



LASTDIRIGENT · STUDIUM REFERENCYJNE

Teczka dowodo- wa

Dowód systemu energetycznego zbudowanego end-to-end

W pełni samodzielnie zbudowany system energetyczny — od pozyskania danych przez prognozę cen i optymalizację obciążenia po lokalny briefing AI. Ta teczka dokumentuje metodę i dowody studium referencyjnego.

Wynik w skrócie

Dynamiczne taryfy prądu czynią moment zużycia dźwignią kosztów. Na modelu chłodni — prowadzonej jako magazyn ciepła — to studium pokazuje, jak przesunąć obciążenie w tanie godziny. Wszystkie liczby pochodzą z zamrożonego, wersjonowanego zbioru danych.

KOSZTY PRĄDU

-18,4 %

249,75 € przez 89 dni wobec samej regulacji termostatem

BŁĄD PROGNOZY

16,77

MAE €/MWh · day-ahead, walk-forward — około 3× ostrzej niż baseline płaski (51,91).

CENY UJEMNE

249 h

wykryte w oknie (11,5 %) · korelacja udział OZE ↔ cena
-0,78

BRIEFING AI

lokalnie

Qwen 3.6 na własnym sprzęcie — dane nie opuszczają maszyny (RODO)

WNIOSEK

Jeden freelancer zbudował i udowodnił pełny łańcuch — inżynierię danych, uczenie maszynowe, optymalizację matematyczną, lokalną AI i automatyzację — jako jeden reprodukowalny system. Build jest deterministyczny: z tych samych danych źródłowych powstaje bajt w bajt ta sama teczka.

Studium referencyjne na modelowej chłodni (Monachium), nie wdrożenie u klienta. Cel: dowód głębi technicznej. Granice i założenia są ujawnione w załączniku.

Zadanie

Od 2025 dynamiczne taryfy prądu są obowiązkowe — cena giełdowa waha się co godzinę, chwilami schodzi poniżej zera. Moment zużycia staje się przez to dźwignią kosztów.

Chłodnia ma bezwładność cieplną: może chłodzić na zapas i magazynować chłód. Prowadzona jak bateria cieplna, pozwala przesunąć swoje obciążenie w tanie godziny — bez zagrożenia dla łańcucha chłodniczego.

Zadanie tego studium: system, który prognozuje cenę na jutro, planuje obciążenie kosztowo optymalnie i zrozumiale brifuje obsługę — od pozyskania danych po automatyzację, z jednej ręki.

Taryfy dynamiczne obowiązkowe od 2025 · cena giełdowa co godzinę, chwilami ujemna

Źródła

Każde twierdzenie tej teczki stoi na danych publicznie weryfikowalnych — pozyskanych, złączonych i zamrożonych z dowodem pochodzenia.

Ceny, miks wytwórczy i pogoda są łączone w bazie szeregów czasowych (TimescaleDB) i utrwalane jako wersjonowany snapshot. Już tutaj widać wzorzec: udział źródeł odnawialnych i cena bieżąca przeciwnie.

