



TECHNISCHE HOCHSCHULE NÜRNBERG
GEORG SIMON OHM

Wirtschaftlichkeit von Windkraftanlagen und Versorgungsanalyse Max Bögl Sengenthal

Autor: Achim Schneider

E-Mail: achim.schneider@laibstadt.de

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. Matthias Popp

Ort, Datum: Nürnberg, 08.03.2022

Eidesstaatliche Erklärung

Ich versichere, dass ich die Arbeit selbständig angefertigt, nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt, alle benutzten Quellen und Hilfsmittel angegeben sowie wörtliche und sinngemäße Zitate gekennzeichnet habe.

Nürnberg, 08.03.2022

Achim Schneider

Inhaltsverzeichnis

Eidesstaatliche Erklärung	I
Inhaltsverzeichnis.....	II
Abbildungsverzeichnis.....	III
Tabellenverzeichnis.....	IV
Abkürzungsverzeichnis.....	V
1 Einleitung	6
2 Wirtschaftlichkeit von Windkraftanlagen	6
2.1 Grundlagen der Windenergie	6
2.2 Aktueller Stand der Technik	9
2.3 EEG-Umlage.....	10
2.4 Wirtschaftlichkeit.....	12
3 Versorgungsanalyse Max Bögl	15
3.1 Problemstellung	15
3.2 Energieerzeugung.....	16
3.3 Energiespeicherung	18
3.4 Verbrauch	19
3.5 Strommarktpreise.....	19
3.6 Bewirtschaftungsstrategie	21
3.7 Preis Minimum	22
3.8 Sensitivitätsanalyse	25
4 Ausblick.....	26
Literaturverzeichnis.....	27

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Rotorformen mit vertikaler Drehachse [2]	7
Abbildung 2: Aufbau und Komponenten einer WKA mit horizontaler Achse [3]	7
Abbildung 3: Mittlere Windgeschw. ü.Gr. [4]	8
Abbildung 4: Status des Windenergieausbaus in Deutschland Onshore [5]	9
Abbildung 5: Durchschnittliche Anlagenkonfiguration von neu errichteten Anlagen.....	9
Abbildung 6: Entwicklung der Zuschlagswerte für Windenergie in Deutschland [5]	11
Abbildung 7: Wettbewerbssituation in den Ausschreibungen für Windenergie [5]	11
Abbildung 8: Jährliche Betriebskosten eines typischen Windparks [2]	12
Abbildung 9: Spezifische Anlagenkosten im Jahr 2021 (ohne MwSt.) [9].....	13
Abbildung 10: Prognose der mittleren Vollaststunden je Inbetriebnahme [10].....	13
Abbildung 11: Strohgestehungskosten in Abhängigkeit zu der Ammortisationszeit	14
Abbildung 12: Windleistungszeitreihe 2018 [12].....	17
Abbildung 13: Solarzeitreihe 2018 [12].....	18
Abbildung 14: Verbrauchszeitreihe 2018 [12].....	19
Abbildung 15: Strommarktpreis 2018-2020	20
Abbildung 16: Strommarktpreis 2021/22	21
Abbildung 17: Minimum Stromgestehungskosten grob	23
Abbildung 18: Minimum Stromgestehungskosten mittel.....	24
Abbildung 19: Minimum Strohgestehungskosten fein.....	25
Abbildung 20: Sensitivitätsanalyse.....	26

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Typische Onshore-Anlagen [6] [7] [8]	10
---	----

Abkürzungsverzeichnis

WKA	Windkraftanlage(n)
WEA	Windenergieanlage(n)
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
PV	Photovoltaik

1 Einleitung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Fragestellung wie ein moderner Industriebetrieb wirtschaftlich eine CO₂-neutrale Selbstversorgung mit elektrischer Energie realisieren kann. Zusätzlich wird im 1. Teil der Arbeit die Windkraft als Möglichkeit der Energieerzeugung genauer analysiert und geprüft zu welchen Kosten elektrische Energie erzeugt werden kann.

2 Wirtschaftlichkeit von Windkraftanlagen

Im folgenden Teil dieser Arbeit werden die Grundlagen der Windenergie und der aktuelle Stand der Technik vorgestellt. Weiter werden die Stromgestehungskosten für diese Energieform ermittelt und die Wirtschaftlichkeit betrachtet.

2.1 Grundlagen der Windenergie

Das Ziel von WKA ist die Nutzung der im Wind mitgeführten kinetischen Energie der Luftmasse. Eine WKA ist eine technische Anlage, welche durch Abbremsen der Windgeschwindigkeit die dadurch entstehende Leistungsdifferenz nutzt. Für eine maximale Energieausbeute müsste die Luft bis zum vollständigen Stillstand abgebremst werden. In der Praxis ist dies nicht möglich. Es wird eine Mindest-Geschwindigkeit der Luft nach der WKA benötigt, damit ein genügendes Abfließen des Luftmassenstroms gewährleistet ist und die Turbine nicht „verstopft“. In der Theorie ergibt sich ein sogenannter Betz´scher Leistungsbeiwert $C_{P,Betz}$ von max ca. 0,59. Dies ist eine theoretische Grenze und bedeutet, dass maximal 59% der kinetischen Energie der Luftmasse genutzt werden kann. Dieser Leistungsbeiwert kann in der Praxis auch geringer ausfallen. Zum Gesamtwirkungsgrad dazu kommen noch aerodynamische-, mechanische- und elektrische Wirkungsgrade der Anlage.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten diese Windenergie zu nutzen. In der Praxis zu finden sind fast ausschließlich Windturbinen mit vertikaler oder horizontaler Drehachse.

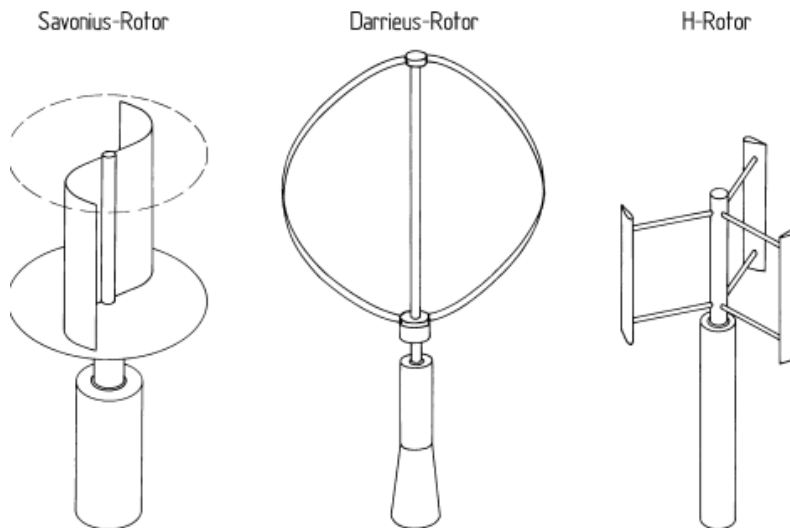


Abbildung 1: Rotorformen mit vertikaler Drehachse [2]

In Abbildung 1 sind typische Bauformen für Anlagen mit vertikaler Drehachse abgebildet. Diese sind einfach aufgebaut und kostengünstig und finden häufig Verwendung in Kleinanlagen z.B. auf Hausdächern, elektronischen Verkehrsschildern etc. Vom Wirkungsgrad sind diese aber den Anlagen mit horizontaler Achse unterlegen, so dass man in den zur kommerziellen großskaligen Nutzung der Windenergie fast ausschließlich letztere findet. Abbildung 2 zeigt den Aufbau einer üblichen Anlage mit horizontaler Achse.

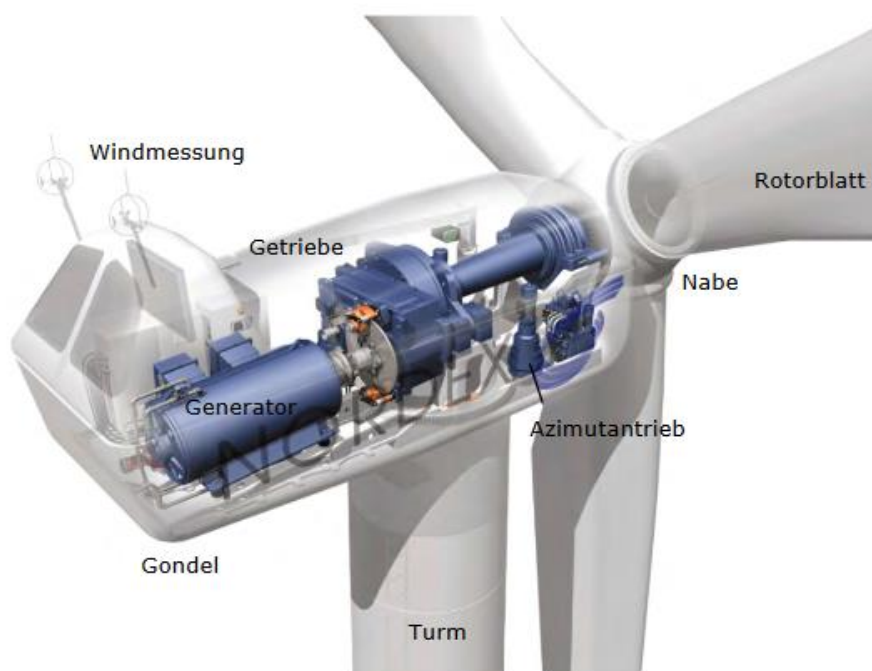


Abbildung 2: Aufbau und Komponenten einer WKA mit horizontaler Achse [3]

Maßgeblich abhängig für die Energieausbeute einer WKA ist die mittlere Windgeschwindigkeit eines Standortes. Dabei zu beachten ist die Windgeschwindigkeit über Grund auf Nabenhöhe der WKA. In Deutschland kommt es zu einem starken Gefälle der mittleren Windgeschwindigkeit von Norden (bis zu 8 m/s an der Nordseeküste) nach Süden (3,5 m/s im Alpenvorland). (vgl. Abb. 3)

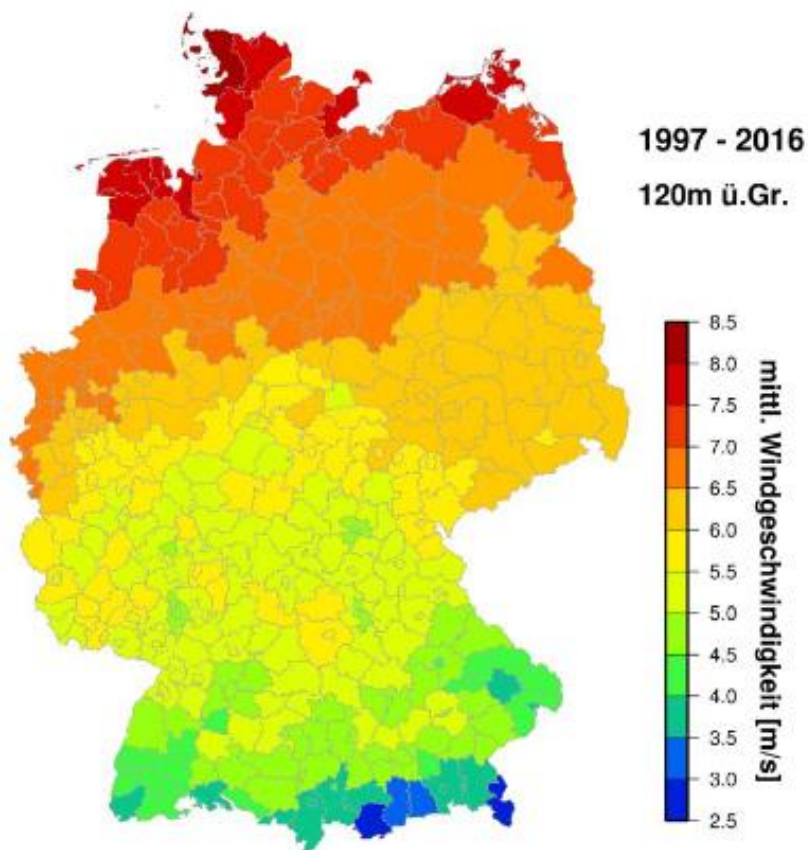


Abbildung 3: Mittlere Windgeschw. ü.Gr. [4]

