

**Kann sich der Bezirk Waidhofen an der Thaya
alleine mit Erneuerbaren Energien
selbst versorgen?**

Eine Grundlagenstudie

von

Philipp Kronbichler

Vorwort

Zu Beginn steht der Hinweis, dass ich bei Erstellung vorliegender Studie unentgeltlich und selbstbeauftragt arbeitete. Sie entsprang dem Wunsch, ein gesamtheitliches Bild über die Energiewende in meiner Heimat, dem Bezirk Waidhofen an der Thaya zu gewinnen. Ausgangspunkt war die große Diskussion über den Ausbau der Windkraft in der Region, welche stark polarisiert. Befürworter und Gegner stehen sich mit eingefahrenen Positionen und Argumenten fast schon unversöhnlich gegenüber. Differenzierte Meinungen und neutrale Positionen drohen in der emotionalen Debatte unterzugehen.

Dabei ist es gerade beim Thema Windkraft äußerst wichtig, zunächst einmal ein Gesamtkonzept für die Energiewende zu entwerfen, eine Art ungefähren Fahrplan, um abschätzen zu können, welche Energiequellen im Bezirk vorhanden sind und in welchem Ausmaß genutzt werden können. Das Potential der Erneuerbaren Energien muss bekannt sein, um konkrete Entscheidungen treffen zu können. Erst danach ist es möglich, sich mit der Frage zu beschäftigen, welche Formen Erneuerbarer Energien in welchem Ausmaße genutzt werden können.

Eine sehr wesentliche Rolle spielen dabei verschiedene Speichermöglichkeiten, die bisher in der aktuellen Diskussion so gut wie nicht thematisiert wurden. Ich möchte hier daher diesem Punkt besondere Sorgfalt widmen. In den verschiedenen Szenarien machen Speicher besonders in ökonomischer Hinsicht manchmal einen gewaltigen Unterschied. Ihre Notwendigkeit wird einerseits von physikalischen Rahmenbedingungen festgelegt, andererseits spielen hier auch politische Erwägungen eine große Rolle. Ein größeres Sicherheitsbedürfnis schlägt sich meistens auch in größeren Speichern nieder.

Aufgrund der großen Komplexität der Materie ist die vorliegende Studie in keinem Falle umfassend oder gar erschöpfend. Sie kann allerhöchstens als Ausgangspunkt dienen für weitere Studien, die sich dem Thema genauer nähern können, und Detailstudien und -analysen zu einzelnen Aspekten und Punkten. Trotzdem lassen sich einzelne Erkenntnisse hier schon gewinnen, auf die zum Schluss noch näher eingegangen wird.

Grundlegend sind folgende Erkenntnisse:

1. Die Energiewende im Bezirk Waidhofen a.d.Thaya ist möglich (und außerdem alternativlos).
2. Sie kann, richtig in die Wege geleitet, wichtige ökonomische Impulse für die Region liefern.
3. Sie ist ein grundlegender Faktor für erhöhte Krisensicherheit und Resilienz in der Region.
4. Die Energiewende setzt ein grundlegendes Umdenken unserer Haltung zu Energieverbrauch, Energieerzeugung und Energiespeicherung voraus.

Abschließend möchte ich allen Menschen danken, die mir die nötige Unterstützung gaben und mir Mut machten, mich an diese Thematik zu wagen: Liebe Uli, lieber Florian, liebe Monika, lieber Hans, liebe Sabine, lieber Franz, liebe Renate, lieber Otmar, lieber Alexander, danke für all die vielen wertschätzenden und anregenden Gespräche und Diskussionen, die mir die Arbeit hier erleichterten und oftmals auch in die richtige Richtung lenkten! Ohne euch gäbe es diese Arbeit nicht!

Herzlichen Dank!

Philipp Kronbichler, Waidhofen a.d. Thaya, Februar 2024

Inhaltsverzeichnis

Grundlagen.....	S. 4
Das Drei-Säulen-Modell der Nachhaltigkeit.....	S. 5
Ausgangslage.....	S. 6
Erneuerbare Energiequellen der Region.....	S. 7
Die Notwendigkeit von Speichern.....	S. 9
Basis-Szenarien.....	S. 12
Szenario 1.....	S. 14
Szenario 2.....	S. 15
Szenario 3.....	S. 16
Szenario 4.....	S. 17
Vergleich der 4 Basisszenarien.....	S. 18
<i>Outside-the-box</i> -Szenarien.....	S. 20
Szenario 5.....	S. 21
Alternativen für die Windkraftnutzung.....	S. 22
Szenario 6.....	S. 24
Szenario 7.....	S. 25
Szenario 8.....	S. 26
Vorschläge zur grundlegenden Architektur der Energiewende.....	S. 28
Erkenntnisse und Resümee.....	S. 29
Zusammenfassende Erkenntnisse.....	S. 31

Grundlagen

1. Anerkennung der Klima- und Biodiversitätskrise

Die Basis einer jeden Arbeit zum Thema Energiewende muss die Anerkennung der Klima- und Biodiversitätskrise sein, welche die Durchschnittstemperatur der Erde im Jahr 2023 bereits um gut 1,45°C gegenüber ihrem vorindustriellem Niveau erhöht hat, und zum Aussterben zahlreicher Tier- und Pflanzenarten geführt hat ^[1]. Grundlage ist weiters die Anerkennung, dass für beide Phänomene die industrielle und technologische Revolution der globalen menschlichen Gesellschaft verantwortlich ist. Die Förderung und Verbrennung fossiler Rohstoffe, sowie Landschaftsnutzung, Raubbau und „freie“ Marktwirtschaft sind wesentliche Treiber der Klima- und Biodiversitätskrise, die in den kommenden Jahrzehnten zu einer existenziellen Krise der gesamten Menschheit werden kann.

2. Die Möglichkeiten des Bezirkes Waidhofen an der Thaya

Die Anerkennung der Klima- und Biodiversitätskrise schließt die Tatsache mit ein, dass beide zusammenhängende Krisen nicht auf regionaler, sondern auf globaler Ebene gelöst werden müssen. Die Region kann allerdings durch das erfolgreiche Lösen der Herausforderungen der Energiewende ein Vorbild für andere Regionen werden. Außerdem hilft die Energiewende, den Herausforderungen des Klimawandels und der Biodiversitätskrise besser zu begegnen.

3. Nachhaltigkeit als grundlegender Lösungsansatz

Der Begriff „Nachhaltigkeit“ ist ein beliebtes Wort, mit welchem ein grundlegender gesellschaftlicher Wertewandel beschrieben wird, welcher die bisherige Haltung kurzfristigen ökonomischen Denkens und genussorientierten Konsums ablösen soll. Doch was bedeutet „Nachhaltigkeit“ bei genauerem Lichte betrachtet? Im Rahmen dieser Studie stützt sich die Verwendung dieses Begriffs auf die drei Leitstrategien Effizienz, Suffizienz und Konsistenz ^[2].

Effizienz: Mit minimalem Aufwand maximales Ergebnis erzielen.

Suffizienz: Mit möglichst wenig auskommen.

Konsistenz: Möglichst lang anhaltenden Nutzen anstreben.

In diesem Zusammenhang ist als weitere wichtige Grundlage noch das **Drei-Säulen-Modell der Nachhaltigkeit** zu erwähnen (siehe unten).

4. Die Grenzen der vorliegenden Studie

Vorliegende Studie beschränkt sich einzig und alleine auf den Bezirk Waidhofen an der Thaya. Synergien und Wechselwirkungen mit anderen Regionen und Bezirken können, wenn überhaupt, nur am Rande angeschnitten werden.

Da viele Technologien noch in Entwicklung sind und viele Effekte die Kosten über die Jahre maßgeblich beeinflussen können, sind diese – im Gegensatz zu physikalischen Rahmenbedingungen – starken Schwankungen unterworfen. Die Kostenkalkulationen in dieser Studie stützen sich auf gegenwärtige Preise und können sich in Zukunft durchaus anders entwickeln.

Der Markt der Erneuerbaren Energien ist in vollem Aufbruch begriffen, auch was die Entwicklung neuer Technologien betrifft. Vorliegende Studie tritt daher maßgeblich für Technologieoffenheit auch gegenüber noch nicht auf dem Markt etablierter technischer Möglichkeiten ein.

Weitere Teilaspekte wie Wärmewende, Mobilitätswende und Netzausbau werden wenn, dann nur am Rande gestreift und nicht näher ausgeführt.

Das Drei-Säulen Modell der Nachhaltigkeit



Das Drei-Säulen-Modell ^[12] versucht, den engen Blickwinkel einer rein ökonomischen Betrachtung um weitere Aspekte zu erweitern. So spielen bei der Betrachtung eines Gesamtsystems neben **wirtschaftlichen** Gesichtspunkten immer auch **ökologische** und **soziale** Bedingungen eine Rolle. Das Drei-Säulen-Modell berücksichtigt diese drei Stützpfeiler in gleichem Maße.

Bei einem konkreten Fall, wie bei dieser Studie, reicht es also nicht, ein Energiesystem nur unter wirtschaftlichem Aspekt zu betrachten. Die ökologischen und sozialen Folgen sind genauso zu berücksichtigen und mit einzubeziehen. Dies ist erheblich schwieriger und vor allem weit weniger genau quantifizierbar als eine bloße ökonomische Gegenrechnung verschiedener Technologiesysteme oder Anbieter.

Bei den weiter unten angeführten Vergleichen spielen technische und wirtschaftliche Kalkulationen daher trotzdem die Hauptrolle, da sie zahlenmäßig leichter miteinander verglichen werden können. Allerdings wird deutlich werden, dass die Einbeziehung sozialer und ökologischer Faktoren einen deutlichen Unterschied macht. Dadurch verändert sich nämlich die Perspektive, unter welcher Entscheidungen getroffen werden.

Ausgangslage

1. Derzeitiger Energiebedarf des gesamten Bezirks Waidhofen an der Thaya

Grundlage für jede Berechnung eines Szenarios, die gesamte Energieversorgung des Bezirks Waidhofen a.d. Thaya auf Erneuerbare Energien umzustellen, ist der derzeitige Energiebedarf. Dieser beträgt laut Energiemosaik Austria ^[3] derzeit 902 GWh/a (Gigawattstunden pro Jahr, Referenzjahr ist 2019). Zur besseren Berechnung wird diese Zahl im Folgenden auf **900 GWh** abgerundet.

2. Zukünftige Entwicklung des Energiebedarfs

Durch **Effizienzsteigerung und Vermeidung** kann ein erheblicher Teil des derzeitigen Energieverbrauchs eingespart werden. Alleine die zunehmende Durchsetzung der Elektromobilität wird durch großflächige Ablösung von Verbrennermotoren mit viel effizienteren Elektromotoren den derzeitigen Energiebedarf im Verkehrssektor von 213 GWh/a (Gigawattstunden im Jahr) dramatisch senken. Weitere Verkehrsmaßnahmen wie eine Zunahme von Mikromobilität und Verbesserung des Angebots im öffentlichen Verkehr führen zu weiteren Einsparmaßnahmen. Ebenfalls großes Einsparpotential bietet der Bereich der Wohnhäuser (bessere Dämmung, effizienteres Heizen durch Wärmepumpen etc.), wo momentan 354 GWh/a verbraucht werden.

Energiemosaik Austria beziffert das **Einsparpotential** im Bezirk Waidhofen auf **über 50%**. Das würde einem zukünftigen Bedarf von insgesamt **450 GWh/a** oder weniger nach erfolgreicher Energiewende entsprechen.

Im weiteren Verlauf der Studie wird zumeist mit einem Jahresbedarf von 450 GWh gerechnet, wobei 2 Szenarien auch mit einem rigorosen Einsparziel von 2/3 des derzeitigen Jahresbedarfs, also mit 300 GWh rechnen. Welches dieser Verbrauchsziele realistisch ist, ist dabei nicht Gegenstand der Studie, sondern alleine die nötigen Konsequenzen auf dem Energieerzeugungssektor.

3. Einsparung als wesentlicher Aspekt der Energiewende

Bei der Betrachtung verschiedener Szenarien bei den Ausbauzielen der Erneuerbaren Energien wird deutlich werden, dass jede eingesparte Kilowattstunde pures Gold wert ist. Teilweise bringt die Umstellung alleine schon Effizienzsteigerungen mit sich, andere Aspekte wie verbesserte, großflächige Wärmedämmung muss jedoch aktiv vorangetrieben werden. Auch ein verbessertes Angebot im öffentlichen Verkehr, wie etwa Elektrobusse und der Neubau der Thayatalbahn, verbunden mit einer verstärkten Förderung von Mikromobilität und Leichtelektrofahrzeugen neben den sich langsam etablierenden Elektroautos, sind wesentliche Hebel bei der Senkung des Energieverbrauchs im Verkehrssektor. Mehr dazu findet sich im Waldviertler Mobilitätsmanifest ^[39].