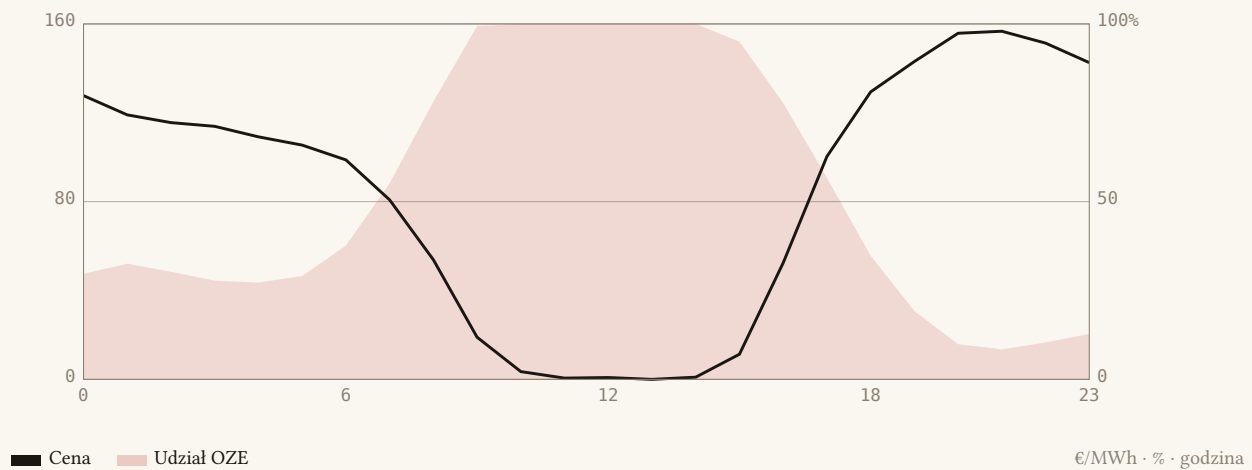
ŹRÓDŁO	ZAWARTOŚĆ	LICENCJA
aWATTar	Cena giełdowa day-ahead (EPEX)	public (EPEX day-ahead)
Bundesnetzagentur/SMARD	Miks wytwórczy — 9 źródeł, obciążenie, obciążenie resztkowe	Bundesnetzagentur (open)
Bundesnetzagentur/SMARD (Preis)	Cena hurtowa DE-LU	Bundesnetzagentur (open)
Open-Meteo/DWD	Pogoda — temperatura, nasłonecznienie, wiatr (Monachium)	CC-BY 4.0

Okno 91 dni · 2184 h · 4 źródeł · München

Wzorzec

W południe słońce zalewa sieć. Udział OZE rośnie, cena się załamuje — nierzadko poniżej zera.

Ta »kaczka« jest dźwignią: kto chłodzi wtedy, chłodzi najtaniej. W całym oknie ceny regularnie schodziły na minus — krzywa pokazuje dzień wzorcowy, na którym zależność czyta się najczyściej.



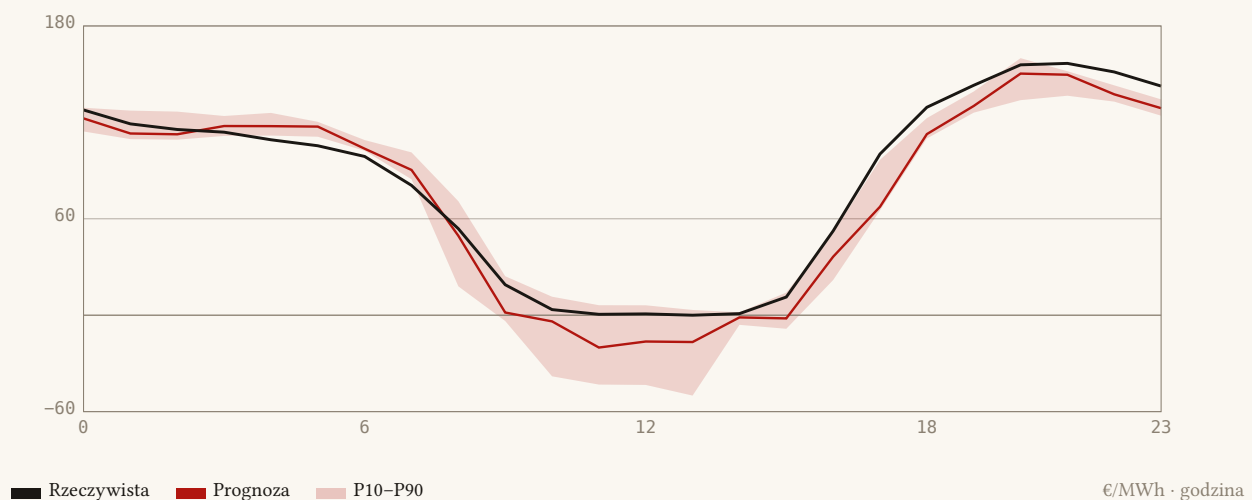
Ceny ujemne 249 h · 11,5 % · korelacja udział OZE ↔ cena -0,78

IV Prognoza

Handlować z jednodniowym wyprzedzeniem znaczy znać cenę jutra. Prognozuje ją model gradient boosting — walk-forward, z codziennym refitem.