2.2 Aktueller Stand der Technik

		Leistung	Anzahl
Entwicklung Jahr 2021	Brutto-Zubau	1.925 MW	484 WEA
	davon Repowering	244 MW	64 WEA
	Stilllegung	233 MW	230 WEA
	Netto-Zubau	1.692 MW	254 WEA
Kumuliert 31.12.2021	Kumulierter Bestand	56.130 MW	28.230 WEA

Abbildung 4: Status des Windenergieausbaus in Deutschland Onshore [5]

In Abbildung 4 sind der Brutto-/ Netto-Zubau, Stilllegung und der kumulierte Bestand von Offshore-WKA in Deutschland im Jahr 2021 aufgelistet. Der Netto-Zubau ist der Brutto-Zubau mit Abzug der Stilllegungen. Aus der Brutto-Zubau Leistung dividiert durch die Anzahl der zugebauten WEA erhält man als Ergebnis eine durchschnittliche Anlagenleistung von Onshore-Anlagen in Deutschland von ca. 4 MW. Die stillgelegten Anlagen haben im Durchschnitt eine Leistung von ca. 1 MW. Die stillgelegten Anlagen stammen weitgehend aus den Anfängen der EEG-Förderung und sollten so um die 20 Jahre alt sein. Daraus lässt sich ein Trend zu deutlich größeren Anlagen erkennen.

Durchschnittliche Konfiguration	Zubau Jahr 2021	Veränderung zum Vorjahr
Anlagenleistung	3.978 kW	+17%
Rotordurchmesser	133 m	+10%
Nabenhöhe	140 m	+4%
Gesamthöhe	206 m	+6%

Abbildung 5: Durchschnittliche Anlagenkonfiguration von neu errichteten Anlagen im Jahr 2021 [5]

Für den Zubau im Jahr 2021 errechnet die Deutsche WindGuard in ihrem Statusbericht 2021 eine typische Anlagenkonfiguration wie in Abbildung 5.

In Tabelle 1 findet sich eine Auflistung von typischen Onshore-WKA aus der 4 MW Klasse der Hersteller Enercon, Vestas und Siemens Gamesa.

Anlage	Enercon E-138 EP3	Vestas V136-4.2	SG 3.4-145
Nennleistung [kW]	4200	4200	3500
Rotordurchmesser [m]	138	136	145
Nabenhöhe [m]	81 – 160	variabel	106 / 124 / 128
Anlagenkonzept	Getrieblos	Planetengetriebe	Planetengetriebe

Tabelle 1: Typische Onshore-Anlagen [6] [7] [8]

2.3 EEG-Umlage

Das Erneuerbare-Energien-Gesetz ist im Jahr 2000 erstmals in Kraft getreten mit dem Ziel den Ausbau von regenerativen in Deutschland zu fördern. Hauptinstrument sind staatlich zugesicherte Vergütungen für die Einspeisung von unter das EEG fallenden Energieerzeugungsanlagen. Diese Preissicherheit und das Preisniveau welches zumindest in der Vergangenheit deutlich über dem Strombörsenpreis lagen, sollen Investoren dazu motivieren in regenerative Energien zu investieren.

Finanziert wird diese Subvention durch eine Umlage auf den Endverbraucher Strompreis. Die sogenannte EEG-Umlage wird jährlich neu festgelegt und finanziert die Differenz zwischen der durch die EEG zugesicherte Vergütung und dem am Strommarkt vermarktbar Preis.

Die Bundesnetzagentur führt jährlich Ausschreibungen für verschiedene regenerative Anlagentypen, darunter auch Onshore Windenergie, durch. Dabei wird ein höchster Zuschlagwert (Entwicklung vgl. Abb. 6) und ein Ausschreibungsvolumen in [MW] installierter Leistung gegeben. Interessierte Investoren können in einer Ausschreibungsrunde Gebote dazu abgeben wie viel Leistung Sie zu welchem Strompreis umsetzen möchten. Zuschlag erhalten jeweils die günstigsten Bieter aufsteigend, bis das Ausschreibungsvolumen ausgeschöpft ist. (vgl. Abb. 7)

	Jahr	Zulässiger Höchstwert	Mittlerer mengengewichteter Zuschlagswert
Ausschreibungsjahr	2017	7,0 ct/kWh	4,53 ct/kWh
	2018	6,3 ct/kWh	5,63 ct/kWh
	2019	6,2 ct/kWh	6,14 ct/kWh
	2020	6,2 ct/kWh	6,11 ct/kWh
	2021	6,0 ct/kWh	5,88 ct/kWh

Abbildung 6: Entwicklung der Zuschlagswerte für Windenergie an Land in Deutschland [5]

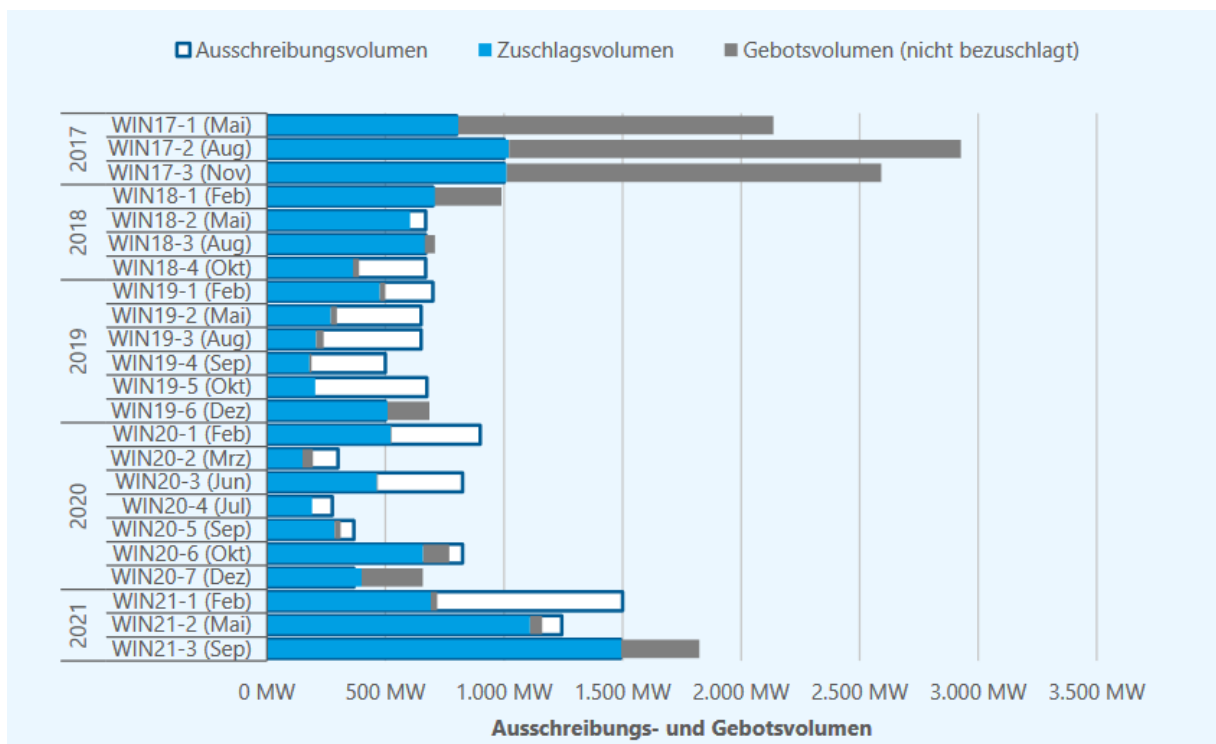


Abbildung 7: Wettbewerbssituation in den Ausschreibungen für Windenergie an Land [5]

2.4 Wirtschaftlichkeit

Neben den Investitionskosten ist die Wirtschaftlichkeit von WKA auch von den Betriebskosten abhängig. Da die Windenergie keine neue Technologie mehr ist, sondern schon seit mehreren Jahrzehnten kommerzielle Anlagen in Betrieb sind, ist der jährliche Aufwand für die Betriebskosten gut abschätzbar. Im Gegensatz zu fossilen Kraftwerken fallen für den Betrieb keine Kosten für den Energieträger an, da der Wind jedem kostenlos zur Verfügung steht. Die Betriebskosten konzentrieren sich auf die Bereiche Wartung / Reparatur, Versicherung, Landbeschaffung, technische Betriebsführung und den Betrieb von Hilfsanlagen. (Kosten vgl. Abb. 8)

	Prozentsatz vom WKA-Preis
Wartungsvertrag (Standard)	0,7–0,9
Reparaturrücklage (kalk. Ansatz)	0,5–1,0
Versicherungen	0,5–0,6
Landpacht	1,0–1,2
Techn. Überwachung u. Verwaltung	0,5–0,6
Sonstiges (Strombezug, Wartung periph. Anlagen)	0,8–1,0
gesamte jährliche Betriebskosten	4,0–5,3 %

Abbildung 8: Jährliche Betriebskosten eines typischen Windparks [2]

Eine Kostenstudie der Deutsche WindGuard kommt auf jährliche Betriebskosten von ca. 4,0 % [11]. Deshalb werden für weitere Betrachtungen jährliche Betriebskosten von 4,0 % der Anlagenkosten verwendet.

Den größten Kostenfaktor machen immer noch die Investitionskosten aus. In einer Untersuchung des Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE aus dem Juni 2021 wurde der in Abbildung 9 aufgelistete CAPEX (Investitionskosten) für verschiedene regenerative und konventionelle Energieerzeugungsanlagen ermittelt. Als spezifische Anlagenkosten für Windkraft kommt diese Untersuchung zu einem Spektrum von 1400 – 2000 EUR / kW bei Onshore Anlagen. Für weitere Betrachtungen wird ein Wert von 1500 EUR / kW herangezogen.