Erneuerbare Energiequellen in der Region

1. Verfügbare Energieressourcen

Bei der Betrachtung der natürlichen Energieressourcen des Bezirks Waidhofen fällt zuerst der Waldreichtum, sowie die Landwirtschaft ins Auge. Wie später zu zeigen ist, handelt es sich dabei jedoch um den geringsten Teil des verfügbaren Energiereichtums. Wind- und vor allem Sonnenenergie sind in noch viel größerem Ausmaß vorhanden. Geothermie ist höchstens in Verbindung mit Niedertemperaturwärmepumpen nutzbar, jedoch wirtschaftlich nicht zur Stromerzeugung. Auch die Wasserkraft kann mangels größerer Flüsse und großer Höhenunterschiede nur in kleinem Umfang (Kleinwasserkraft) genutzt werden.

Im weiteren Verlauf werden daher nur die drei Energieressourcen Wind- und Sonnenenergie, sowie Biomasse betrachtet, wobei das Hauptaugenmerk auf den ersten beiden liegen wird.

2. Vergleich der Effizienzgrade und des Flächenbedarfs: Wieviel Energie kann pro Quadratmeter erzeugt bzw. „geerntet“ werden?

Dieser Abschnitt behandelt alleine die physikalischen Aspekte und lässt behördliche Vorgaben und Bestimmungen der Raumordnung außer Betracht.

Sonnenenergie wird heutzutage hauptsächlich in Form von Photovoltaik (PV) zur Stromerzeugung genutzt. Sie benötigt derzeit im Durchschnitt 5-9 m², um mit einer Leistung von einem KWp (1 Kilowatt Spitzenleistung) im Jahr eine Megawattstunde (1 MWh/a) Strom zu erzeugen ^[4]. Im Folgenden wird daher mit einem Durchschnitt von 7 m² pro KWp gerechnet.

Eine **Windkraftanlage** (WKA) mit einer Leistung von 6 MW benötigt ein Fundament von ca. 400 m² Grundfläche. Allerdings muss sie in einem Windpark aus rein physikalischen Gründen zur nächsten Windkraftanlage eine Distanz von mindestens 3-5 Rotordurchmessern (je nach Windrichtung) halten, was bei einem Rotor von 150 m Durchmesser 450-750 m entspricht. Zur Berechnung des Platzbedarfs für Windkraft wird daher im Folgenden von einem Oval mit 750 m Länge und 450 m Breite ausgegangen, bei welchem die Windkraftanlage im Zentrum steht. Das ergibt bei optimaler Ausnutzung des Platzangebots ca. 265.000 m² pro 6 MW oder etwa 44 m²/KW. Außerdem gilt in NÖ eine Abstandsregelung von 1.200 m zur nächsten menschlichen Behausung. Der Jahresertrag hängt von der Volllaststundenzahl ab, die im österreichischen Durchschnitt laut Studie 2.000 beträgt ^[5]. Ein Jahresertrag von 1 MWh hat im Durchschnitt also einen Flächenbedarf von 22 m².

Biomasse hat energetisch die geringste Effizienz. Sie liegt bei etwa 1-5 KWh/m² im Jahr ^[6,7] und ist damit um eine ganze Größenordnung niedriger als bei Wind- und Sonnenenergie. 1 MWh braucht also eine Fläche von 200-1.000 m². Biomasse hat jedoch den Vorteil guter Speicherbarkeit, sowie der kombinierten Erzeugung von Strom und Wärme. Als Unterstützung für Sonnen- und Windenergie ist sie daher durchaus wichtig, als Hauptträgerin der Energieversorgung hingegen ungeeignet.

Zusammenfassung der Effizienzgrade (Energieertrag pro Fläche):

Photovoltaik: 1 MWh/a pro 7 m²

Windkraft: 1 MWh/a pro 22 m²

Biomasse: 1 MWh/a pro 200-1.000 m²

3. Betrachtung unter dem Aspekt des Drei-Säulen-Modells

Alle Erneuerbare Energien bedeuten eine wesentliche Änderung gegenüber der derzeit etablierten fossilen Energiewirtschaft, weshalb alle ihre Formen auf mehr oder weniger starken Widerstand in der Bevölkerung stoßen und gesellschaftliche Kontroversen verursachen. Innerhalb dieser Kontroverse sind jedoch deutliche Unterschiede wahrzunehmen, auf die im Folgenden näher eingegangen wird.

Ein weiteres Phänomen ist das so genannte „**Green-Green-Dilemma**“, bei welchem sich Klimaziele und ökologischer Landschafts- und Artenschutz bei der Umsetzung der Energiewende teilweise widersprechen ^[49]. Hierfür sind besonders Wasser- und Windkraft anfällig.

Auf gesellschaftlicher Ebene kann wahrgenommen werden, dass große Energieanlagen immer auf Widerstand stoßen und Kontroversen erzeugen. Das gilt im Besonderen für Wasser- und Windkraft, da diese Energieerzeuger sich sehr schlecht kleinskalieren lassen und ihre größte Effizienz bei großen Anlagen erreichen. Das spiegelt sich auch im Medienecho wieder, in welchem Wasser- und Windkraft besonders häufig mit Pro- und Kontra-Artikeln und -Argumenten bedacht werden. Große Freiflächenphotovoltaikanlagen oder große Biomassewerke geraten jedoch aus diesem Grund auch immer wieder in die Schlagzeilen.

Klar ist, dass **Biomasse** wesentlich weniger effizient und damit **unwirtschaftlicher** ist als Wind- und Sonnenenergie. Auch ihr **ökologischer Impact** ist wesentlich höher, da Waldflächen gerodet werden müssen, bzw. Ackerflächen für Energiepflanzen benötigt werden. Ihre **soziale Akzeptanz** ist hingegen verhältnismäßig hoch, solange Rauch und Abgase nicht die Luftqualität beeinträchtigen. Die Investitionskosten liegen bei 2.000-4.000 €/KW ^[8]. Nutzungsmöglichkeiten sind sowohl auf öffentlicher, gewerblicher und privater Ebene möglich.

Am **Effizientesten** ist hingegen die **Sonnenenergie**. Sie hat einen ca. dreimal höheren Jahresertrag bei gleicher Fläche aufzuweisen wie Windenergie. Ihr **ökologischer Impact** wird bisweilen kontrovers diskutiert, da bei der Herstellung der PV-Zellen u.A. giftige Chemikalien zum Einsatz kommen ^[47] (was auch ein Entsorgungsproblem in sich birgt!), andererseits unter aufgeständerten Solarpanelen weiter Pflanzen wachsen bzw. angebaut werden können. Auch ihre **soziale Akzeptanz** ist relativ hoch. Photovoltaik ist aufgrund ihrer Einsatzvielfalt und flexiblen Skalierbarkeit leicht in urbane Gebiete integrierbar und kann sowohl als Zaun- als auch Fassadenelement gestaltet werden. Ihre Einsatzmöglichkeiten sind von allen drei untersuchten Energiequellen am größten und reichen vom großen Solarpark bis hin zu tragbaren, mobilen PV-Modulen. Die Investitionskosten liegen bei 900-2.700 €/KWp ^[9].

Windenergie ist **nicht so effizient wie Sonnenenergie** und lässt sich schlecht klein skalieren. Je größer Windkraftanlagen sind, umso effizienter werden sie, weshalb etwa Kleinwindkraft ein Nischenprodukt bleiben wird. Windkraft hat jedoch den Vorteil, in unseren Breiten im Winter mehr Ertrag zu liefern als Sonnenenergie. Die **ökologischen Auswirkungen** sind stark umstritten. Je nach Studie gibt es keine oder nur vernachlässigbare negative Auswirkungen, oder im Gegenteil eine starke Gefährdung besonders von Greifvögeln und Fledermäusen. Dies kann jedoch durch gezielte Abschaltungen und farblich kontrastierende Gestaltung der Rotorblätter, sowie strenge Umweltverträglichkeitsprüfungen minimiert werden ^[14]. Die **soziale Akzeptanz** ist gemischt. In Gegenden, wo bereits Windkraftanlagen stehen, werden sie neutral bis positiv wahrgenommen, während sich in Regionen ohne bisherigen Windkraftausbau z.T. heftiger Widerstand in der Bevölkerung regt. Dieser rührt von der stark landschaftsverändernden Wirkung großer Windkraftanlagen her, die Industrielemente in ländlich geprägte Landschaften bringen und sie bei großer Bestandsdichte dominieren kann. So droht in der gesellschaftlichen Wahrnehmung aus einer weitgehend naturbelassenen Landschaft eine Industrielandschaft zu werden. Sowohl die genaue Überprüfung etwaiger ökologische Auswirkungen, als auch der anfängliche Widerstand der Bevölkerung hemmt daher den Ausbau der Windkraft. Die Investitionskosten bewegen sich bei 1.300-1.400 €/KW bei Großwindkraftanlagen im Megawattbereich ^[10,11].

Zusammenfassung:

	Ökologie	Soziales	Effizienz	Kosten
Sonnenenergie	negativ – neutral – positiv	neutral – positiv	positiv	900-2.700 €/KWp
Windenergie	neutral – negativ	positiv – neutral – negativ	neutral – positiv	1.300-1.400 €/KW
Biomasse	neutral – negativ	neutral – positiv	negativ	2.000-4.000 €/KW

In solcher Weise ganzheitlicher betrachtet ist **Sonnenenergie** in Form von Photovoltaik am besten. Die Installationskosten können bei kleineren Photovoltaikanlagen über denen großer **Windkraftanlagen** liegen. Diese bieten außerdem pro installierter Leistung einen höheren Jahresertrag (ca. doppelt so viel wie Photovoltaik). In der öffentlichen Wahrnehmung ist Photovoltaik neutral – positiv besetzt, während die gesellschaftliche Haltung zur Windkraft sehr kontrovers ist und sich über das ganze Spektrum der Meinungsvielfalt erstreckt. Am positivsten wird Windkraft rezipiert, wenn die Erzeugung weitab menschlicher Behausungen geschieht. Photovoltaik lässt sich hingegen problemlos in Siedlungsgebiete, sowie Acker- und Wiesenflächen integrieren. Im Drei-Säulen-Modell der Nachhaltigkeit gewinnt sie aus mehreren Gründen daher in praktisch allen Bereichen. **Biomasse** hat ihren größten Gewinn in der sozialen Akzeptanz, während sie in allen anderen Belangen verliert. Sie hat die höchsten Investitionskosten, die geringste Effizienz und kann zu Raubbau an der Natur führen. Im Gegensatz zu allen anderen erneuerbaren Energieerzeugern ist sie jedoch speicherfähig, was wiederum einen großen Vorteil darstellt.

Die Notwendigkeit von Speichern

Einer der grundlegendsten Unterschiede zwischen fossilen und erneuerbaren Energieträgern ist, dass fossile Energieträger sich sehr gut speichern lassen, erneuerbare hingegen nicht (mit Ausnahme von Biomasse, Wasserkraft und Erdwärme). Die Speicherfähigkeit ist den „Fossilen“ geradezu naturimmanent, während für „Erneuerbare“ extra Speicher in verschiedener Form mit eingeplant werden müssen.

Für die Speicherung von Wind- und Sonnenstrom gibt es eine ganze Reihe von verschiedenen Speichermöglichkeiten, die hier nicht alle berücksichtigt werden können. Es wird nur je eine Form von Kurz-, Mittel- und Langfristspeicher betrachtet, die sich bis zu einem gewissen Grad auch überlappen können. Manche Speicherformen wie Pumpspeicher sind im Bezirk Waidhofen auch nicht anwendbar.

Batterie/Akkuspeicher

Die Begriffe Akku und Batterie werden im Folgenden synonym gebraucht. Diese Speicherform ist für elektrische Energie die effizienteste, da selbige nicht in eine andere Form transformiert werden muss. Effizienzgrade von 90-95% sind bei der etablierten Lithium-Ionen-Technologie mittlerweile Standard^[16]. Die Speicherdichte fällt für stationäre Anlagen kaum ins Gewicht und wird daher hier nicht mitberücksichtigt. Die Selbstentladung ist äußerst gering und fällt nur bei Langzeitspeichern von mehreren Monaten bis Jahren ins Gewicht. Batteriespeicher sind daher vor allem für kurz- bis mittelfristige Speicherung von einigen Stunden bis Wochen geeignet.

