



Gefördert durch:



Koordiniert durch:



Projektträger:

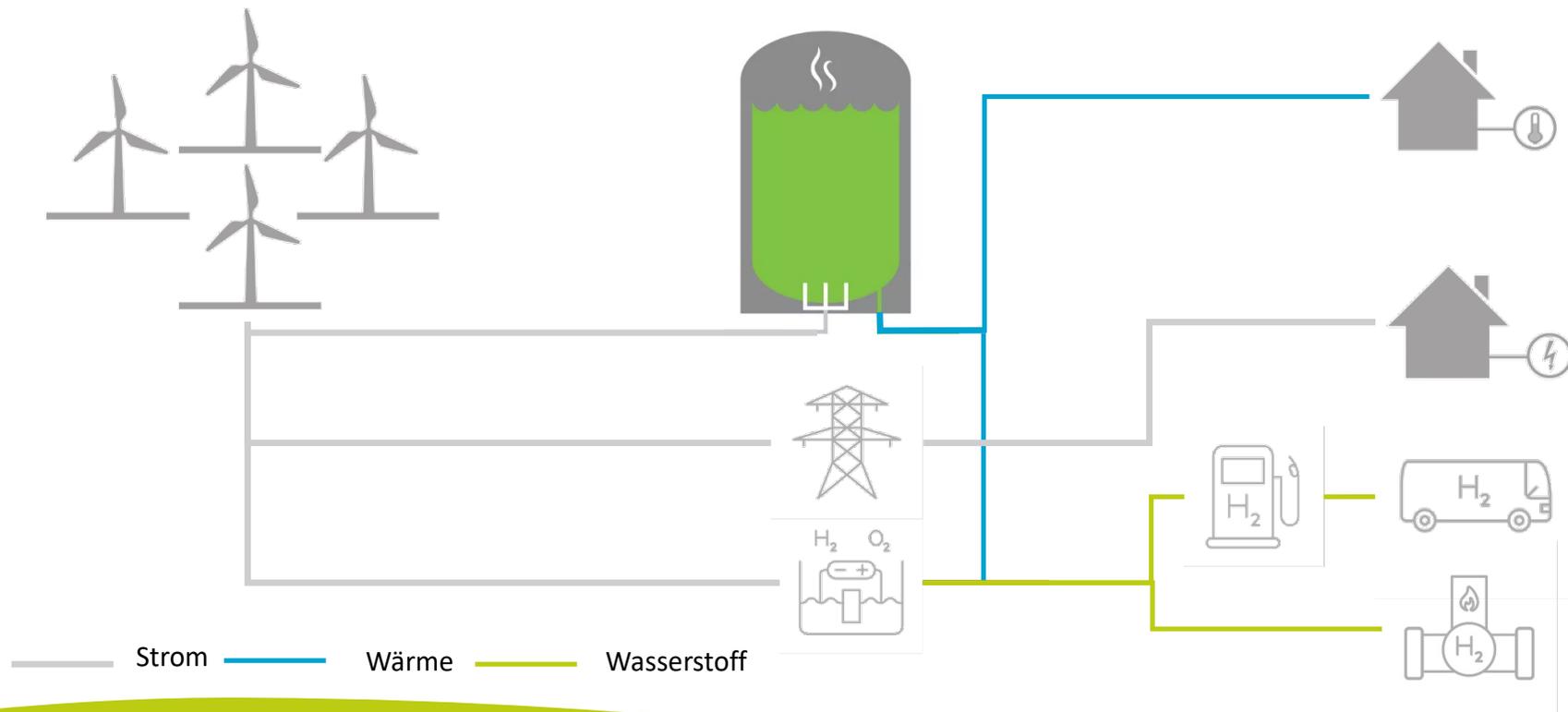


Technische und wirtschaftliche Potenzialbetrachtung für klimafreundliche Wärme in Rathenow

(Kritische) Fragestellungen zu Windenergie im Stadtwald Rathenow



Die Grundidee: Nutzung von Windenergie zur Bereitstellung von Wärme, Strom und Wasserstoff



Annahmen für die Fallbeispiele

Anlageneinsatz:

1 Priorität:

Maximal mögliche Deckung der Fernwärmenachfrage durch Strom (mit Power-to-Heat und Elektrolyse).

