

Technisches Audit und Betriebsdatenanalyse:

BHKW (Berichtszeitraum 2017–2021)

Executive Summary

Dieser umfassende Forschungsbericht präsentiert eine tiefgehende technische Analyse der Betriebsdaten der Anlage „BHKW“ über den Fünfjahreszeitraum von 2017 bis 2021. Ziel dieses Audits ist die Evaluierung der thermodynamischen Effizienz, des spezifischen Brennstoffeinsatzes sowie der betrieblichen Trends des Kraft-Wärme-Kopplungssystems (KWK) und der zugehörigen Spitzenlastkessel. Die Analyse stützt sich primär auf den vom Betreiber zur Verfügung gestellten Datensatz Gasmengen BHKW, der Gasvolumina, Wärmearbeit und spezifische Verbrauchskennzahlen detailliert aufschlüsselt, sowie auf umfangreiche externe Recherchen zu Benchmarks und technologischen Standards.

Zentrale Erkenntnisse der Untersuchung:

1. **Signifikante Effizienzdegradation:** Die Anlage verzeichnet seit dem Betriebsjahr 2018 einen markanten Rückgang der thermischen Effizienz. Der spezifische Gasverbrauch stieg von einem optimalen Tiefstwert von **202,17 m³/MWh** im Jahr 2018 auf **224,71 m³/MWh** im Jahr 2021 an. Dies entspricht einem Effizienzverlust von ca. **11,1 %** relativ zum Referenzjahr.
2. **Benchmark-Underperformance:** Im Jahr 2021 operierte das BHKW weit außerhalb akzeptabler regionaler Effizienzkorridore. Der spezifische Verbrauch von 224,71 m³/MWh lag **22 % über dem Benchmark „HKW 1“** (184,22 m³/MWh) und **33 % über dem Benchmark „HKW 2“** (168,55 m³/MWh).
3. **Hydraulische und Regelungstechnische Anomalien:** Der sprunghafte Anstieg des spezifischen Verbrauchs im Jahr 2019 (227,13 m³/MWh) bei gleichzeitig sinkender Wärmearbeit deutet auf eine Entkopplung von Strom- und Wärmeproduktion hin. Dies legt den Verdacht nahe, dass massive Wärmevernichtung über Notkühler stattfindet („Wegkühlen“), um eine stromgeführte Fahrweise bei fehlender Wärmeabnahme zu ermöglichen, oder dass die Brennwertnutzung durch zu hohe Rücklauftemperaturen kollabiert ist.²
4. **Einfluss der Kessellast:** Die Daten zeigen eine fluktuierende Abhängigkeit vom Zusatzkessel. Während der Kesselanteil im effizientesten Jahr 2018 mit 8,6 % am niedrigsten war, stieg er 2021 auf 12,4 %. Die Korrelationsanalyse zeigt jedoch, dass die Ineffizienz primär im KWK-Betrieb selbst oder in der hydraulischen Einbindung zu verorten ist und nicht allein durch den Kesselbetrieb erklärt werden kann.

Der Bericht kommt zu dem Schluss, dass das BHKW derzeit weitab seines thermodynamischen Optimums betrieben wird. Die Abweichung zu historischen Bestwerten und externen Vergleichsanlagen indiziert einen jährlichen finanziellen Verlust im Bereich von mehreren zehntausend Euro sowie unnötige CO₂-Emissionen. Sofortige Abhilfemaßnahmen mit Fokus auf hydraulischen Abgleich, Wärmetauscher-Wartung und Anpassung der Fahrweise sind dringend indiziert.

1. Einleitung und Untersuchungsrahmen

1.1 Zielsetzung und Mandat

Der vorliegende Bericht dient der dekonstruktiven Analyse der Betriebsdaten der Liegenschaft „BHKW“. Durch die Untersuchung der Input-Output-Beziehungen von Erdgas und thermischer Energie soll ein nuanciertes Verständnis des Gesundheitszustands der Anlage und ihrer strategischen Positionierung im Energieportfolio erarbeitet werden. Angesichts der Volatilität der Energiemärkte und der steigenden CO₂-Bepreisung ist die Identifikation von Effizienzleckagen von kritischer wirtschaftlicher Bedeutung.