Die Bereitstellung der benötigten Rohstoffe steht immer wieder im kritischen Fokus, da besonders bei Seltenen Erden einige wenige Konzerne und Staaten eine Monopolstellung erlangt haben, und der Abbau von Lithium ökologisch belastend ist. Hier bieten sich daher Lösungen wie „Second-Life-Batteries“ an, wo gebrauchte E-Auto Akkus noch einige Jahre als stationäre Speicher verwendet werden können. Auch ein konsequentes Akku-Recycling macht sehr viel Sinn, weil auf diese Weise die Importabhängigkeit schwindet und dieser Prozess weitaus nachhaltiger ist als die Entsorgung auf Sondermülldeponien. Eine weitere interessante Anwendungsmöglichkeit bietet das so genannte „Vehicle-to-Grid“ Konzept^[50], bei welchem Elektrofahrzeuge imstande sind, Strom aus dem internen Akku bei Bedarf ins öffentliche Netz zurückzuspeisen. Die geladene Energie steht so nicht mehr nur alleine für den Antrieb zur Verfügung, sondern auch als dezentraler Pufferspeicher fürs Netz.

Die Technologieszene befindet sich auf diesem Feld in starker Bewegung, so kommen bereits ökologisch bessere Natrium-Ionen Akkus auf den Markt. Sie werden allerdings noch einige Jahre brauchen, um sich zu etablieren. Für stationäre Speicher ebenfalls interessant sind Redox-Flow-Batterien, die zwar eine geringe Energiedichte haben, jedoch sehr langlebig und vor allem ökologisch verträglich sind ^[17]. Ihre Effizienz ist mit 75-80% etwas geringer als die von Lithiumakkus, in der Regel sind auch die Ladeströme etwas geringer.

Die Kosten eines Akkuspeichers sind von allen drei hier vorgestellten Methoden die höchsten, wobei sie seit Jahren stark und kontinuierlich fallen. Gegenwärtig belaufen sie sich auf 400-1.000 €/KWh ^[18].

Wasserstoffspeicher

Bei der Wasserstoffspeicherung wird zunächst mittels elektrischer Energie in einem Elektrolyseur Wasser in Sauerstoff und Wasserstoff gespalten. Der Wasserstoff wird in Druckspeicher gepresst und bei Bedarf in einer Brennstoffzelle, in welcher der Wasserstoff zusammen mit dem Sauerstoff der Umgebungsluft wieder zu Wasser reagiert, zurück verstromt. Diese Form der chemischen Speicherung hat mit etwa 30-35% einen weitaus geringeren rein elektrischen Wirkungsgrad als die elektrochemische Speicherung in Batterien. ^[20] Der größte Teil der chemischen Bindungsenergie wird in Form von Wärme frei. Wird diese mittels Kraft-Wärme-Koppelung (KWK) mitgenutzt, steigt der gesamte (nicht nur der elektrische) Wirkungsgrad auf ca. 80%.

Herausforderungen bietet der generelle Umgang mit Wasserstoff, der das leichteste und damit auch flüchtigste Element unseres Universums ist. Mittlerweile hat sich die Speicherung unter hohem Druck von mehreren hundert Bar in speziellen Hochdrucktanks etabliert, was allerdings den Herstellungsaufwand und damit die Kosten in die Höhe treibt. Wasserstoff diffundiert außerdem mit der Zeit selbst durch die dichtesten Hochsicherheitstankwände, was für eine mittelfristige Speicherdauer von einigen Wochen bis Monaten ausreicht, bei mehr als einem Jahr jedoch problematisch wird. Es ist außerdem zu bedenken, dass aufwendigere Herstellungsprozesse immer auch eine höhere ökologische Belastung bedeuten.

Dennoch ist die Wasserstoffspeicherung besonders in größerem Maßstab erheblich billiger als die Speicherung über Batterien (die Kosten für Wärmetauscher und Wärmespeicherung nicht mit eingerechnet). Bei großen Drucktanks beträgt sie 30 €/KWh (rein elektrisch), bei kleineren Hochdruckgasflaschen bis zu 160 €/KWh ^[19].

Wasserstoffspeicherung eignet sich allerdings nicht für die kurzfristige Aufnahme großer Ladeströme, da ansonsten die nötigen Elektrolyseanlagen und Brennstoffzellenstacks sehr groß dimensioniert werden müssen, was die Kosten in die Höhe treibt. Elektrolyseanlagen kosten derzeit ca. 800-1.000 €/KW, Brennstoffzellen ca. 2.000-2.500 €/KW (rein elektrisch) ^[21].

Methanol- und Ammoniakspeicherung

Um die speziellen Herausforderungen der Wasserstoffspeicherung zu umgehen, wird mittlerweile daran geforscht, den per Elektrolyse erzeugten Wasserstoff in chemisch gebundener Form zu lagern (Power-to-X) ^[32]. Hier bieten sich vor allem die wasserstoffhaltigen Chemikalien Methanol und Ammoniak an. Beide können mit relativ geringem energetischem Aufwand aus Wasserstoff erzeugt werden: Methanol aus Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid, Ammoniak aus Wasserstoff und Stickstoff. Sie lassen sich außerdem recht einfach wieder in ihre chemischen Grundbestandteile aufspalten.

Interessanterweise gleicht sich bei beiden Stoffen die etwas aufwendigere Herstellung und Rückverstromung im Vergleich zu Wasserstoff (die mit etwas verringerter Effizienz einhergeht) durch die leichtere Handhabung und Speicherung wieder aus. Methanol lässt sich leichter als das gasförmige Ammoniak speichern, weil es flüssig ist. Die Speicherkosten für Methanol belaufen sich auf etwa 1 €/KWh rein elektrisch, während Ammoniak auf etwa 1,7 €/KWh kommt ^[22]. Gegenwärtig werden beide Stoffe hauptsächlich aus fossilem Erdgas gewonnen, während sich die chemische Produktion aus Erneuerbaren Energien erst im Aufbau befindet ^[34, 36, 37].

Sowohl Methanol als auch Ammoniak eignen sich gut für Langzeitspeicher von einigen Monaten bis sogar Jahren. Damit können sie auch eine hervorragende Notfallreserve im Katastrophenfall bilden, sollte das Energieversorgungsnetz kurz- bis mittelfristig ausfallen.

Beide Stoffe sind außerdem für die chemische Industrie interessant, weil sie die Ausgangsbasis für unzählige Produkte bilden, die im Alltag gebraucht werden ^[34, 36, 37]. Eine langfristige Strategie zur Erzeugung von Ammoniak und Methanol würde also nicht nur der Energieversorgungssicherheit dienen, sondern auch den Wirtschaftsstandort Waidhofen stärken und neue Arbeitsplätze schaffen.

Betrachtung unter dem Aspekt des Drei-Säulen-Modells

Obwohl der Einsatz aller drei Formen der Energiespeicherung für eine erfolgreiche Umsetzung der Energiewende unabdingbar ist, so müssen wie bei den erneuerbaren Energieerzeugern trotzdem nicht nur die wirtschaftlichen, sondern auch die gesellschaftlichen und ökologischen Aspekte mitberücksichtigt werden.

Hier steht – wie schon erwähnt – vor allem bei Lithium-Akkus der Rohstoffbedarf mitsamt allem ökologischem und sozialem Impact, sowie die Herausforderung der Lieferketten im öffentlichen Fokus. Dass er um mehrere Größenordnungen niedriger liegt als bei der fossilen Industrie darf nicht darüber hinwegtäuschen, dass es noch großes Optimierungspotential gibt. Hier kommt dem Akkurecycling eine immer größere Bedeutung zu, mit welchem über 90% aller notwendigen Inhaltsstoffe zurückgewonnen werden können ^[51]. Unproblematisch sind in dieser Hinsicht Redox-Flow-Batterien, und auch Natrium-Ionen Akkus zeigen hier großes Potential.

Beim Aufbau der Wasserstoffinfrastruktur liegt die Hauptherausforderung bei der Herstellung der notwendigen Hochsicherheitsdrucktanks, die entweder aus Edelstahl oder Kohlenfaser gefertigt werden müssen, was nicht nur sehr teuer und aufwendig ist, sondern auch CO²-Emissionen verursacht. Elektrolyseure und Brennstoffzellen benötigen außerdem seltene (und damit teure) Elemente aus Platin, was erneut die Problematik von Rohstoffen und Lieferketten aufwirft.

Das gleiche gilt auch für die Power-to-X-Lösungen, wobei teure und aufwendige Tankinfrastruktur hier nicht ins Gewicht fällt. Die Endprodukte Methanol und Ammoniak sind allerdings giftig, jedoch biologisch abbaubar. Ammoniak ist hierbei ca. 10x giftiger als Methanol. ^[52,53] Der Umgang mit beiden Stoffen ist jedoch in der Industrie gängig und unter guter Kontrolle. Große Umweltkatastrophen oder Chemieunfälle sind bisher – im Gegensatz zu Erdöl oder anderen chemischen Stoffen – nicht vorgekommen. Trotzdem ist aus Sicht der Toxizität eine Power-to-X-Umsetzung mit Methanol als Endprodukt vorzuziehen.

Negative soziale Folgen liegen bei allen Speicherlösungen vor allem bei der Rohstoffgewinnung und bei den Lieferketten. Sie sind jedoch lösbar, vor allem bei stärkerer Regionalisierung und Recycling, soweit möglich. Second-Life und Vehicle-To-Grid Optionen helfen, vorhandene Akkus möglichst effizient und nachhaltig zu nutzen. Die wirtschaftliche Belastung beim Aufbau einer Speicherinfrastruktur ist, soweit bekannt, hierzulande das einzige gesellschaftliche und politische Hindernis. Das liegt auch an der bisher mangelnden Anerkennung der Wichtigkeit dieses Aspektes der Energiewende, der ein grundlegendes Umdenken im allgemeinen gesellschaftlichen Denken und Empfinden erfordert.

Basis-Szenarien

Auf der Basis der bisher gewonnenen Erkenntnisse sollen die nun folgenden Szenarien entworfen werden. Sie verstehen sich ausdrücklich nicht als Prognosen, sondern als Extrapolationen, die aus Übertragungen realer Daten gewonnen werden. Es sind Versuche einer Annäherung an zukünftige Entwicklungen, die uns ins Haus stehen und die wir in einem gewissen Handlungsspielraum lenken (oder nicht lenken) können.

Alle Szenarien arbeiten mit der Aufschlüsselung des Jahresenergieverbrauchs, sowie des Energieertrags verschiedener erneuerbarer Energiequellen auf die einzelnen Monate. So wird deutlich, wo Defizite und Überschüsse entstehen. Eine differenziertere Betrachtung mit kleineren Zeiträumen war im Rahmen dieser Studie leider nicht möglich. Dies bleibt zukünftigen Studien überlassen.

Basisszenario 0

Ausgangsbasis sind zunächst die Daten über den durchschnittlichen Stromverbrauch eines deutschen Haushaltes, aufgeschlüsselt über 12 Monate ^[26]. Darunter liegen die Daten für den (leicht angepassten) Jahresertrag einer PV-Anlage mit 5 KWp aus dem Jahr 2020, wiederum Monat für Monat aufgeschlüsselt ^[4]. Dieses Jahr wurde gewählt, weil es fast genau einen Jahresertrag von 1.000 KWh pro installierter KWp aufwies. Die Zahlen in den Kästen repräsentieren KWh (Kilowattstunden).

Jahresverbrauch: 3.500 KWh

Jahresertrag: 5.000 KWh (installierte PV-Leistung 5 KWp)

	Jänner	Februar	März	April	Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober	November	Dezember
Verbrauch	326	300	312	282	274	265	272	266	277	298	311	292
Ertrag	140	210	485	710	670	580	640	565	495	230	190	85
Differenz	-186	-90	+173	+428	+396	+315	+368	+299	+218	-68	-121	-207

Überschuss in den Monaten März – September: 2.197 KWh

Defizit in den Monaten Oktober – Februar: min. 672 KWh

In diesem Szenario wird deutlich, dass ein deutscher Durchschnittshaushalt einen Langfristspeicher von etwa 700 KWh oder mehr bräuchte, um sich ganzjährig nur aus seiner eigenen Photovoltaikanlage mit Strom versorgen zu können. Einen solchen bietet die Firma Homepower Solutions mit ihrem Produkt Picea an ^[23], welches neben einem Akkuspeicher außerdem noch einen Elektrolyseur und eine Brennstoffzelle nebst Hochdruckgasflaschen mit einer rein elektrischen Speicherfähigkeit von 300 – 1.500 KWh anbietet. Dieses System nutzt intelligenterweise auch die Abwärme des Elektrolyseurs und der Brennstoffzelle und unterstützt so den Warmwasserhaushalt und die Heizung mit bis zu 2.000 KWh im Jahr.

