

Nicolas Ürlings

Wasserstoff als Schlüssel für nachhaltige Energie in Industrieparks. Technologien und Wirtschaftlichkeit

Masterarbeit

BEI GRIN MACHT SICH IHR WISSEN BEZAHLT



- Wir veröffentlichen Ihre Hausarbeit, Bachelor- und Masterarbeit
- Ihr eigenes eBook und Buch - weltweit in allen wichtigen Shops
- Verdienen Sie an jedem Verkauf

Jetzt bei www.GRIN.com hochladen
und kostenlos publizieren



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de/> abrufbar.

Dieses Werk sowie alle darin enthaltenen einzelnen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsschutz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlanges. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen, Auswertungen durch Datenbanken und für die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronische Systeme. Alle Rechte, auch die des auszugsweisen Nachdrucks, der fotomechanischen Wiedergabe (einschließlich Mikrokopie) sowie der Auswertung durch Datenbanken oder ähnliche Einrichtungen, vorbehalten.

Impressum:

Copyright © 2022 GRIN Verlag
ISBN: 9783346979995

Dieses Buch bei GRIN:

<https://www.grin.com/document/1421722>

Nicolas Ürlings

Wasserstoff als Schlüssel für nachhaltige Energie in Industrieparks. Technologien und Wirtschaftlichkeit

GRIN - Your knowledge has value

Der GRIN Verlag publiziert seit 1998 wissenschaftliche Arbeiten von Studenten, Hochschullehrern und anderen Akademikern als eBook und gedrucktes Buch. Die Verlagswebsite www.grin.com ist die ideale Plattform zur Veröffentlichung von Hausarbeiten, Abschlussarbeiten, wissenschaftlichen Aufsätzen, Dissertationen und Fachbüchern.

Besuchen Sie uns im Internet:

<http://www.grin.com/>

<http://www.facebook.com/grincom>

http://www.twitter.com/grin_com

RHEINISCHE FACHHOCHSCHULE KÖLN

University of Applied Sciences

Fachbereich: Ingenieurwesen

Studiengang: Technical Management (M. Eng.)

Masterthesis

Integration von Wasserstoff in Kombination mit
erneuerbarem Strom zur nachhaltigen Energieversorgung
eines Industrieparks

Vorgelegt von: Nicolas Ürlings

Sommersemester 2022

Kurzfassung

Um die Vorgaben des Bundes-Klimaschutzgesetzes und des Pariser Klimaschutzabkommens zur Reduzierung der Treibhausgase einzuhalten, kann ein Teil der benötigten Wärmeenergie der Industrie durch erneuerbaren Strom erzeugt werden. Die Elektrifizierung der Industrie, aber auch die Umstellung der anderen energieverbrauchenden Sektoren resultiert in einen erhöhten Strombedarf. Infolge der schwankenden Verfügbarkeit erneuerbarer Energien, in Kombination mit dem Wegfall konventioneller Kraftwerkskapazitäten, können Versorgungslücken im öffentlichen Stromnetz entstehen. Wasserstoff kann für dieses Szenario vorgelagert und bei Bedarf mittels verschiedener Technologien in Strom und/oder Wärme umgewandelt werden. Die Frage, mit welcher technischen Umsetzung aus dem grünen Wasserstoff in einem Industriepark zentrale Wärme erzeugt werden kann, ist in der Masterarbeit beantwortet. Um die Machbarkeit zu prüfen, ist die für die Wärmeerzeugung angewendete Technologie in einem Industriepark integriert. Die wesentlichen technischen und wirtschaftlichen Kenndaten sind dargestellt.

Schlagwörter: Wasserstoff, Wärmeversorgung, Energieversorgung, Elektrifizierung, Dekarbonisierung, Engpass, Versorgungslücke, Industriepark, Chemiepark.

Abstract

In order to meet the requirements of the Federal Climate Protection Act and the Paris Climate Agreement for the reduction of greenhouse gases, part of the heat energy required by the industry, can be generated using renewable electricity. The electrification of the industry the other energy-consuming sectors, results in an increased demand for electricity. The intermittency of renewable energies combined with the loss of conventional power plant capacities may result in electrical supply gaps. For this scenario, hydrogen can be stored upstream and, if necessary, converted into electricity and/or heat using various technologies. The question of which technology is the most suitable to be used to generate centralized heat from green hydrogen in an industrial park is answered in this master's thesis. The specific technology is integrated into an industrial park to proof its feasibility and essential technical and economical characteristics are determined.

