

BMU - UMWELTINNOVATIONSPROGRAMM

Abschlussbericht und Auswertung des begleitenden Messprogramms

zum Vorhaben:

Green Factory Allgäu

KfW-Aktenzeichen: N Ka3-002024

Fördernehmer/-in:

Müller Produktions GmbH

Umweltbereich

Ressourceneffizienz, Energie

Laufzeit des Vorhabens

25.11.2013 – 31.03.2021

Autoren

Rauter Michael, Karg Florian, Köberlein Jana, Hohmann Andrea

Gefördert aus Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und
Reaktorsicherheit (BMUB)

Datum der Erstellung

25.07.2022





Berichts-Kennblatt

Aktenzeichen: N Ka3-002024	Vorhaben-Nr.:
Titel des Vorhabens: Green Factory Allgäu	
Autor(en); Name(n), Vorname(n)	Vorhabenbeginn: 25.11.2013
	Vorhabenende (Abschlussdatum): 31.03.2021
Fördernehmer/-in (Name, Anschrift) Müller Produktions GmbH Gutenbergstr. 12 87781 Ungerhausen	Veröffentlichungsdatum:
	Seitenzahl: 144
Gefördert im Rahmen des Umweltinnovationsprogramms des Bundesumweltministeriums	
Kurzfassung/ Summary	
<p>Die Müller Produktions GmbH ist ein mittelständisches Unternehmen und entwickelt und produziert Lösungen für die Energie- und Gebäudetechnik sowie den industriellen Anlagenbau.</p> <p>Um den Herausforderungen der Energiewende zu begegnen, hat die Müller Produktions GmbH mit der Green Factory Allgäu ein innovatives, jedoch gleichzeitig risikoreiches Vorhaben umgesetzt. Sie verfolgt das langfristige Ziel einer energieeffizienten, -flexiblen und nahezu energieautarken Fabrik, in welcher verschiedene moderne Technologien zur dezentralen Energiegewinnung sowie Energiespeicherung dafür sorgen, den Bedarf an extern bezogener Energie zu minimieren sowie das Treibhauspotenzial der Energieversorgung der Fabrik zu reduzieren.</p> <p>Hierzu wurden im Rahmen des Projekts "Green Factory Allgäu" innovative Maßnahmen für eine umweltverträgliche und wirtschaftliche Energieversorgung sowie Effizienzmaßnahmen in verschiedenen Bereichen der Versorgungstechnik entwickelt und umgesetzt. Als Basis wurde zunächst die Transparenzschaffung und Befähigung zum flexiblen Anlagenbetrieb forciert. Hierzu konnten verbesserte Erzeugungsprognosen, ein Planungssystem für die energieeffiziente Produktionsplanung sowie die Gebäudeleittechnik zur Steuerung von Anlagen der technischen Gebäudeausrüstung eingeführt werden. Im Bereich der Erzeugung weist die Müller Produktions GmbH mit mehreren Photovoltaikanlagen, einem</p>	

Pelletkessel, einem ökogasbetriebenen BHKW und einem Gaskessel zur Deckung von Spitzenlasten eine geeignete Struktur für die nachhaltige Bereitstellung von elektrischer und thermischer Energie auf.

Im einjährigen Messzeitraum vom 01.04.2020 bis zum 31.03.2021 wurden in der Green Factory 1.458.873 kWh Strom erzeugt, etwa 72% davon durch die PV-Anlagen und 28% durch ein BHKW. Knapp 59% des eigenerzeugten Stroms wurde in der Green Factory selbst verbraucht, 602.415 kWh wurden in das öffentliche Stromnetz eingespeist. In Zeiten der Unterdeckung insbesondere während der Nachtstunden wurden 302.938 kWh Strom aus dem Netz bezogen. Dies ist vorrangig dadurch begründet, dass die Netzeinspeisung des BHKWs in diesen Zeiten die maximale Einspeisemenge aus der KWK-Anlage überschritten hätte. Der gesamte Stromverbrauch des Werks in Höhe von 1.159.396 kWh wurde im Betrachtungszeitraum zu knapp 43% mit eigenerzeugtem PV-Strom, zu 31% mit eigenerzeugtem BHKW-Strom sowie zu 26% mit Strom aus dem öffentlichen Netz gedeckt. Mit diesem Strom-Mix erreicht die Green Factory einen Autarkiegrad von 74%. Etwa 48% des erzeugten PV-Stroms sowie 87% des erzeugten BHKW-Stroms wurden am Produktionsstandort selbst verbraucht, der übrige erzeugte Strom wurde in das Netz eingespeist. Mit ihren Technologien zur Wärmeerzeugung ist die Green Factory zu 100% wärmeautark und versorgt zusätzlich mit 1,15 GWh Energie die umliegenden Verbraucher im Gewerbegebiet über ein lokales Nahwärmenetz.