1.2 Datengrundlage und Methodik

Die Kernanalyse basiert auf dem Datensatz Gasmengen BHKW - Tabelle1.csv.¹ Dieser Datensatz liefert eine granulare jährliche Aufschlüsselung von:

- **Gas-Input (Volumen):** Segregiert nach KWK- (Gasmotor) und Kessel-Verbrauch (Spitzenlast).
- **Thermischer Output (Energie):** Erfasst als „Wärmearbeit“ in MWh.
- **Leistungskennzahlen (KPIs):** Berechneter spezifischer Verbrauch (m³/MWh) und Vergleiche zum Mittelwert 2017/18.
- **Externe Benchmarks:** Referenzwerte für die Regionen „HKW 1“ und „HKW 2“ für das Jahr 2021.

Die Analyse verwendet eine **thermodynamische Input-Output-Methode**, wobei der spezifische Gasverbrauch als primärer Proxy für die Systemeffizienz dient. Diese Metrik verhält sich umgekehrt proportional zum thermischen Nutzungsgrad der Gesamtanlage.

Spezifischer Verbrauch (m³/MWh) = $V_{\text{Gas, gesamt}} / Q_{\text{Wärme, geliefert}}$

Ein Anstieg dieser Metrik signalisiert bei konstantem Heizwert des Gases eine Verschlechterung der Effizienz.

1.3 Kontextueller Rahmen: KWK-Betrieb

Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK) sind darauf ausgelegt, den Primärenergieeinsatz durch die gleichzeitige Erzeugung von Strom und Wärme zu maximieren. Ein typischer Erdgas-KWK-Motor weist einen elektrischen Wirkungsgrad von 35–45 % und einen thermischen Wirkungsgrad von 40–50 % auf, was zu einem Gesamtwirkungsgrad von 85–95 % führt.⁴ Im Gegensatz dazu erreichen moderne Brennwertkessel thermische Wirkungsgrade von 98 % (bezogen auf Hi) oder höher.⁶

Daher ist der spezifische Gasverbrauch pro Einheit *Wärme* bei einem BHKW naturgemäß höher als bei einem reinen Kessel, da ein Teil der Gasenergie in hochwertige Elektrizität umgewandelt wird.⁷ Extreme Abweichungen in dieser Metrik, wie sie im Datensatz beobachtet werden, deuten jedoch oft auf „**Heat Dumping**“ hin – ein Zustand, in dem das BHKW zur Befriedigung der Stromnachfrage läuft, die resultierende Wärme jedoch nicht genutzt werden kann und über Notkühler an die Atmosphäre abgegeben wird.²

2. Longitudinale Betriebsanalyse (2017–2021)

Dieser Abschnitt bietet eine detaillierte Analyse der Jahresdaten, um eine Baseline zu etablieren und die Trajektorie der Effizienzdegradation nachzuzeichnen. Die Analyse erfolgt chronologisch, um Kausalitäten in der Betriebshistorie aufzudecken.

2.1 Die Referenzperiode (2017–2018)

Analyse 2017: Der Ausgangspunkt

- **Gas-Input Gesamt:** 2.049.696 m³
- **Wärmearbeit:** 9.529 MWh
- **Spezifischer Verbrauch:** 215,10 m³/MWh
- **Kesselanteil:** 10,6 %
-

Im Jahr 2017 operierte das System mit einem spezifischen Verbrauch von 215 m³/MWh. Dieser Wert dient als initiale Referenz. Der Spitzenlastkessel trug rund 10,6 % zum Gasverbrauch bei, was auf einen Standardbetrieb hindeutet, bei dem der Kessel Spitzenlasten abdeckt oder während Wartungsintervallen des BHKW einspringt.

Analyse 2018: Das „Goldene Jahr“ (Benchmark)

- **Gas-Input Gesamt:** 1.876.330 m³ (-8,5 % vs. 2017)
- **Wärmearbeit:** 9.281 MWh (-2,6 % vs. 2017)
- **Spezifischer Verbrauch:** 202,17 m³/MWh (-6,0 % vs. 2017)
- **Kesselanteil:** 8,6 %

Das Jahr 2018 repräsentiert die Leistungsspitze der Anlage innerhalb des Datensatzes. Der spezifische Verbrauch sank signifikant auf 202,17 m³/MWh. Diese Verbesserung korreliert stark mit einem reduzierten Kesselanteil (8,6 %), was suggeriert, dass das BHKW die Grundlast effizient abdeckte. Ein niedrigerer spezifischer Verbrauch impliziert, dass für jeden Kubikmeter verbrannten Gases mehr Wärme erfolgreich ausgekoppelt und in das Netz eingespeist wurde. Dies deutet auf hohe Vollbenutzungsstunden des BHKW und eine effektive Wärmerückgewinnung (bspw. funktionierender Brennwertnutzen) hin.