Keywords: Hydrogen, heat supply, energy supply, electrification, decarbonization, bottleneck, supply gap, industrial park, chemical park.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Problemstellung, Zielsetzung und Forschungsfrage	5
1.2	Vorgehensweise und Methoden	7
2	Theoretische Grundlagen	10
2.1	Energiebedarfsszenario.....	10
2.1.1	Reduktion von Treibhausgasen	10
2.1.2	Elektrifizierung der Industrie	11
2.1.3	Leistungsbedarf der Elektrifizierung	12
2.1.4	Szenarioerstellung und Handlungsoption	14
2.2	Wasserstoff	15
2.2.1	Eigenschaften von Wasserstoff	16
2.2.2	Prozesskette grüner Wasserstoff.....	17
2.2.3	Wasserstoffwirtschaft	23
2.2.4	Kosten von grünem Wasserstoff.....	25
2.3	Wasserstoff – Technologien zur Wärme- und Stromerzeugung	27
2.3.1	Wasserstoff Gasturbine	27
2.3.2	Brennstoffzellen BHKW	30
2.3.3	BHKW (H ₂ Motor)	34
2.3.4	Wasserstoffkessel	36
2.4	Aktuelle Forschung.....	38
2.4.1	Zukünftiger Energie- und Technologiemark in der Industrie	39
2.4.2	Grüne Prozesswärme in der Industrie	41
2.4.3	100 % erneuerbarer Strom, Ausweg aus der Dunkelflaute	42
2.5	Zusammenfassung und Forschungsbedarf.....	44
3	Fallstudie	45
3.1	Verbrauchermodellierung	45
3.1.1	Temperaturniveau und Energieverbrauch	46
3.1.2	Lastgang und Leistung	48
3.1.3	Dunkelflaute – Engpasssszenario	50
3.1.4	Zusammenfassung – Leistungs- und Energiebedarf.....	52
3.2	Nutzwertanalyse	53
3.2.1	Leistung	54
3.2.2	Wärmeparameter	55
3.2.3	Betriebsverhalten	55
3.2.4	Planungssicherheit.....	56
3.2.5	Wirkungsgrad	57
3.2.6	Investitions- und Betriebskosten.....	57
3.2.7	Zusammenfassung Eigenschaften und Bewertung.....	58
3.3	Integration der Vorzugsvariante.....	59

3.3.1	Wärmebilanz	61
3.3.2	Verluste.....	63
3.3.3	Anlagenverluste	67
3.3.4	Wirkungs- und Nutzungsgrad	69
3.3.5	Spezifikation Kessel und Brenner.....	70
3.3.6	Elektrische Verbraucher	71
3.3.7	Wasserverbrauch	72
4	Bewertung.....	73
4.1	Kostenmodell.....	73
4.2	Kapitalkosten.....	74
4.2.1	Investitionskostenschätzung.....	74
4.2.2	Abschreibungsdauer, Zins und Kapitalkosten.....	76
4.3	Brennstoffkosten	77
4.4	Betriebskosten.....	78
4.4.1	Fixe Betriebskosten.....	78
4.4.2	Variable Betriebskosten	78
4.5	Wärmegestellungskosten	80
4.6	Sensitivitätsanalyse	81
4.6.1	Bemessung und Bewertung	82
4.6.2	Best Case	84
4.6.3	Ausfallberechnung.....	85
5	Zusammenfassung.....	86
5.1	Ausblick.....	87
	Anhang A Infos zu Theoretische Grundlagen	90
A.1	TRL Definition	90
	Anhang B - Infos zu Fallstudie	91
B.1	Tool für synthetischen Lastgang.....	91
B.2	Daten Auswertung Tage unter 25 % Anteil EE	92
B.3	Technische Datenblatt SSB Brenner SAACKE GmbH	93
B.4	Technische Daten ZFR Dampfkessel BOSCH GmbH	94
	Anhang C - Infos zu Bewertung	96
C.1	Preiszusammenstellung Bosch Thermotechnik GmbH.....	96
C.2	Richtpreis Brenner SAACKE GmbH.....	97
	Abbildungsverzeichnis	98
	Tabellenverzeichnis	100
	Formelzeichenverzeichnis.....	101
	Abkürzungs- und Indicesverzeichnis	102

Literaturverzeichnis105

1 Einleitung

Spätestens im 21. Jahrhundert hat die Menschheit erkannt, dass fossile Energieträger nicht unendlich zur Verfügung stehen. Zudem sind die Auswirkungen der Klimaerwärmung auf Menschheit und Natur in den letzten Jahren besonders spürbar geworden. Somit ist die Einsparung oder Substitution von Energie aus fossilen Brennstoffen von essenzieller Bedeutung. Durch den Ausstoß klimaschädlicher Gase, sind die Kosten des menschengemachten Klimawandels zur Belastung für die Volkswirtschaften dieser Erde geworden [1]. Um es mit einem Zitat von Barack Obama, des ehemaligen US-Präsidenten, auszudrücken:

„Wir sind die erste Generation, die die Folgen des Klimawandels spürt und wir sind die letzte, die etwas dagegen tun kann.“ [2]

Für das „vor-Corona“ Jahr 2019 beträgt der Endenergieverbrauch der deutschen Industrie 2.512 PJ (698 TWh) und macht damit 28 % des gesamten Energieverbrauchs der Bundesrepublik Deutschland (BRD) aus [3, S. 21].

