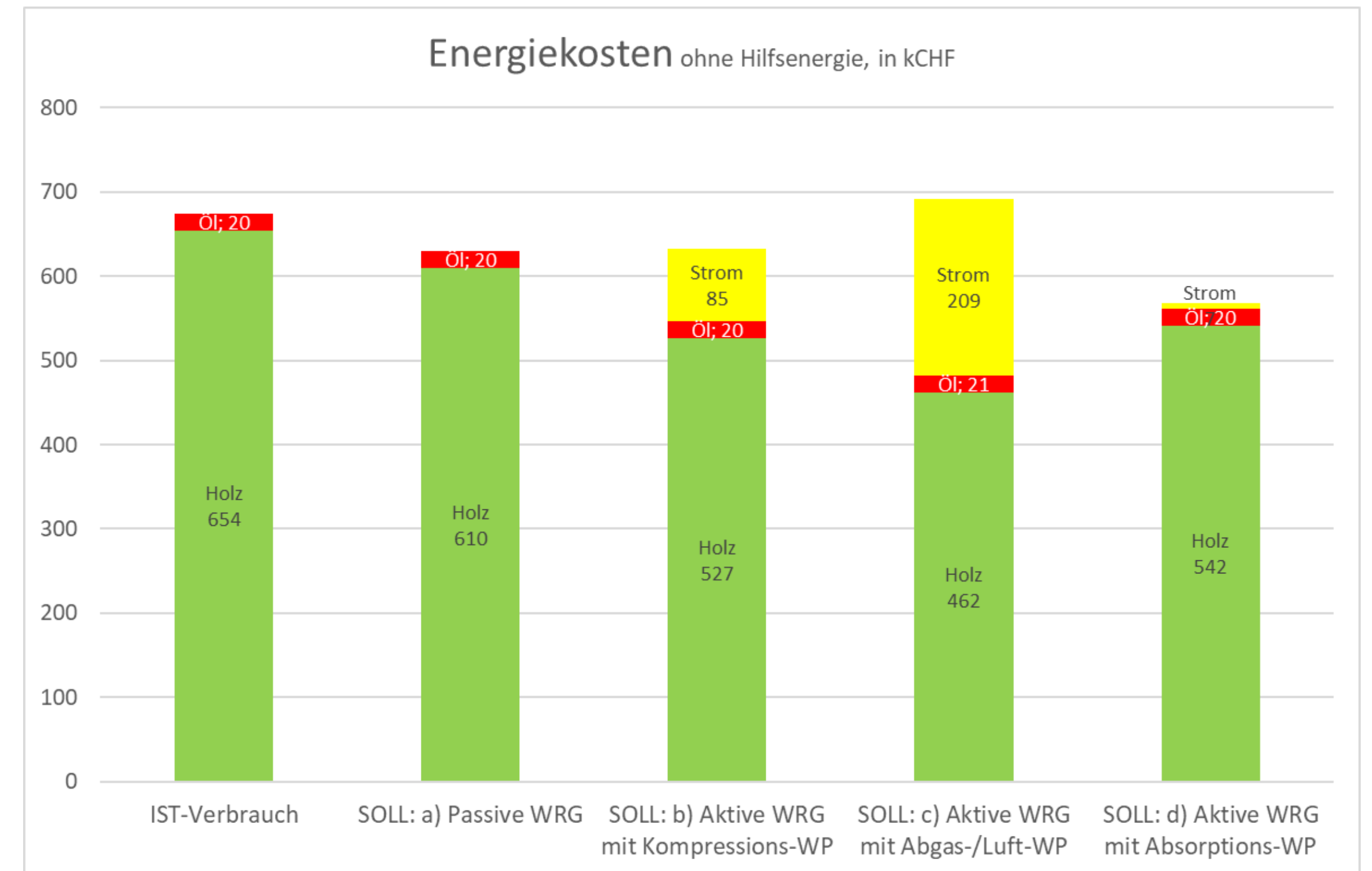
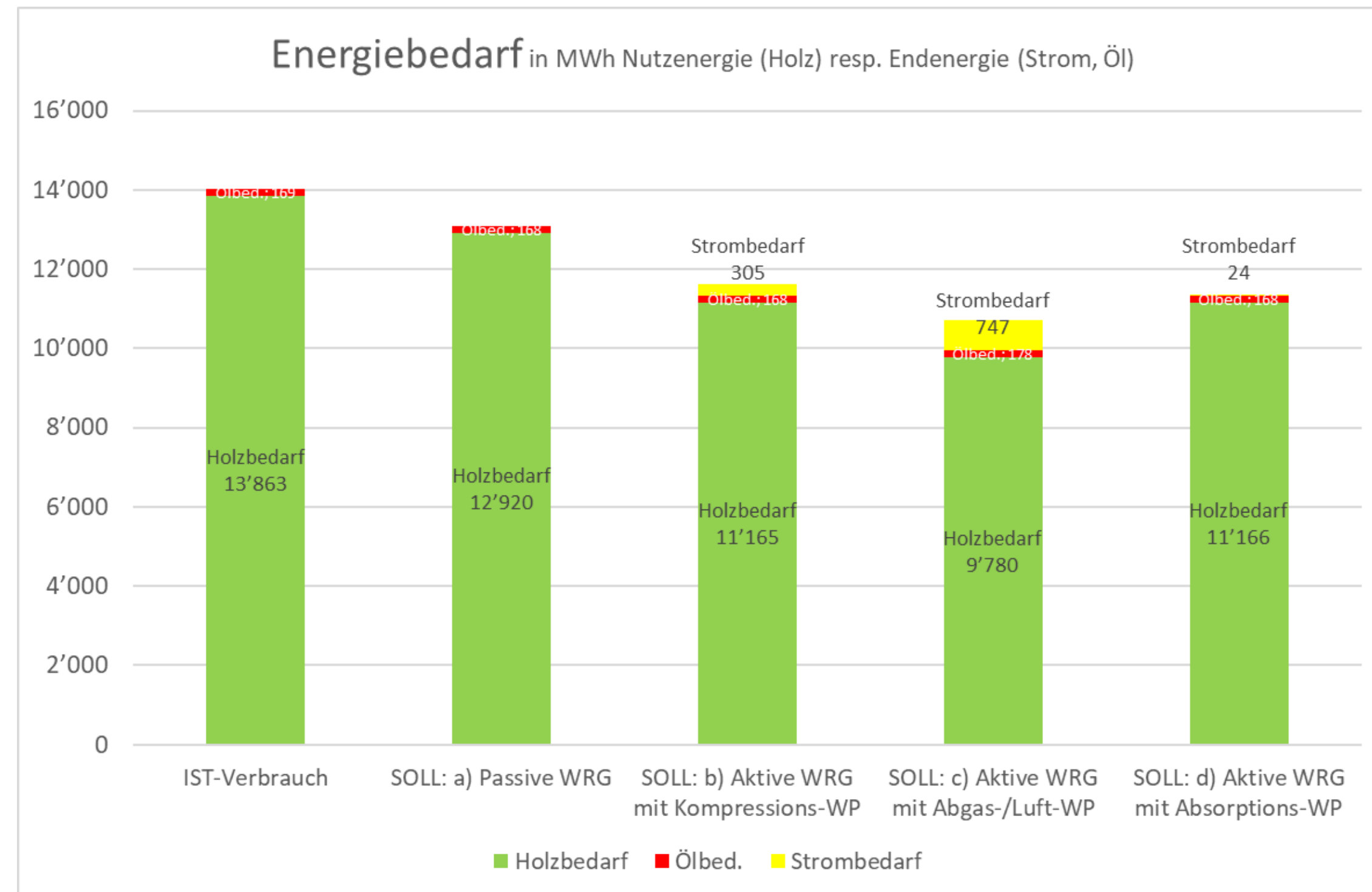