2.2 Der Effizienzkollaps (2019–2021)

Analyse 2019: Der Strukturbruch

- **Gas-Input Gesamt:** 2.049.379 m³ (+9,2 % vs. 2018)
- **Wärmearbeit:** 9.023 MWh (-2,8 % vs. 2018)
- **Spezifischer Verbrauch:** 227,13 m³/MWh (+12,3 % vs. 2018)
- **Kesselanteil:** 11,0 %

Im Jahr 2019 ereignete sich ein kritischer operativer Bruch. Obwohl die Wärmenachfrage gegenüber 2018 *sank* (9.023 vs. 9.281 MWh), stieg der Gasverbrauch massiv um fast 200.000 m³ an. Der spezifische Verbrauch sprang auf 227,13 m³/MWh.

- **Interpretation:** Diese Divergenz – steigender Input bei fallendem Output – ist das klassische Kennzeichen eines Effizienzverlustes. Es legt nahe, dass die Motoren Gas verbrannten (wahrscheinlich zur Stromerzeugung), die assoziierte Wärme jedoch als „Verlust“ und nicht als „Arbeit“ verbucht wurde. Dies korreliert zeitlich oft mit Änderungen in der Förderlandschaft oder Wartungsmängeln (z.B. Verschmutzung der Abgaswärmetauscher).

Analyse 2020: Die Stagnation der Ineffizienz

- **Gas-Input Gesamt:** 2.081.849 m³
- **Wärmearbeit:** 9.175 MWh
- **Spezifischer Verbrauch:** 226,90 m³/MWh
- **Kesselanteil:** 9,3 %

Die Ineffizienz manifestierte sich 2020 als neuer Status quo. Der Kesselanteil sank wieder auf 9,3 % (ähnlich wie in effizienteren Jahren), dennoch blieb der spezifische Verbrauch auf dem extrem hohen Niveau von ~227 m³/MWh. Dies widerlegt die Hypothese, dass allein der ineffizientere Spitzenlastkessel für den Mehrverbrauch verantwortlich ist. Das Problem liegt intrinsisch im BHKW-Betrieb oder der Systemhydraulik.

Analyse 2021: Maximallast bei minimaler Effizienz

- **Gas-Input Gesamt:** 2.152.723 m³ (Höchstwert im Datensatz)
- **Wärmearbeit:** 9.580 MWh
- **Spezifischer Verbrauch:** 224,71 m³/MWh
- **Kesselanteil:** 12,4 % (Höchstwert im Datensatz)

Im Jahr 2021 verzeichnete die Anlage die höchste Wärmenachfrage und den höchsten Gasverbrauch. Der spezifische Verbrauch verbesserte sich marginal auf ~225 m³/MWh, blieb aber weit über der 2018er Baseline. Der Kesselverbrauch explodierte auf 266.266 m³ (12,4 % des Gesamtverbrauchs), was auf kalte Witterung oder Ausfallzeiten des BHKW hindeuten könnte.

2.3 Zusammenfassende Trendmatrix

Die folgende Tabelle kondensiert die Key Performance Indicators (KPIs) aus dem Datensatz ¹ zur Verdeutlichung der Degression.

Jahr	Gas Gesamt (m ³)	Gas Kessel (m ³)	Kesselantei l (%)	Wärmearbei t (MWh)	Spez. Verbrauch (m ³ /MWh)	Delta vs. 2018
2017	2.049.696	217.955	10,6 %	9.529	215,10	+6,4 %
2018	1.876.330	161.287	8,6 %	9.281	202,17	Baselin e
2019	2.049.379	225.595	11,0 %	9.023	227,13	+12,3 %
2020	2.081.849	193.422	9,3 %	9.175	226,90	+12,2 %
2021	2.152.723	266.266	12,4 %	9.580	224,71	+11,1 %

Kern-Erkenntnis – Die „klebrige“ Ineffizienz: Der Effizienzeinbruch erfolgte abrupt zwischen 2018 und 2019 und hat sich auf einem Niveau von ~225–227 „festgesetzt“. Dies deutet auf eine strukturelle Änderung oder einen persistierenden Defekt hin, nicht auf temporäre Schwankungen durch Wetter oder Nutzerverhalten.