Szenario 0a (Übertragung auf den Bezirk Waidhofen a.d. Thaya)

Für die Übertragung auf den Bezirk Waidhofen wird zunächst von der Hälfte des derzeitigen energetischen Jahresverbrauchs im Bezirk ausgegangen, welchen Energiemosaik Austria für möglich erachtet ^[3]. Das sind 450 GWh, also etwas mehr als das 128.571fache des elektrischen Jahresverbrauchs eines durchschnittlichen deutschen Haushaltes im Szenario vorher.

Es ist hier besonders zu beachten, dass es sich beim angenommenen (fiktiven zukünftigen) Energieverbrauch des Bezirks Waidhofen um den Gesamtenergieverbrauch, also inklusive Wärme, Verkehr, Industrie etc. handelt. Die Ausgangsdaten beziehen sich jedoch nur auf den Stromverbrauch eines deutschen Durchschnittshaushaltes. Eine solche Übertragung ist möglich, da die Schwankungsbreiten, auf Monate aufgegliedert, sich ungefähr entsprechen. Der Gesamtenergiebedarf eines Haushaltes weist im Jahresverlauf deutlich größere Schwankungen auf.

Hier, wie auch in den folgenden Szenarien, wird der Jahresertrag des Bezirks Waidhofen aus Erneuerbaren Energien höher als der Jahresverbrauch angesetzt, um die Möglichkeit zu zeigen, dass ein Energieimporteur der Jetztzeit in der Zukunft zum Energieexporteur werden kann. Der elektrische Jahresertrag im vorherigen Beispiel steigt nun von 5.000 KWh auf 500 GWh, was dem 100.000fachen entspricht. Die installierte Leistung beträgt 500 MW an Photovoltaik.

Jahresverbrauch: 450 GWh

Jahresertrag: 500 GWh (nur PV)

	Jänner	Februar	März	April	Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober	November	Dezember
Verbrauch	41,94	38,57	40,47	36,27	35,24	34,02	34,97	34,25	35,64	38,34	40,59	37,49
PV	14,0	21,0	48,5	71,0	67,0	58,0	64,0	56,5	49,5	23,0	19,0	8,5
Differenz	-27,94	-17,57	+8,03	+34,73	+31,76	+23,98	+29,03	+22,25	+13,86	-15,34	-21,59	-28,99

Die Zahlen in den Kästen entsprechen GWh (Gigawattstunden).

Überschuss in den Monaten März – September: 163,64 GWh

Defizit in den Monaten Oktober – Februar: min. 111,43 GWh

Wollte der Bezirk Waidhofen seinen Energiebedarf nun einzig und alleine mit Photovoltaik decken, so wird sofort deutlich, dass es dafür riesenhafte Speicher mit einer Kapazität von über 100 Gigawattstunden bräuchte. Sicherheitspuffer mit eingerechnet müssten es vermutlich sogar 120 GWh oder mehr sein. Hierbei würde selbst Wasserstoff alleine aus Kostengründen an seine Grenzen stoßen. Den derzeit billigsten Preis von 30€/KWh gerechnet beliefen sich die Kosten nur für die Hochdruckspeicher auf ca. 3,6 Mrd. €. Würde die Speichermethode mit Power-to-Liquid über Methanol angewandt, sanken die Kosten der reinen Speicherung auf 120 Mio €, also auf ein Dreißigstel. Die Kosten für die Methanolerzeugung wären etwas höher als die reine Wasserstoffherzeugung, würden durch die geringeren Lagerkosten jedoch mehr als wettgemacht. Genaueres dazu später.

Szenario 1

In diesem und den nächsten drei Szenarien wird nun die Windenergie in Form großer traditioneller Windkraftanlagen (WKA) mit 6 MW Leistung mitberücksichtigt. Im Szenario 1 sind es 15 WKA mit einer installierten Leistung von 90 MW und einem kalkulierten Jahresertrag von 180 GWh (Datengrundlage, siehe ^[25]). Die installierte Leistung von Photovoltaik kann dadurch auf 320 MW sinken, was einem Jahresertrag von 320 GWh entspricht. Gesamtjahresverbrauch und -ertrag bleiben gegenüber dem vorherigen Szenario gleich.

Jahresverbrauch: 450 GWh

Ertrag über PV: 320 GWh

Kumulierte Monatsüberschüsse: 119,46 GWh

	Jänner	Februar	März	April	Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober	November	Dezember
Verbrauch	41,94	38,57	40,47	36,27	35,24	34,02	34,97	34,25	35,64	38,34	40,59	37,49
PV	8,96	13,44	31,04	45,44	42,88	37,12	40,96	36,16	31,68	14,72	12,16	5,44
WKA	27,52	37,5	14,3	20,18	13,1	9,33	15,37	7,37	13,02	18,22	21,25	19,73
Differenz	-5,46	+12,37	+4,87	+29,35	+20,74	+12,43	+21,36	+9,28	+9,06	-5,4	-7,18	-12,32

Jahresertrag: 500 GWh

Ertrag über WKA: 180 GWh

Kumulierte Monatsdefizite: 30,1 GWh

Die Zahlen in den Kästen entsprechen GWh (Gigawattstunden).

Durch den Einsatz großer Windkraftanlagen ist hier das Energiedefizit in den Herbst- und Wintermonaten dramatisch gesunken. Dennoch bleibt ein Defizit übrig, das durch Energieimporte und/oder große Speicher ausgeglichen werden muss. Batteriespeicher können ein so großes Defizit nicht ausgleichen, daher bleibt nur Wasserstoff, eventuell kombiniert mit Power-to-X-Lösungen. Die Speicherkapazität müsste größer als das kalkulierte Defizit dimensioniert werden, also auf mindestens 31 GWh. In diesem Rahmen wird trotzdem nur mit dem elektrischen Wirkungsgrad gerechnet, da sich die notwendige Synergie mit erforderlichen Wärmespeichern und dem Fernwärmenetz (samt Ausbau) schlecht kalkulieren lassen. Dies bleibt zukünftigen Studien überlassen.

Akkuspeicher wurden in diesem und den folgenden Szenarien pauschal auf die selbe Kapazität wie ein Tausendstel des Jahresenergieertrags kalkuliert, also 500 MWh. Die Dimensionierung von Elektrolyseanlagen und Brennstoffzellen wurde anteilig hochgerechnet vom Picea-System der Firma HomepowerSolutions ^[23] übernommen. Für Elektrolyseure ergibt sich hier eine Gesamtleistung von 51 MW für den gesamten Bezirk, und 33 MW für Brennstoffzellen (rein elektrische Leistung).

Daraus resultierende Investitionskosten:

PV: 320 Mio. €

Elektrolyseanlagen: 46 Mio. €

Gesamt: 1.687 Mio

WKA: 117 Mio. €

Brennstoffzellen: 74 Mio. €

Akkuspeicher: 200 Mio. €

Wasserstoffspeicher: 930 Mio. €

Das Interessante an den Kosten ist nicht nur, wie vergleichsweise günstig die Windkraft ist, sondern wie hoch die Speicherkosten für den Wasserstoff sind. Die große Menge frisst die günstigeren Preise pro KWh im Vergleich zum Akkuspeicher buchstäblich auf. Im Vergleich dazu fallen die Investitionskosten für Elektrolyseanlagen und Brennstoffzellen kaum ins Gewicht. In späteren Szenarien wird daher versucht, die Speicherkosten zu senken.

Szenario 2

In diesem Szenario wird der Anteil der Windkraft gegenüber der Photovoltaik weiter erhöht, um den Speicherbedarf (und die damit verbundenen Kosten) zu senken. Kalkuliert werden nun 20 WKA (Windkraftanlagen) mit einer Gesamtleistung von 120 MW und einem Jahresertrag von 240 GWh. Die installierte PV-Leistung kann dadurch auf 260 MW sinken. Jahresverbrauch und kalkulierter Jahresertrag bleiben gegenüber dem vorherigen Szenario gleich.

Jahresverbrauch: 450 GWh

PV: 260 GWh

Kumulierte Monatsüberschüsse: 112,63 GWh

Jahresertrag: 500 GWh

WKA: 240 GWh

Kumulierte Monatsdefizite: 11,23 GWh

	Jänner	Februar	März	April	Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober	November	Dezember
Verbrauch	41,94	38,57	40,47	36,27	35,24	34,02	34,97	34,25	35,64	38,34	40,59	37,49
PV	7,28	10,92	25,22	36,92	34,84	30,16	33,28	29,38	25,74	11,96	9,88	4,42
WKA	36,69	50,0	19,07	26,91	17,47	12,44	20,49	9,83	17,36	24,29	28,33	26,31
Differenz	+2,03	+22,35	+3,82	+27,56	+17,07	+8,58	+18,80	+4,96	+7,46	-2,09	-2,38	-6,76

Die Zahlen in den Kästen entsprechen GWh (Gigawattstunden).

Das Energiedefizit ist nun auf 11,23 GWh/a gesunken, weshalb die nötige Speicherkapazität nunmehr auf 12 GWh für Wasserstoff kalkuliert wird. Die Kosten haben sich in diesem Szenario nur für WKA, PV und Speicher geändert. Alles andere bleibt gleich, wenngleich eine Erhöhung der kurzfristigen Speicherkapazität diskutiert werden könnte, da der kurzfristige Windkraftertrag stärker und irregulärer schwankt als PV-Ertrag.

Investitionskosten:

PV: 260 Mio. €

Elektrolyseanlagen: 46 Mio. €

Gesamt: 1.096 Mio. €

WKA: 156 Mio. €

Brennstoffzellen: 74 Mio. €

Akkuspeicher: 200 Mio. €

Wasserstoffspeicher: 360 Mio. €

Ein Ausbau an Windkraftkapazität führt also zu deutlicher Kostenersparnis, wenngleich größerer Widerstand in der Bevölkerung zu erwarten ist und die ökologische Belastung steigt. Die Kosten-Nutzen-Risiko-Abschätzung wird komplexer.

Szenario 3

Dieses, wie auch das nächste Szenario, ist ein extremes, in welchem es gelingt, den Energieverbrauch des Bezirks Waidhofen auf ein Drittel des heutigen Verbrauchs zu senken, also 300 GWh/a. Wie realistisch ein solches Szenario ist, soll hier nicht Gegenstand sein, sondern die Folgen für die Energiewirtschaft und die damit verbundenen direkten Investitionen innerhalb der oben gesetzten Parameter. Es wird nun mit 10 Windkraftanlagen kalkuliert, um ökologische Verträglichkeit und soziale Akzeptanz im Vergleich zu den vorherigen Szenarien zu erhöhen. Der gesamte Jahresertrag wurde auf 400 GWh gesenkt, was anteilig deutlich mehr ist als in den vorherigen Szenarien. PV-Leistung beträgt nun mit 280 MW etwas mehr als in Szenario 2, allerdings weniger als in Szenario 1.

Die Akkuspeicherkapazität kann hier auf 400 MWh gesenkt werden, wie auch die Elektrolyseleistung auf 41 MW und die Brennstoffzellenleistung auf 27 MW absinken.

Jahresverbrauch: 300 GWh

PV: 280 GWh

Kumulierte Monatsüberschüsse: 137,71 GWh

Jahresertrag: 400 GWh

WKA: 120 GWh

Kumulierte Monatsdefizite: 11,64 GWh

	Jänner	Februar	März	April	Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober	November	Dezember
Verbrauch	27,96	25,71	26,98	24,18	23,49	22,68	23,31	22,83	23,76	25,56	27,06	24,99
PV	7,84	11,76	27,16	39,76	37,52	32,48	35,84	31,64	27,72	12,88	10,64	4,76
WKA	18,34	25,0	9,53	13,45	8,73	6,22	10,25	4,91	8,68	12,15	14,17	13,15
Differenz	-1,78	+11,05	+9,71	+29,03	+22,76	+16,02	+22,78	+13,72	+12,64	-0,53	-2,25	-7,08

Die Zahlen in den Kästen entsprechen GWh (Gigawattstunden).

Der Unterschied in den installierten Leistungen (und damit Erträgen) von PV und WKA macht sich sofort bemerkbar. Das Energiedefizit ist sogar ein wenig höher als im vorherigen Szenario, weshalb erneut ca. 12 GWh Wasserstoffspeicher kalkuliert werden müssen.

Investitionskosten:

PV: 280 Mio. €

Elektrolyseanlagen: 33 Mio. €

Gesamt: 965 Mio. €

WKA: 78 Mio. €

Brennstoffzellen: 54 Mio. €

Akkuspeicher: 160 Mio. €

Wasserstoffspeicher: 360 Mio. €

Der relativ hohe Speicherbedarf frisst einen Großteil der durch den verringerten Verbrauch eingesparten Investitionen auf. Da allerdings die Energieexporte gestiegen sind, (ein Plus von 25,08 GWh im Vergleich zu Szenario 2) darf auf diesem Sektor auch mit erhöhten Einnahmen gerechnet werden.