Wie sieht der Variantenvergleich aus?

Variante	Abgas-WÜ	Abgas-WP	Mehrquelle (AUL-WP)	Absorption
Holzeinsparung	7%	19%	29%	18%
Strombedarf	0 MWh	304 MWh	747 MWh	25 MWh
Kapitalkosten	tief	mittel	hoch	mittel
Sommer ohne Holz	-	-	+	-

Varianten: Energie- und Betriebskostenbetrachtung (ohne Netzausbau)

Der Gesamtenergiebedarf (ohne Aufteilung in Energieformen) und somit die Gesamteffizienz steigt mit jedem Ausbauschr. Aufgrund des hohen Strompreises schlägt sich dies **nicht** in den Kosten nieder.



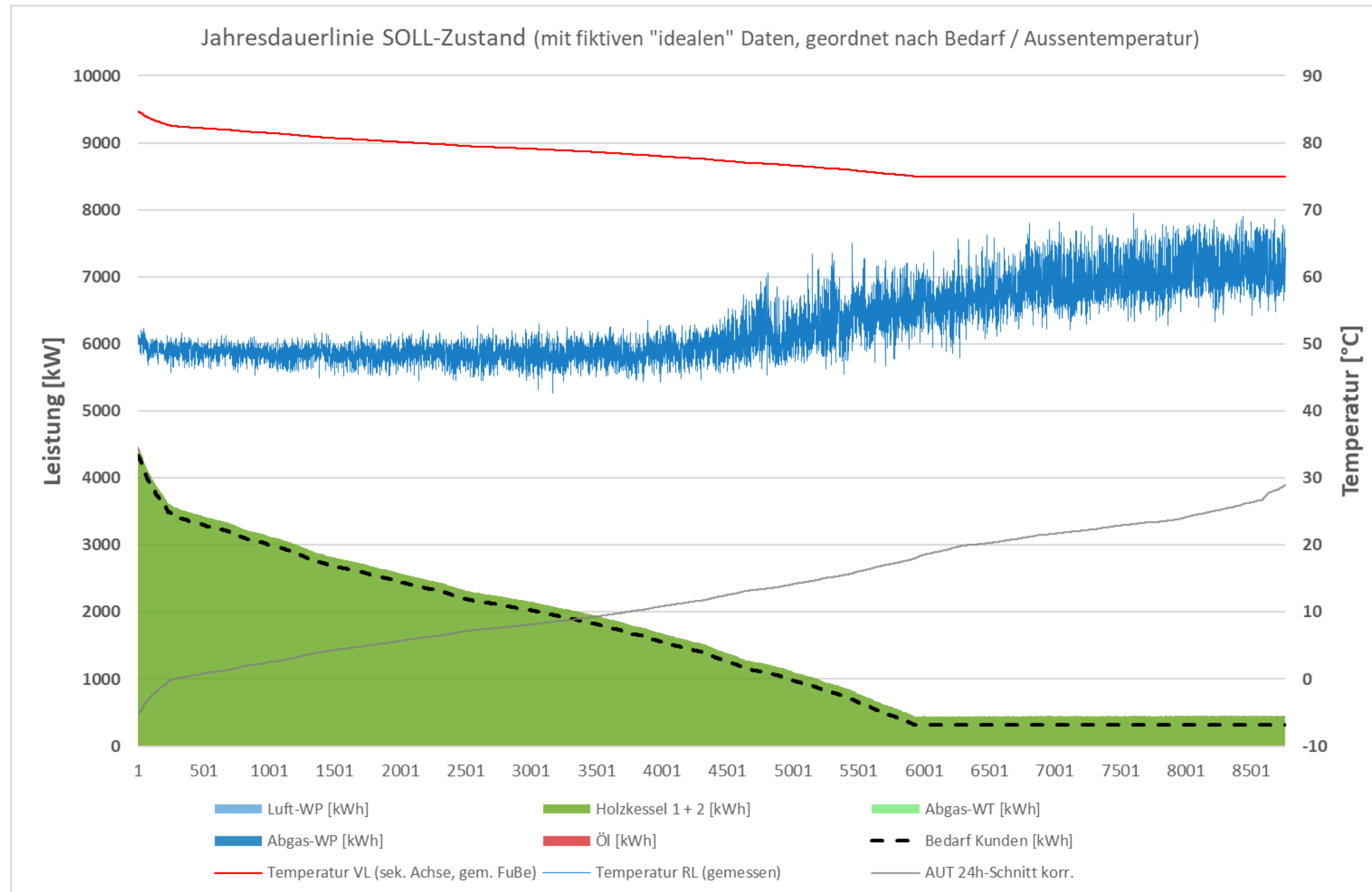
Fazit und Empfehlung

- Alle Varianten erreichen keine Wirtschaftlichkeit (15 Jahre, 5.5% Verzinsung).
- Ökonomisch am besten schliesst der Abgas-Wärmeübertrager ab, er benötigt kaum Hilfsenergie.
- Alle WP-Varianten kämpfen mit den Energiepreisen (Holz knapp 5Rp/kWh, Elektrizität 28Rp/kWh, d.h. JAZ > 5)
- Die Variante mit der Absorptionswärmepumpe liefert bereits mit dem IST-Verbrauch einen anständigen Deckungsbeitrag. Dieser reicht knapp nicht aus, um die Kapitalkosten zu decken.

- **Für alle Varianten ist somit klar:**

Der Absatz muss steigen, um eine Wirtschaftlichkeit zu erreichen!