Decydująca jest nie tylko wartość punktowa, ale niepewność: model podaje kwantyle P10/P50/P90 oraz prawdopodobieństwo cen ujemnych. Plan zna więc własne ryzyko, zamiast dawać się nabrać na pozorną precyzję.

Która wielkość napędza cenę? Model znalazł to sam: udział źródeł odnawialnych jest czynnikiem najważniejszym — przed obciążeniem resztkowym.



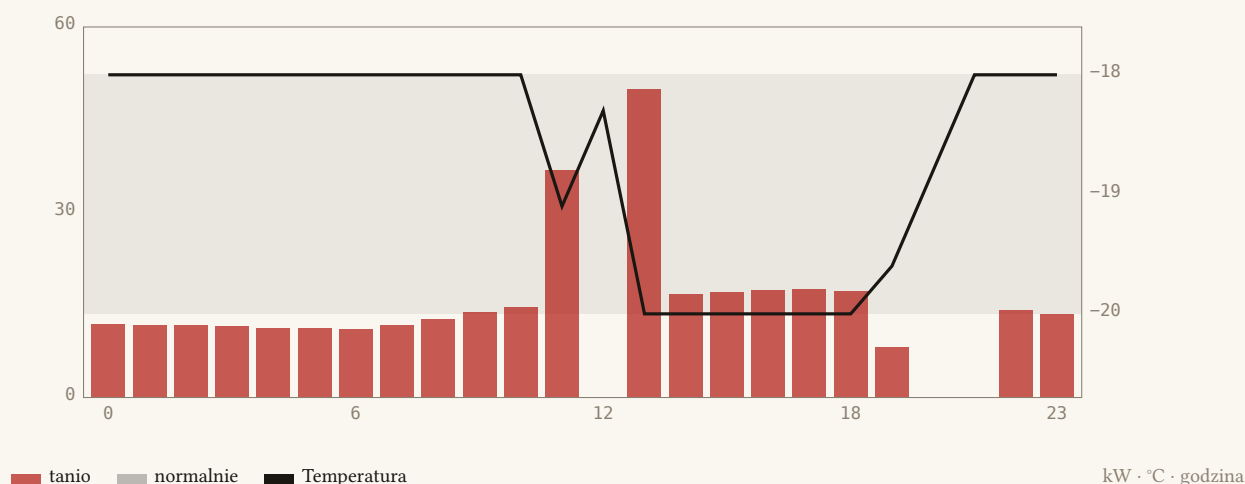
Błąd prognozy MAE 16,77 · Flat 51,91 · Persystencja 31,03 €/MWh · WAPE 15,7 %

V Plan obciążenia

Chłodnia staje się baterią: chłód jest magazynem, a pasmo temperatury — jego stanem naładowania.

Liniowy program optymalizacyjny rozkłada moc chłodniczą na dobę: minimalizuj koszty prądu, utrzymaj pasmo, nigdy nie przekrocz mocy przyłączeniowej. Uczciwy warunek brzegowy wymusza na koniec doby tę samą temperaturę, co na początku — mierzony jest więc czysty zysk z arbitrażu, a nie wychłodzenie komory.

Efekt: obciążenie wędruje w tanie godziny, a temperatura jedzie po paśmie.



Bateria ciepła Pasma −20...−18 °C · $P_{\max}$ 50 kW · COP 2,5

VI Briefing

Z liczb powstaje rekomendacja działania — sformułowana przez model językowy, który chodzi lokalnie, na własnym sprzęcie.

Qwen 3.6 (35 B) tworzy briefing po niemiecku, ugruntowany we wskaźnikach dnia. Dane nie opuszczają maszyny — to twardy argument o ochronie danych. Gdy serwer padnie, wchodzi deterministyczny szablon. Raz utworzony briefing zostaje w teczce zamrożony.