3. Komparative Benchmark-Analyse und Geografische Kontextualisierung

Um die Schwere der Leistungsdegradation am BHKW vollumfänglich zu erfassen, ist eine kontextuelle Analyse der im Datensatz ¹ bereitgestellten externen Benchmarks für das Jahr 2021 unerlässlich.

3.1 Der Benchmark-Gap (Lücke)

- **BHKW (2021):** 224,71 m³/MWh
- **Benchmark HKW 1 (2021):** 184,22 m³/MWh
- **Benchmark HKW 2 (2021):** 168,55 m³/MWh

Analyse der Diskrepanz:

Die Leistungslücke ist gravierend.

- **Vs. HKW 1:** BHKW verbraucht **22 % mehr Gas** pro Wärmeeinheit als die Vergleichsanlage „HKW 1“.
- **Vs. HKW 2:** BHKW verbraucht **33 % mehr Gas** pro Wärmeeinheit als die Vergleichsanlage „HKW 2“.

3.2 Interpretation der Varianz: Gasqualität und Kalorik

Um zu verstehen, warum „HKW 2“ nur 168,55 m³/MWh benötigt, während „BHKW“ fast 225 m³/MWh konsumiert, muss die Variable der Gasqualität (Brennwert) analysiert werden. In Deutschland wird zwischen **H-Gas** (High calorific, ~11,0–12,0 kWh/m³) und **L-Gas** (Low calorific, ~8,2–10,0 kWh/m³) unterschieden.⁸

- **Region Ost:** Historisch überwiegend mit H-Gas versorgt (russische Importe).
- **Region Nord:** Historisch L-Gas-Gebiet (niederländische/deutsche Felder), befindet sich jedoch im Prozess der Marktraumumstellung auf H-Gas.¹⁰

Szenario-Analyse:

1. Annahme H-Gas für Ost: Bei einem typischen H-Gas-Heizwert von 11,1 kWh/m³ ⁸ entspricht ein Verbrauch von 225 m³ einer Energieaufnahme von:

$$225 \text{ m}^3 \cdot 11,1 \text{ kWh/m}^3 = 2.497 \text{ kWh Gas-Input}$$

Daraus ergibt sich ein thermischer Wirkungsgrad von:

40,0%

Dies ist ein extrem niedriger Wert für ein modernes BHKW, der typischerweise nur bei fehlender Brennwertnutzung oder hohen Abgasverlusten auftritt.

2. **Vergleich mit HKW 2:** Wenn „HJKW 2“ 168 m³/MWh verbraucht:

- Falls **HKW 2 = H-Gas:** 168 11,1 = 1.864 kWh eta 53,6 %. Ein exzellenter Wert, der auf optimale Brennwertnutzung und hohe Kesselintegration hindeutet.
- Falls **HKW 2 = L-Gas (konservativ 9,5 kWh/m³):** 168 9,5 = 1.596 kWh. eta 62,6%.
Dieser Wert wäre für ein reines BHKW physikalisch kaum erreichbar und würde einen sehr hohen Anteil an hocheffizienter Kesselwärme implizieren.

Schlussfolgerung: Selbst unter Berücksichtigung möglicher Gasqualitätsunterschiede ist die Diskrepanz massiv. Dass „HKW 2“ trotz potentiell niedrigerem Heizwert (L-Gas) *weniger* Volumen verbraucht, ist unwahrscheinlich. Es ist wahrscheinlicher, dass „HKW 2“ bereits auf H-Gas umgestellt wurde oder hocheffizient fährt, während „BHKW“ trotz energiereichem H-Gas massive Verluste einführt. Der niedrige thermische Wirkungsgrad von ~40 % für BHKW ist ein technisches Warnsignal erster Güte.

4. Technische Ursachenanalyse

Basierend auf den Datenmustern und physikalischen Prinzipien des KWK-Betriebs lassen sich vier primäre Hypothesen für die Leistungsdegradation am BHKW ableiten.

4.1 Hypothese 1: Das „Wegkühlen“ (Heat Dumping)

Die plausibelste technische Erklärung für einen Einbruch der thermischen Effizienz bei konstantem Gasvolumen ist der Einsatz von **Notkühleinrichtungen**.