Ausgangslage: IST-Daten 2023 (mit «idealer» Wärmeproduktion)



- Installierte Nutzleistung:
 - Holzkessel 1: 3'200 kW
 - Holzkessel 2: 1'200 kW
 - Abgas-WT: 0 kW
 - WP (Rauch/AUL): 0 kW
 - Ölkessel: 4'700kW

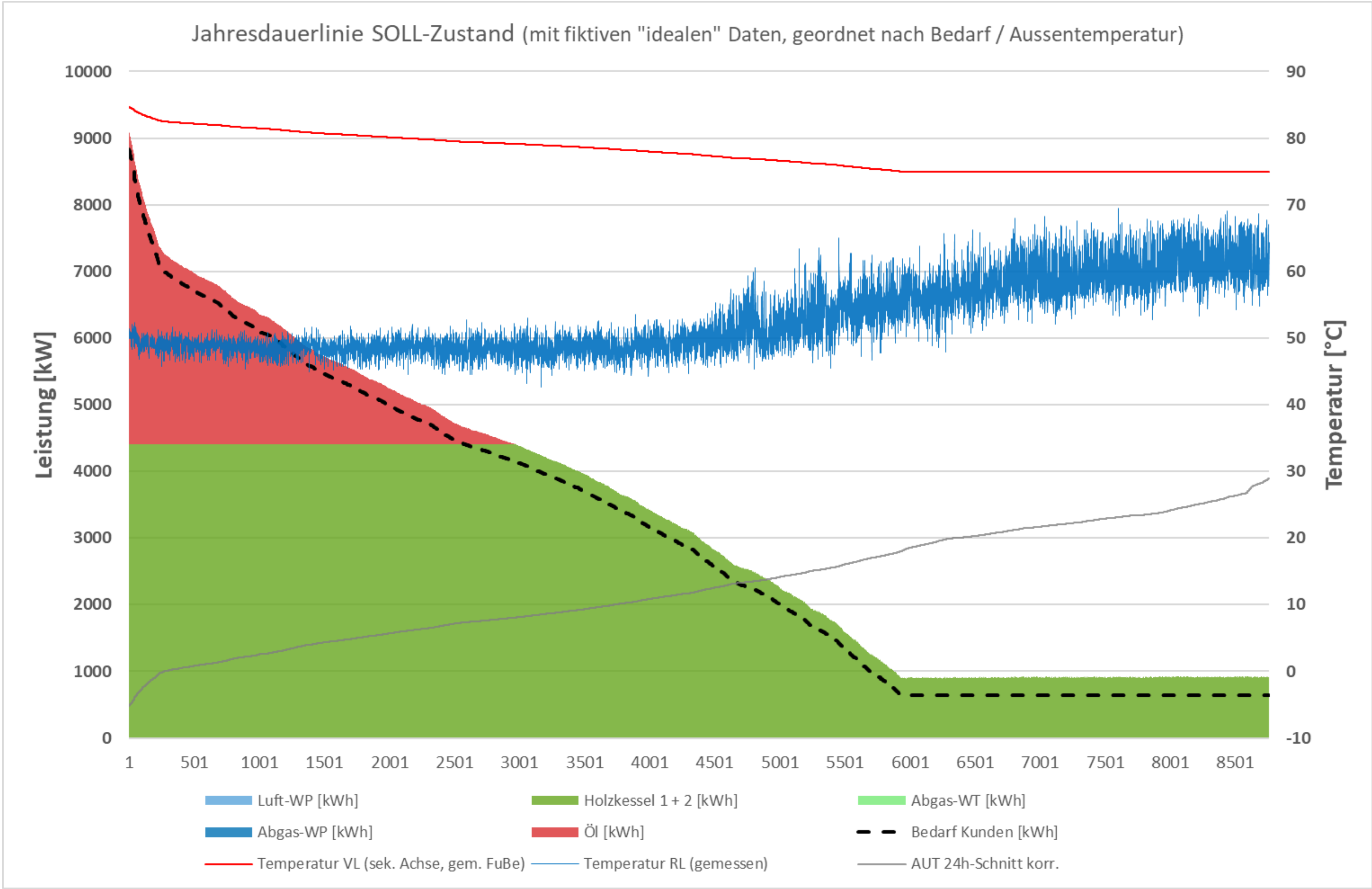
- Produktion: ~14 GWh
- Leistungsspitze: 4'470 kW
- Bedarfsspitze¹: 4'340 kW
- Holzbedarf: ~6'000 t/a
- Ölbedarf: ~19'000 l/a
- Strombedarf²: 0 MWh/a