»Laden Sie die Kälteanlage in den günstigen Stunden 11 bis 14 auf, um 2 EUR (20 %) zu sparen. Nutzen Sie dabei den hohen VRE-Anteil von 53 % für eine effiziente Betriebsführung. System schlägt vor, der Mensch entscheidet.«

QWEN 3.6 · LOKALNIE · DZIEŃ WZORCOWY 17 MAJA 2026

Lokalny LLM dane nie opuszczają maszyny · zgodnie z RODO

VII Automatyzacja

Cykl chodzi codziennie — człowiek trzyma rękę na dźwigni.

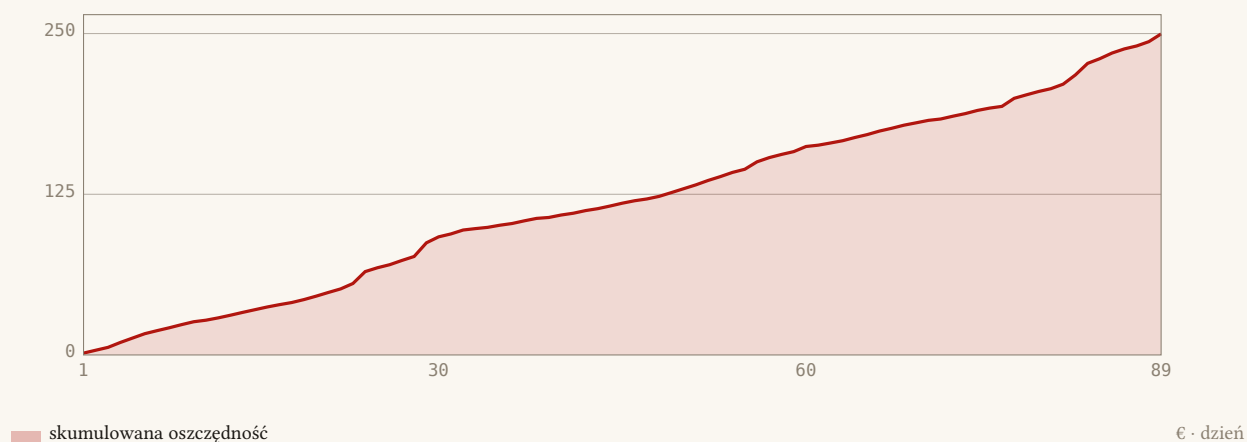
Gdy tylko ceny day-ahead zostaną opublikowane, system przechodzi ustalony łańcuch. Na końcu nie stoi automatyczna ingerencja, tylko propozycja: system proponuje, człowiek decyduje.

- 1 **Ceny**
pobranie kursów day-ahead (14:00)
- 2 **Prognoza**
model szacuje cenę + niepewność
- 3 **Plan**
LP rozkłada moc chłodniczą
- 4 **Briefing**
lokalny LLM formułuje rekomendację
- 5 **Zatwierdzenie**
człowiek decyduje — potem alarm

VIII Dowód

W całym oknie plan obniża koszty prądu odczuwalnie — a zysk nie jest efektem jednorazowym, tylko kumuluje się dzień po dniu.

To, co leży tu jako zamrożone studium referencyjne, da się odtworzyć na interaktywnym pulpicie (texni.dev) na tym samym snapshocie.



Wynik $-18,4\% \cdot 249,75\text{ €} \cdot 89\text{ dni} \cdot 1359,08\text{ €} \rightarrow 1109,32\text{ €}$

A Architektura

Build jest trzyfazowy i deterministyczny — z tych samych danych źródłowych powstaje bajt w bajt ta sama teczka.

Dostęp do sieci i model językowy chodzą dokładnie raz i są zapisywane do zamrożonych sidecarów. Część licząca nie zna zegara — żadnego wall-clocku, żadnego źródła losowości bez ziarna. Odtworzenie przelicza całe ML od nowa i daje ten sam bundle, bajt po bajcie (zweryfikowane).