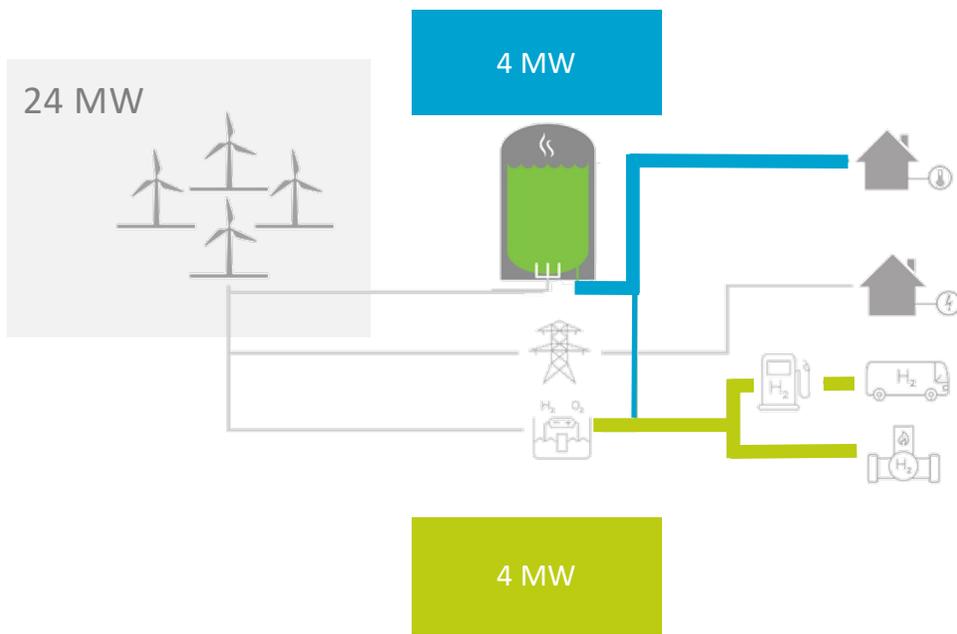
2 Priorität:

Maximal mögliche Wasserstoffherzeugung und somit Minimierung der Reststrommenge, die nicht für Power-to-Heat oder zur Elektrolyse genutzt wird.

Wirtschaftliche Annahmen:

| | WKA | Direktleitung | Power-to-Heat | Elektrolyse |
|---------------------|-------------|---------------|--------------------|-------------------|
| CAPEX: | 1.600 €/kW | 400.000 € | 300 €/kW | 2.200 €/kW |
| OPEX: | 40 €/(kW*a) | 4.000 €/a | 6 €/(kW*a) | 88 €/(kW*a) |
| Lebensdauer: | 25 | 25 | 25 | 20 |
| Zinssatz | 4% | 4% | 4% | 4% |
| Stromsteuer: | | | 20,50 €/MWh | 0,00 €/MWh |
| Netzentgelte | | | 0,00 €/MWh | 0,00 €/MWh |
| Sonstige Umlagen | | | 0,00 €/MWh | 0,00 €/MWh |
| Zusatzbelastung: | | | 20,50 €/MWh | 0,00 €/MWh |
| Stromkosten: | 59,53 €/MWh | 0,52 €/MWh | 80,54 €/MWh | 60,04 €/MWh |

Fallbeispiel: 50:50



48,8 Mio € Gesamtinvestition

39%

der Rathenower
Fernwärme gedeckt

**8 ct/
kWh**

Wärme-
erzeugungskosten

108

Tonnen grüner
Wasserstoff pro Jahr

12,8 €/kg

Wasserstoff-
gestehungskosten

Fallbeispiel 50:50 – im Detail

Installierte Leistungen:

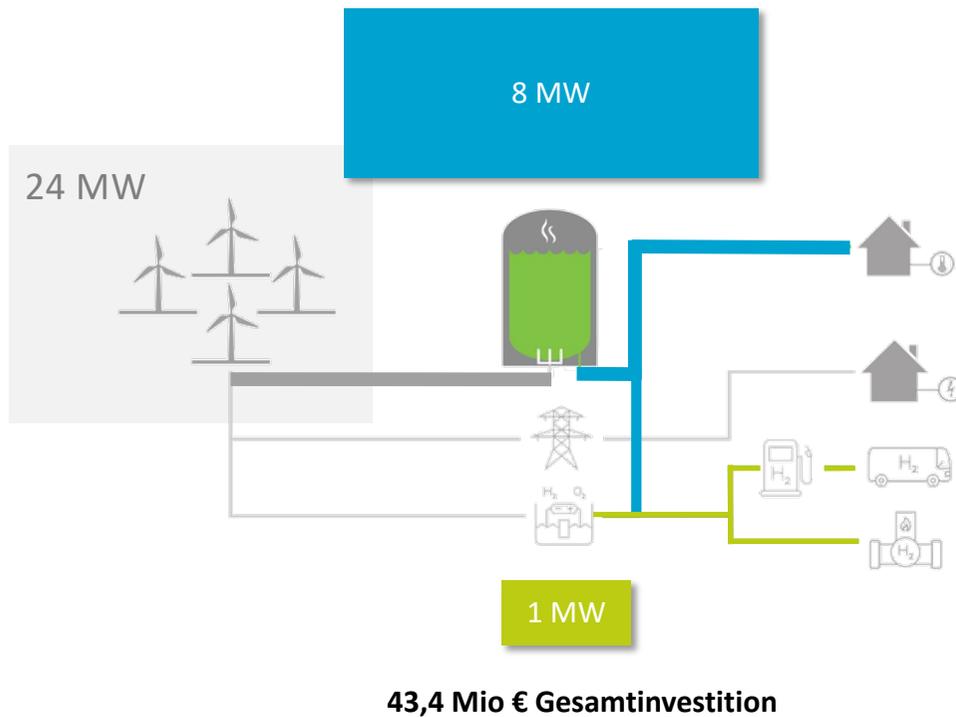
24 MW installierte Leistung (4 WKAs)
 4 MW Power-to-Heat
 4 MW Elektrolyse

Annahme für Wärmekosten:

Wasserstoff und Reststrom werden zu Erzeugungskosten verkauft.

| | | | Annuitäten (Kosten positiv) | Spez. Kosten | Erlöse | CAPEX |
|-----------------------------------|----------------------|----------------------|-----------------------------|--------------|-------------|---------------------|
| Leistung WKA | 24,0 MW | 2.392 VBH | 3.447.664 €/a | | | 38.800.000 € |
| Stromerzeugung WKA | 57.420 MWh | | | 60,04 €/MWh | | |
| Leistung P2H | 4,0 MW | 3.928 VBH | 100.814 €/a | | | 1.200.000 € |
| Strombezug P2H | 15.711 MWh | 27% | 322.081 €/a | | | |
| Fernwärmeerzeugung P2H | 15.711 MWh | 36% | | 86,96 €/MWh | | |
| Leistung Elektrolyse | 4,0 MW | 1.498 VBH | 999.519 €/a | | | 8.800.000 € |
| Strombezug Elektrolyse | 5.992 MWh | 10% | 0 €/a | | | |
| Fernwärmeerzeugung Elektrolyse | 1.498 MWh | 3% | | | | |
| Wasserstoffherzeugung Elektrolyse | 107.856 kg | 4.250 MWh_HHV | -1.359.296 €/a | 12,60 €/kg | 12,60 €/kg | |
| Wasserbedarf: | 2.696 m ³ | 58 Personenverbrauch | | | | |
| Reststrommenge | 35.717 MWh | 62% | -2.144.536 €/a | 60,04 €/MWh | 60,04 €/MWh | |
| Gesamtkosten: | | | 1.366.248 €/a | | | 48.800.000 € |
| Wärmekosten: | | | 79,39 €/MWh | | | |

Fallbeispiel: Fokus Wärme



der Rathenower
Fernwärme gedeckt



Wärme-
erzeugungskosten



Tonnen grüner
Wasserstoff pro Jahr



Wasserstoff-
gestehungskosten

Fallbeispiel Fokus Wärme – im Detail

Installierte Leistungen:

24 MW installierte Leistung (4 WKAs)
8 MW Power-to-Heat
1 MW Elektrolyse

Annahme für Wärmekosten:

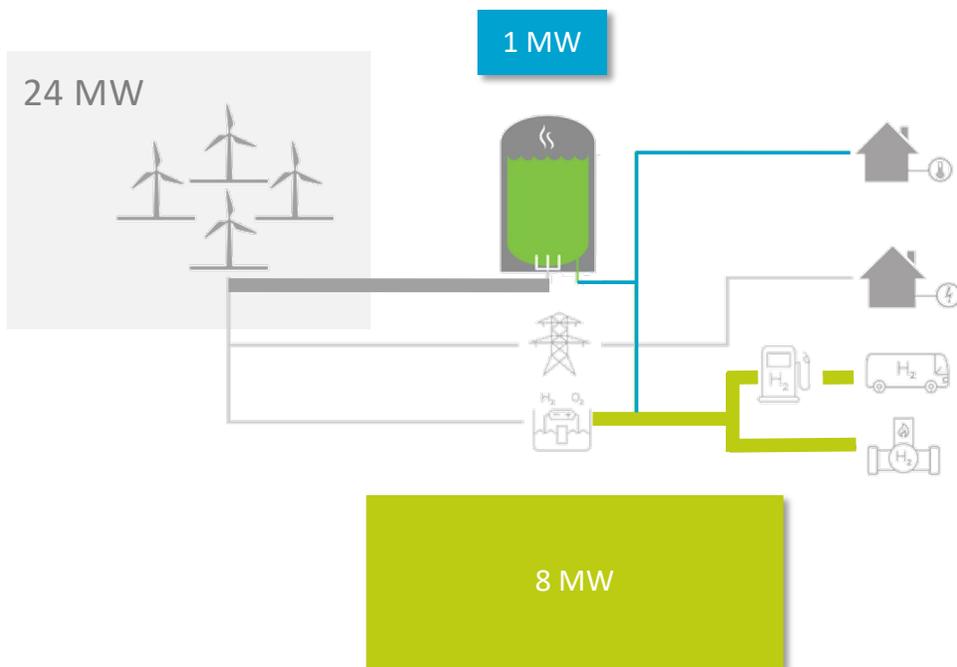
Wasserstoff und Reststrom werden zu Erzeugungskosten verkauft.

| | | | Annuitäten (Kosten positiv) | Spez. Kosten | Erlöse | CAPEX |
|-----------------------------------|----------------------|----------------------|-----------------------------|--------------|-------------|---------------------|
| Leistung WKA | 24,0 MW | 2.392 VBH | 3.447.664 €/a | | | 38.800.000 € |
| Stromerzeugung WKA | 57.420 MWh | | | 60,04 €/MWh | | |
| Leistung P2H | 8,0 MW | 2.908 VBH | 201.629 €/a | | | 2.400.000 € |
| Strombezug P2H | 23.265 MWh | 41% | 476.943 €/a | | | |
| Fernwärmeerzeugung P2H | 23.265 MWh | 54% | | 89,21 €/MWh | | |
| Leistung Elektrolyse | 1,0 MW | 2.883 VBH | 249.880 €/a | | | 2.200.000 € |
| Strombezug Elektrolyse | 2.883 MWh | 5% | 0 €/a | | | |
| Fernwärmeerzeugung Elektrolyse | 721 MWh | 2% | | | | |
| Wasserstoffherzeugung Elektrolyse | 51.894 kg | 2.045 MWh_HHV | -422.984 €/a | 8,15 €/kg | 8,15 €/kg | |
| Wasserbedarf: | 1.297 m ³ | 28 Personenverbrauch | | | | |
| Reststrommenge | 31.271 MWh | 54% | -1.877.630 €/a | 60,04 €/MWh | 60,04 €/MWh | |
| Gesamtkosten: | | | 2.075.501 €/a | | | 43.400.000 € |
| Wärmekosten: | | | 86,53 €/MWh | | | |

Fallbeispiel: Fokus Wasserstoff



56,7 Mio € Gesamtinvestition



21

der Rathenower
Fernwärme gedeckt

2 ct/
kWh

Wärme-
erzeugungskosten

530

Tonnen grüner
Wasserstoff pro Jahr

7,11
€/kg

Wasserstoff-
gestehungskosten



Fallbeispiel Fokus Wasserstoff – im Detail

Installierte Leistungen:

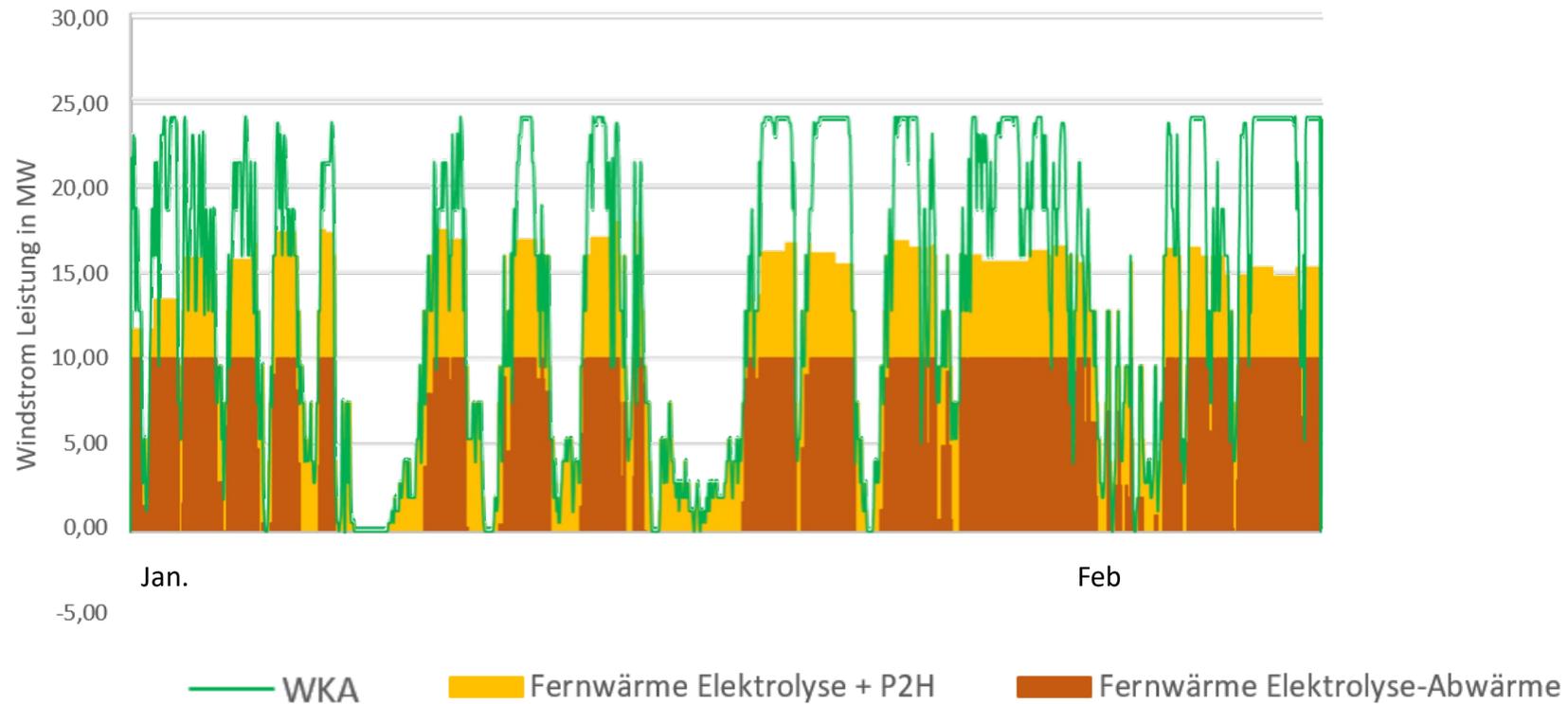
24 MW installierte Leistung (4 WKAs)
 1 MW Power-to-Heat
 8 MW Elektrolyse

Annahme für Wärmekosten:

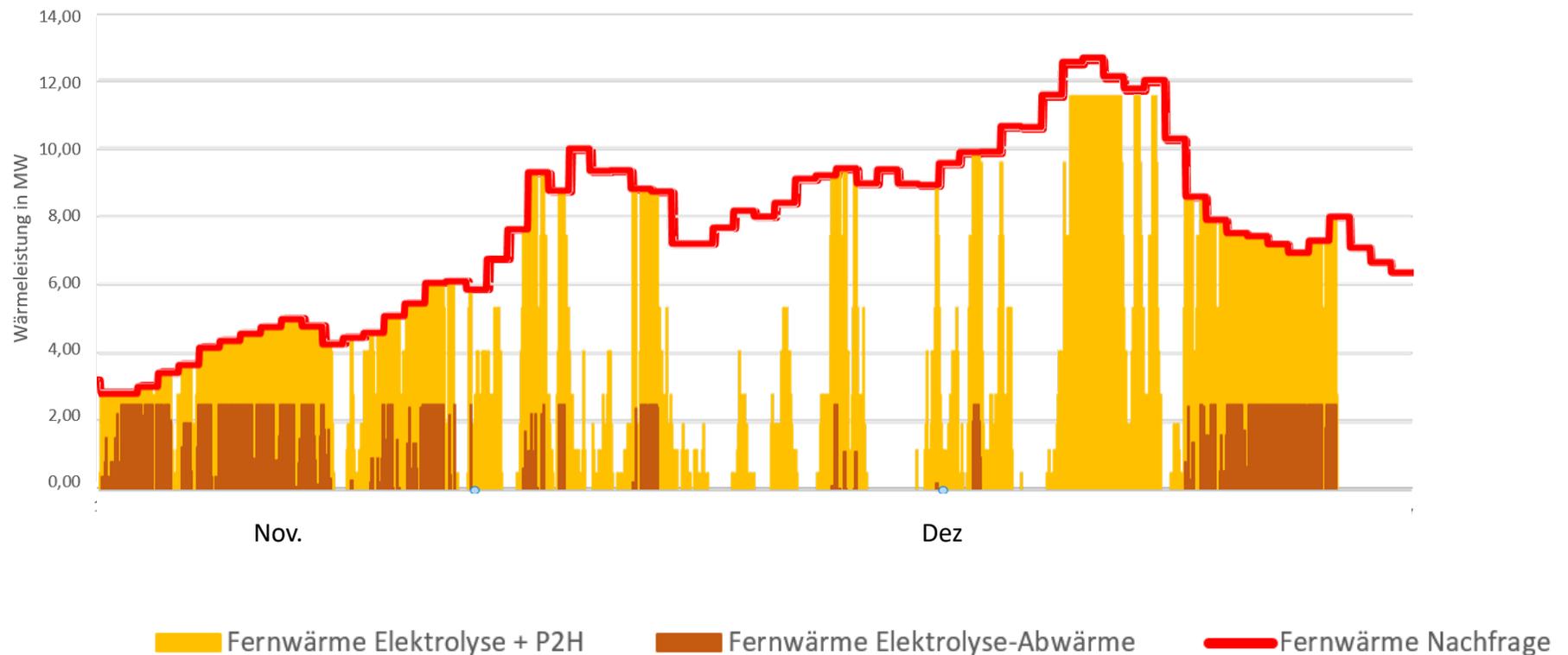
Wasserstoff und Reststrom werden zu Erzeugungskosten verkauft.

| | | | Annuitäten (Kosten positiv) | Spez. Kosten | Erlöse | CAPEX |
|-----------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------------|--------------|-------------|---------------------|
| Leistung WKA | 24,0 MW | 2.392 VBH | 3.447.664 €/a | | | 38.800.000 € |
| Stromerzeugung WKA | 57.420 MWh | | | 60,04 €/MWh | | |
| Leistung P2H | 1,0 MW | 1.906 VBH | 25.204 €/a | | | 300.000 € |
| Strombezug P2H | 1.906 MWh | 3% | 39.081 €/a | | | |
| Fernwärmeerzeugung P2H | 1.906 MWh | 4% | | 93,76 €/MWh | | |
| Leistung Elektrolyse | 8,0 MW | 3.676 VBH | 1.999.039 €/a | | | 17.600.000 € |
| Strombezug Elektrolyse | 29.412 MWh | 51% | 0 €/a | | | |
| Fernwärmeerzeugung Elektrolyse | 7.249 MWh | 17% | | | | |
| Wasserstoffherzeugung Elektrolyse | 529.413 kg | 20.861 MWh_HHV | -3.765.015 €/a | 7,11 €/kg | 7,11 €/kg | |
| Wasserbedarf: | 13.235 m ³ | 283 Personenverbrauch | | | | |
| Reststrommenge | 26.102 MWh | 45% | -1.567.223 €/a | 60,04 €/MWh | 60,04 €/MWh | |
| Gesamtkosten: | | | 178.749 €/a | | | 56.700.000 € |
| Wärmekosten: | | | 19,52 €/MWh | | | |

Wieviel Wind zur Wärmeerzeugung genutzt werden kann



Wieviel Wärme durch Windwärme abgedeckt werden kann





Windkraft vs. Wald – sinnvoll für den Klimaschutz?