¹ Netzleistung minus Netzverluste geschätzt

² exkl. Hilfsenergie

– **Anteil fossil: 1.2%**

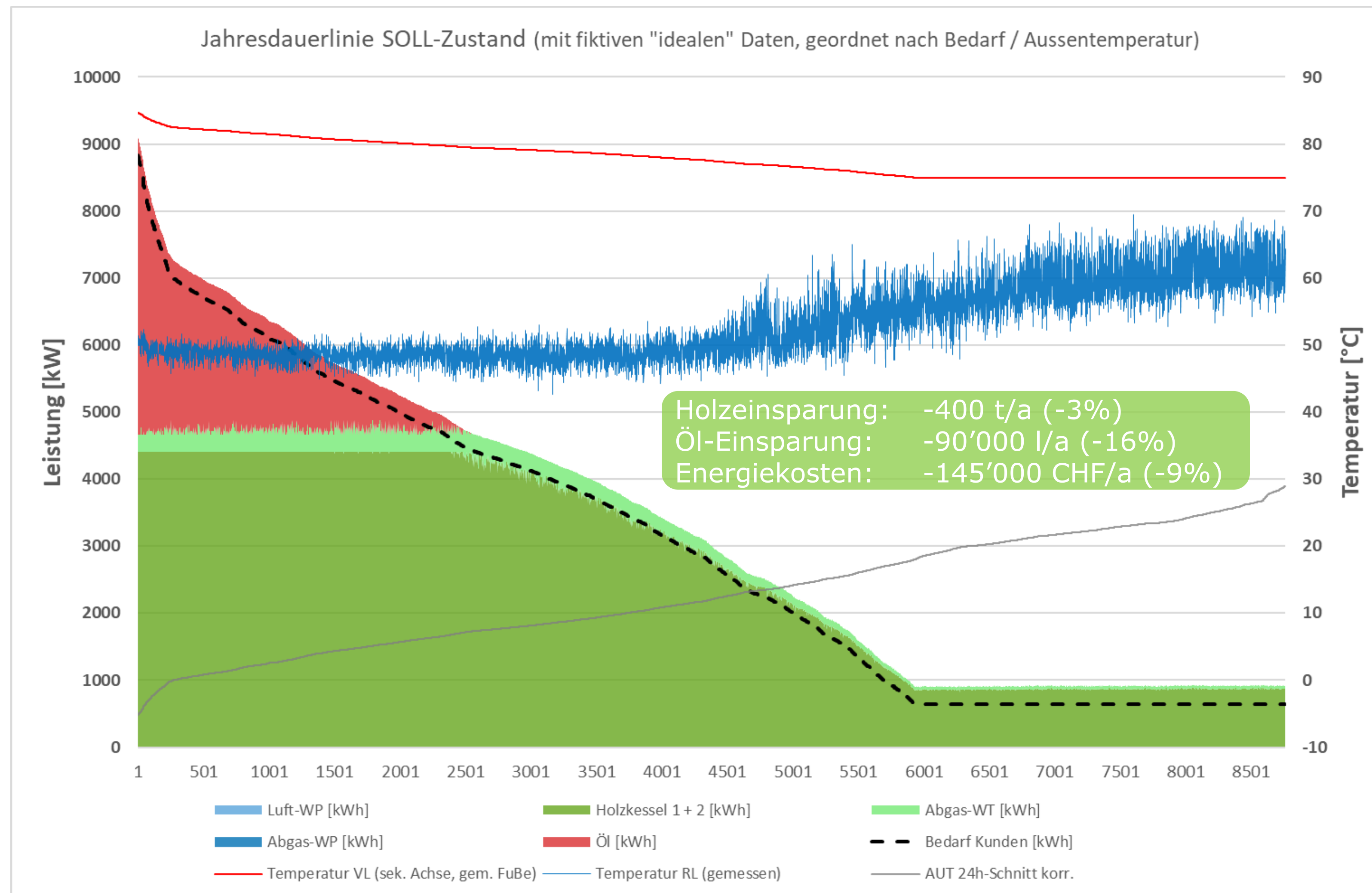
Variante 2 – Mit Netzausbau



- Installierte Nutzleistung:
 - Holzkessel 1: 3'200 kW
 - Holzkessel 2: 1'200 kW
 - Abgas-WT: 0 kW
 - WP (Rauch/AUL): 0 kW
 - Ölkessel: 4'700kW
 - Produktion: ~28.5 GWh (+103%_{ggü. IST})
 - Leistungsspitze: 9'100 kW
 - Bedarfsspitze¹: 8'830 kW
 - Holzbedarf: ~10'400 t/a
 - Ölbedarf: ~500'000 l/a
 - Strombedarf²: 0 MWh/a
- ¹ Netzleistung minus Netzverluste geschätzt
² exkl. Hilfsenergie

– Anteil fossil: 17%

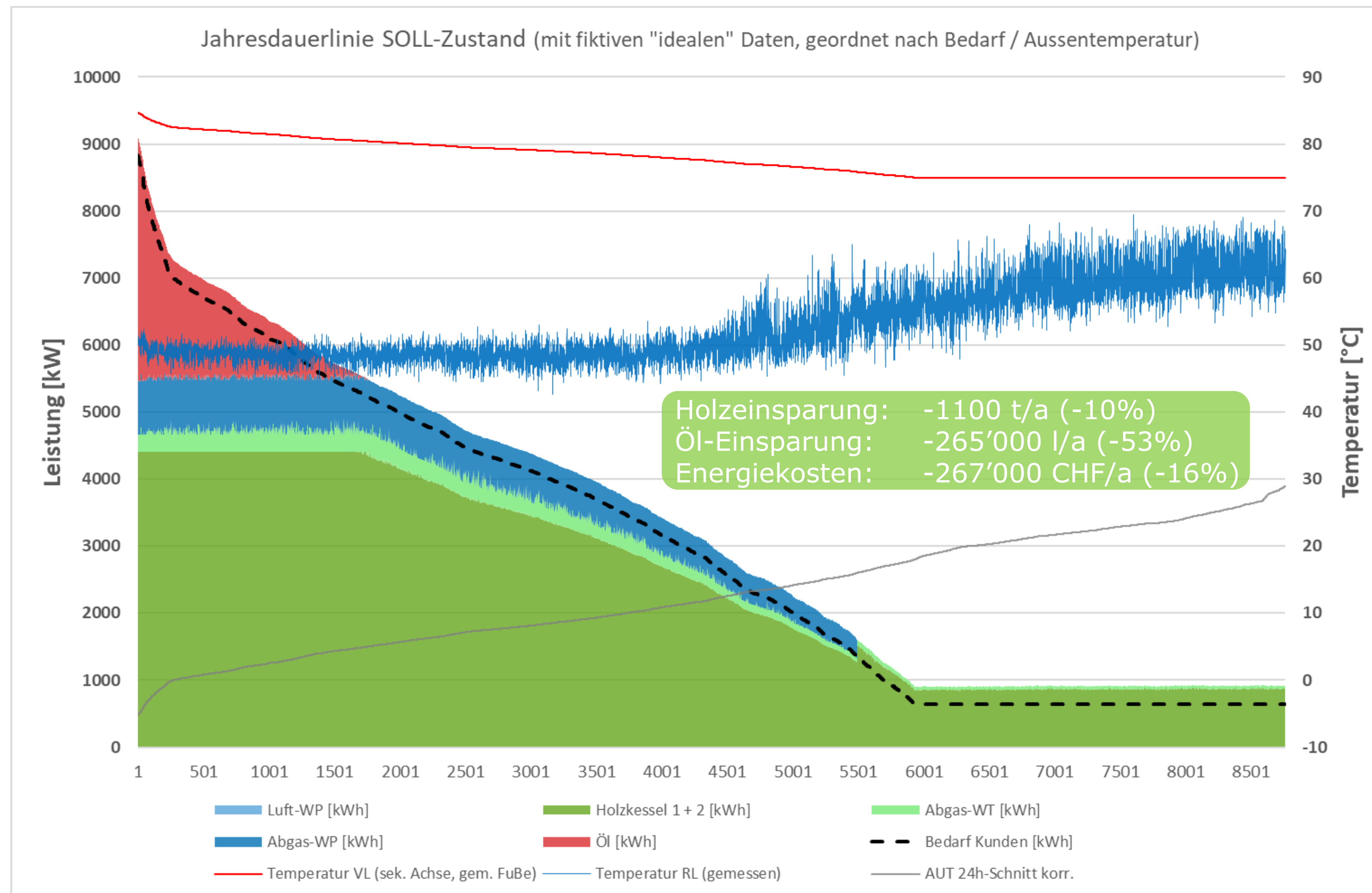
Variante 2a) - Kondensierender Abgaswärmetauscher



- Installierte Nutzleistung:
 - Holzkessel 1: 3'200 kW
 - Holzkessel 2: 1'200 kW
 - Abgas-WT: **500 kW**
 - WP (Rauch/AUL): 0 kW
 - Ölkessel: 4'700kW
 - Produktion: ~28.5 GWh (+103%_{ggü. IST})
 - Leistungsspitze: 9'100 kW
 - Bedarfsspitze¹: 8'830 kW
 - Holzbedarf: ~10'000 t/a
 - Ölbedarf: ~410'000 l/a
 - Strombedarf²: 0 MWh/a
- ¹ Netzleistung minus Netzverluste geschätzt
² exkl. Hilfsenergie