Durch geeignete Betriebsstrategien eines Batteriespeichers und des BHKWs können Eigenverbrauchsanteil und Autarkiegrad signifikant erhöht werden. Diese führen in den Sommermonaten zu einem zusätzlichen Eigenverbrauch von 34 MWh PV-Strom, der ansonsten in das Netz eingespeist werden würde. Der Eigenverbrauchsanteil erhöht sich so auf 61%, der Autarkiegrad auf 77%. Durch den veränderten Strom-Mix können rund 4,5 t CO₂-Äquivalente eingespart werden. Die Ausweitung des am Strombedarf orientierten BHKW-Betriebs ermöglicht eine Erhöhung des Eigenverbrauchsanteils auf 63% und des Autarkiegrads auf 86%. Restriktionen des Netzbetreibers bezüglich der maximalen Rückspeisung von mittels BHKW erzeugtem Strom in das Netz werden durch Verschiebungen durch Nutzung des Batteriespeichers umgangen. Durch den erweiterten Betrieb des BHKW können rund 191 MWh Wärme zusätzlich gewonnen werden. Durch die dadurch mögliche Substitution des Spitzenlast-Gaskessels sowie durch die Verringerung des Stromnetzbezugs lässt sich ein jährliches Einsparpotenzial von rund 50 t CO₂-äq erzielen. Beim Gaskessel handelt es sich um einen Spitzenlastgaskessel und eine redundante Absicherung der anderen Wärmeerzeuger. Zur Erweiterung des Flexibilisierungspotenzials können Anlagen aus der Produktion und Produktionsinfrastruktur in ihrem Stromverbrauch angepasst werden. Insbesondere eine Laserschneidanlage, Sandstrahl- und Lackierkabinen können den Batteriespeicher durch Lastmanagement ergänzen.

Effiziente Technologien sorgen in der Green Factory Allgäu auf der Verbrauchsseite dafür, dass der Energieverbrauch möglichst niedrig gehalten werden kann und leisten so einen weiteren Beitrag zur Erhöhung des Eigenverbrauchsanteils und des Autarkiegrads. Unter anderem die Tageslichtadaptiven

LED-Beleuchtungssysteme, Heiz- und Kühldecken, ein vollautomatisches Hochregallager sowie eine energieeffiziente Laserschneidanlage wurden im Rahmen des Projekts beschafft.