CAPEX [EUR/kW]	Wind onshore	Wind offshore	Biogas	Feste Biomasse	Braunkohle	Steinkohle	GuD	Gasturbine
2021 niedrig	1400	3000	2500	3000	1600	1500	800	400
2021 hoch	2000	4000	5000	5000	2200	2000	1100	600

CAPEX	PV Dach Kleinanlagen (≤ 30 kWp)	PV Dach Großanlagen (> 30 kWp)	PV Freiflächenanlagen (> 1 MWp)	Batteriespeicher für PV Kleinanlagen (≤ 30 kWp, PV-Leistung zu Batteriekapazität 1:1)	Batteriespeicher für PV Dach Großanlagen (> 30 kWp, PV-Leistung zu Batteriekapazität 2:1)	Batteriespeicher für PV-Freiflächenanlagen (> 1 MWp, PV-Leistung zu Batteriekapazität 3:2)
Einheit	[EUR/kWp]	[EUR/kWp]	[EUR/kWp]	[EUR/kWh]	[EUR/kWh]	[EUR/kWh]
2021 niedrig	1000	750	530	500	600	500
2021 hoch	1600	1400	800	1200	1000	700

Abbildung 9: Spezifische Anlagenkosten im Jahr 2021 (ohne MwSt.) [9]

Mithilfe der im folgenden erlangten Kenntnisse lassen sich die jährlichen Kosten einer beispielhaften WKA abschätzen. Für eine Wirtschaftlichkeitsrechnung benötigt man nun noch den Energieertrag, welcher sich aus der Nennleistung der Anlage und den Jahresvolllaststunden ermitteln lässt.

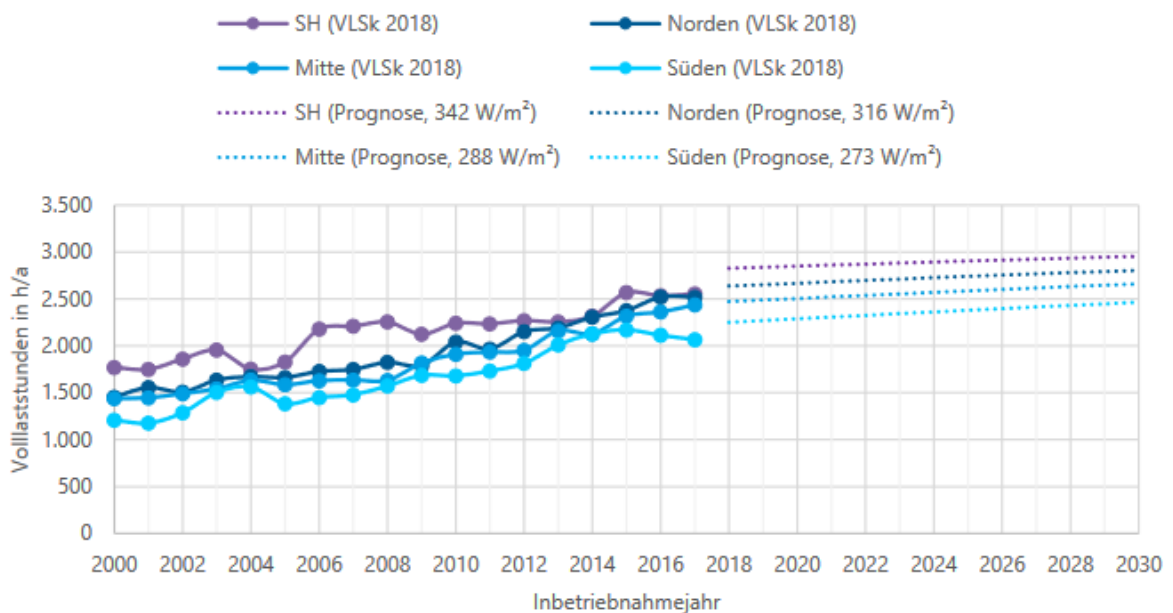


Abbildung 10: Prognose der Entwicklung der mittleren Volllaststunden je Inbetriebnahme [10]

Eine Untersuchung der Deutschen WindGuard kommt zu dem Ergebnis, dass mit einem Fortschritt in der Anlagentechnik auch die Volllaststunden pro Jahr zunehmen. Für eine Inbetriebnahme im Jahr 2021 kann man je nach Standort Jahresvolllaststunden von 2300 bis 2900 h erwarten. Für die weitere Betrachtung wird ein Mittelwert von 2600 Jahresvolllaststunden herangezogen. (vgl. Abb. 10)

Zur Wirtschaftlichkeitsrechnung wird die Annuitätenmethode herangezogen. Dies ist ein Verfahren der klassischen, dynamischen Investitionsrechnung, um die Kapitalkosten zu bestimmen. Der Kapitalwert A einer Investition wird auf die Nutzungsdauer n so verteilt, dass eine jährliche Annuität g entsteht, welche geleistet werden muss, um eine Verzinsung des eingesetzten Kapital A mit einem Zinssatz p zu erreichen.

$$g = A * \frac{(1 + p)^n * p}{(1 + p)^n - 1}$$

Zur Berechnung der Stromgestehungskosten muss die Annuität mit den jährlichen Betriebskosten addiert werden. Diese jährlichen Gesamtkosten geteilt durch den Jahresenergieertrag ergibt die Stromgestehungskosten.

$$\text{Stromgestehungskosten} = \frac{\text{Annuität} + \text{Betriebskosten}}{\text{jährlicher Energieertrag}}$$

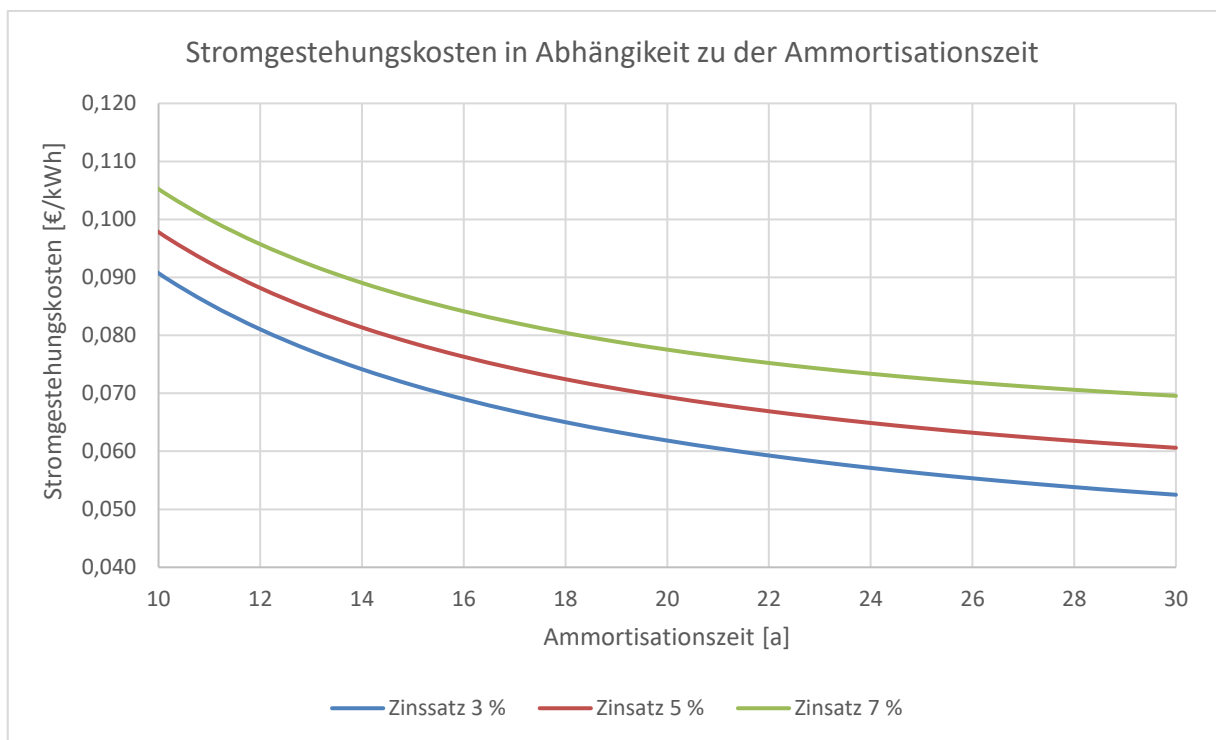


Abbildung 11: Stromgestehungskosten in Abhängigkeit zu der Amortisationszeit

In Abbildung 11 sind für einen Zinssatz auf das eingesetzte Kapital von 3, 5 und 7 %, die Stromgestehungskosten in Abhängigkeit der Amortisationszeit abgebildet. Der

Berechnung zugrunde liegen Investitionskosten von 1500 EUR/kW, Betriebskosten von 4.0 % und 2600 Vollaststunden.

Für eine Amortisationszeit von 20 Jahren (übliche Laufzeit von EEG-Verträgen) ergeben sich Stromgestehungskosten von 6,2 ct/kWh (Kapitalzins 3 %), 6,9 ct/kWh (Kapitalzins 5 %) und 7,8 ct/kWh (Kapitalzins 7 %).

Bei EEG-Anlagen sind aufgrund der hohen Sicherheit eher kleine Zinssätze gängig. Der mittlere Zuschlagswert von 5,88 ct/kWh aus 2021 liegt in der Größenregion des in dieser Untersuchung ermittelten Wert von 6,2 ct/kWh (niedriger Zinssatz, da geringes Risiko). Es ist davon auszugehen, dass die Bieter aus diesem Ausschreibungsverfahren mit geringeren Kosten als in dieser Untersuchung, kalkuliert haben.

Durch den sich Ende 2021 / Anfang 2022 stark nach oben entwickeltem Strompreis, könnte in der Zukunft auch ohne EEG-Förderung Windkraft rentabel sein. Dafür ist aber abzuwarten auf welchem Niveau sich die Strombörsen Preise einpendeln.

3 Versorgungsanalyse Max Bögl

Der zweite Teil dieser Arbeit beschäftigt sich mit der Fragestellung einer regenerativen Selbstversorgung eines Werks des Unternehmens Max Bögl. Dabei handelt es sich um ein Gemeinschaftsprojekt der Studierenden des 6. Semester Bachelor Maschinenbau (Vertiefung Energietechnik) im Wintersemester 2021/22. Jeder Studierende analysiert dabei die Wirtschaftlichkeit einer regenerativen Selbstversorgung bei einem anderen Marktpreisszenario. Die Analyse baut auf den Erkenntnisse und einem Berechnungsprogramm einer im Sommersemester 2021 durchgeführten Projektarbeit auf.

3.1 Problemstellung

Die Firma Max Bögl betreibt in Sengenthal bei Neumarkt einen energieintensiven Produktionsstandort zur Fertigung von Betonfertigteilen. Das Ziel der Unternehmensführung ist den Produktionsstandort auf eine komplette Selbstversorgung mit regenerativen Energien umzustellen. Dabei sollen die Kosten

der Energieversorgung unter denen eines Fremdbezugs über das Stromnetz liegen. So soll das Unternehmen CO₂-neutral, unabhängig vom Energiemarkt und wirtschaftlicher werden.

Der Standort kommt auf einen zu deckenden jährlichen Energiebedarf von ca. 22 GWh, was zu einer durchschnittlichen Jahresverbrauchsleistung von ungefähr 2,5 MW führt. Dabei schwankt die benötigte Leistung im Tages- und Jahresverlauf zwischen etwa 0,6 MW und 6 MW. [12]

Unter Einbezug der aktuell schon bestehenden Energieerzeugungs- und Speicheranlagen soll herausgefunden werden, welche Erweiterung zu einer vollständigen Selbstversorgung mit den geringsten Kosten führt.