Szenario 4

Um erneut die Speicherkosten zu senken, wird gegenüber dem vorherigen Szenario wiederum der Anteil an Windkraft erhöht. Wie in Szenario 1 wird mit 15 WKA mit einer installierten Gesamtleistung von 90 MW und einem Jahresertrag von 180 GWh gerechnet, welchem eine installierte PV-Leistung von 220 MW mit einem Jahresertrag von 220 GWh gegenüberstehen. Alle anderen Parameter wurden gleich belassen.

Jahresverbrauch: 300 GWh

PV: 220 GWh

Kumulierte Monatsüberschüsse: 140,46 GWh

Jahresertrag: 400 GWh

WKA: 180 GWh

Kumulierte Monatsdefizite: 1,52 GWh

	Jänner	Februar	März	April	Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober	November	Dezember
Verbrauch	27,96	25,71	26,98	24,18	23,49	22,68	23,31	22,83	23,76	25,56	27,06	24,99
PV	6,16	9,24	21,34	31,24	29,84	25,52	28,16	24,86	21,78	10,12	8,36	3,74
WKA	27,52	37,5	14,3	20,18	13,1	9,33	15,37	7,37	13,02	18,22	21,25	19,73
Differenz	+5,72	+21,03	+8,66	+27,24	+19,45	+12,17	+20,22	+9,4	11,04	+2,78	+2,55	-1,52

Die Zahlen in den Kästen entsprechen GWh (Gigawattstunden).

Hier kann das Energiedefizit und damit der Speicherbedarf enorm gesenkt werden, während große, in den anderen Szenarien kaum erreichte Überschüsse erzielt werden. Es braucht nur mehr mit ca. 2 GWh Speicherbedarf im Jahr gerechnet werden. Die Investitionskosten für die Wasserstoffspeicherung unterschreiten hier deutlich diejenigen für die Akkuspeicher.

Investitionskosten:

PV: 220 Mio. €

Elektrolyseanlagen: 33 Mio. €

Gesamt: 645 Mio. €

WKA: 117 Mio. €

Brennstoffzellen: 54 Mio. €

Akkuspeicher: 160 Mio. €

Wasserstoffspeicher: 60 Mio. €

Von allen bisher vorgestellten Szenarien ist dieses hier wirtschaftlich das optimalste. Es ist vergleichsweise günstig, belastet die Ökologie nur sehr mäßig, erlegt jedoch der Bevölkerung einen sehr rigorosen Energiesparkurs auf, der – wenn überhaupt – vermutlich nur mit einem sehr hohen Eigenmotivationsanteil zu erreichen ist.

Es folgt eine kurze Gegenüberstellung und Zusammenfassung der bisherigen Ergebnisse:

Vergleich der 4 Basisszenarien

Selbst bei relativ groben und undifferenzierten Kalkulationen wie den obigen 4 Szenarien wird deutlich, dass der Speicherbedarf umso höher wird, je stärker die Gesamterträge von Windkraft und PV voneinander abweichen. Aufgrund des Drei-Säulen-Modells wurde dabei immer der Ertrag durch PV gegenüber der Windkraft bevorzugt. Die anschließende Tabelle fasst die bisherigen Daten und Erkenntnisse kurz zusammen und kalkuliert zusätzlich noch den Flächenbedarf und den Gesamtjahresüberschuss mit ein:

	Energie- verbrauch	Energie- erzeugung WKA	Energie- erzeugung PV	Speicher- bedarf	Energie- überschuss	Investitions- kosten	Flächenbedarf WKA	Flächen- bedarf PV	Flächen- bedarf gesamt
Szenario 1	450 GWh/a	180 GWh/a	320 GWh/a	ca. 31,0 GWh	89,36 GWh	1.687 Mio. €	15 WKA = 3,96 km ²	2,24 km ²	6,2 km ²
Szenario 2	450 GWh/a	240 GWh/a	260 GWh/a	ca. 12,0 GWh	101,40 GWh	1.096 Mio. €	20 WKA = 5,28 km ²	1,82 km ²	7,1 km ²
Szenario 3	300 GWh/a	120 GWh/a	280 GWh/a	ca. 12,0 GWh	126,07 GWh	965 Mio. €	10 WKA = 2,64 km ²	1,96 km ²	4,6 km ²
Szenario 4	300 GWh/a	180 GWh/a	220 GWh/a	ca. 2,0 GWh	138,94 GWh	645 Mio. €	15 WKA = 3,96 km ²	1,54 km ²	5,5 km ²

Der Gesamtjahresüberschuss ergibt sich aus der Differenz zwischen den kumulierten monatlichen Energieüberschüssen und -defiziten. Aus diesem Vergleich könnte eine erste Abschätzung vorgenommen werden, in welche Richtung sich die zukünftige Energiepolitik bewegen soll. Sie berücksichtigt allerdings keine innovativen technologischen Entwicklungen, die sich noch nicht auf dem breiten Markt durchgesetzt haben. Diesen soll das nächste Kapitel Rechnung tragen.

Out-of-the-Box-Szenarien

“Out of the Box” benennt eine Geisteshaltung, die den Rahmen eines vorgegebenen strukturellen Modells (die sprichwörtliche „Kiste“) verlässt ^[40]. Bei der Befassung zukünftiger Möglichkeiten und Entwicklungen ist dieses Denken in hohem Maße wichtig, um das ganze Potenzial für eine lebenswerte Zukunft erfassen und bewerten zu können. Dabei sind natürlich immer Überraschungen möglich, sogenannte „Black Swans“, die schier unmöglich vorherzusehen sind ^[41], weshalb es umso wichtiger ist, scheinbar abseitig oder gar verrückt Erscheinendes mit zu berücksichtigen.

Im Rahmen dieser Arbeit soll jedoch Spekulatives beiseite gelassen werden und der Fokus alleine auf Technologien liegen, welche das Experimentierstadium zumindest zu großen Teilen bereits hinter sich gelassen haben und reif für den Markt sind.

Dazu gehört zunächst die bereits erwähnte Technologie des „Power-to-X“, in diesem konkreten Falle die Weiterverarbeitung von durch Windkraft oder PV erzeugtem Wasserstoff zu Ammoniak oder Methanol ^[34, 36, 37], was die Speicherkosten dramatisch senken, und die Speicherkapazitäten ebenso dramatisch erhöhen würde. Beide Stoffe werden bereits im großindustriellen Maßstab erzeugt, bisher allerdings noch zum Großteil aus fossilem Erdgas. Hier bahnt sich jedoch eine strukturelle Wende an.

Kostengegenüberstellung der Szenarien 1 und 2 mit Einbeziehung von Power-to-X

Die Szenarien 1, 2 und 3 haben einen hohen Speicherbedarf von 31, respektive 12 GWh. Diesen alleine mit Wasserstoffspeicherung zu decken treibt die Kosten in die Höhe. Mehr Sinn machte es, mittels Wasserstoff maximal 3 GWh zu speichern und den Rest zu Methanol weiterzuverarbeiten. Ammoniak wird aufgrund seiner größeren Giftigkeit nicht in die weiteren Überlegungen mit einbezogen. Hierbei fallen sowohl für die der Elektrolyse nachgeschaltete Methanolsynthese ebenso Kosten an, wie für Methanolreformer vor der Wiederverstromung in einer Brennstoffzelle. Die durch die günstigere Speicherung eingesparten Kosten müssen dafür gegengerechnet werden. Aufgrund zu vieler unbekannter Parameter werden die Kosten von Elektrolyseuren und Brennstoffzellen (gemeinsam 120 Mio. €) einfach verdoppelt. Das bedeutet für das optimierte Szenario 1: 3 GWh Wasserstoffspeicher und 28 GWh Methanolspeicher. Für das optimierte Szenario 2 ergeben sich mit diesmal 2 GWh Wasserstoffspeicher und 10 GWh Methanolspeicher.

	PV	WKA	Akkuspeicher	Elektrolyseur	Brennstoffzelle	Synthese+ Reformer/Cracker	H ₂ -Speicher	Methanol- speicher	Gesamt
Szenario 1 original	320 Mio.	117 Mio.	200 Mio.	46 Mio.	74 Mio.		930 Mio.		1.687 Mio.
Szenario 2 original	260 Mio.	156 Mio.	200 Mio.	46 Mio.	74 Mio.		360 Mio.		1.096 Mio.
Szenario 1 optimiert	320 Mio.	117 Mio.	200 Mio.	46 Mio.	74 Mio.	120 Mio.	90 Mio.	28 Mio.	995 Mio.
Szenario 2 optimiert	260 Mio.	156 Mio.	200 Mio.	46 Mio.	74 Mio.	120 Mio.	60 Mio.	10 Mio.	926 Mio.

Die Einsparpotentiale sind signifikant, und zwar umso größer, je größer der Speicherbedarf ausfällt. Voraussetzung ist, dass die Kosten für die Power-to-X-Synthese bzw. Rückverstromung jene für Wasserstoffherzeugung und Rückverstromung sich nicht wesentlich mehr als verdoppeln.

Nun stellt sich die Frage, ob die Power-to-X-Technologie vielleicht sogar den kompletten Windenergieausbau ersetzen könnte – wie im Szenario 0a bereits als Gedankenexperiment vorgestellt.

Szenario 5

Die Grunddaten sind im Vergleich zum Szenario 0a die gleichen, ebenso wie die Ergebnisse. Erneut wird auch mit einem Akkuspeicher von 500 MWh gerechnet, sowie mit einer Elektrolyseurleistung von 51 MW und einer Brennstoffzellenleistung von 33 MW.

Interessant ist vielleicht noch, dass dieses Szenario von allen bisherigen den geringsten Flächenbedarf aufweist.

Jahresverbrauch: 450 GWh

Kumulierte Monatsüberschüsse: 163,64 GWh

Flächenbedarf PV: 3,5 km²

Jahresertrag: 500 GWh (nur PV)

Kumulierte Monatsdefizite: 111,43 GWh

	Jänner	Februar	März	April	Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober	November	Dezember
Verbrauch	41,94	38,57	40,47	36,27	35,24	34,02	34,97	34,25	35,64	38,34	40,59	37,49
PV	14,0	21,0	48,5	71,0	67,0	58,0	64,0	56,5	49,5	23,0	19,0	8,5
Differenz	-27,94	-17,57	+8,03	+34,73	+31,76	+23,98	+29,03	+22,25	+13,86	-15,34	-21,59	-28,99

Die Zahlen in den Kästen entsprechen GWh (Gigawattstunden).

Aufgrund des großen kumulierten Energiedefizits in den Herbst/Wintermonaten wird mit einem Speicherbedarf von mindestens 120 GWh gerechnet, wobei diesmal auch der Wasserstoff mit insgesamt 5 GWh stärker beteiligt ist. Mittels Methanol werden die restlichen 115 GWh gespeichert. Erneut werden die Kosten für die chemische Synthese und Aufspaltung zur Stromgeneration als gleich zur Wasserstofftechnologie angenommen (also 120 Mio. €).

Daraus ergeben sich folgende Investitionskosten:

PV-Installation: 500 Mio. €	Brennstoffzellen: 74 Mio. €	Methanolspeicher: 115 Mio. €
Akkuspeicher: 200 Mio. €	Wasserstoffspeicher: 150 Mio. €	Gesamt: 1.205 Mio. €
Elektrolyseanlagen: 46 Mio. €	Synthese+Reformer/Cracker: 120 Mio. €	

Fazit: Es ist möglich, komplett ohne traditionelle Windkraftanlagen auszukommen, allerdings zu deutlich höheren Kosten als in den meisten anderen Szenarien (außer Szenario 1). Ab einem bestimmten Punkt übersteigen die zusätzlichen Kosten der Speicherinfrastruktur die eingesparte Windkraftinstallation. Ob diese zusätzlichen Kosten verkraftbar bzw. vertretbar sind, bleibt weiterer Diskussion überlassen.

Alternativen für die Windkraftnutzung

Bei den bisherigen Szenarien wurde aufgrund des Drei-Säulen-Modells die Windkraft stets etwas nachrangig behandelt. Es wurde dabei klar, dass bessere soziale Verträglichkeit und schonendere Ökologie stets zulasten der Ökonomie gingen, und zwar umso mehr, je weniger Windkraft installiert wird. Hier wird daher nun nach Möglichkeiten gesucht, Nutzungsmöglichkeiten der Windkraft bei besserer Berücksichtigung von sozialer Akzeptanz und ökologischer Verträglichkeit zu untersuchen.