– **Anteil fossil: 14%**

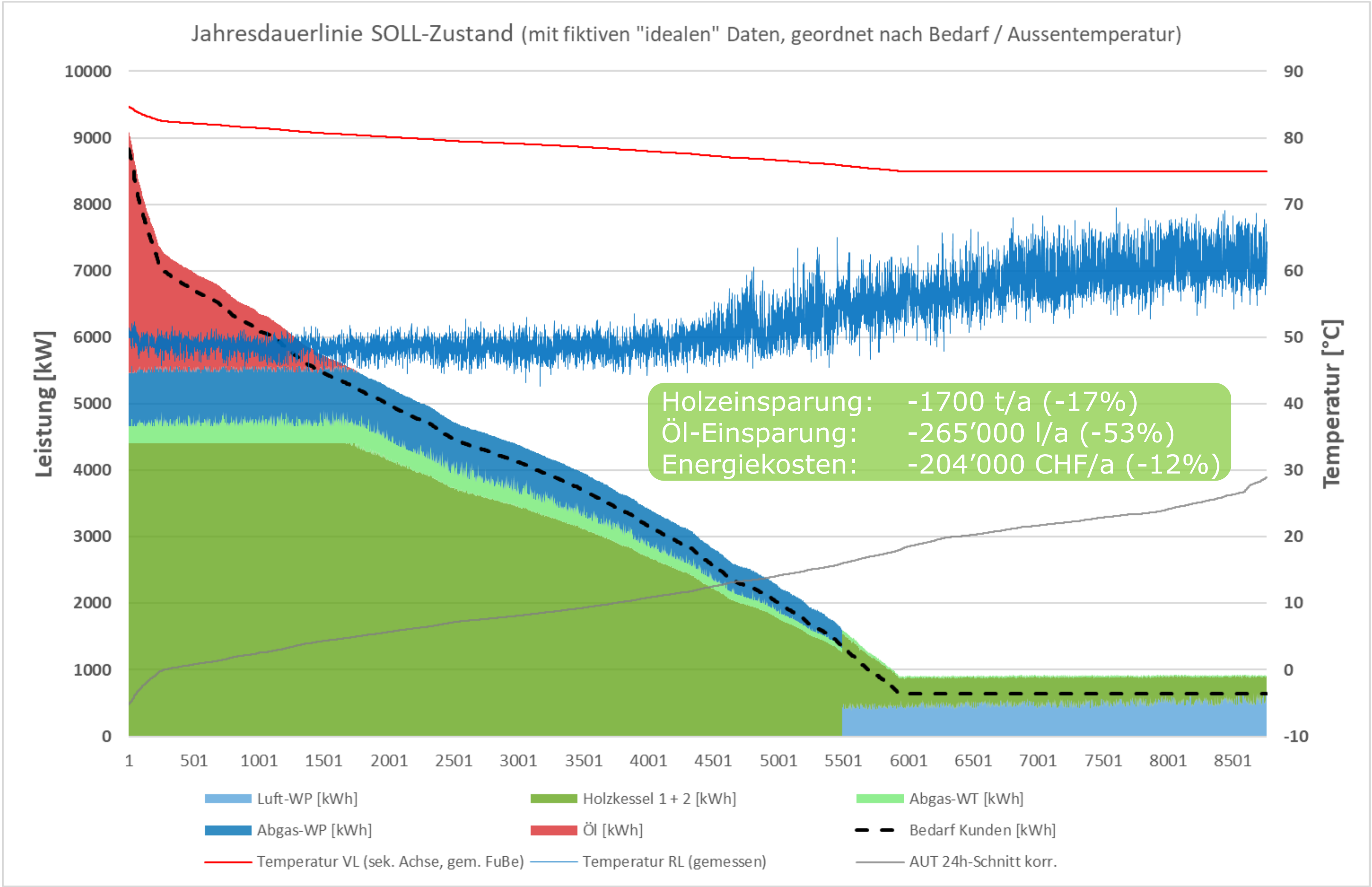
Variante 2b) – Rauchgas-Kompressions-Wärmepumpe



- Installierte Nutzleistung:
 - Holzessel 1: 3'200 kW
 - Holzessel 2: 1'200 kW
 - Abgas-WT: **500 kW**
 - WP (Rauch): **800 kW**
 - Ölkessel: 4'700kW
 - Produktion: ~28.5 GWh (+103%_{ggü. IST})
 - Leistungsspitze: 9'100 KW
 - Bedarfsspitze¹: 8'830 kW
 - Holzbedarf: ~9'300 t/a
 - Ölbedarf: ~235'000 l/a
 - Strombedarf²: 550 MWh/a
- ¹ Netzleistung minus Netzverluste geschätzt
² exkl. Hilfsenergie