Als Variablen zum Ausbau des Energiesystems stehen folgende Komponenten zur Verfügung:

- Photovoltaik (4,0 MW Bestand)
- Biomasse-Dampfkraftwerk (0,34 MW Bestand)
- Batteriespeicher (2,60 MWh Bestand)
- Power-To-Gas-To-Power Anlage als Speicher

Zusätzlich verfügt der Standort Sengenthal über drei WKA mit einer installierten Leistung von 9,6 MW. Diese Windleistung steht zur Selbstversorgung zur Verfügung, kann aber aktuell nicht weiter ausgebaut werden.

3.2 Energieerzeugung

Die drei Windkraftanlagen verfügen zwar über eine Nennleistung von 9,6 MW, aufgrund des über das Jahr aber sehr volatilen Windangebots kommen diese nur auf eine mittlere Leistung von 2,6 MW. (vgl. Abb. 12) Im Durchschnitt werden von den drei Anlagen 22,9 GWh elektrische Energie pro Jahr erzeugt. Dies liegt etwas über dem Jahresverbrauch von 22 GWh. Somit reichen die WKA schon aus, um bilanziell den Stromverbrauch von Max Bögl zu decken. Aufgrund der hohen Volatilität und Dunkelflauten wären aber sehr große Speicherkapazitäten notwendig, um dies zu ermöglichen.

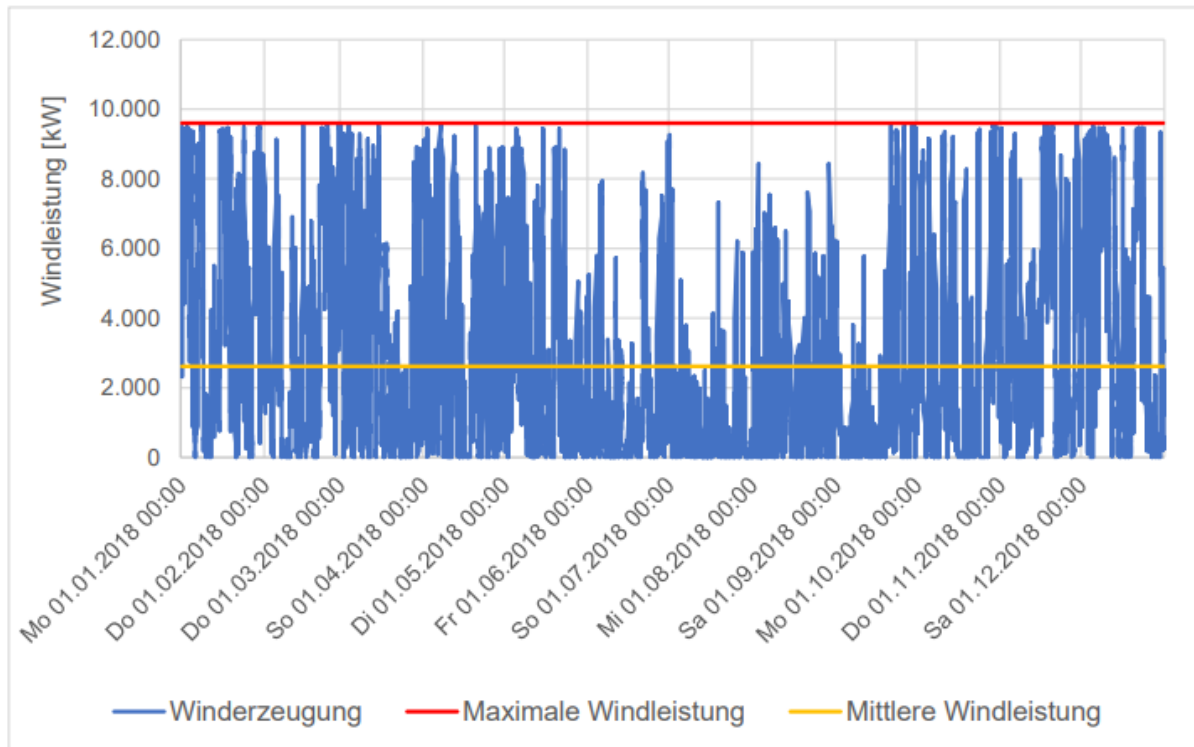


Abbildung 12: Windleistungszeitreihe 2018 [12]

Aktuell sind bei Max Bögl in Sengenthal 4 MW PV-Leistung installiert. Die PV-Leistung ist eine Variable und kann noch deutlich weiter ausgebaut werden. Bei der Leistungsangabe wird die Peak-Leistung genannt. Da aber selbst bei besten Sommer-Wetter in unseren Breitengraden diese Peak-Leistung nicht erreicht werden kann und bei Nacht gar keine Leistung zur Verfügung steht, fällt die mittlere PV-Auslastung deutlich geringer aus. Im Jahr 2018 betrug die mittlere PV-Auslastung am Standort Sengenthal 10,5 %. (vgl. Abb. 13) Es stehen die Solarzeitreihen aus den Jahr 2018, 2019 und 2020 zur Verfügung. Beim weiteren Zubau wird im Modell das Verhalten aus diesen Zeitreihen übernommen.

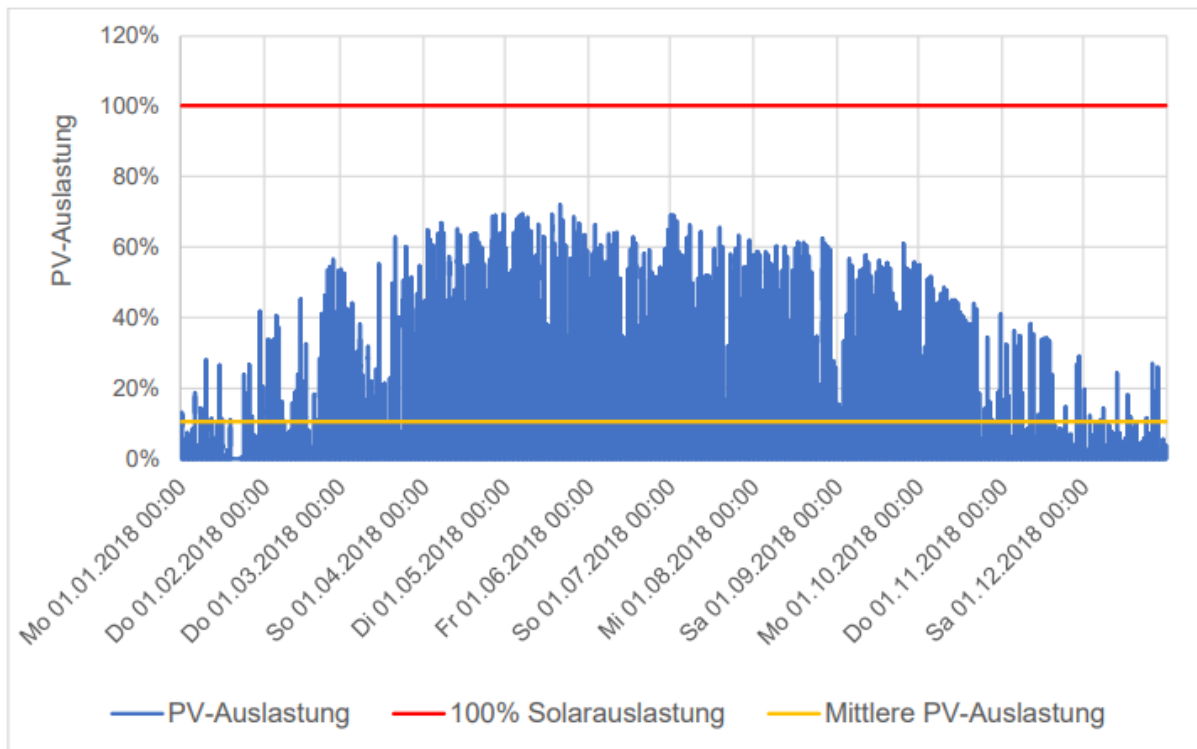


Abbildung 13: Solarzeitreihe 2018 [12]

Als dritte Variable in der Energieerzeugung steht ein Dampfkraftwerk zur Verfügung. Um die CO₂-neutralität zu gewährleisten wird dieses bei Max Bögl mit Hackschnitzeln gefeuert. Der Vorteil eines solchen Kraftwerks liegt in der konstanten und regelbaren Stromerzeugung. Es wird mit einer konstanten Mindestleistung betrieben und kann im Bedarfsfall auch hoch geregelt werden. Zusätzlich kann die Abwärme im Betrieb als Prozess- und Heizwärme genutzt werden.

3.3 Energiespeicherung

Zur Energiespeicherung stehen Lithium-Ionen-Batterien zur Verfügung, dessen Speicherkapazität einfach erweitert werden kann. Die Speicherwirkungsgrade dieser sind hoch (bis zu 90%), die MWh Speicherkapazität aber auch teuer. Außerdem können diese schnell Be- und Entladen werden.

Ein weiterer Energiespeicher, welcher betrachtet wird ist ein Power-To-Gas-To-Power Speicher. Mittels eines Elektrolyseurs wird in Überschussphasen Wasserstoff erzeugt, welcher dann in Hochdrucktanks gespeichert wird. In Defizitphasen kann der Wasserstoff in einer Brennstoffzelle verstromt werden. Vorteil ist das günstig hohe Speicherkapazität erreicht werden können. Der größte Nachteil ist der schlechte Speicherwirkungsgrad. (34-44%) [13]

3.4 Verbrauch

Beim Verbrauch kann man den Einfluss des Tag-Nacht-Rhythmus auf die Produktion erkennen. Tagsüber liegen die Leistungen in der Regel im Bereich zwischen 4,0 und 5,0 MW. Peaks können bis zu 6,0 MW erreichen. Zwischen Weihnachten und Neujahr fallen die Verbrauchleistungen deutlich. Über das Jahr gesehen stellt sich eine Durchschnittsleistung von ca. 2,5 MW ein. (vgl. Abb. 14)