Im betrachteten Jahr konnten durch das innovative Konzept der Green Factory die Treibhausgasemissionen der Wärmeerzeugung im Vergleich zur 100%-igen Wärmeversorgung durch Erdgas um 521 t CO₂-äqv. und 4.645 GJ Primärenergie (nicht reg. Ressourcen; u.H.) pro Jahr reduziert werden. Dies entspricht einer Reduktion um 89% bzw. 44%. Das Treibhauspotenzial des Green Factory Strom-Mix beträgt 0,164 kg CO₂-äqv. pro kWh Strom, was einer Reduktion gegenüber dem deutschen Strom-Mix von 64% entspricht. Auch bezüglich der Primärenergie ist eine erhebliche Einsparung von 35% gegenüber dem aus dem Netz bezogenen Strom möglich. Im Vergleich zum reinen Bezug des Stroms aus dem deutschen Stromnetz vermeidet die Green Factory 334 t CO₂-äqv. pro Jahr und spart 2.496 GJ Primärenergie (nicht reg. Ressourcen; u.H.) pro Jahr ein. Durch die Reduktion der Transportaufwände und die vorrangig mit PV-Überschuss-Strom gespeiste Eigenerzeugung des Stickstoffs können die Treibhausgasemissionen im Vergleich zum Bezug des Stickstoffs von extern um 83% reduziert werden. Auch durch die Reduktion der Transportaufwände bei der Einlagerung sowie Entnahme aus dem vollautomatischen Hochregallager können 83% der Treibhausgasemissionen eingespart werden. Insgesamt konnten in der Green Factory innerhalb des Berichtszeitraums so 869 t CO₂-äqv. pro Jahr im Vergleich zur konventionellen Energie- und Medienversorgung eingespart werden. Durch die Kombination der verschiedenen Strom- und Wärmeerzeugungsanlagen sowie der Flexibilisierungs- und Effizienztechnologien konnte die Müller Produktions GmbH im Messzeitraum 174.427€ (81%) Stromkosten gegenüber dem Netzbezug sowie 84.977€ (40%) Wärmekosten einsparen.

Da noch nicht alle Potentiale vollständig ausgeschöpft worden sind, wird sich die Green Factory Allgäu auch zukünftig kontinuierlich weiterentwickeln. Insbesondere die intelligente Steuerung aller Erzeuger, Verbraucher und Speicher der Green Factory wird auf Basis neuer Erkenntnisse und politischer Rahmenbedingungen fortwährend angepasst. Durch die Schaffung der Transparenz über alle Energieflüsse dank der installierten Messtechnik, der Visualisierung in der Energiemanagementsoftware, sowie der Verknüpfung mit Produktionsdaten ist die notwendige Grundlage zur kontinuierlichen Anpassung und Optimierung einer effizienten, flexiblen und nahezu autarken Fabrik geschaffen.

Die Green Factory zeigt eindrucksvoll, wie Unternehmen die Energiewende für sich nutzen und einen Beitrag zu ihrem Gelingen leisten können. Durch die Branchenunabhängigkeit des realisierten Konzepts und den modularen Aufbau ist dies auf Unternehmen unterschiedlichster Ausrichtung und Größe adaptierbar. Die Green Factory ist durch ihre Kombination vielseitiger Technologien zur Versorgung, Speicherung und Kopplung der Sektoren flexibel und resilient gegenüber zukünftigen Entwicklungen im Energiemarkt. Sie optimiert die dezentrale Nutzung erneuerbarer Energien und kann gleichzeitig durch Energieflexibilität und Lastmanagement zur Stabilisierung der Stromnetze beitragen.

Schlagwörter: Erneuerbare Energien, Energieeffizienz, Energieautarkie, Energieflexibilität



Anzahl der gelieferten Berichte 1 Papierform: - Elektronische Datenträger: -	Sonstige Medien: - Veröffentlichung im Internet: -
--	---



Report Coversheet

Reference-No.: N Ka3-002024	Project-No.:
Report Title: Green Factory Allgäu	
Author(s); Family Name, First Name (Company)	Start of project: 25.11.2013
	End of project: 31.03.2021
Performing Organisation (Name, Address) Müller Produktions GmbH Gutenbergstr. 12 87781 Ungerhausen	Publication Date:
	No. of Pages: 144
Funded in the Environmental Innovation Programme of the Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Building and Nuclear Safety.	
<p>Summary</p> <p>Müller Produktions GmbH is a medium-sized company, which develops and produces solutions for energy and building systems as well as industrial applications. To meet the challenges of the energy transition, Müller Produktions GmbH has implemented an innovative, but at the same time risky project with the Green Factory Allgäu. Its long-term goal is an energy-efficient, flexible and almost energy-autonomous factory in which various modern technologies for decentralized energy generation and energy storage ensure that the need for externally sourced energy is minimized and the greenhouse gas potential of the factory's energy supply is reduced. Therefore, innovative measures for an environmentally friendly and economical energy supply as well as efficiency measures regarding production and supply technology were developed and implemented as part of the "Green Factory Allgäu" project. The creation of transparency and the ability to operate the system flexibly were promoted first. For this purpose, an improved generation forecasts, a planning system for energy-efficient production planning and the building management system for controlling systems of technical building equipment were implemented. In the area of generation, Müller Produktions GmbH has a suitable structure for the sustainable provision of electrical and thermal energy with several photovoltaic systems, a pellet boiler, an eco-gas-powered combined heat and power plant (CHP) and a gas boiler to cover peak loads.</p>	