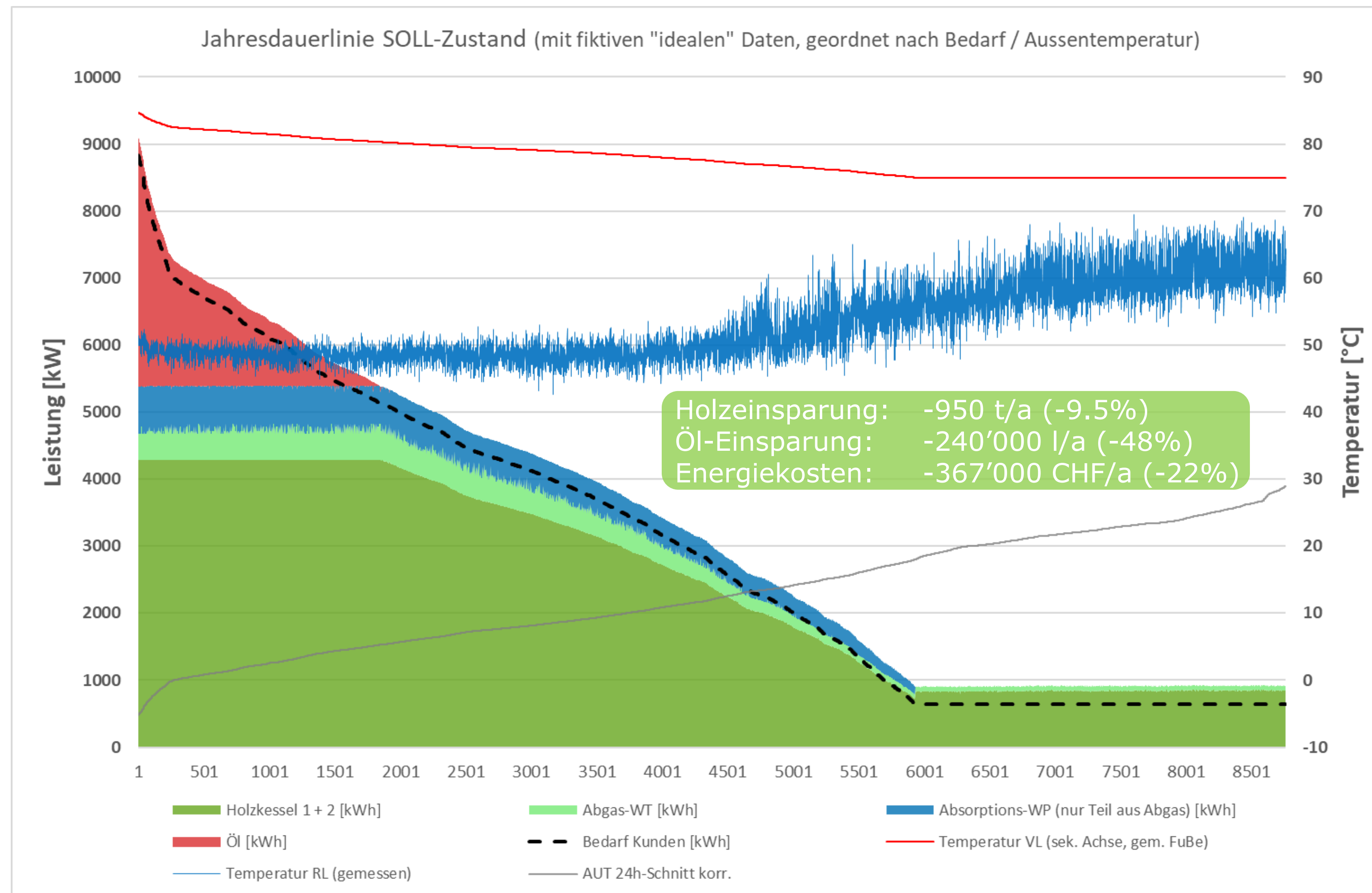
– **Anteil fossil: 8%**

Variante 2c) – Rauchgas/Luft-Kompressions-Wärmepumpe



- Installierte Nutzleistung:
 - Holzkessel 1: 3'200 kW
 - Holzkessel 2: 1'200 kW
 - Abgas-WT: **500 kW**
 - WP (Rauch/AUL): **800/467 kW**
 - Ölkessel: 4'700kW
 - Produktion: ~28.5 GWh (+103%_{ggü. IST})
 - Leistungsspitze: 9'100 kW
 - Bedarfsspitze¹: 8'830 kW
 - Holzbedarf: ~8'700 t/a
 - Ölbedarf: ~235'000 l/a
 - Strombedarf²: 1'040 MWh/a
- ¹ Netzleistung minus Netzverluste geschätzt
² exkl. Hilfsenergie
- **Anteil fossil: 8%**

Variante 2d) – Absorptions-Wärmepumpe



- Installierte Nutzleistung:
 - Holzessel 1: **3'110 kW**
 - Holzessel 2: **1'170 kW**
 - Abgas-WT: **550 kW**
 - Absorptions-WP: **700 kW¹**
 - Ölkessel: **4'700kW**
 - Produktion: ~28.5 GWh (+103%_{oggu. IST})
 - Leistungsspitze: 9'100 kW
 - Bedarfsspitze²: 8'830 kW
 - Holzbedarf: ~9'450 t/a
 - Ölbedarf: ~260'000 l/a
 - Strombedarf²: 45 MWh/a
- ¹ Verdampferleistung
² Netzleistung minus Netzverluste geschätzt
³ exkl. Hilfsenergie