Zusätzlich zu mechanischer Energie, Beleuchtung und Versorgung der Informations- und Kommunikationstechnik, besteht in der Industrie ein Endenergiebedarf an Prozesswärme in Höhe von 467 TWh_{th} bzw. 66,9 %, gemessen am gesamten Endenergiebedarf des Industriesektors [3, S. 31]. Wasserdampf, Thermalöl oder Heißwasser sind die eingesetzten Wärmeträger.

Der Großteil der industriellen Treibhausgas-Emissionen (Treibhausgas = THG) werden durch Unternehmen der energieintensiven Industrie (z. B. Metallerzeugung und Chemie) verursacht. Dieses Segment verursacht etwa 70 % des industriellen Energieverbrauchs [4, S. 113]. Gas, Kohle und Strom sind die wichtigsten Energieträger in der Industrie. In einer Reduktion der Nutzung fossiler Brennstoffe seitens der Industrie liegt ein großes Potential. Um dieses auszuschöpfen, sind erhebliche Anstrengungen notwendig. Ein vielversprechendes Konzept ist die Elektrifizierung der Prozesswärme, die eine Nutzung von grünem Strom in den wärmeverbrauchenden Prozessen ermöglicht.

Neben der Reduktion von Treibhausgasen sinkt durch die Nutzung von inländisch produziertem Strom aus erneuerbaren Quellen die Abhängigkeit von Energieimporten. Die importierten Rohstoffe zur Energieerzeugung unterliegen sowohl erheblichen preislichen Schwankungen als auch geopolitischer Unsicherheit. Zur elektrischen Erzeugung von Wärme bietet sich ein Hochspannungs-Elektrodenkessel [5, S. 17] zur Dampferzeugung an. Die technologische Entwicklung von Hochtemperatur-Wärmepumpen im Bereich 100 °C bis 140 °C ermöglicht deren Einsatz zur Wärmeerzeugung [6]. Sie

könnten in Zukunft elektrisch erzeugten Niederdruckdampf und Heißwasser bereitstellen und so ebenfalls eine Rolle bei der Dekarbonisierung der industriellen Prozesswärme spielen [5, S. 17]. Gemeinhin wird diese energetische Umwandlung von Strom in Wärme auch mit dem Schlagwort „Power-to-Heat“ (PtH) bezeichnet. Dieses Verfahren führt nur zu einer Dekarbonisierung, wenn der verbrauchte Strom aus erneuerbaren Quellen stammt.

Alternativ zum PtH Konzept existieren heute schon Technologien, die mittels grünen Wasserstoffes nachhaltige Wärme und insbesondere Dampf erzeugen. Dieser Prozess wird als „Hydrogen-to-Heat“ (HtH) bezeichnet. Einige dieser Technologien befinden sich noch im Entwicklungsstadium. Die Nutzung von Wasserstoff zur Wärmeerzeugung unterliegt, speziell in der Herstellung, hohen Umwandlungsverlusten und ist deshalb weniger effizient als eine direkte Nutzung von Elektrizität zur Wärmeerzeugung.

Die großen Effizienzunterschiede und die potenziell gute Verfügbarkeit des grünen Stroms im Vergleich zu grünem Wasserstoff, sind wesentliche Argumente für die Elektrifizierung der Industrie zur Verminderung der THG. In der Zukunft wird also erneuerbarer Strom größtenteils und immer wenn möglich direkt zur Wärmeerzeugung genutzt werden [7].

Die Verfügbarkeit von erneuerbarem Strom ist jedoch aufgrund von täglichen Schwankungen und saisonalen Einflussfaktoren nur bedingt vorhersehbar. Speziell in den Wintermonaten sinkt die Verfügbarkeit des solar erzeugten Stromes in Deutschland. Ein erhöhter Windkraftertrag kann aktuell den Mangel an Solarenergie im Winter nicht vollständig ausgleichen. Die Erzeugungsleistung durch erneuerbare Energien (EE) für den Monat Januar des Jahres 2022 ist in Abbildung 1.1 dargestellt.