Dies geht nicht ohne eine grundlegende technologische Neuorientierung. Denn die beobachteten ökologischen Nachteile (rasend schnelle Flügelspitzen, welche Greifvögel und Fledermäuse bedrohen) und die gesellschaftliche Kontroverse bei Neuinstallation (dominierende Landschaftsprägung, Veränderung hin zu einer Industrielandschaft) lassen sich zwar dämpfen, aber nicht vollständig beseitigen. Große, ökonomisch sinnvolle und entsprechend effiziente Windkraftanlagen im Megawattbereich gehen immer mit einer großen Landschaftsveränderung einher.

Es wird jedoch bereits an effizienteren, schonenderen Alternativen geforscht.

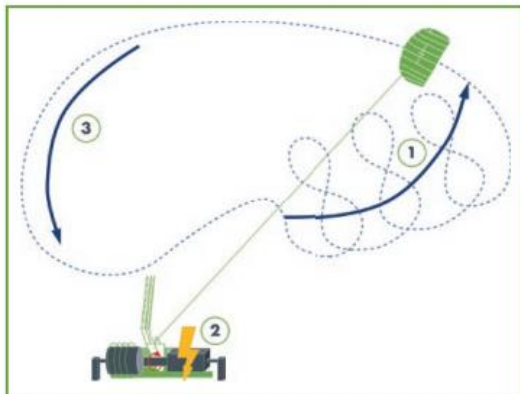
Höhenwindkraftwerke in Form von Energiedrachen oder Power-Kites

Im Januar 2023 wurde nach mehrjähriger Entwicklungszeit auf der Insel Mauritius im indischen Ozean ein neues Windkraftsystem der deutschen Firma Skysails^[27] installiert, das sich radikal von den bisherigen Windrädern unterscheidet. Statt eines großen Windrads auf einem langen Mast besteht das Skysails-System aus einem paraglideschirmartigen Lenkdrachen, der vollautomatisch fliegt. Der Lenkdrache kann dabei in Höhen steigen, die für fest installierte Windkraftanlagen unerreichbar sind. Im Falle von Skysails bis zu 400 Höhenmeter. Dort weht der Wind stetiger und stärker als näher am Boden, was die Windkraftausbeute beträchtlich steigert. Gleichzeitig ist der

Materialeinsatz und damit die Kosten deutlich geringer. Der Generator wird am Boden installiert, was auch die Statik verbessert. Und vor allem: Der Lenkdrache (bzw. Kite) kann je nach Bedarf steigen gelassen werden und ist auch nur dann sichtbar. Die dauerhafte Landschaftsveränderung durch konventionelle Windräder entfällt dadurch. Die ökologischen Auswirkungen müssen noch genauer erforscht werden. Da sich das ab- und aufwickelnde Seil jedoch deutlich langsamer durch den Luftraum bewegt als die Flügelspitzen der Rotorblätter, sind auch geringere Auswirkungen auf die fliegende Fauna zu erwarten.

Eine Herausforderung wird vermutlich die behördliche Regelung des von so einer Flugwindanlage eingenommenen Luftraum darstellen. Hier gibt es erste Erfahrungen in Norddeutschland und Mauritius, die allerdings vor Ort (also im Bezirk Waidhofen a.d.Thaya) noch einer gründlichen Überprüfung und ev. Adaptierung bedürfen.

HOW IT WORKS



- 1 The power kite unwinds a tether of 800 m length from a winch.
- 2 The tractive force drives a generator inside the winch that produces electricity.
- 3 Once the tether has reached its maximum extension, the autopilot steers the kite into a position with minimal drag and lift. While consuming only a fraction of the energy generated during the power phase, the generator now acts as a motor and reels-in the tether.

The system continuously repeats this process, flying the kite at an altitude of 100 to 400 meters. Energy generated by the Airborne Wind Energy System can be fed into the grid, stored, or directly consumed.



Die Funktionsweise ist auf der Graphik links dargestellt ^[28]: In der Steigphase wird der Kite in Schleifen im Wind gesteuert, wodurch sich das Seil, an welchem der Drache hängt, abwickelt. Dadurch wird ein elektrischer Generator angetrieben. Hat das Seil seine maximale Länge erreicht, steuert die Automatik den Drachen aus dem Wind und holt das Seil wieder ein. Der dazu nötige Energieaufwand ist gering, da nur minimale Kräfte den Kite bremsen.

Anfang 2024 ist die Firma Skysails weltweit die einzige, die diese Technik auf dem kommerziellen Markt anbietet ^[42]. Das erste Modell mit der Bezeichnung SKS PN-14 hat eine Leistung von 100-200 kW bei einer Kitefläche von 90-180 m². Aus diesen Eckdaten lässt sich eine Größerskalierung ableiten. Ein Drache mit einer Größe von 1.800 m² würde eine Leistung von 2 MW ermöglichen, eine Kitefläche von 3.600 m² eine Leistung von 4 MW. Pläne für eine solche Größerskalierung gibt es vom Konkurrenzunternehmen Enerkite ^[31].

Um das tatsächliche Potential dieser Technologie im Bezirk Waidhofen an der Thaya abschätzen und seine ganzheitlichen Auswirkungen auf die Ökologie, Umwelt und die Reaktionen in der Gesellschaft abschätzen zu können, würde sich die probeweise Installation eines oder mehrerer PN-14 Modelle empfehlen. Wichtig ist, einen Sicherheitsabstand von mindestens 850 m (die Länge des Seils + Sicherheitsmarge) zu stärker frequentierten Verkehrswegen oder Gebäuden einzuhalten ^[29].

Szenarien mit Power Kites (Energiefeldern)

Da die Technologie so neu ist, gibt es noch keine belastbaren Messungen über Vollaststunden und Jahreserträge. Um trotzdem einen ungefähren Vergleich zu herkömmlichen Windkraftanlagen zu bekommen, wurden im Folgenden reale Erträge von deutschen Offshore-Windkraftanlagen (die eine höhere Vollaststundenzahl aufweisen als Onshore-Windkraftanlagen) den Daten in den folgenden Szenarien zugrunde gelegt ^[25]. Da die Preisentwicklung noch nicht absehbar ist, jedoch geringer sein wird als bei traditionellen Windkraftanlagen, werden die angenommenen Investitionskosten für Flugwindkraftanlagen (FWKA) im Vergleich zu herkömmlichen WKA (Windkraftanlagen) halbiert. Die enormen Materialeinsparungen und günstigere Architektur lassen das bei entsprechender Größenskalierung realistisch erscheinen.

Zu bedenken ist besonders, dass die Energiedrachen nur bei Bedarf fliegen gelassen werden können, also in den Herbst- und Wintermonaten. In den Frühlings- und Sommermonaten reicht Photovoltaik zur Deckung des Energiebedarfs aus, allenfalls Nachts könnte überlegt werden, die Power Kites fliegen zu lassen (wenn entsprechende Bedingungen herrschen und Bedarf vorhanden ist). Ein Powerkite wird mit einer Leistung von 4 MW angenommen.

Szenario 6

In diesem Szenario wird die installierte Photovoltaik-Leistung von 500 MW beibehalten, ebenso wie ein bezirkswweiter Jahresverbrauch von 450 GWh. Hinzu tritt nun eine installierte Leistung von 40 MW in Form von Flugwindkraftanlagen (FWKA). Diese kommt jedoch nur in den Herbst- und Wintermonaten zum Einsatz, wenn die Photovoltaik nicht mehr genug Strom produziert.

Jahresverbrauch: 450 GWh

PV: 500 GWh

Kumulierte Monatsüberschüsse: 163,68 GWh

Jahresertrag: 569,38 GWh

FWKA: flexibel (installierte Leistung 40 MW)

Kumulierte Monatsdefizite: 42,09 GWh

	Jänner	Februar	März	April	Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober	November	Dezember
Verbrauch	41,94	38,57	40,47	36,27	35,24	34,02	34,97	34,25	35,64	38,34	40,59	37,49
PV	14,0	21,0	48,5	71,0	67,0	58,0	64,0	56,5	49,5	23,0	19,0	8,5
FWKA	11,8	15,56								15,38	13,32	13,32
Differenz	-16,14	-2,01	+8,03	+34,73	+31,76	+23,98	+29,03	+22,25	+13,86	+0,04	-8,27	-15,67

Die Zahlen in den Kästen entsprechen GWh (Gigawattstunden).

Für die Kostenabschätzung wird – wie oben schon erwähnt – nur die Hälfte der Investitionskosten von WKA für die FWKA angenommen, also 650 €/KW. Alle anderen Kostenparameter für Akkuspeicher, Wasserstoffinfrastruktur und chemische Umwandlungen bleiben gleich. Nur die Akkukapazität steigt durch den erhöhten Jahresertrag auf 570 MWh. Der restliche Speicherbedarf sinkt allerdings auf 45 GWh, welche aufgeteilt werden auf 3 GWh Wasserstoff und 42 GWh Methanol.

Kalkulierte Investitionskosten:

PV: 500 Mio. €

Elektrolyseanlagen: 46 Mio. €

Synthese+Reformer: 120 Mio. €

FWKA: 26 Mio. €

Brennstoffzellen: 74 Mio. €

Methanolspeicher: 42 Mio. €

Akkuspeicher: 228 Mio. €

Wasserstoffspeicher: 90 Mio. €

Gesamt: 1.126 Mio. €

Die Kosten sind in diesem Szenario nur leicht gesunken, wobei zu bedenken ist, dass ein größerer Energieüberschuss über das gesamte Jahr hinweg gesehen erzeugt wird, welcher verkauft werden kann. Waren es im Szenario 5 lediglich 52,21 GWh, so sind es hier 121,29 GWh, was größere Mehreinnahmen nach sich zieht. Dieser Überschuss kann noch vergrößert werden, würden die Flugwindkraftanlagen ganzjährig, und nicht nur saisonal betrieben werden. Der Energieertrag in so einem Szenario steigt allerdings von 500 GWh jährlich auf 625,6 GWh, was natürlich die Energieüberschüsse und damit Exporte drastisch steigert!

Szenario 6a

Jahresverbrauch: 450 GWh

PV: 500 GWh

Kumulierte Monatsüberschüsse: 221,1 GWh

Jahresertrag: 625,6 GWh

FWKA: 125,6 GWh

Kumulierte Monatsdefizite: 42,09 GWh

	Jänner	Februar	März	April	Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober	November	Dezember
Verbrauch	41,94	38,57	40,47	36,27	35,24	34,02	34,97	34,25	35,64	38,34	40,59	37,49
PV	14,0	21,0	48,5	71,0	67,0	58,0	64,0	56,5	49,5	23,0	19,0	8,5
FWKA	11,8	15,56	12,3	9,24	6,66	5,64	6,66	9,74	7,18	15,38	13,32	13,32
Differenz	-16,14	-2,01	+20,33	+43,97	+38,42	+29,62	+35,69	+31,99	+21,04	+0,04	-8,27	-15,67

Die Zahlen in den Kästen entsprechen GWh (Gigawattstunden).

Der Weiterbetrieb der FWKA über die Monate März bis September bringt ein stattliches Plus von 57,42 GWh, wodurch sich mögliche Energieexporte auf ca. 176 GWh steigern. Da alle Investitionskosten gegenüber Szenario 6 unverändert bleiben (bis auf eine Erhöhung der Akkuspeicherkapazität auf 625 MWh), darf sich der Bezirk Waidhofen in diesem Szenario über satte Gewinne aus gewaltigen Energieüberschüssen freuen. Ein eventuell nötiger Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur sowie der chemischen Industrie ist hier allerdings nicht mitberücksichtigt. Die größere Akkuspeicherkapazität sorgt für eine Erhöhung der notwendigen Investitionskosten um 50 Mio. € auf **1.148 Mio. €**.

Szenario 7

Wie sieht es nun aus, wenn die Gesamtjahresproduktion auf 500 GWh beschränkt bleibt? Hier kann die installierte PV-Leistung wieder sinken, und zwar auf 375 MWp (was 375 GWh/a entspricht). Alle anderen Parameter bleiben gleich:

Jahresverbrauch: 450 GWh

PV: 375 GWh

Kumulierte Monatsüberschüsse: 117,45 GWh

Jahresertrag: 500,6 GWh

FWKA: 125,6 GWh

Kumulierte Monatsdefizite: 63,42 GWh

	Jänner	Februar	März	April	Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober	November	Dezember
Verbrauch	41,94	38,57	40,47	36,27	35,24	34,02	34,97	34,25	35,64	38,34	40,59	37,49
PV	10,5	15,75	36,38	53,25	50,25	43,5	48,0	42,38	37,13	17,25	14,25	6,38
FWKA	11,8	15,56	12,3	9,24	6,66	5,64	6,66	9,74	7,18	15,38	13,32	13,32
Differenz	-19,64	-7,26	+8,21	+26,22	+21,67	+15,12	+19,69	+17,87	+8,67	-5,71	-13,02	-17,79

Die Zahlen in den Kästen entsprechen GWh (Gigawattstunden).