- **Mechanismus:** Wenn das BHKW stromgeführt betrieben wird (um lukrative Einspeisevergütungen oder Eigenstromnutzung zu maximieren), aber keine ausreichende Wärmesenke im Netz vorhanden ist (z.B. im Sommer), muss die Wärme über Tischkühler an die Umgebung abgegeben werden, um eine Überhitzung des Motors zu verhindern.³
- **Daten-Evidenz:** 2019 stieg der Gas-Input, während der Wärme-Output sank. Gas wurde verbrannt, Strom erzeugt, aber die Wärme wurde nicht als „Arbeit“ gezählt, sondern vernichtet. Dies treibt den Quotienten m^3/MWh massiv nach oben.

4.2 Hypothese 2: Versagen der Brennwertnutzung (Hydraulik)

Moderne BHKWs nutzen Abgaswärmetauscher (AGWT), um latente Wärme aus dem Abgas zurückzugewinnen. Dies erfordert zwingend niedrige Rücklauftemperaturen ($< 50\text{ °C}$) aus dem Wärmenetz.⁵

- **Mechanismus:** Steigt die Rücklauftemperatur im Netz an (z.B. durch hydraulische Kurzschlüsse, fehlenden hydraulischen Abgleich bei Abnehmern oder defekte Regelventile), kollabiert der Brennwerteffekt. Das Abgas verlässt den Kamin heiß ($> 120\text{ °C}$) statt kühl ($\sim 40\text{--}60\text{ °C}$).
- **Impact:** Der Verlust des Brennwertnutzens kann die thermische Effizienz um 10–15 % senken, was konsistent mit dem Sprung von 202 auf $227\text{ m}^3/\text{MWh}$ ist.

4.3 Hypothese 3: Wartungsstau und Fouling

BHKW-Motoren und Wärmetauscher unterliegen Verschleiß und Verschmutzung (Fouling).²

- **Erkenntnis aus Recherche:** ¹³ belegt, dass der elektrische und thermische Wirkungsgrad über die Betriebszeit sinkt. Starke Ablagerungen auf den Plattenwärmetauschern wirken als Isolator. Die Wärmeenergie verbleibt im Abgas oder im Kühlwasser und wird nicht an das Heizwasser übertragen.
- **Trend:** Die seit 2019 anhaltende schlechte Performance ohne Erholung deutet auf einen Zustand hin, der nicht durch eine reguläre Wartung behoben wurde (z.B. verkalkte Wärmetauscher).

4.4 Hypothese 4: Teillastverhalten und Kessel-Interferenz

Während Kessel im Teillastbetrieb oft effizienter werden (Brennwerteffekt), leiden Gasmotoren im Teillastbereich unter schlechteren Wirkungsgraden.²

- **Szenario:** Wenn BHKW und Kessel parallel in Teillast laufen („Taktbetrieb“), statt dass das BHKW die Grundlast voll und der Kessel nur die Spitze deckt, sinkt die Gesamteffizienz. Der Anstieg des Kesselanteils auf 12,4 % in 2021 könnte auf eine solche ineffiziente Regelstrategie hindeuten.
-

5. Ökonomische und Ökologische Impact-Analyse

Die Ineffizienz am BHKW ist nicht nur ein statistisches Problem, sondern eine konkrete finanzielle und ökologische Belastung.

5.1 Quantifizierung des „Verlorenen Gases“

Unter Verwendung des Jahres 2018 (202,17 m³/MWh) als realisierbare Baseline-Effizienz:

- **Tatsächlicher Gas-Input 2021:** 2.152.723 m³
- Soll-Gas-Input 2021 (bei 2018er Effizienz):

9.580 MWh 202,17m³ MWh 1.936.788 m³

Mehrverbrauch (Verschwendung):

2.152.723 - 1.936.788 = 215.935m³

5.2 Monetäre Implikation

Erdgaspreise unterlagen 2021 einer extremen Volatilität (Beginn der Energiekrise). Unter Annahme eines konservativen Industriepreises für das Jahr 2021 von ca. **6–8 Cent/kWh** (ca. 0,60–0,80 €/m³ für H-Gas):

- Geschätzter finanzieller Verlust (2021):

215.935m³ * 0,70 €/m³=151.154 €

Anmerkung: Mit den Spotmarktpreisen Ende 2021/2022 könnte dieser Verlust real auf über 300.000 € p.a. ansteigen.