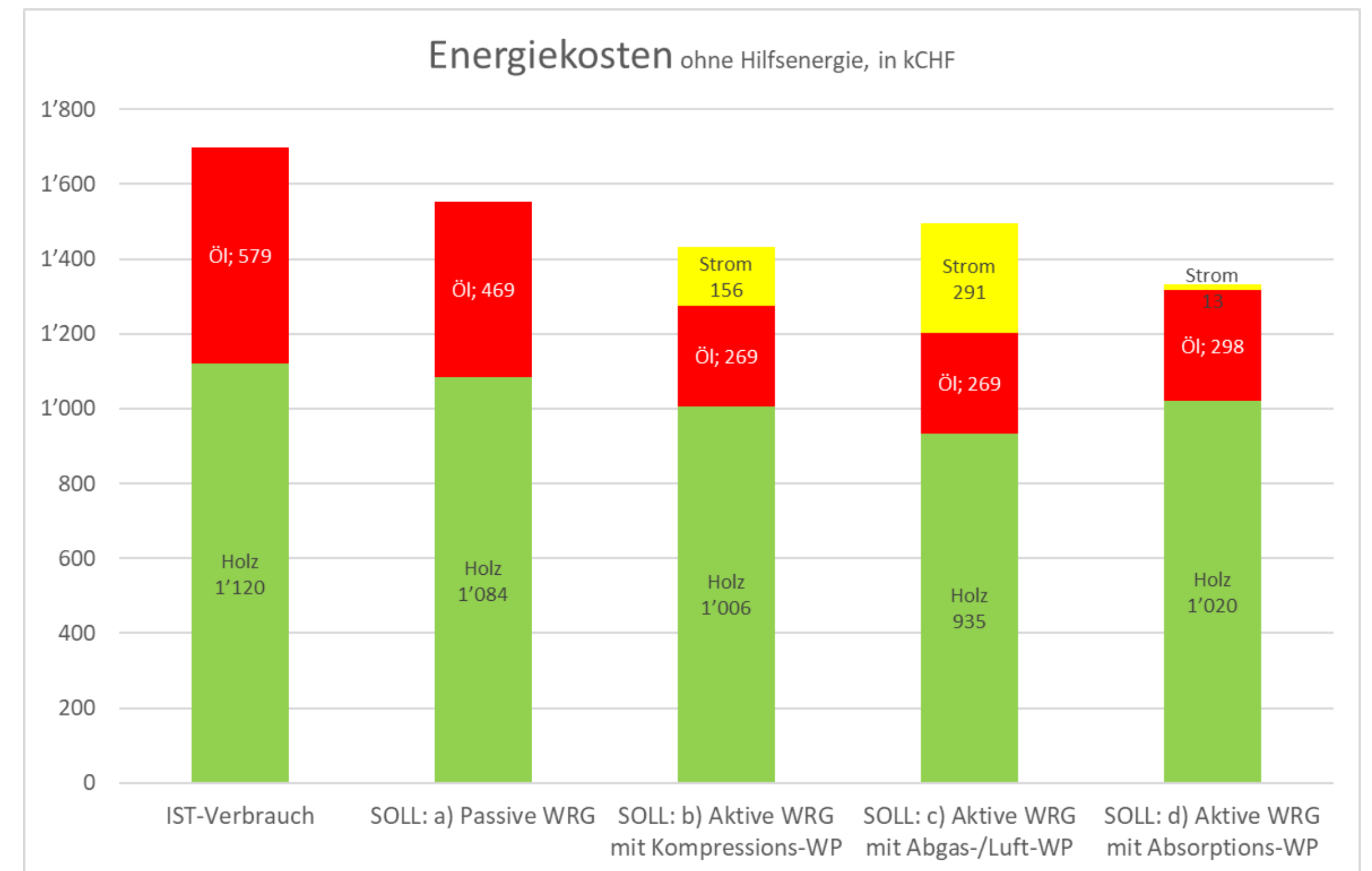
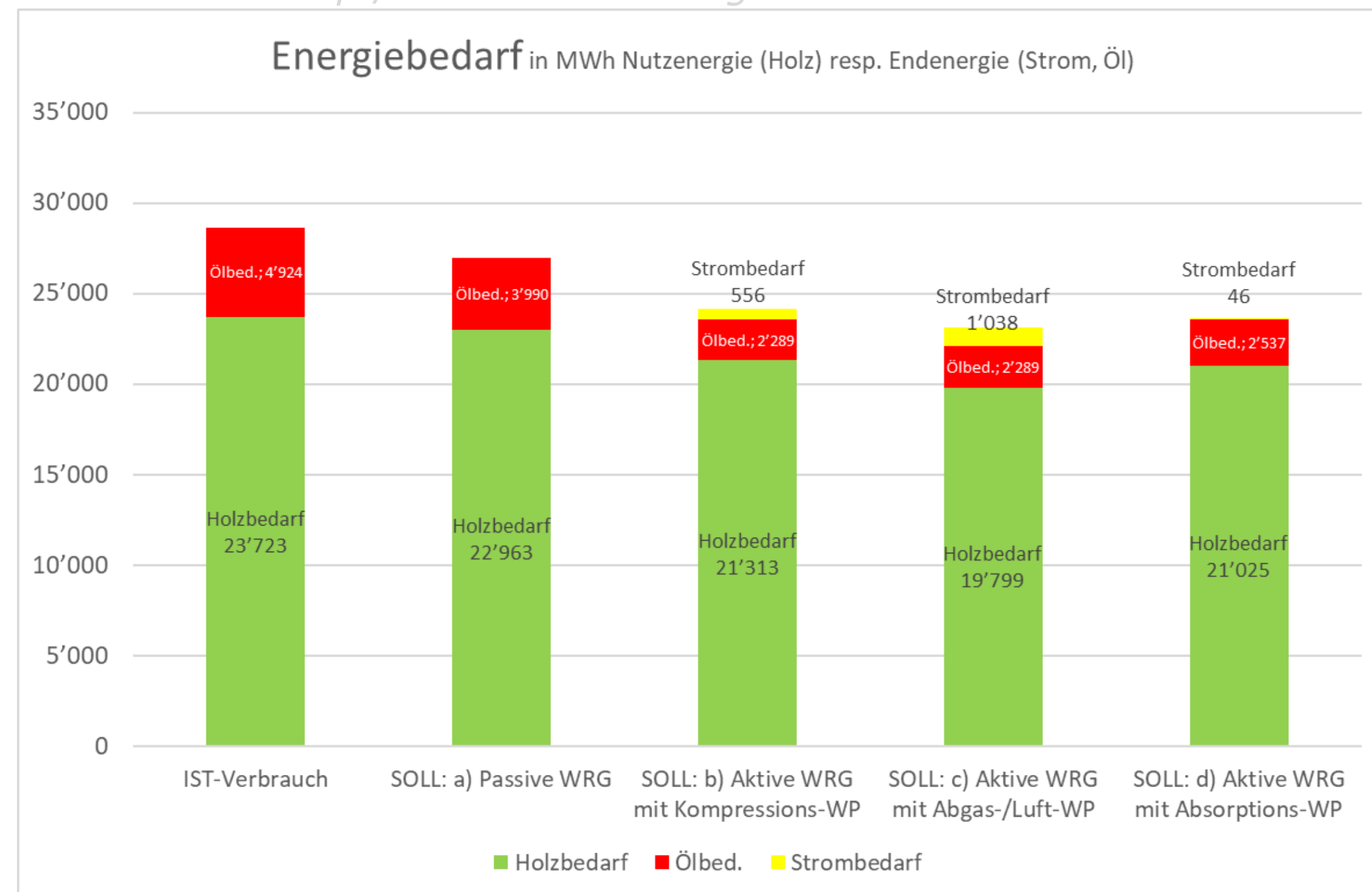
– **Anteil fossil: 9%**

Variante 2a-2d) Mit Netzausbau 1 – Energie- und Kostenbetrachtung

Der Gesamtenergiebedarf sinkt mit den Ausbausritten.

Aufgrund des hohen Strompreises hat die Variante «Absorptions-Wärmepumpe» die tiefsten Energiekosten.

Hinweis: Da der Wirkungsgrad des Kessels mit der Absorptions-WP sinkt, wurde der Holzpreis skaliert. Neu beträgt dieser 4.86 Rp./kWh_{Nutzenergie}; Öl wird mit 12 Rp./kWh berücksichtigt



Wirtschaftlichkeitsanalyse

Investition vs.
«Status quo»

Stufe 1: Nur Abgas-Wärmetauscher

Einsparung Energiekosten	145'625	CHF/a
Zusätzlicher Hilfsstrom	9'400	CHF/a
Betrieb- und Unterhaltskosten	3'000	CHF/a
Jährlicher Deckungsbeitrag	133'225	CHF/a

Investitionskosten	430'000	CHF
Laufzeit	15	Jahre
Zins	5.5%	
Annuität	10.0%	

Annuitätskosten (jährl. Kapitalkosten)	42'839	CHF/a
Amortisationszeit	3.7	Jahre
Jährlicher Überschuss	90'386	CHF/a
Maximale Investitionskosten	1'337'261	CHF

Fazit:
Die erste Stufe (kondensierender Abgas-WT) lohnt sich.
Der Abgas-Wärmetauscher darf bis zu 1340000 kosten.

Investition vs.
«Nur Abgas-WT»

Stufe 2: Abgas-Wärmepumpe vs. status quo

Einsparung Energiekosten	267'943	CHF/a
Zusätzlicher Hilfsstrom	18'900	CHF/a
Betrieb- und Unterhaltskosten	9'000	CHF/a
Jährlicher Deckungsbeitrag	240'043	CHF/a

Investitionskosten	1'400'000	CHF
Laufzeit	15	Jahre
Zins	5.5%	
Annuität	10.0%	

Annuitätskosten (jährl. Kapitalkosten)	139'476	CHF/a
Amortisationszeit	7.2	Jahre
Jährlicher Überschuss	100'567	CHF/a
Maximale Investitionskosten	2'409'451	CHF
Break-Even Strompreis	44.1	Rp./Kwh

Fazit:
Die zweite Stufe (Abgas-Wärmepumpe) lohnt sich.
Die Abgas-Wärmepumpe darf bis zu 2410000 kosten.
Mit den gewählten Investitionskosten müsste der Strompreis bei 44.1 Rp./kWh liegen, damit sich die Investition lohnt.