During the one-year measurement period from 01.04.2020 until 31.03.2021, the Green Factory generated 1,458,873 kWh of electricity, about 72% of which was generated by the PV systems and 28% by a CHP unit. Almost 59% of the self-generated electricity was consumed in the Green Factory itself, 602,415 kWh were fed into the public power grid. During periods of power shortage, 302,938 kWh of electricity was purchased from the grid. During the period under review, the factory's total electricity consumption of 1,159,396 kWh was covered by almost 43% self-generated PV electricity, 31% self-generated CHP electricity and 26% electricity from the public grid. With this electricity mix, the Green Factory achieved a self-sufficiency level of 74%. About 48% of the generated PV electricity and 87% of the generated CHP electricity were consumed at the production site itself, the remaining generated electricity was fed into the grid. With its heat generation technologies, the Green Factory is 100% heat self-sufficient and also fully supplies the surrounding consumers in the industrial park with heat via a local heating network.

Suitable operating strategies for the battery storage system and the CHP unit can significantly increase the share of self-consumption and the degree of autonomy. In the summer months, these lead to an additional self-consumption of 34 MWh of PV electricity, which would otherwise be fed into the grid. The proportion of self-consumption increases to 61% and the degree of self-sufficiency to 77%. The changed electricity mix can save around 4.5 t of CO₂ equivalents. The expansion of the electricity demand responsive CHP operation enables the proportion of self-consumption to be increased to 63% and the degree of self-sufficiency to 86%. Restrictions imposed by the grid operator on the maximum amount of electricity generated by the CHP unit that can be fed back into the grid are circumvented by the battery storage system. Due to the expanded operation of the CHP, around 191 MWh of additional heat can be obtained from the CHP. Through the possible substitution of the peak load gas boiler, which also secures the redundancy of the heat generators, and the reduction of electricity from the public grid, an annual savings potential of around 50 t CO₂-eq. can be achieved. To expand the flexibility potential, systems from production and production infrastructure can be adjusted in terms of their electricity consumption. In particular, a laser cutting system, sandblasting and painting booths can supplement the battery storage with load management.

On the consumption side, efficient technologies in the Green Factory Allgäu ensure that energy consumption can be kept as low as possible and thus make a further contribution to increasing the proportion of self-consumption and the degree of self-sufficiency. Among other things, the daylight-adaptive LED lighting systems, heating and cooling ceilings, a fully automatic high-bay warehouse and an energy-efficient laser cutting system were introduced as part of the project and integrated into the overall concept.

In the year under review, the Green Factory's innovative concept reduced greenhouse gas emissions from heat generation by 521 t CO₂-eq. and 4,645 GJ of primary energy (non renewable resources; l_hv) per year. compared to a 100% heat supply by natural gas. This corresponds to a reduction of 89% respectively 44%.



The greenhouse potential of the Green Factory electricity mix is 0.164 kg CO₂-eq. per kWh of electricity, which corresponds to a reduction of 64% compared to the German electricity mix. Also in terms of primary energy, a significant saving of 35% is possible compared to electricity purchased from the grid. Compared to only purchasing electricity from the German grid, the Green Factory avoids 334 t CO₂-eq. per year and saves 2,496 GJ primary energy per year. By reducing transportation efforts and generating its own nitrogen primarily fed by PV surplus electricity, greenhouse gas emissions can be reduced by 83% compared to purchasing nitrogen from external sources. Also, by reducing the transportation effort for storage as well as removal from the fully automated high-bay warehouse, 83% of greenhouse gas emissions for internal transports can be saved. In total, 869 t CO₂-eq. per year could be saved in the Green Factory compared to conventional energy and media supply. By combining the various electricity and heat generation systems, Müller Produktions GmbH was able to save €174,427 (81%) in electricity costs compared to grid purchases and €84,977 (40%) in heat costs during the measurement period.