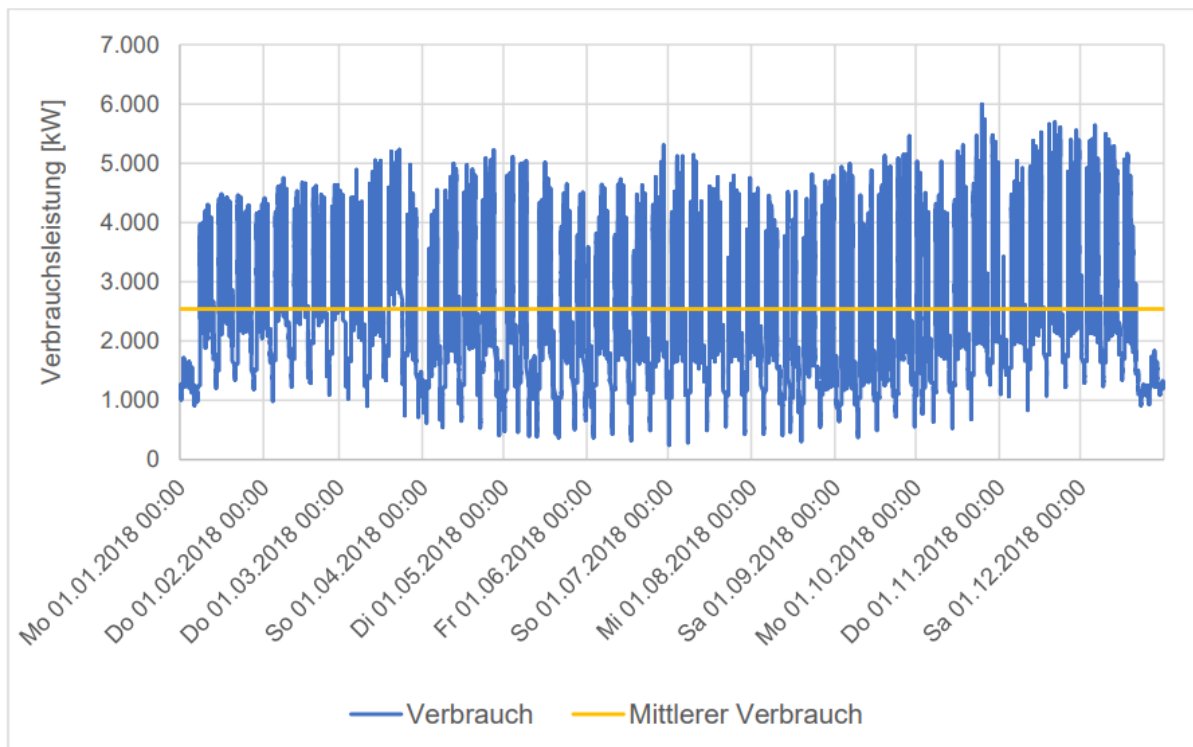


Abbildung 14: Verbrauchszeitreihe 2018 [12]

3.5 Strommarktpreise

Der Strommarktpreis ist das Preisniveau zu welchem die MWh elektrische Energie, stündlich an der Strombörse gehandelt wird. Bei der Wirtschaftlichkeit der Selbstversorgung ist der Strommarktpreis eine Variable mit sehr hoher Sensitivität. Bei steigendem Strompreisniveau nehmen die Einnahmen von exportierten, nicht speicherbaren Überschüssen zu. Zusätzlich steigt der Einkaufspreis für Strom, mit welchem als Wirtschaftlichkeitskriterium verglichen wird. Steigende Strompreise machen es leichter ein wirtschaftliches Szenario zu finden.

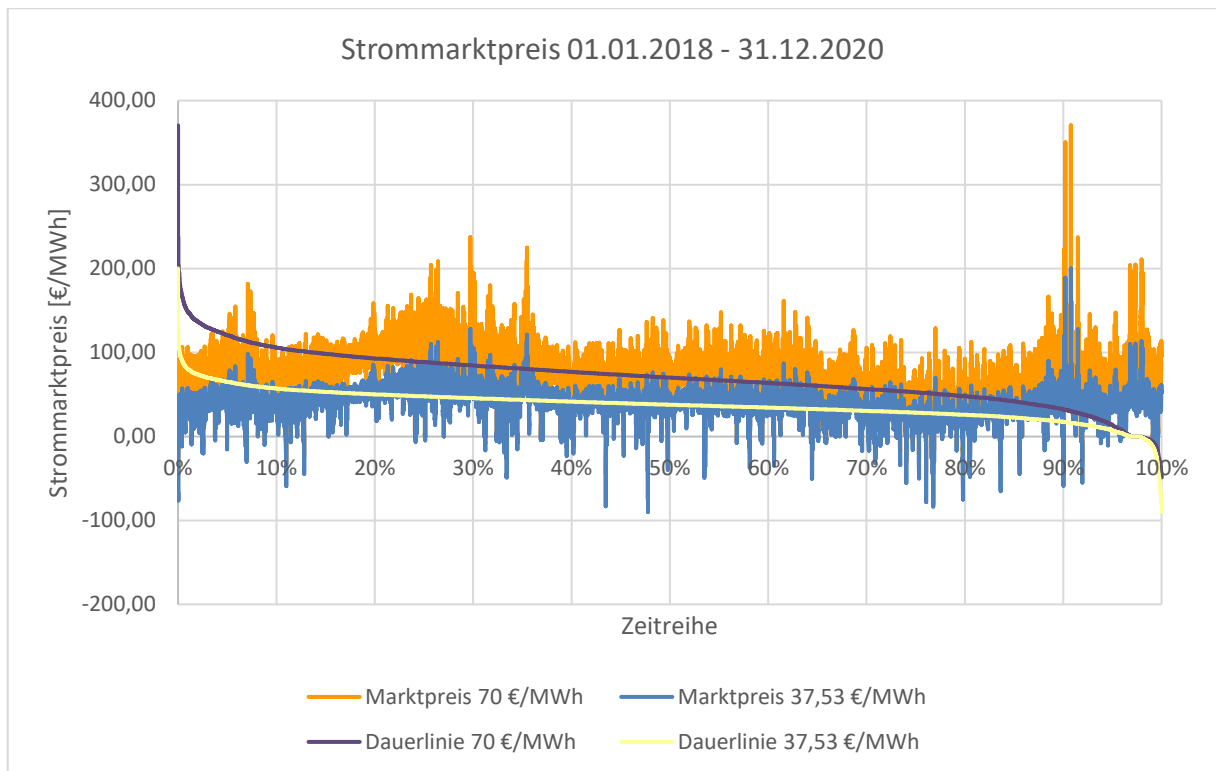


Abbildung 15: Strommarktpreis 2018-2020

Als Basis dienen die Studentenwerte an der Strombörse EEX in Leipzig wie sie in einem Zeitraum von Januar 2018 bis Dezember 2020 aufgetreten sind. (vgl. Abb. 15) Es kommt nicht nur zu positiven, sondern vereinzelt auch zu negativen Strompreisen. Das bedeutet, dass zu diesen Zeitpunkten ein Einspeisen von elektrischer Energie in das Netz Geld kostet. Dies verringert den Gewinn, sodass an Zeitpunkten von negativen Strompreisen Max Bögl nicht einspeist und Erzeugungsanlagen ggf. abschaltet.

Das in den letzten Jahren stabile Preisniveau ist aktuell für Prognosen nicht mehr anwendbar. Ab Mitte 2021 hat der Strompreis ein massiven Schub nach oben gemacht. (vgl. Abb. 16) So lag der mittlere Marktpreis über die Jahre 2018, 2019 und 2020 noch bei 37,53 €/MWh. Im Zeitraum von Januar 2021 bis Februar 2022 stieg dieser Mittlere Preis auf 104 €/MWh. Betrachtet man nur die letzten sechs Monate liegt der mittlere Marktpreis sogar bei 160 €/MWh.

Wo sich langfristig der Strompreis einpendelt, ist nicht vorherzusagen. Langfristige Trends wie z.B. das Abschalten von weiteren Atomkraftwerken, Kohleausstieg und steigende CO₂-Bepreisung lassen aber vermuten, dass das neue Preisniveau über dem der Vergangenheit liegen wird. Im Rahmen der Projektarbeit, welcher dieser Bericht angehört, wird daher für verschiedene Marktpreisniveaus modelliert. In dieser

Arbeit wird die Optimumsuche für einen angenommenen Marktpreis von 70 €/MWh durchgeführt. Dafür wird aus der Zeitreihe des Strompreises von 2018-2020 jeder Stundenwert mit einem Faktor multipliziert, so dass eine neue Strompreiszeitreihe mit dem Mittelwert 70 €/MWh entsteht, welche qualitativ dem Verlauf der als Basis dienenden Zeitreihe folgt.

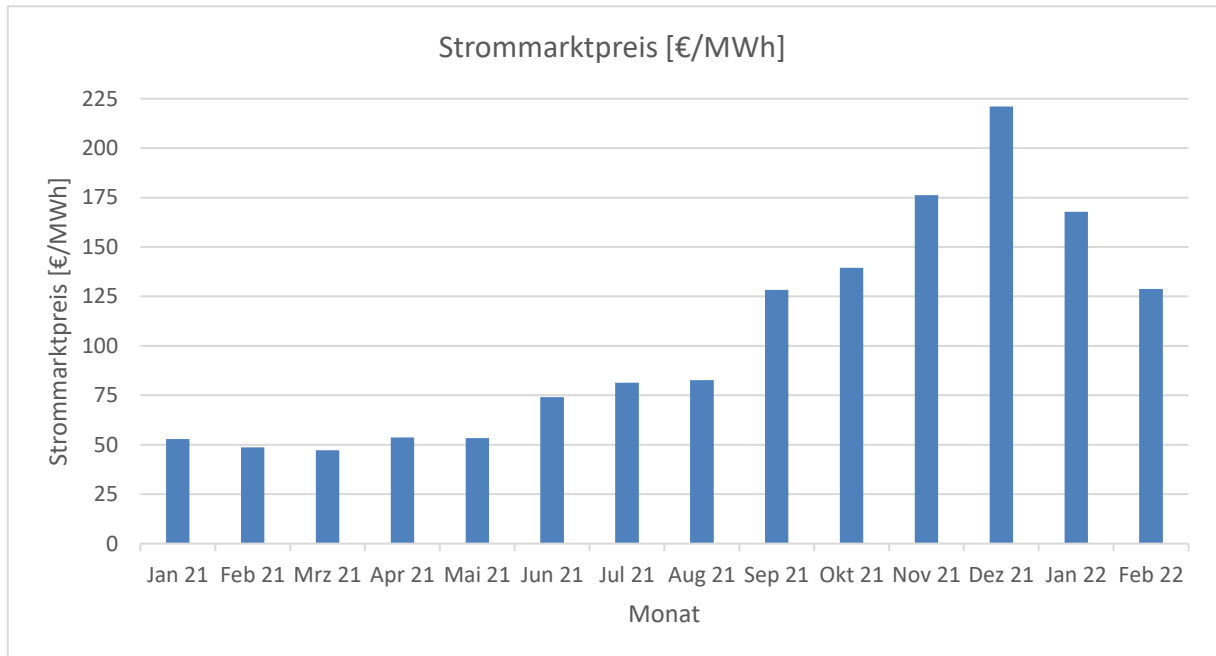


Abbildung 16: Strommarktpreis 2021/22

3.6 Bewirtschaftungsstrategie

Die Bewirtschaftungsstrategie hat das Ziel die Versorgungssicherheit zu gewährleisten, gleichzeitig aber auch Strom möglichst gewinnbringend zu exportieren um über diese Exporterlöse die Stromkosten für den Unternehmensbedarf zu senken. Die Exportleistung ist durch den Netzanschluss am Werk in Sengenthal auf 19 MW begrenzt. Die Exportgewinne werden auf Basis der Strommarkt Zeitreihe berechnet. Die Bewirtschaftung wird für jede Stunde im Jahr geplant.