Kaum verwunderlich, dass das Energiedefizit höher ist als in den meisten anderen Szenarien. Es wäre also auch hier wichtig, den Jahresenergieertrag von Photovoltaik und Windkraft möglichst anzugleichen, um den Speicherbedarf zu minimieren. Die Kostenersparnis wäre aufgrund der höheren Effizienz und der geringeren Kosten für FWKA gegenüber traditionellen WKA sogar noch ausgeprägter. Der folgenden Kostenkalkulation ist ein Speicherbedarf von 65 GWh zugrunde gelegt, wovon 3 GWh auf Wasserstoff entfallen, und 62 GWh auf Methanol. Alle anderen Kostenannahmen bleiben gleich.

Kalkulierte Investitionskosten:

PV: 375 Mio. €

Elektrolyseanlagen: 46 Mio. €

Synthese+Reformer: 120 Mio. €

FWKA: 26 Mio. €

Brennstoffzellen: 74 Mio. €

Methanolspeicher: 62 Mio. €

Akkuspeicher: 200 Mio. €

Wasserstoffspeicher: 90 Mio. €

Gesamt: 993 Mio. €

Szenario 8

In diesem letzten Szenario wird nun der Jahresertrag von PV und FKWA bei gleichbleibendem Verbrauch möglichst angeglichen. Das erfordert eine installierte Leistung von 80 MW bei den Flugwindkraftanlagen, sowie eine installierte Leistung von 250 MW bei der Photovoltaik. Das ergibt 251,2 GWh + 250 GWh im Jahr, im Gesamten also 501,2 GWh/a.

Jahresverbrauch: 450 GWh

PV: 250 GWh

Kumulierte Monatsüberschüsse: 78,2 GWh

Jahresertrag: 501,2 GWh

FWKA: 251,2 GWh

Kumulierte Monatsdefizite: 22,39 GWh

	Jänner	Februar	März	April	Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober	November	Dezember
Verbrauch	41,94	38,57	40,47	36,27	35,24	34,02	34,97	34,25	35,64	38,34	40,59	37,49
PV	7,0	10,5	24,25	35,5	33,5	29,0	32,0	28,25	24,75	11,5	9,5	4,25
FWKA	23,6	31,12	24,6	18,48	13,32	11,28	13,32	19,48	14,36	30,76	26,64	26,64
Differenz	-11,34	+3,05	+8,38	+17,71	+11,58	+6,26	+10,35	+13,48	+3,47	+3,92	-4,45	-6,6

Die Zahlen in den Kästen entsprechen GWh (Gigawattstunden).

Durch die Angleichung des Jahresertrags von Photovoltaik und Windkraft wird hier ein geringerer Energieüberschuss als in den anderen Szenarien und ein relativ moderates Energiedefizit generiert. Der Speicherbedarf wird für die noch folgende Kostenkalkulation auf 26 GWh aufgerundet, wobei 2 GWh auf Wasserstoff und je 24 GWh auf Methanol entfallen. Alle anderen Parameter bleiben gleich.

Kalkulierte Investitionskosten:

PV: 250 Mio. €

Elektrolyseanlagen: 46 Mio. €

Synthese+Reformer: 120 Mio. €

FWKA: 52 Mio. €

Brennstoffzellen: 74 Mio. €

Methanolspeicher: 24 Mio. €

Akkuspeicher: 200 Mio. €

Wasserstoffspeicher: 60 Mio. €

Gesamt: 826 Mio. €

Zusammenfassung aller Szenarien

An dieser Stelle seien die wichtigsten Eckdaten aller 8 Haupt- und Unterszenarien noch einmal zusammengefasst. Bis auf zwei Ausnahmen wurde immer von einem Jahresenergieverbrauch von 450 GWh für den ganzen Bezirk Waidhofen ausgegangen. Auch der Gesamtenergieertrag von PV und WK betrug bis auf vier Ausnahmen immer 500 GWh. Die Extremszenarien 3 und 4 wurden gewählt, um zu zeigen, wie leicht bei verhältnismäßig geringen Investitionen hohe Energieüberschüsse erzielt werden können. Allerdings wird dabei die Bevölkerung mit rigorosen Einschränkungen zu leben haben.

Eine wichtige Erkenntnis ist die Bedeutung von Mittel- und Langfristspeichern wie Wasserstoff und Power-to-X. Besonders letztere ermöglichen Speicherkapazitäten von über 100 GWh und sorgen so mit für eine krisensichere Energieversorgung der Region.

Die Kosten pendeln interessanterweise in den meisten Szenarien um eine Milliarde €, mit nur wenigen Ausreißern nach oben oder unten. Hierzu später noch mehr.

	Gesamtverbrauch pro Jahr	Gesamtertrag pro Jahr	Ertrag PV	Ertrag WK	Anzahl WKA/FWKA	Kumulierte monatliche Überschüsse	Kumulierte monatliche Defizite	Jahresüberschuss	Geschätzte Investitionskosten
Szenario 1	450 GWh	500,0 GWh	320 GWh	180 GWh	15	119,46 GWh	30,1 GWh	89,36 GWh	1.687 Mio. €
Szenario 1 opt.	450 GWh	500,0 GWh	320 GWh	180 GWh	15	119,46 GWh	30,1 GWh	89,36 GWh	1.096 Mio. €
Szenario 2	450 GWh	500,0 GWh	260 GWh	240 GWh	20	112,63 GWh	11,23 GWh	101,4 GWh	995 Mio. €
Szenario 2 opt.	450 GWh	500,0 GWh	260 GWh	240 GWh	20	112,63 GWh	11,23 GWh	101,4 GWh	926 Mio. €
Szenario 3	300 GWh	400,0 GWh	220 GWh	120 GWh	10	137,71 GWh	11,64 GWh	126,07 GWh	965 Mio. €
Szenario 4	300 GWh	400,0 GWh	220 GWh	180 GWh	15	140,46 GWh	1,52 GWh	138,94 GWh	645 Mio. €
Szenario 5	450 GWh	500,0 GWh	500 GWh	0 GWh	0	163,68 GWh	111,43 GWh	52,25 GWh	1.205 Mio. €
Szenario 6	450 GWh	569,4 GWh	500 GWh	69,4 GWh	10	163,68 GWh	42,09 GWh	121,59 GWh	1.126 Mio. €
Szenario 6a	450 GWh	625,6 GWh	500 GWh	125,6 GWh	10	221,1 GWh	42,09 GWh	179,01 GWh	1.148 Mio. €
Szenario 7	450 GWh	500,6 GWh	375 GWh	125,6 GWh	10	117,45 GWh	63,42 GWh	54,03 GWh	993 Mio. €
Szenario 8	450 GWh	501,2 GWh	250 GWh	251,2 GWh	20	78,2 GWh	22,39 GWh	55,81 GWh	826 Mio. €

Vorschläge zur grundlegenden Architektur der Energiewende

In den hier behandelten Szenarien wurde der Bezirk Waidhofen bisher als Ganzes betrachtet. Es wäre jedoch wichtig, auf dieser Basis für jede Gemeinde eine eigene Studie zu erstellen, um die vorhandenen Potentiale noch besser und umfassender erfassen zu können. Das betrifft vor allem den Ausbau der Photovoltaik, die auf drei separaten Ebenen vollzogen wird, und zwar im privaten, im öffentlichen, sowie im gewerblichen Sektor. Sie ist in jeder Gemeinde des Bezirks individuell zu betrachten und zu kalkulieren. Windkraft hingegen ist nur an einigen besonders geeigneten Standorten möglich. Hier muss gemeindeübergreifend für den gesamten Bezirk kalkuliert werden.

Für eine (krisen)sichere zukünftige Energieversorgung ist jedoch auch die grundlegende Architektur der Energieerzeugung und -verteilung neu zu denken und zu planen. Hier spielen besonders **Energiegemeinschaften** eine zentrale Rolle ^[43].

Energiegemeinschaften haben den großen Vorteil, Energie möglichst nahe am Ort, wo sie erzeugt wird, auch verbrauchen zu können. Um für die Herausforderungen der Zukunft wirklich gerüstet zu sein ist es aber nötig, sie entsprechend zu planen.

Vorgeschlagen wird hier, sie auf mehreren Ebenen hierarchisch auszulegen.

Die unterste Ebene bilden Dörfer, Siedlungen, Hofgemeinschaften etc. Hier befinden sich vor allem private und kleinere gewerbliche Photovoltaikanlagen und Speicher. Die dort erzeugte Energie wird zunächst innerhalb dieser Kleinenergiegemeinschaft verbraucht und/oder gespeichert, bevor sie in die nächste höherrangige Energiegemeinschaft eingespeist wird.

Diese nächste Ebene befindet sich auf Gemeindeebene. Zusätzlich zu privaten und gewerblichen Anlagen stehen hier auch öffentliche PV-Anlagen, Kraftwerke und Speicher, die den Energiefluss regulieren. Dort befindliche Überschüsse werden wiederum in das bezirkswide Energiegemeinschaftsnetz eingespeist.

Jede Ebene dieses Energiegemeinschaftsverbands sollte ein mindestens dreistufiges Energiespeichersystem besitzen:

1. Private und gewerbliche/öffentliche Akkuspeicher/Akkuspeicherkraftwerke.
2. Gewerbliche und öffentliche Elektrolyse- und Brennstoffzellenanlagen, sowie die für die Wasserstoffspeicherung notwendigen Hochdruckbehälter.
3. Gewerbliche und öffentliche Power-to-X-Anlagen, welche aus dem erzeugten Wasserstoff Methanol und/oder Ammoniak herstellen, sowie die zur Lagerung nötigen Tanks.

Auf diese Weise kann im Notfall jede Energiegemeinschaft auf ihrer Ebene für eine gewisse Zeit auch unabhängig und autark von den anderen agieren. Die meiste Zeit wird das so entstehende Energienetz jedoch vor allem *zusammenwirken* und auf diese Weise für Sicherheit, Wohlstand und Stabilität in der Region sorgen.

Die gleiche Architektur sollte auch in weiteren, höherrangigen Energienetzen implementiert werden, wie Regionen/Vierteln, Bundesländern, und schließlich auf staatlicher und staatenübergreifender Ebene. Nur auf diese Weise kann die Energiewende erfolgreich funktionieren.

Erkenntnisse und Resümee

Vermutlich wird nicht nur eine:r in den Szenarien bei den kalkulierten Zahlen der zu erwartenden Kosten gedacht haben: „Wer soll das alles zahlen?!“

Die Antwort ist ebenso einfach wie erschütternd und selbstverständlich: Wir alle, jede:r von uns, wie es immer schon gewesen ist. Und die Energiewende ist ja auch schon im Gange: Laut Studie ^[24] belief sich die Ökostromerzeugung im Jahr 2022 im Bezirk Waidhofen bereits auf 47,7 GWh. Das ist noch nicht ganz ein Zehntel vom Gesamtenergiebedarf, was in den meisten Szenarien als Ausbauziel angestrebt wird. Bereits 2011 erzeugte der Bezirk jedoch bereits 234 GWh an Gesamtenergie in Eigenproduktion, das meiste davon aus Biomasse (223,6 GWh). ^[48]

Dieser hohe Anteil bietet zwei große Vorteile:

1. Trotz nach wie vor wichtiger Energieeinsparungen muss weniger Sonnen- und Windenergie installiert werden, als in den meisten obigen Szenarien kalkuliert. Die notwendigen Investitionen sinken dadurch.
2. Biomasseheizkraftwerke sind für eine zukünftige Methanolproduktion von unschätzbarem Wert. Gäbe es sie nicht, so müsste das dafür notwendige CO² aus der Luft gewonnen werden – was sehr ineffizient ist – oder giftiges Ammoniak mittels Stickstoff aus der Luft.

Hier ist auch wichtig, den Zeithorizont zu bedenken, in welchem sich die Energiewende zu vollziehen hat: Die österreichische Regierung hat als Ziel festgelegt, im Jahr 2040 klimaneutral zu sein ^[44]. Das ist bereits in 16 Jahren und erforderte im Rahmen der hier entwickelten Szenarien mindestens 41 – 106 Mio. € an Investitionen pro Jahr für den gesamten Bezirk Waidhofen, und zwar sowohl von privater, gewerblicher, als auch öffentlicher Seite.

Allerdings fehlen in vorliegender Studie noch viele Aspekte, wie z.B. der Ausbau des Stromnetzes, des Fernwärmenetzes, Gebäudesanierungen, sowie der gesamte Bereich der Mobilitätswende. Die tatsächlichen Kosten werden also höher liegen. Auf der anderen Seite sind für den Bezirk stetige Einnahmen zu erwarten, sobald das Ziel, deutliche Jahresenergieüberschüsse zu erzielen, tatsächlich erreicht worden ist.