Since not all potentials have been fully exploited yet, the Green Factory Allgäu will continue to develop further in the future. In particular, the intelligent control of all generators, consumers and storage units of the Green Factory will be continuously adapted on the basis of new findings and political framework conditions. By creating transparency over all energy flows thanks to the installed measurement technology, the visualization in the energy management software, and the link with production data, the necessary basis for the continuous adaptation and optimization of an efficient, flexible, and almost self-sufficient factory has been created.

The Green Factory impressively demonstrates how companies can use the energy transition for themselves and contribute to its success. Due to the industry-independence of the implemented concept and the modular structure, this can be adapted to companies of different sectors and size. The Green Factory is flexible and resilient to future developments in the energy market due to its combination of versatile technologies for supply, storage and coupling of sectors. It optimizes the decentralized use of renewable energies and, at the same time, can contribute to the stabilization of the power grids through energy flexibility and load management.

Keywords: renewable energies, energy efficiency, energy sufficiency, energy flexibility

Number of copies: 1

Internet publication: -

Inhalt

1	Einleitung	1
1.1	Kurzbeschreibung des Unternehmens	1
1.2	Ausgangssituation	2
2	Vorhabensumsetzung	4
2.1	Ziel des Vorhabens: Green Factory	4
2.2	Technische Lösung	5
2.2.1	Transparenzschaffung & Flexibilitätsbefähigung	14
2.2.2	Erzeugung & Flexibilisierung	16
2.2.3	Effizienz & Technologien	29
2.3	Darstellung der Umsetzung des Vorhabens	30
2.4	Behördliche Anforderungen	36
2.5	Vorgehen zur Bewertung der Zielerreichung: Konzeption des Messprogramms	37
3	Ergebnisse	41
3.1	Bewertung der Vorhabendurchführung	41
3.2	Durchführung und Ergebnisse der Bewertung der Zielerreichung	44
3.2.1	Maßnahmen zur Transparenzschaffung und Flexibilitätsbefähigung	44
3.2.2	Maßnahmen zur Erzeugung und Flexibilisierung	52
3.2.3	Maßnahmen im Bereich Energieeffizienz und Technologie	76
3.2.4	Störungen der Projekttechnik im Messzeitraum	84
3.3	Umweltbilanz des Gesamtsystems	86
3.3.1	Definition der betrachteten Szenarien	86
3.3.2	Vergleich mit konventioneller Energiebeschaffung	89
3.3.3	Umweltbilanz der Stromversorgung	91
3.3.4	Umweltbilanz der Wärmeversorgung	96
3.3.5	Umweltbilanz der Transportaufwände sowie des Stickstoffbezugs	96
3.3.6	Umweltbilanz des Gesamtsystems	98
3.3.7	Erhöhung des Autarkiegrads	100
3.4	Wirtschaftlichkeitsanalyse	101
3.5	Technischer Vergleich zu konventionellen Verfahren / Innovation	111
4	Empfehlungen	113
4.1	Erfahrungen aus der Praxiseinführung	113
4.2	Modellcharakter/ Übertragbarkeit	115



5	Zusammenfassung / Summary	117
5.1	Einleitung / Introduction.....	117
5.2	Vorhabensumsetzung / Project implementation.....	118
5.3	Ergebnisse / Project results.....	121
5.4	Ausblick / Prospects.....	127
6	References	130
7	Anhang	132