- Annahmen:

- Flächenbedarf einer Windkraftanlage (WKA): 0,28 ha
- Flächenbedarf für Zufahrtswege 0,35 bis 0,45 ha
- Netto-Vermeidungsfaktor von Windkraftanlagen: 606,14 gCO₂/kWh.
 - Berücksichtigt **auch Emissionen beim Bau der Anlage.**
- Durchschnittliche CO₂-Einsparung deutscher Wälder – etwa 5,4 tCO₂/ha Wald
 - Ist aber stark von Art und Alter des Baumbestandes abhängig!

- Flächenvergleich & CO₂-Einsparung:

- 0,5 ha Wald → **2,7** Tonnen CO₂ werden pro Jahr eingespart
- 0,5 ha für eine Windkraftanlage mit 3 MW Leistung → **3.600** Tonnen CO₂ werden pro Jahr eingespart

- Fazit

- In **der Kohlenstoffbilanz sind Windkraftanlagen deutlich besser.**
- Das sind aber **nicht die einzigen Faktoren** die bei der Entscheidung eine Rolle spielen. WKAs sind bei der Klimabilanz besser, in Bezug auf Biodiversität und andere Umweltfaktoren nicht.
- Deshalb ist bei einer Standortentscheidung ebenfalls wichtig die **Qualität des Waldes** einschätzen zu können sowie Maßnahmen zu ergreifen, die den Wald von hoher Qualität langfristig schützen können

Zwischenfazit aus bisherigen Rechnungen

- Die **Wärme aus Windkraft und Power-to-Heat** hat bei den getroffenen Annahmen **Vollkosten von ca. 9 ct/kWh**.
Zum Vergleich: Die Verbrennung von Erdgas (Erdgaspreis inkl. Transport und CO₂-Zertifikate-Anteil) wird 2030 voraussichtlich zwischen 6,5 ct/kWh und 16,6 ct/kWh kosten. Die variablen Kosten der Fernwärmeerzeugung sind wg. Umwandlungsverlusten höher und die Vollkosten entsprechend noch höher.
- Die **Abwärme aus der Elektrolyse ist kostenfrei**, sofern der Wasserstoff zum Erzeugungspreis verläuft wird.
(+) Die Bedingungen am Standort sind günstig, sodass grüner Wasserstoffpreis konkurrenzfähig erzeugt werden kann.
(!) Frühzeitige Festlegung von Abnehmern empfehlenswert, um Abnehmerisiko zu minimieren.
- Eine **Kombination von Power-to-Heat und Elektrolyse ist sinnvoll, muss jedoch gut aufeinander abgestimmt** sein, sodass der Elektrolyseur genügend Stunden pro Jahr betrieben werden kann, da beide Anlagen um den Strom aus der Windkraftanlage „konkurrieren“.



Weitere Fallbeispiele



Fallbeispiel: Kannibalisierung des Stroms 1

24 MW installierte Leistung (4 WKAs)

4 MW Power-to-Heat

4 MW Elektrolyse

| | | | Annuitäten (Kosten positiv) | Spez. Kosten | Erlöse | CAPEX |
|-----------------------------------|----------------------|----------------------|-----------------------------|--------------|-------------|---------------------|
| Leistung WKA | 24,0 MW | 2.392 VBH | 3.447.664 €/a | | | 38.800.000 € |
| Stromerzeugung WKA | 57.420 MWh | | | 60,04 €/MWh | | |
| Leistung P2H | 4,0 MW | 3.928 VBH | 100.814 €/a | | | 1.200.000 € |
| Strombezug P2H | 15.711 MWh | 27% | 322.081 €/a | | | |
| Fernwärmeerzeugung P2H | 15.711 MWh | 36% | | 86,96 €/MWh | | |
| Leistung Elektrolyse | 4,0 MW | 1.498 VBH | 999.519 €/a | | | 8.800.000 € |
| Strombezug Elektrolyse | 5.992 MWh | 10% | 0 €/a | | | |
| Fernwärmeerzeugung Elektrolyse | 1.498 MWh | 3% | | | | |
| Wasserstoffherzeugung Elektrolyse | 107.856 kg | 4.250 MWh_HHV | -1.359.296 €/a | 12,60 €/kg | 12,60 €/kg | |
| Wasserbedarf: | 2.696 m ³ | 58 Personenverbrauch | | | | |
| Reststrommenge | 35.717 MWh | 62% | -2.144.536 €/a | 60,04 €/MWh | 60,04 €/MWh | |
| Gesamtkosten: | | | 1.366.248 €/a | | | 48.800.000 € |
| Wärmekosten: | | | 79,39 €/MWh | | | |

Annahme für Wärmekosten:

Wasserstoff und Reststrom werden zu Erzeugungskosten verkauft.