Wichtig ist auf der anderen Seite die Quantifizierung grundlegender Eckdaten, die erreicht werden müssen, damit die Energiewende erfolgreich sein wird. Je mehr Energie eingespart wird, umso weniger muss an Erneuerbaren Energien ausgebaut werden. Der Bezirk Waidhofen hat eine Fläche von 669 km² und würde es schaffen, mit Photovoltaik auf einer Fläche von 3,5 km² bereits bilanzielle Überschüsse zu erzeugen (behördliche Regelungen und Zufahrtswege für Windkraftanlagen oder Freiflächen-PV-Anlagen nicht mit eingerechnet).

Weiters wurde deutlich, wie wichtig für die Eigenversorgung das Thema Speicherausbau ist und welche Technologien es dafür braucht. Es konnte gezeigt werden, dass Power-to-X in fast allen Szenarien praktisch alternativlos und Wasserstoff alleine als Speicher nur unter großen Investitionen möglich ist. Ein weiterer Weg, die Eigenversorgung durch große Überproduktion zu erreichen, wurde nicht durchgerechnet, da dadurch die Netzbelastung stiege und die Speicher woanders stehen müssten, um die Energiespitzen abzufedern.

Von ökonomischer Seite her, wie auch von Seiten des Klimaschutzes, ist der Ruf nach Windkraft völlig verständlich, auch das spiegeln die Zahlen der verschiedenen Szenarien deutlich wieder. Auf der anderen Seite zeigen sich nicht nur in der aktuellen Diskussion im Bezirk Waidhofen, sondern auch im Drei-Säulen-Modell der Nachhaltigkeit

gewisse Nachteile in Form des „Green-Green-Dilemmas“. Ökologische Bedenken sind vorhanden, wie auch die Dominierung und damit auch Veränderung des Landschaftsbildes von einer Naturlandschaft hin zu einer Industrielandschaft (immer abhängig von der Anzahl der Windkraftanlagen). Hier konnte mit dem Verweis auf Powerkites bzw. Flugwindkraftanlagen ein Ausweg gezeigt werden, der in Form von Versuchsanlagen hoffentlich auch hier in der Region neue wertvolle Erkenntnisse bringen kann. Vor allem die ökologischen Auswirkungen sind wichtig zu dokumentieren, wie auch das Bild, das sie der Bevölkerung vermitteln. Nicht zuletzt gilt es, entsprechende behördliche Regeln zu entwickeln.

Eine wichtige Erkenntnis ist die, dass die Windkraft trotz gesellschaftlicher Kontroversen und ökologischer Bedenken umso wichtiger wird, je größer das betrachtete Gebiet und je größer die dort ansässige Bevölkerung samt Infrastruktur ausfällt. Auch wenn der eine oder andere Waldviertler Bezirk gänzlich ohne Windkraftanlagen auskäme, so wird der Windkraftausbau zum unverzichtbaren Element, sobald das gesamte Waldviertel betrachtet wird. Es muss also zunächst eine Planung auf höherer Ebene (Land/Region/Viertel) vorausgehen, bevor Windkraft auf Bezirks- oder gar Gemeindeebene diskutiert werden kann.

Es konnte außerdem gezeigt werden, dass eine stärkere Berücksichtigung der Ökologie und der Bevölkerung (durch weniger Windkraftausbau) sich immer in höheren Kosten niederschlagen wird. Die daraus folgenden sozialen Belastungen für die Bevölkerung können in diesem Rahmen nicht quantifiziert werden. Daher kann diese Studie auch nicht die Antwort liefern, welcher Weg der beste ist. Das muss in einer offen und sachlich geführten Diskussion die Bevölkerung, etwa im Rahmen eines Bürger:innen-Rates, selber entscheiden.

Szenario 8 beispielsweise glänzt mit einer guten, sicheren Energieversorgung und den zweitniedrigsten Investitionskosten unter allen Szenarien. Aber es bietet auch den drittniedrigsten Energieexport und damit weniger Einnahmen als z.B. Szenario 6a, welches allerdings über 320 Mio. € mehr an Investitionen fordert, bei jedoch deutlich höherem Energieertrag. All diese Vor- und Nachteile gilt es in weiteren Studien näher zu untersuchen und innerhalb der Bevölkerung zu diskutieren.

Flankierend empfehlen sich außerdem weitere Maßnahmen, wie etwa CO₂-Abscheidung mit anschließender Speicherung bei den Biomassewärmekraftwerken, da Kohlendioxid für die Methanolproduktion gebraucht wird. Wird das gleiche Prinzip auch bei der Wiederverstromung des Methanol angewandt, entsteht ein System, das mehr CO₂ aus der Atmosphäre zieht, als es wieder ausstößt.

Für eine nachhaltige Wirtschaftsgrundlage ist es auch wichtig über Produktions- und Recyclingfabriken von Akkus und PV-Modulen nachzudenken. Denn die enorme Menge an installierten Akkuspeichern und PV-Modulen hat ein Ablaufdatum. Um gewaltige Berge an Sondermüll zu vermeiden ist es daher wichtig, beides zu recyceln und vor allem auf gute Recyclebarkeit hin zu produzieren. Es liegt nahe, das möglichst in der Region zu tun, in welcher der Bedarf besteht. Natürlich braucht das Erhebungen bezüglich Wirtschaftlichkeit etc.

Schlussendlich ist festzuhalten, dass der gesamte Energieverbrauch dramatisch sinken muss. Jede überflüssige Kilowattstunde ist nicht nur eine Belastung für die Ökonomie, sondern auch für die Ökologie. Ein nachhaltiger Ansatz zur Energiewende beinhaltet daher mindestens eine Halbierung des derzeitigen Energieverbrauchs. Das kann erreicht werden durch eine konsequente Mobilitätswende (E-Mobilität, Mikromobilität wie Fahrradmobilität, mehr öffentlicher Verkehr&Bahnverkehr, Senkung des Mobilitätsbedarfs etc.), bessere Häuserdämmung und effizientere Heizsysteme wie Wärmepumpen etc. Dieser große Bereich kann hier nur thematisiert, aber nicht kalkuliert werden. Dazu sind weitere Untersuchungen und Studien nötig.

Zusammenfassende Erkenntnisse:

1. Der Bezirk Waidhofen a.d.Thaya ist ohne Weiteres in der Lage, sich alleine mit Erneuerbaren Energien selbst zu versorgen.
2. Eine Voraussetzung dafür ist mindestens eine Halbierung des derzeitigen Energieverbrauchs.
3. Eine alternativlose Stütze bildet weiters der Ausbau verschiedener Speichersysteme (Akkuspeicher, Wasserstoff, Power-to-X).
4. Als hauptsächliches Rückgrat der Erneuerbaren Energieerzeugung bietet sich die Photovoltaik an.
5. Windkraft wirkt unterstützend, wird jedoch sozial und ökologisch besonders kontrovers diskutiert. Es wird daher empfohlen, praktische Erfahrungen und Erkenntnisse mit Flugwindkraftwerken (Powerkites) zu sammeln.
6. Erneuerbare Energieerzeugung gänzlich ohne Windkraft (aus ökologischen und/oder sozialen Gründen) wäre auf Bezirksebene zwar möglich, jedoch aufwendiger und teurer als mit Windkraft.
7. Windkraft macht im erneuerbaren Energiemix umso mehr Sinn, je größer das betrachtete Gebiet und seine Bevölkerung ist und vice versa.
8. Die Jahresenergieerträge müssen den Energiebedarf im Bezirk deutlich übersteigen.
9. Die Schaffung eines mindestens dreifach hierarchisch gestaffelten Netzes von Energiegemeinschaften erhöht die Versorgungs- und Krisensicherheit.
10. Es sind gründliche Nachfolgestudien erforderlich, besonders was Sektorkoppelung (Wärmeversorgung) und Power-to-X-Technologien betrifft.
11. Die Energiewende muss Hand in Hand mit einer grundlegenden Mobilitätswende und einer Wirtschaftswende hin zu Kreislaufwirtschaft und ökologischer Land- und Forstwirtschaft gehen.

Quellen:

1. [Temperaturanomalien im Jahr 2023 – Wikipedia](#)
2. [Nachhaltigkeit – Wikipedia](#)
3. [Energiesmosaik Austria \(energemosaik.at\)](#)
4. [PV-Ertrag im Jahr, Monat und Tag \(Daten für 2023\) \(echtsolar.de\)](#)
5. [Studie Windkraft Stand-04-07-2012.pdf \(uma.or.at\)](#)
6. [Bioenergie \(erneuerbare-energien-und-natur.de\)](#)
7. [Bioenergie – Ein erneuerbares Energiesystem \(enertrag.org\)](#)
8. [Biomassekraftwerk » Stromproduktion aus Biomasse \(heizungsbau.net\)](#)
9. [Kosten Photovoltaik in Österreich 2023 - Privat & Gewerblich \(dachgold.at\)](#)
10. [Leuchttürme der Energiewende: Windkraft bei EVN: Oesterreichs Energie](#)
11. [IG Windkraft - - Wirtschaftsfaktor Windenergie](#)
12. [Drei-Säulen-Modell \(Nachhaltigkeit\) – Wikipedia](#)

13. [Verfügbarkeit von Wind- und Sonnenenergie \(nablaenergy.de\)](https://nablaenergy.de)
14. [Windkraftanlage – Wikipedia](#)
15. [Das erneuerbare Energiesystem – Entwicklung und Ausblick | Science Media Center Germany](#)
16. [Akkumulator – Wikipedia](#)
17. [Redox-Flow-Batterie – Wikipedia](#)
18. [Batteriespeicher \(ladeengel.de\)](#)
19. [Wasserstoff Speicher \(ladeengel.de\)](#)
20. [Wasserstoffwirtschaft – Wikipedia](#)
21. [Wasserstoff Systeme \(ladeengel.de\)](#)
22. [Stationäre Tankanlagen für Benzin, Diesel und Heizöl | DENIOS](#)
23. [Maximal unabhängig mit dem ersten Ganzjahres-Stromspeicher \(homepowersolutions.de\)](#)
24. [PowerPoint-Präsentation \(energiestammtisch.info\)](#)
25. [Windenergie Deutschland 2023 | Zahlen, Fakten, Charts \(strom-report.com\)](#)
26. [Durchschnittlicher Stromverbrauch: Wie viel ist normal? \(cheapenergy24.de\)](#)
27. [Wind Power: Unleashing its True Potential | SkySails Power \(skysails-power.com\)](#)
28. [220823 Flyer SKS PN-14.indd \(skysails-power.com\)](#)
29. [220920 NGr Flyer Site Requirement.indd \(skysails-power.com\)](#)
30. [Verbundprojekt: SkyPower100 - skypower100s Webseite!](#)
31. [Flugwindkraft_enerkite - EnerKite Flugwindkraftanlagen](#)
32. [Power-to-X – Wikipedia](#)
33. [Methanol – Energie & System Erde \(energieinfo.de\)](#)
34. [Power-to-Ammonia – Wikipedia](#)
35. [Ammoniak-Brennstoffzelle – Wikipedia](#)
36. [Power to Liquid – Wikipedia](#)
37. [Methanolwirtschaft – Wikipedia](#)
38. [Höchst effiziente auf Ammoniak basierte Systeme zur klimafreundlichen Energieversorgung \(fraunhofer.de\)](#)
39. [Waldviertler-Mobilitaets-Manifest-WEB-2023.pdf \(verkehrswende.at\)](#)
40. [Out of the box-Denken - Onpulson Wirtschaftslexikon](#)
41. [Black Swan \(Risiken\) – Wikipedia](#)
42. [Onshore Wind Power has a New Face | SkySails Power \(skysails-power.com\)](#)
43. [Überblick Energiegemeinschaft \(kelag.at\)](#)
44. [Nachhaltige Klimaschutz-Maßnahmen \(bmk.gv.at\)](#)
45. [\(PDF\) Windenergievorhaben und Fledermausschutz: Was fordern Expert*innen zur Lösung des Grün-Grün-Dilemmas? \(researchgate.net\)](#)
46. [Windkraft und Wildtiere: Ein grünes Dilemma | PIRSCH](#)

47. [\(PDF\) Solar's Green Dilemma \(researchgate.net\)](#)
48. Umsetzungskonzept für die Klima- und Energiemodellregion Thayaland, Energieagentur der Regionen (EAR), Waidhofen April 2011
49. [Dulluri_Rat.pdf \(uni-koeln.de\)](#)
50. [Vehicle to Grid – Wikipedia](#)
51. [Batterierecycling – Wikipedia](#)
52. [Ammoniak – Wikipedia](#)
53. [Methanol – Wikipedia](#)