- 1

Ingest
sieć, jednorazowo → snapshot + proveniencja
- 2

Compute
czysto: szereg → cechy → ML → LP → Model Card
- 3

AI-Capture
Qwen, jednorazowo → zamrożone
- 4

Assemble
czysto → Teczka dowodowa (v0.2)

B Model Card

Uczciwe wskaźniki, ujawnione granice — pełna karta modelu.

Wielkość docelowa: cena prądu day-ahead (€/MWh), obszar DE/DE-LU. Model: HistGradientBoosting (punkt + kwantyle) oraz klasyfikator dla $P(\text{cena} < 0)$. Backtest: walk-forward, rozszerzający się, z codziennym refitem.

METRYKI (BACKTEST)

MAE	16,77 €/MWh
RMSE	29,97 €/MWh
WAPE	15,7 %
Baseline płaski	51,91 €/MWh
Baseline persystencja-24 h	31,03 €/MWh

WAŻNOŚĆ PERMUTACYJNA

vre_share		0,392
residual_load_mw		0,198
temperature_c		0,038
dow		0,014
lag_168		0,012
is_holiday		0,010

Granice Demonstracja portfolio, nie system produkcyjny. Jedna modelowa lokalizacja, stałe założenia (COP, idealny model ciepłny, cenobiorca). Bez gwarancji przenoszalności.

C Model optymalizacji

Serce decyzji — sformułowane jako program liniowy.

Zmienną decyzyjną jest moc chłodnicza na godzinę. Minimalizowane są koszty prądu przy termodynamice komory, paśmie temperatury i mocy przyłączeniowej. Warunek terminalny oddziela prawdziwy zysk z arbitrażu od zwykłego wychłodzenia.

FUNKCJA CELU
TERMODYNAMIKA KOMORY
PASMO TEMPERATURY
MOC PRZYŁĄCZENIOWA
TERMINALNE — CZYSTY ARBITRAŻ

$$\min_u \sum_{h=0}^{23} p_h \cdot u_h / \eta$$
$$T_{h+1} = T_h + (k(T_{\text{amb}} - T_h) - \eta u_h) \cdot \Delta t / C$$
$$T_{\min} \leq T_h \leq T_{\max}$$
$$0 \leq u_h \leq P_{\max}$$
$$T_{24} = T_0$$

u_h Moc chłodnicza w godzinie h (kW) · $C = 20 \text{ kWh/}^\circ\text{C}$ · $P_{\max} = 50 \text{ kW}$ · $\text{COP} = 2,5$ · Pasma temperatury $-20 \dots -18 \text{ }^\circ\text{C}$ · $k = 0,5 \text{ kW/}^\circ\text{C}$

Rozwiązane przez `scipy.linprog`. Warunek terminalny wymusza na koniec doby stan wyjściowy — mierzony jest arbitraż, nie wychłodzenie.

D Odtwarzalność i granice

Co ta teczka dowodzi — a czego nie.

49 testów jednostkowych i testy akceptacyjne z asercjami na wartościach zabezpieczają łańcuch; odtworzenie jest bajt w bajt zgodne. Wszystkie źródła danych mają wskazaną licencję (m.in. Open-Meteo/DWD CC-BY 4.0).

Granice, nazwane wprost: to jest studium referencyjne na modelowej chłodni, nie wdrożenie u klienta. Model jest demonstracją portfolio. Liczby obowiązują dla pokazanego okna i przyjętych założeń — są dowodem metody i głębi, nie obietnicą dla konkretnego zakładu.

Kolofon

SNAPSHOT `c3badce30b4aca78`
SCHEMAT `reise · v0.2.0`
OKNO `2026-04-02 – 2026-07-01 · 2184 h · 91 dni`
WYGENEROWANO Z `beweismappe.reise.json`

Build deterministyczny — odtwarzalny bajt w bajt.

Skład: Typst · Pismo: Stack Sans Notch, Libertinus Serif · Rysunki: wektory natywne.

texni.dev · Jeden operator, pełny stack.