Für die Planung der Speicher wird jeder Zeitschritt in Überschuss- oder Defizitphasen aufgeteilt. Zum anderen ist relevant ob gerade eine Hochpreis- oder Tiefpreis- Phase ist. In den Überschussphasen ist das Ziel die Speicher aufzuladen. Gibt es mehr Überschüsse als Ladeleistung zur Verfügung steht oder die Speicher bereits voll sind, werden die restlichen Überschüsse als Export verkauft. Wenn die Exportleistung die Leistung des Netzanschlusses übersteigt oder der Strommarkt negative Preise aufweist, müssen die Erzeugungsanlagen heruntergeregelt werden. In Defizitphasen

muss die Speicherladung ausreichend sein um das Defizit zu überbrücken. Die benötigte Leistung darf die Entladeleistung der Speicher nicht überschreiten, ansonsten muss Leistung importiert oder Last abgeworfen werden. Beides führt allerdings zu einem unzulässigen Szenario. [12]

3.7 Preis Minimum

Mit der Strategie aus 3.6 wird nun mit einem Berechnungsprogramm das Minimum der Stromgestehungskosten gesucht. Als Variablen stehen dabei die PV- und Dampfkraftwerksleistung, sowie Kapazität des Batteriespeichers und Leistung des Wasserstoff Elektrolyseurs zur Verfügung. Jede Variable kann mit einer Auflösung von 5-Stufen eingestellt werden. Im Anschluss werden die Stromgestehungskosten für alle 625 Kombinationsmöglichkeiten die Stromgestehungskosten in €/MWh berechnet. Wird in der Lösungsmatrix der ermittelte Wert für das Szenario in schwarzer Schrift ausgegeben, handelt es sich um ein gültiges Szenario. Ist die Schriftfarbe rot, so ist das Szenario ungültig, da nicht zu jeder Stunde eine Selbstversorgung möglich war. Ist das Feld rot ausgefüllt, so ist die Speicherstrategie nicht nachhaltig. Der Wasserstoffspeicher wird nicht mehr komplett voll, so dass davon auszugehen ist, dass dieser irgendwann leerläuft. In grüner Schriftfarbe werden gültige Szenarien hinterlegt, welche den Marktpreis bei vollständiger Eigenbedarfsdeckung unterbieten und damit wirtschaftlich sind. Das Preis Minimum wird durch ein gelbes Feld markiert. (vgl. Abb. 18, 19, 20)

Die folgend vorgestellten Ergebnisse basieren auf einem mittleren Strompreisniveau von 70 €/MWh. Zusammen mit 30 €/MWh EEG-Umlage und weiteren Abgaben ergibt sich ein Marktpreis für die Eigenbedarfsdeckung von 178,03 €/MWh, welchen ein wirtschaftliches Szenario unterbieten muss.

Im ersten Berechnungsdurchgang wird eine grobe Auflösung gewählt. Ausgehend von der jeweils aktuell installierten Leistung sind die Variablen folgend abgestuft.

- PV-Leistung: 4-, 10-, 20-, 40-, 60-MW
- Dampfleistung: 0,34-, 1-, 2-, 4-, 6-MW
- Batteriekapazität: 2,6-, 10-, 20-, 40-, 60-MWh
- Elektrolyseurleistung: 0-, 1-, 2-, 4-, 6-MW

Der grobe Berechnungsdurchgang ergibt als Minimum einen Stromgestehungspreis von 178,04 €/MWh und liegt 0,01 € über dem Wirtschaftlichkeitskriterium. Das Minimum ergibt sich für eine Kombination von 40 MW PV-, 2 MW Dampf-, 1 MW Elektrolyseurleistung sowie 10 MWh Batteriekapazität. (vgl. Abb. 17)

Ergebnisarray	PV	H2	Bat	4					10					20					40					60					
				2,6	10	20	40	60	2,6	10	20	40	60	2,6	10	20	40	60	2,6	10	20	40	60	2,6	10	20	40	60	
0,34	0			340,54	315,52	298,66	270,37	283,95	287,80	257,79	243,16	234,81	233,62	255,62	224,28	208,36	203,62	208,90	225,86	195,65	180,95	178,89	187,83	226,52	195,50	180,57	179,22	187,85	
	1			658,31	590,64	548,54	548,54	478,67	508,65	416,15	367,95	325,74	302,69	426,81	318,37	252,72	232,36	235,24	360,46	246,32	199,55	201,02	211,85	342,19	227,76	196,33	200,55	211,19	
	2			609,82	550,63	513,68	513,68	457,33	440,30	356,64	313,70	282,30	274,61	339,06	243,78	222,85	228,05	237,32	258,33	203,20	197,01	202,22	214,39	233,83	202,03	197,33	203,14	213,40	
	4			545,99	499,33	474,62	474,62	436,47	346,80	282,09	269,46	269,61	272,59	249,71	230,00	226,64	232,65	242,23	216,59	203,98	201,41	207,90	220,50	215,19	204,34	202,60	208,51	219,22	
	6			514,68	476,49	461,13	461,13	431,67	306,27	279,37	273,96	274,97	278,17	246,05	234,76	232,36	238,52	248,51	219,90	209,87	207,20	214,47	227,40	218,12	210,03	208,33	214,49	225,81	
	0				303,48	282,47	269,90	260,93	259,57	257,76	232,39	221,12	216,15	219,03	230,22	204,07	192,60	190,48	200,00	204,47	180,44	169,53	171,59	181,80	207,58	182,72	171,61	174,50	184,65
1	1			531,97	477,99	443,46	409,42	391,02	397,39	318,47	281,24	249,74	250,23	325,17	234,17	208,12	209,43	219,34	265,67	192,07	183,17	190,08	201,15	252,73	191,70	186,71	192,46	202,28	
	2			476,88	432,27	404,16	377,88	366,18	320,19	254,35	241,15	240,91	245,33	236,01	208,48	204,25	210,77	221,37	204,35	186,02	185,25	192,05	203,53	202,65	189,71	188,25	194,21	204,70	
	4			407,10	376,12	360,97	348,90	342,33	262,89	245,47	240,94	242,90	248,48	218,87	208,37	208,34	216,24	227,31	197,51	190,46	190,32	198,09	209,56	200,04	194,22	193,77	200,32	211,07	
	6			375,24	352,13	345,72	342,23	336,12	264,47	248,15	245,52	248,48	254,05	220,48	214,31	214,12	222,02	233,85	202,96	196,84	196,00	204,48	216,25	206,11	200,26	199,94	206,71	218,02	
	0				266,29	249,49	240,47	238,94	244,16	230,18	210,78	204,57	206,06	212,17	208,09	189,42	183,61	189,06	197,51	187,35	178,59	166,09	173,63	185,02	193,52	175,88	171,55	178,43	189,59
	1				402,00	370,83	352,34	338,67	333,77	290,33	237,43	227,44	228,25	233,37	230,49	201,88	193,70	203,08	214,97	199,32	178,04	179,05	187,81	199,94	202,26	184,17	184,70	193,40	203,93
2	2			347,17	325,62	314,26	308,18	306,15	241,37	226,81	222,77	226,32	232,60	209,92	194,93	195,58	205,36	217,59	185,24	180,11	181,30	190,86	203,05	190,72	186,52	187,79	195,80	206,92	
	4			285,85	280,89	281,02	286,44	292,91	234,37	222,77	222,44	227,41	235,70	204,11	200,55	201,38	211,57	224,49	189,50	185,72	187,34	196,54	209,47	195,04	191,94	193,11	201,73	212,82	
	6			289,54	285,59	286,78	292,84	299,18	237,06	225,71	226,27	231,69	242,25	209,65	206,70	208,08	218,48	230,92	195,12	192,02	193,48	203,15	215,57	200,44	197,41	199,21	208,20	219,27	
	0				257,07	247,65	246,49	253,31	263,85	230,22	218,31	217,70	225,54	237,01	214,24	203,75	202,40	211,76	225,34	199,56	190,90	190,29	200,31	214,09	209,12	200,14	199,34	209,09	222,33
	1				344,60	325,39	318,71	320,12	325,08	266,29	249,84	244,52	247,87	256,69	245,47	225,36	216,29	225,83	238,33	226,43	206,04	202,67	212,11	224,84	232,62	213,32	210,74	220,20	232,13
	2				304,79	295,82	294,30	300,68	310,07	265,59	249,30	244,28	249,61	259,08	239,67	221,48	219,37	229,55	242,03	218,79	205,57	205,72	215,76	228,41	223,39	213,58	214,29	223,78	235,34
4	4			311,48	303,45	302,23	308,31	317,88	265,69	251,34	249,10	255,28	264,45	233,85	226,08	226,52	236,77	249,24	216,44	212,22	212,94	222,78	235,51	224,37	220,12	221,45	230,74	242,43	
	6			318,29	310,26	309,54	315,47	324,99	270,15	257,66	255,19	261,15	270,86	236,55	233,18	233,52	243,53	256,20	222,99	219,41	219,91	229,81	242,50	230,75	227,11	228,63	237,63	249,49	
	0				303,31	296,44	294,99	301,34	311,78	277,55	267,69	266,68	274,04	285,27	262,32	253,29	251,72	260,73	274,30	248,59	240,87	240,03	249,71	263,47	259,06	250,97	249,74	259,15	272,47
	1				381,65	361,84	355,72	357,37	362,50	317,16	299,43	293,59	296,71	305,18	295,99	274,84	265,63	274,86	287,08	276,98	256,02	252,40	261,36	274,12	283,66	264,10	261,16	270,60	282,35
	2				356,24	346,16	343,84	349,83	359,10	316,38	298,66	292,79	298,29	307,62	289,66	270,94	268,41	278,49	290,99	269,14	255,52	255,53	265,19	277,75	274,55	264,40	264,81	273,92	285,81
	4				362,69	353,50	351,43	357,06	366,75	315,72	300,86	298,04	303,99	313,14	283,85	275,54	275,55	285,74	298,19	266,85	262,17	262,60	272,27	285,04	275,54	270,87	272,01	281,15	292,85
6				369,88	360,69	359,16	364,54	373,96	320,29	307,04	304,24	309,94	319,51	286,55	282,67	282,62	292,55	305,13	273,41	269,39	269,66	279,27	291,91	281,91	277,89	279,09	287,80	299,65	

Abbildung 17: Minimum Stromgestehungskosten grob

In einem zweiten Berechnungsdurchgang wird die Matrix um das 1. Minimum herum verfeinert. Die neue Matrix ist folgend aufgebaut.