Stufe 2: Abgas-Wärmepumpe vs. nur Abgas-WT

Einsparung Energiekosten ggü. Stufe 1	122'318	CHF/a
Zusätzlicher Hilfsstrom	9'500	CHF/a
Betrieb- und Unterhaltskosten	6'000	CHF/a
Jährlicher Deckungsbeitrag	106'818	CHF/a

Investitionskosten (zusätzlich)	970'000	CHF
Laufzeit	15	Jahre
Zins	5.5%	
Annuität	10.0%	

Annuitätskosten (jährl. Kapitalkosten)	96'637	CHF/a
Amortisationszeit	12.9	Jahre
Jährlicher Überschuss	10'181	CHF/a
Maximale Investitionskosten	1'072'191	CHF
Break-Even Strompreis	29.7	Rp./Kwh

Fazit:
Die zweite Stufe (Abgas-Wärmepumpe) lohnt sich.
Die Abgas-Wärmepumpe darf bis zu 1070000 kosten.
Mit den gewählten Investitionskosten müsste der Strompreis bei 29.7 Rp./kWh liegen, damit sich die Investition lohnt.

Stufe 3: Abgas/Luft-Wärmepumpe vs. status quo

Einsparung Energiekosten	204'300	CHF/a
Zusätzlicher Hilfsstrom	23'650	CHF/a
Betrieb- und Unterhaltskosten	12'000	CHF/a
Jährlicher Deckungsbeitrag	168'650	CHF/a

Investitionskosten	1'750'000	CHF
Laufzeit	15	Jahre
Zins	5.5%	
Annuität	10.0%	

Annuitätskosten (jährl. Kapitalkosten)	174'345	CHF/a
Amortisationszeit	15.8	Jahre
Jährlicher Überschuss	-5'695	CHF/a
Maximale Investitionskosten	1'692'833	CHF
Break-Even Strompreis	27.3	Rp./Kwh

Fazit:
Die dritte Stufe (Abgas/Luft-Wärmepumpe) lohnt sich nicht.
Die Abgas-Wärmepumpe darf bis zu 1690000 kosten.
Mit den gewählten Investitionskosten müsste der Strompreis bei 27.3 Rp./kWh liegen, damit sich die Investition lohnt.

Stufe 3: Abgas/Luft-Wärmepumpe vs. nur Abgas-WT

Einsparung Energiekosten	58'674	CHF/a
Zusätzlicher Hilfsstrom	14'250	CHF/a
Betrieb- und Unterhaltskosten	9'000	CHF/a
Jährlicher Deckungsbeitrag	35'424	CHF/a

Investitionskosten (zusätzlich)	1'320'000	CHF
Laufzeit	15	Jahre
Zins	5.5%	
Annuität	10.0%	

Annuitätskosten (jährl. Kapitalkosten)	131'506	CHF/a
Amortisationszeit	DB zu klein	Jahre
Jährlicher Überschuss	-96'082	CHF/a
Maximale Investitionskosten	355'573	CHF
Break-Even Strompreis	19.3	Rp./Kwh

Fazit:
Die dritte Stufe (Abgas/Luft-Wärmepumpe) lohnt sich nicht.
Die Abgas-Wärmepumpe darf bis zu 360000 kosten.
Mit den gewählten Investitionskosten müsste der Strompreis bei 19.3 Rp./kWh liegen, damit sich die Investition lohnt.

Absorptions-WP vs. status quo

Einsparung Energiekosten	367'504	CHF/a
Zusätzlicher Hilfsstrom	15'900	CHF/a
Betrieb- und Unterhaltskosten	15'000	CHF/a
Jährlicher Deckungsbeitrag	336'604	CHF/a

Investitionskosten	1'250'000	CHF
Laufzeit	15	Jahre
Zins	5.5%	
Investitionskosten (zusätzlich)	10.0%	

Annuitätskosten (jährl. Kapitalkosten)	124'532	CHF/a
Amortisationszeit	4.3	Jahre
Jährlicher Überschuss	212'072	CHF/a
Maximale Investitionskosten	3'378'695	CHF

Fazit:
Die zweite Stufe (Absorptions-Wärmepumpe) lohnt sich.
Die Abgas-Wärmepumpe darf bis zu 3380000 kosten.

Absorptions-WP vs. nur Abgas-WT

Einsparung Energiekosten	145'625	CHF/a
Zusätzlicher Hilfsstrom	6'500	CHF/a
Betrieb- und Unterhaltskosten	12'000	CHF/a
Jährlicher Deckungsbeitrag	127'125	CHF/a

Investitionskosten (zusätzlich)	820'000	CHF
Laufzeit	15	Jahre
Zins	5.5%	
Annuität	10.0%	

Annuitätskosten (jährl. Kapitalkosten)	81'693	CHF/a
Amortisationszeit	8.2	Jahre
Jährlicher Überschuss	45'432	CHF/a
Maximale Investitionskosten	1'276'031	CHF

Fazit:
Die zweite Stufe (Absorptions-Wärmepumpe) lohnt sich.
Die Abgas-Wärmepumpe darf bis zu 1280000 kosten.

Wirtschaftlichkeitsanalyse

Absorptions-WP vs. status quo

Einsparung Energiekosten	367'504	CHF/a
Zusätzlicher Hilfsstrom	15'900	CHF/a
Betrieb- und Unterhaltskosten	15'000	CHF/a
Jährlicher Deckungsbeitrag	336'604	CHF/a

Investitionskosten	1'250'000	CHF
Laufzeit	15	Jahre
Zins	5.5%	
Investitionskosten (zusätzlich)	10.0%	

Annuitätskosten (jährl. Kapitalkosten)	124'532	CHF/a
Amortisationszeit	4.3	Jahre
Jährlicher Überschuss	212'072	CHF/a
Maximale Investitionskosten	3'378'695	CHF

Fazit:

Die zweite Stufe (Absorptions-Wärmepumpe) lohnt sich.
Die Abgas-Wärmepumpe darf bis zu 3380000 kosten.

Danke für Ihre Aufmerksamkeit!

Hochschule Luzern
Technik & Architektur
Institut für Gebäudetechnik und Energie IGE
Timotheus Zehnder
Dozent

T direkt +41 41 349 37 31
timotheus.zehnder@hslu.ch