Fallbeispiel: Kannibalisierung des Stroms 2

24 MW installierte Leistung (4 WKAs)
 2 MW Power-to-Heat
 4 MW Elektrolyse

| | | | Annuitäten (Kosten positiv) | Spez. Kosten | Erlöse | CAPEX |
|-----------------------------------|----------------------|----------------------|-----------------------------|--------------|-------------|---------------------|
| Leistung WKA | 24,0 MW | 2.392 VBH | 3.447.664 €/a | | | 38.800.000 € |
| Stromerzeugung WKA | 57.420 MWh | | | 60,04 €/MWh | | |
| Leistung P2H | 2,0 MW | 5.100 VBH | 50.407 €/a | | | 600.000 € |
| Strombezug P2H | 10.200 MWh | 18% | 209.097 €/a | | | |
| Fernwärmeerzeugung P2H | 10.200 MWh | 24% | | 85,48 €/MWh | | |
| Leistung Elektrolyse | 4,0 MW | 803 VBH | 999.519 €/a | | | 8.800.000 € |
| Strombezug Elektrolyse | 3.212 MWh | 6% | 0 €/a | | | |
| Fernwärmeerzeugung Elektrolyse | 803 MWh | 2% | | | | |
| Wasserstoffherzeugung Elektrolyse | 57.823 kg | 2.278 MWh_HHV | -1.192.402 €/a | 20,62 €/kg | 20,62 €/kg | |
| Wasserbedarf: | 1.446 m ³ | 31 Personenverbrauch | | | | |
| Reststrommenge | 44.008 MWh | 77% | -2.642.353 €/a | 60,04 €/MWh | 60,04 €/MWh | |
| Gesamtkosten: | | | 871.932 €/a | | | 48.200.000 € |
| Wärmekosten: | | | 79,25 €/MWh | | | |

Annahme für Wärmekosten:
 Wasserstoff und Reststrom werden zu Erzeugungskosten verkauft.

Fallbeispiel: Kannibalisierung des Stroms 3

24 MW installierte Leistung (4 WKAs)

4 MW Power-to-Heat

2 MW Elektrolyse

| | | | Annuitäten (Kosten positiv) | Spez. Kosten | Erlöse | CAPEX |
|-----------------------------------|----------------------|----------------------|-----------------------------|--------------|-------------|---------------------|
| Leistung WKA | 24,0 MW | 2.392 VBH | 3.447.664 €/a | | | 38.800.000 € |
| Stromerzeugung WKA | 57.420 MWh | | | 60,04 €/MWh | | |
| Leistung P2H | 4,0 MW | 4.093 VBH | 100.814 €/a | | | 1.200.000 € |
| Strombezug P2H | 16.370 MWh | 29% | 335.591 €/a | | | |
| Fernwärmeerzeugung P2H | 16.370 MWh | 38% | | 86,70 €/MWh | | |
| Leistung Elektrolyse | 2,0 MW | 1.678 VBH | 499.760 €/a | | | 4.400.000 € |
| Strombezug Elektrolyse | 3.356 MWh | 6% | 0 €/a | | | |
| Fernwärmeerzeugung Elektrolyse | 839 MWh | 2% | | | | |
| Wasserstoffherzeugung Elektrolyse | 60.406 kg | 2.380 MWh_HHV | -701.258 €/a | 11,61 €/kg | 11,61 €/kg | |
| Wasserbedarf: | 1.510 m ³ | 32 Personenverbrauch | | | | |
| Reststrommenge | 37.694 MWh | 66% | -2.263.244 €/a | 60,04 €/MWh | 60,04 €/MWh | |
| Gesamtkosten: | | | 1.419.327 €/a | | | 44.400.000 € |
| Wärmekosten: | | | 82,47 €/MWh | | | |

Annahme für Wärmekosten:

Wasserstoff und Reststrom werden zu Erzeugungskosten verkauft.