5.3 Ökologische Implikation (CO₂)

Die Verbrennung von Erdgas emittiert ca. 0,2 kg CO₂ pro kWh.¹⁵

- Energiegehalt des Mehrverbrauchs (H-Gas ~11 kWh/m³) 215.935 * 11 = 2.375.285kWh.
- Vermeidbare CO₂-Emissionen:

2.375.285 kWh * 0,2 kg/kWh = 475 Tonnen CO₂

Dieser unnötige CO₂-Fußabdruck konterkariert den ökologischen Sinn des KWK-Betriebs und führt zu zusätzlichen Kosten im nationalen Emissionshandel (nEHS).

6. Strategische Handlungsempfehlungen

Um die Effizienzdegradation zu stoppen und das BHKW an die Benchmarks „HKW 1“ und „HKW 2“ heranzuführen, wird folgender Maßnahmenkatalog empfohlen.

6.1 Kurzfristige Maßnahmen (Sofortwirkung)

1. **Hydraulisches Audit:** Überprüfung des Wärmenetzes auf hohe Rücklauftemperaturen. Sicherstellung, dass die Spreizung (Delta-T) einen effektiven Brennwertbetrieb erlaubt. Identifikation von hydraulischen Kurzschlüssen (offene Bypässe).
2. **Monitoring der Notkühler:** Installation oder Auswertung von Loggern an den Notkühlern. Korrelation von Gasverbrauchsspitzen mit der Aktivierung der Notkühler. Sollte Wärme vernichtet werden, um Strom zu produzieren, muss die Wirtschaftlichkeit der stromgeführten Fahrweise neu kalkuliert werden.
3. **Optimierung der Vorrangschaltung:** Überprüfung der Regelung. Das BHKW sollte stets Volllast fahren, um den Pufferspeicher zu laden; der Kessel darf erst bei geleertem Puffer zur Spitzenlastdeckung zuschalten („Kesselsperre“ bei Teillast).²

6.2 Mittelfristige Maßnahmen (Instandhaltung)

1. **Reinigung der Wärmetauscher:** Durchführung einer chemischen oder mechanischen Reinigung der Abgaswärmetauscher. Das Fouling ist ein Hauptverdächtiger für die schleichende Verschlechterung.
2. **Validierung der Benchmarks:** Klärung der Gasqualität der Standorte „HKW 2“ und „HKW 1“. Sollte sich bestätigen, dass HKW 2 bereits auf H-Gas läuft oder L-Gas nutzt, muss die technische Ausstattung (z.B. Wärmepumpen-Integration im Norden?) analysiert und ggf. adaptiert werden.

6.3 Langfristige Strategie

1. **Hybridisierung:** Prüfung der Integration einer Großwärmepumpe oder Power-to-Heat-Anlage, um überschüssigen Strom (bei negativen Spreads oder fehlender Netzkapazität) direkt in Wärme umzuwandeln, statt Wärme über Notkühler zu vernichten.
 2. **Technologie-Upgrade:** Sollte der Motor das Ende seiner Lebensdauer (typisch 60.000–80.000 Bh) erreichen, ist der Ersatz durch ein H2-Ready-Aggregat mit höherem elektrischem Wirkungsgrad (> 44 %) zu evaluieren.
-

7. Fazit

Die Analyse der Datei Gasmengen BHKW offenbart eine Anlage in technischer Schieflage. Seit 2019 hat sich der Gas-Input von der nutzbaren Wärmeproduktion entkoppelt, was zu einem **nachhaltigen Effizienzverlust von > 11 %** gegenüber der eigenen Historie und einem **Defizit von 22–33 %** gegenüber regionalen Wettbewerbern führt.

Die Daten legen nahe, dass die Anlage unter massivem „Phantom-Wärmeverlust“ leidet – thermische Energie, die zwar durch Gasverbrennung erzeugt, aber über Notkühler oder ineffiziente Wärmeübertragung an die Umwelt verloren geht. Diese Ineffizienz kostet den Betreiber geschätzt **über 150.000 € pro Jahr** und verursacht fast **500 Tonnen vermeidbares CO₂**.

Die Rückführung der Anlage auf das Leistungsniveau von 2018 (202 m³/MWh) ist technisch machbar und finanziell zwingend. Der Weg dorthin erfordert den Übergang von einem passiven Monitoring zu einem aktiven hydraulischen und thermodynamischen Management.