- PV-Leistung: 36-, 38-, 40-, 42-, 44-MW
- Dampfleistung: 1-, 1,5-, 2-, 2,5-, 3-MW
- Batteriekapazität: 5-, 10-, 15-, 20-, 25-MWh
- Elektrolyseurleistung: 0,5-, 1-, 1,5-, 2-, 2,5-MW

Die Verfeinerung führt zu mehreren wirtschaftlichen Szenarien. Das Minimum von 177,40 €/MWh ergibt sich für eine Kombination aus 44 MW PV-, 2 MW Dampf-, 1 MW Elektrolyseurleistung sowie 10 MWh Batteriekapazität. (vgl. Abb. 18)

Ergebnisarray		PV	36					38					40					42					44				
Dampf	H2	Bat	5	10	15	20	25	5	10	15	20	25	5	10	15	20	25	5	10	15	20	25	5	10	15	20	25
1	0,5		291,73	239,53	209,70	194,56	189,39	288,06	236,20	206,43	192,13	186,80	284,94	232,48	203,40	190,28	184,56	282,06	229,64	200,94	188,39	182,57	280,04	227,28	199,01	186,96	182,08
	1		234,23	196,48	185,85	185,50	185,93	230,20	193,99	184,70	184,05	184,88	226,72	192,07	183,47	183,17	183,98	223,47	191,09	182,46	182,49	183,27	220,79	189,99	182,04	182,09	182,39
	1,5		203,51	188,21	186,09	186,10	186,85	201,34	186,31	184,93	184,91	185,68	199,78	185,29	183,95	183,96	184,79	198,10	184,15	183,25	183,28	184,10	197,08	183,65	182,82	182,86	183,63
	2		195,90	188,25	186,93	187,31	188,17	194,00	187,02	185,75	186,18	186,98	192,32	186,02	184,77	185,25	186,04	190,93	185,24	184,06	184,19	185,37	189,80	184,76	183,68	183,77	184,91
	3		193,93	190,31	189,38	189,69	190,95	192,25	189,04	188,14	188,46	189,40	191,19	188,03	187,21	187,63	188,53	190,38	187,26	186,46	187,00	187,84	189,81	186,70	186,01	186,12	187,31
1,5	0,5		246,16	204,41	188,12	180,72	181,62	242,92	201,52	186,04	179,26	180,60	239,92	198,51	184,50	178,86	179,73	237,77	196,06	182,85	178,21	179,12	235,88	194,21	182,20	177,89	179,15
	1		199,05	184,61	180,71	181,24	182,49	197,29	183,13	179,64	180,16	181,40	196,15	181,49	178,77	179,35	180,66	194,94	180,51	178,49	178,65	179,90	194,30	179,41	178,11	178,73	179,62
	1,5		189,89	182,20	181,57	182,09	183,40	188,05	181,09	180,44	181,04	182,39	186,81	180,12	179,57	180,61	181,52	185,40	179,39	179,31	179,85	181,23	184,66	179,37	178,98	179,56	180,87
	2		185,55	182,92	182,81	183,36	184,75	184,32	181,77	181,68	182,27	183,64	183,34	180,80	180,82	181,40	182,78	182,57	180,08	180,14	180,78	182,20	182,52	180,09	179,85	180,40	181,77
	3		187,42	185,34	185,25	185,64	187,40	186,15	184,19	184,08	184,91	186,29	185,53	183,21	183,15	184,04	185,42	184,73	182,87	182,47	183,39	185,14	184,62	182,44	182,47	183,38	184,74
2	0,5		218,74	190,16	182,48	179,74	181,49	215,95	188,34	181,03	179,00	180,39	213,74	187,19	180,20	178,20	180,00	211,79	186,33	179,29	177,97	179,35	210,44	186,02	178,61	177,71	179,49
	1		191,70	180,05	179,50	180,54	181,85	190,25	178,90	178,76	179,44	181,29	189,08	178,04	177,90	179,05	180,42	188,15	177,39	177,76	178,49	180,28	187,52	177,40	177,43	178,59	179,92
	1,5		183,31	180,72	180,72	181,40	183,18	181,32	179,62	179,53	180,67	182,03	180,77	178,72	178,72	179,88	181,63	180,53	178,46	178,54	179,66	180,95	180,18	178,03	178,62	179,81	181,10
	2		183,61	182,12	181,75	182,85	184,71	182,79	180,60	180,98	182,10	183,52	181,82	180,11	180,17	181,30	183,16	181,54	179,42	180,01	181,15	182,51	181,54	179,43	179,71	180,89	182,63
	3		186,29	185,03	184,69	185,70	187,57	185,04	183,48	183,96	184,98	186,96	184,46	183,00	183,12	184,18	186,16	184,17	182,28	182,90	184,11	185,46	183,67	182,27	182,56	183,73	185,57
2,5	0,5		202,55	188,36	180,54	180,64	182,39	199,93	186,54	179,49	180,04	181,88	197,56	185,40	178,25	179,65	181,01	196,82	184,46	178,10	179,04	180,81	196,70	184,16	178,18	179,18	180,94
	1		191,64	181,49	180,37	181,81	183,60	190,19	180,41	179,74	180,71	182,94	189,41	179,12	179,33	180,36	182,05	188,88	178,90	179,17	180,16	181,91	188,63	178,97	178,80	180,30	181,95
	1,5		188,87	182,77	181,74	182,84	184,98	187,27	181,26	181,05	182,21	183,89	186,38	180,41	180,66	181,84	183,45	185,75	180,16	180,07	181,15	183,26	185,35	180,20	180,17	181,26	183,35
	2		186,30	183,67	183,17	184,24	186,49	185,06	182,62	182,56	183,61	185,39	184,12	181,73	181,65	183,17	184,91	183,84	181,50	181,45	182,52	184,77	183,39	181,07	181,56	182,66	184,82
	3		187,71	186,69	185,83	186,93	189,10	186,94	185,16	185,19	186,30	188,53	185,99	184,30	184,76	185,85	187,55	185,68	184,05	184,10	185,13	187,32	185,64	184,07	184,16	185,20	187,37
3	0,5		202,62	192,30	185,60	184,87	186,65	201,72	191,29	184,57	184,31	186,00	201,08	190,09	184,15	183,45	185,56	200,72	189,60	183,60	183,28	185,35	200,65	189,38	183,30	183,55	185,15
	1		199,91	189,08	184,62	185,86	188,03	198,51	188,02	184,01	185,34	187,48	197,74	186,72	183,56	184,84	186,94	197,24	186,12	183,48	184,77	186,38	197,05	186,21	183,68	184,97	186,58
	1,5		196,72	187,89	185,88	187,21	189,29	195,15	186,86	185,21	186,55	188,77	194,25	186,00	184,84	186,20	188,33	193,65	185,33	184,71	186,02	187,62	193,32	185,44	184,89	185,70	187,86
	2		193,97	188,05	187,07	188,39	190,63	192,81	187,02	186,49	187,77	189,97	191,88	186,22	186,06	187,35	189,45	191,67	186,06	185,93	187,26	188,85	191,32	186,18	186,16	187,02	189,21
	3		193,60	191,19	190,28	191,55	193,78	192,39	190,62	189,58	190,95	193,16	191,93	189,32	189,19	190,47	192,66	191,68	189,11	189,04	190,34	192,51	191,71	189,17	189,13	190,46	192,71

Abbildung 18: Minimum Stromgestehungskosten mittel

Ein dritter Berechnungsgang bringt eine weitere Verfeinerung der Auflösung. Die neue Matrix ist folgend aufgebaut.

- PV-Leistung: 42-, 43-, 44-, 45-, 46-MW
- Dampfleistung: 1,5-, 1,75-, 2-, 2,25-, 2,5-MW
- Batteriekapazität: 10-, 12,5-, 15-, 17,5-, 20-MWh
- Elektrolyseurleistung: 0-, 0,5-, 0,75-, 1-, 1,25-MW

Dies stellt die feinste untersuchte Auflösung dar, da eine noch feinere Auflösung im Zubau kaum Sinn macht.

Für eine Kombination aus 44 MW PV-, 2 MW Dampf-, 0,75 MW Elektrolyseurleistung sowie 12,5 MWh Batteriekapazität entsteht das günstigste gültige Szenario mit einem Stromgestehungspreis von 176,89 €/MWh. (vgl. Abb. 19)

Ergebnisarray	Dampf	H2	PV	Bat	42					43					44					45					46				
					10	12,5	15	17,5	20	10	12,5	15	17,5	20	10	12,5	15	17,5	20	10	12,5	15	17,5	20	10	12,5	15	17,5	20
1,5	0				173,13	169,98	167,55	166,01	165,12	172,67	169,67	167,31	166,09	164,84	172,45	169,41	167,58	166,02	164,74	172,27	169,13	167,10	165,69	164,79	172,46	169,24	167,18	165,64	164,55
	0,5				196,06	187,98	182,85	179,54	178,21	195,12	187,32	182,54	179,28	178,30	194,21	186,99	182,20	179,26	177,88	193,36	186,46	182,00	179,07	178,05	192,53	185,94	181,77	178,81	178,16
	0,75				185,73	180,91	177,98	178,12	178,44	185,41	180,54	177,96	178,11	178,43	185,07	180,20	178,00	178,16	178,16	184,82	179,93	177,72	177,87	178,31	184,62	179,71	177,82	177,94	178,32
	1				180,51	178,20	178,49	178,74	178,65	180,14	178,20	178,12	178,30	178,67	179,41	178,19	178,11	178,35	178,73	179,13	177,92	178,23	178,46	178,44	178,88	178,07	177,96	178,18	178,56
	1,25				179,24	178,75	178,67	178,93	179,23	178,85	178,38	178,63	178,91	179,27	178,85	178,37	178,31	178,54	178,95	178,92	178,52	178,42	178,70	179,07	178,66	178,21	178,52	178,78	179,19
1,75	0				170,94	167,98	166,27	165,37	165,03	170,63	168,10	166,15	165,14	165,14	170,80	168,24	166,28	164,88	164,72	170,33	167,71	165,94	164,81	164,85	170,67	167,67	165,97	164,98	164,67
	0,5				188,29	183,93	180,78	177,31	177,74	187,93	183,93	180,42	177,38	177,72	188,01	183,63	180,10	177,01	177,44	187,80	183,38	179,82	177,15	177,55	187,60	183,16	179,61	177,31	177,67
	0,75				182,47	178,22	177,35	177,45	177,90	182,07	177,85	177,33	177,54	177,97	181,79	177,51	177,02	177,62	178,08	181,92	177,15	177,06	177,27	177,78	181,65	177,33	177,26	177,45	177,88
	1				177,62	177,62	177,56	177,74	178,16	177,56	177,64	177,51	177,74	178,16	177,63	177,25	177,59	177,82	178,24	177,71	177,30	177,24	177,92	177,97	177,46	177,48	177,44	177,68	178,13
	1,25				178,20	177,76	178,16	178,32	178,77	177,75	177,74	177,73	178,32	178,80	177,77	177,77	177,84	177,95	178,44	177,84	177,44	177,86	178,09	178,52	177,98	177,51	177,64	178,28	178,69
2	0				169,56	168,03	166,80	166,42	165,86	169,58	167,54	166,51	165,93	165,46	169,53	167,94	166,63	166,70	165,47	169,83	167,88	166,47	165,99	165,32	169,41	167,67	166,23	166,57	165,95
	0,5				186,33	182,52	179,29	177,60	177,97	186,34	182,13	178,93	177,25	178,00	186,02	181,84	178,61	177,34	177,71	185,85	181,65	178,78	177,47	177,89	185,67	181,47	178,60	177,65	177,97
	0,75				180,20	177,26	177,19	177,81	178,28	179,79	177,23	177,18	177,34	178,25	179,48	176,89	177,33	177,54	178,05	179,63	177,01	177,40	177,60	178,09	179,45	177,13	177,58	177,80	178,28
	1				177,39	177,38	177,76	177,99	178,49	177,36	177,38	177,32	177,97	178,46	177,40	177,38	177,43	177,71	178,59	177,55	177,19	177,56	177,85	178,75	177,30	177,37	177,96	178,46	
	1,25				177,84	177,48	177,98	178,21	179,07	177,44	177,48	177,94	178,21	178,69	177,46	177,49	177,65	178,37	178,79	177,59	177,66	177,77	178,04	178,92	177,77	177,80	177,94	178,20	179,04
2,25	0				169,62	167,48	166,88	165,93	165,94	169,31	167,51	166,62	166,23	166,42	169,14	167,75	166,85	166,45	166,27	169,46	167,91	167,17	166,85	166,10	169,57	167,86	166,95	166,39	166,42
	0,5				184,93	180,98	177,94	177,30	178,11	184,61	180,62	177,58	177,36	177,82	184,32	180,35	177,30	177,46	177,89	184,06	180,48	177,41	177,63	178,00	184,26	180,30	177,10	177,74	178,14
	0,75				178,89	176,96	177,27	177,50	178,37	178,49	176,99	177,31	177,53	178,41	178,17	177,06	177,43	177,68	178,10	178,31	177,15	177,57	177,77	178,20	178,09	177,32	177,28	177,92	178,41
	1				177,41	177,48	177,43	178,06	178,57	177,43	177,52	177,46	178,07	178,65	177,50	177,58	177,56	178,21	178,74	177,62	177,29	177,70	177,96	178,90	177,37	177,44	177,83	178,05	179,04
	1,25				177,95	178,01	177,96	178,60	179,02	177,95	177,99	177,99	178,64	179,07	178,03	178,11	178,12	178,77	179,19	178,12	178,22	178,22	178,44	179,29	178,25	177,94	178,38	178,57	179,43
2,5	0				170,40	169,24	167,70	167,51	167,77	170,27	168,98	167,87	166,89	167,63	170,45	169,02	168,05	167,49	167,68	170,10	168,93	167,82	167,23	167,77	170,57	169,15	168,03	167,53	168,10
	0,5				184,46	180,54	178,10	178,22	179,04	184,07	180,11	178,06	178,24	179,01	184,16	180,20	178,18	178,38	179,18	183,92	179,97	177,88	178,52	179,31	183,74	179,80	178,66	178,68	179,01
	0,75				179,71	178,29	178,26	178,89	179,27	179,70	177,82	178,23	178,86	179,18	179,37	177,89	178,34	178,96	179,36	179,50	178,03	178,42	178,64	179,47	179,71	178,24	178,66	178,85	179,65
	1				178,90	178,75	179,17	179,37	180,16	178,89	178,72	178,66	179,35	180,15	179,97	178,80	178,80	179,47	180,30	179,07	178,46	178,89	179,56	179,94	179,26	178,70	179,09	179,78	180,18
	1,25				179,33	179,24	179,63	180,35	180,71	179,28	179,17	179,57	179,79	180,69	179,35	179,29	179,73	179,99	180,87	179,49	179,42	179,82	180,08	180,95	179,67	179,57	179,57	180,23	181,12