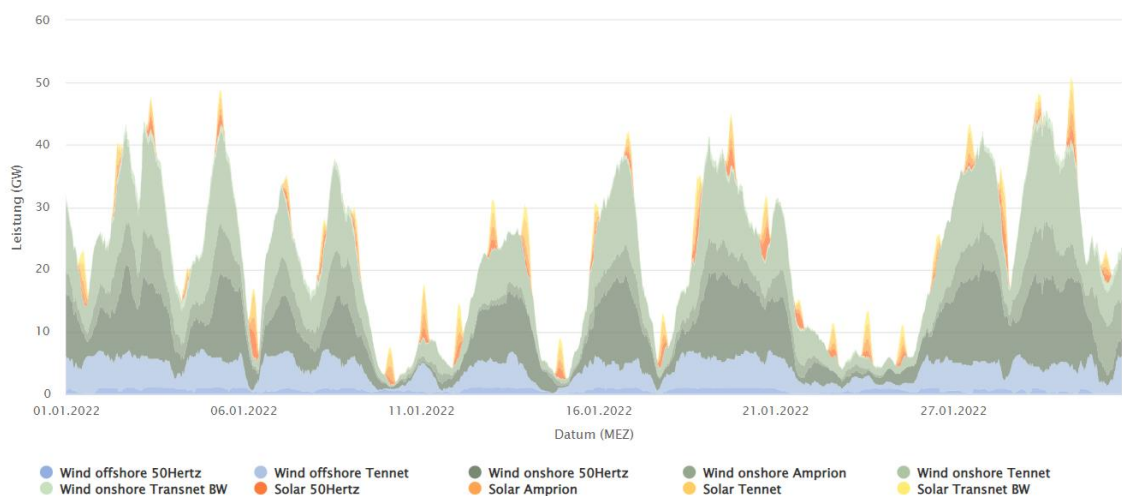


Abbildung 1.1: Energieerzeugung EE – Januar 2022 [8]

Die Schwankungsbreite der Leistung durch EE beträgt 2,04 GW bis 50,25 GW innerhalb des Januars im Jahre 2022. Der Energiebedarf im Januar 2022 schwankte dabei zwischen 77,12 GWe und 35,07 GWe, was zu einem Anteil EE im Netz von im Minimum 16,9 % und im Maximum 81,2 % innerhalb eines Monats führt [8]. Dieses Beispiel verdeutlicht die starke Schwankung zwischen Nachfrage und Angebot durch erneuerbaren Strom.

Neben dem Engpass erneuerbarer Energie im Winter, ist eine zukünftige Steigerung des Strombedarfs durch die Elektrifizierung der deutschen Volkswirtschaft zu erwarten. Wird Prozesswärme elektrisch erzeugt, steigert dies den Strombedarf der Industrie. Der zusätzliche Einsatz von Wärmepumpen im Haushaltssektor wird im Winter den bundesweiten Strombedarf weiter steigern. Hinzu kommt die Elektrifizierung des Transportsektors, die den Strombedarf weiter erhöht [9].

Nach einer aktuellen Berechnung steigt der Strombedarf der Industrie von 218 TWh im Jahre 2019 auf 263 TWh bis ins Jahr 2030, also um ca. 21% [10, S. 11]. Auch der Gesamtbedarf an Strom in Deutschland steigt laut aktualisierter Prognose des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) bis 2030 auf 715 TWh [11] von 504 TWh [12] im Jahr 2021, dies entspricht einer Steigerung um 42 %.

Die beschriebenen Effekte führen zu einer Verknappung von Strom, speziell in den meteorologischen Wintermonaten von Anfang Dezember bis Ende Februar. Der Import von erneuerbaren Energien kann diese Verknappung nicht kompensieren, da andere europäische Länder im Winter ebenfalls weniger „grünen Strom“ erzeugen. Es bleibt also eine Residuallast im deutschen Stromnetz, die anderweitig gedeckt werden muss [13, S. 28].

Die zu geringe Stromgewinnung aus Sonne und Wind im Winter, wird in der Forschung und Politik als „Dunkelflaute“ bezeichnet. Dieses Ereignis stellt eine große Herausforderung in der Energiewende dar. So heißt es in dem jährlichen Monitoring Bericht der Bundesnetzagentur:

„Schließlich ist im Hinblick auf die Zukunft aber insbesondere zu bedenken, dass die bis spätestens Ende 2022 zu erfolgende Stilllegung der bisher noch betriebenen deutschen Atomkraftwerke und die Abschaltung weiterer Kohlekraftwerke zu einer deutlichen Verknappung des Angebotes auf dem Stromer Absatzmarkt und auch zu Veränderungen der Marktstruktur führen wird.“ [14, S. 51]

Aufgrund des stetigen Ausbaus der erneuerbaren Energien ist bis zum Jahr 2040 mit einer Beruhigung des Strommarktes zu rechnen, wie in Abbildung 1.2 dargestellt. Zu