Abbildung 19: Minimum Stromgestehungskosten fein

Ein vollständiger Verzicht des Power-To-Gas-To-Power Speichers würde noch deutlich geringere Minima ermöglichen. Eine komplette Selbstversorgung ist so nicht mehr möglich. Die geringstmöglichen Stromgestehungskosten von 164,55 €/MWh machen einen Stromimport von 8660 MWh notwendig. Dies entspräche 38% des kompletten Jahresenergieverbrauchs.

3.8 Sensitivitätsanalyse

Mit Hilfe einer Sensitivitätsanalyse wird untersucht, welchen Einfluss die Abweichung von einzelnen Variablen vom Optimum, auf die Stromgestehungskosten hat. Dies bringt Aufschluss, wie viel Spielraum in der Zubau Leistung möglich ist.

Bis zu einer Veränderlichkeit von +- 10% zeigen sich alle vier Variablen (PV, Dampf, Batterie, Elektrolyseur) wenig sensibel mit Stromgestehungskosten im wirtschaftlichen Bereich. Ab einer Schwelle von -10 % Abweichung vom Optimum steigen bei allen Variablen die Stromgestehungskosten stark an. Am sensibelsten zeigt sich dabei die PV-Leistung. Bei Abweichung in den positiven Bereich zeigt sich bei Batteriekapazität und Elektrolyse Leistung kaum ein Einfluss auf die Kosten. Bei zunehmender PV- und Dampfleistung steigen die Stromgestehungskosten. Allerdings aber nicht so stark wie bei negativer Abweichung. (vgl. Abb. 20)

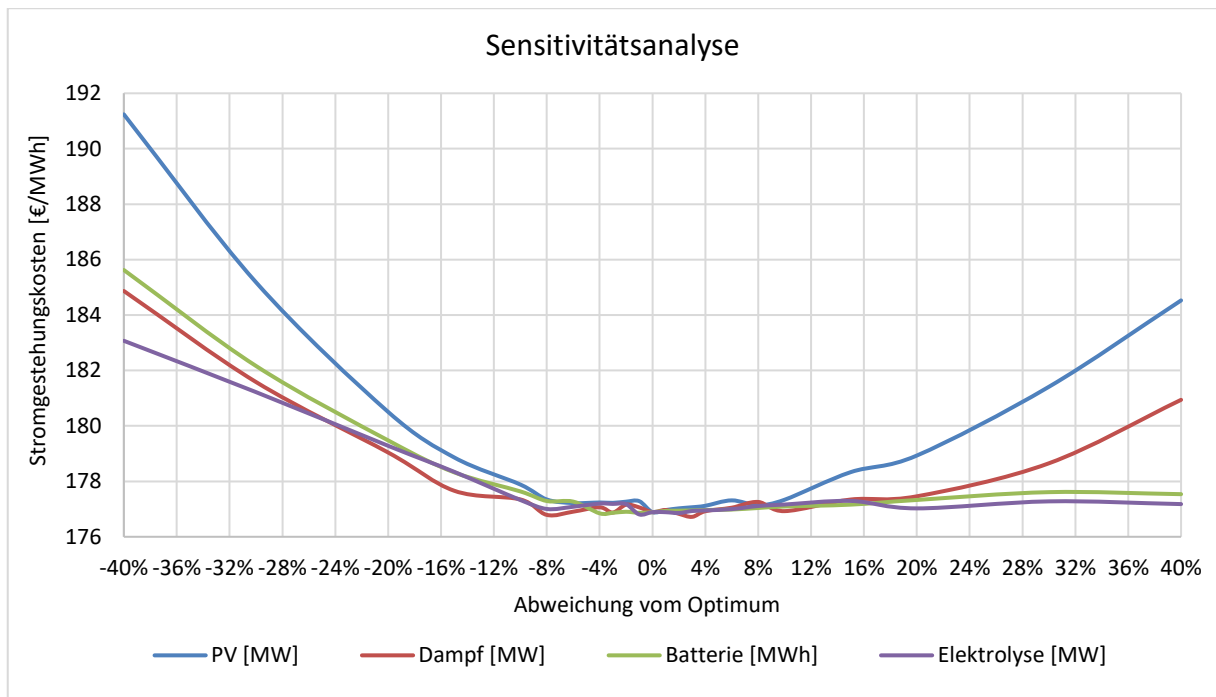


Abbildung 20: Sensitivitätsanalyse

4 Ausblick

Durch steigende Strommarktpreise kann die Windenergie den Sprung machen auch ohne EEG-Einspeisevergütung wirtschaftlich zu sein. Ein stabiles Preisniveau von 60 – 80 €/kWh würde dafür ausreichen. So werden auch in den kommenden Jahren die Ausnutzungsgrade weiter steigen und die Anlagenkosten sinken. Globale Trends wie CO₂-Bepreisung, Preissteigerungen bei fossilen Brennstoffen machen so ein Szenario realistisch. Die hohen Umweltziele der Deutschen Regierung machen einen weiteren Ausbau der Windenergie in Deutschland unabdinglich. Die Windkraft ist aber auch noch nicht am Ende ihrer technischen Entwicklung angelangt.

Die Ergebnisse der Versorgungsanalyse des Max Bögl Standort in Segenthal zeigen sich ebenfalls positiv. In dem berechneten Modell ist bei einem mittleren Strommarktpreis von 70 €/MWh eine wirtschaftliche Selbstversorgung möglich. Durch die Zeit weiter günstiger werdende Komponenten wie PV-Module und Batteriezellen werden auch dort die Wirtschaftlichkeit verbessern.

Literaturverzeichnis

- [1] Deutsche Bank, „Niederlassungen,“ 2010. [Online]. Available: http://www.deutsche-bank.de/de/content/company/globales_netzwerk.htm. [Zugriff am 27 März 2010].

- [2] E. Hau, Windkraftanlagen, Berlin: Springer Vieweg, 2016.

- [3] V. Quaschnig, Regenerative Energiesysteme, München: Carl Hanser, 2019.

- [4] A. Wallasch und S. Lüers, Ausgestaltung von Höchstwertregionen in der technologieübergreifenden Ausschreibung.[Online]. Verfügbar unter: <https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/Studien/> (Zugriff am: 27. Februar 2022).

- [5] Deutsche WindGuard, Status des Windenergieausbaus an Land in Deutschland. [Online].Verfügbar unter: <https://www.windguard.de/veroeffentlichungen.html> (Zugriff am: 24. Februar 2022).

- [6] Enercon, E-138 EP3. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.enercon.de/produkte/ep-3/e-138-ep3/> (Zugriff am: 27.Februar 2022).

- [7] Vestas, V136-4.2 MW. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.vestas.com/en/products/4-mw-platform/V136-4-2-MW> (Zugriff am: 27. Februar 2022).

- [8] Siemens Gamesa, Wind turbine SG 3.4-145. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.siemensgamesa.com/en-int/products-and-services/onshore/wind-turbine-sg-3-4-145> (Zugriff am: 27. Februar 2022).

- [9] Fraunhofer ISE, Stromgestehungskosten erneuerbare Energien. [Online]. Verfügbar unter:
<https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/studie-stromgestehungskosten-erneuerbare-energien.html> (Zugriff am: 02.03.2022).
- [10] Deutsche WindGuard, Volllaststunden von Windenergieanlagen an Land-Entwicklung, Einflüsse, Auswirkungen. [Online]. Verfügbar unter:
<https://www.windguard.de/veroeffentlichungen.html> (Zugriff am: 24. Februar 2022).
- [11] Deutsche WindGuard, Kostensituation der Windenergie an Land in Deutschland - Update. [Online]. Verfügbar unter:
<https://www.windguard.de/veroeffentlichungen.html> (Zugriff am: 24. Februar 2022).
- [12] Patrick Scholz, Regenerative elektrische Selbstversorgung mit marktorientiertem Überschusseexport aus der Energiezelle Max Bögl am Standort Segenthal. [Online]. Verfügbar unter: <https://opus4.kobv.de/opus4-ohm/solrsearch/index/search/searchtype/series/id/19> (Zugriff am 05.03.2022).
- [13] I. Stadler, Energiespeicher, Berlin: Springer Vieweg, 2017.