1 Einleitung

1.1 Kurzbeschreibung des Unternehmens

Die Alois Müller Firmengruppe ist ein mittelständisches, inhaberbetriebenes Unternehmen mit mehr als 600 Mitarbeitern*innen. An zwölf Standorten werden innovative Lösungen für die Energie- und Gebäudetechnik (Heizung, Lüftung, Sanitär, Kälte, Elektro, MSR/Regelungstechnik) sowie den industriellen Anlagenbau entwickelt und produziert. In ihrer im Jahr 2013 in Betrieb gegangenen Green Factory Allgäu in Ungerhausen (siehe Abbildung 1) produziert die Müller Produktions GmbH Energiezentralen in Containerbauweise sowie Energiemodulsysteme. Darüber hinaus werden dort Lüftungskanäle und versorgungstechnische Komponenten des Anlagenbaus wie zum Beispiel Rohrleitungssysteme aus Stahl und Edelstahl gefertigt. Mit dem Unternehmensleitsatz „Energie im Fokus“ legt die Alois Müller GmbH bei allen Projekten einen Schwerpunkt auf innovative sowie kosten- und energieeffiziente Lösungen. Mehr als 250 Mitarbeiter*innen arbeiten dabei im Bereich der Fertigung und Verwaltung in der Green Factory am Standort in Ungerhausen [1].



Abbildung 1: Betriebsgelände der Müller Produktions GmbH in Ungerhausen

1.2 Ausgangssituation

Im Zuge der Energiewende hat sich die Bundesregierung zum Ziel gesetzt, bis zum Jahr 2030 65% der Treibhausgasemissionen gegenüber 1990 zu reduzieren und bis zum Jahr 2045 weitgehende Treibhausgasneutralität zu erreichen [2]. Für den Industriesektor sieht der Klimaschutzplan der Bundesregierung eine Reduktion der CO₂-Äquivalente von 2014 bis 2030 um ca. 20% vor, für den Energiesektor eine Reduktion von ca. 50% [3]. Die Bundesregierung plant diese zulässigen CO₂-Emissionsmengen für die einzelnen Sektoren im Rahmen des neuen Klimaschutzgesetzes weiter abzusenken [2]. Mit einem Anteil von 45% am Stromverbrauch [4] sowie 28% am Endenergieverbrauch [5] hat die deutsche Industrie somit direkt sowie indirekt großes Potenzial einen Beitrag zur Erreichung der Klimaziele zu leisten. Die geplante Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung bis zum Jahr 2050 auf 80% ist mit hohen Investitionskosten in Erzeugungsanlagen und dem Ausbau der Stromnetze verbunden, wodurch die Stromkosten für die Industrie in den letzten Jahren stetig gestiegen sind – seit 2010 um mehr als 50% [6]. Auch zukünftig ist mit einem weiteren Kostenanstieg zu rechnen. Gerade viele kleine und mittelständische Unternehmen, die nicht der energieintensiven Industrie zugeordnet werden, müssen hierbei die volle Umlage- und Steuerlast tragen und werden somit vor eine besondere Herausforderung gestellt. Durch Stromeigenerzeugung und -verbrauch bietet sich Unternehmen jedoch die Möglichkeit ihre Stromkosten erheblich zu reduzieren [7]. Da durch die sinkende Einspeisevergütung die Attraktivität einer Rückspeisung des eigenerzeugten Stroms in das öffentliche Netz zudem sinkt [8], ist ein ganzheitliches Konzept mit aufeinander abgestimmten Erzeugern, Speichern und Verbrauchern notwendig, um Produktionsstandorte dezentral und effizient mit erneuerbaren Energien zu versorgen.

Bisher wird Energie meist als unendlich verfügbare Ressource angesehen und nicht als begrenzter Faktor in die Planung und Steuerung von Produktion und technischer Gebäudeausrüstung (TGA) miteinbezogen. In der Müller Produktions GmbH wurde vor der Vorhabensumsetzung die mittels Photovoltaikanlage selbst erzeugte Energie kontinuierlich in das öffentliche Netz eingespeist, ohne das Ziel der Erhöhung des

Eigenverbrauchs zu verfolgen. Investitionen in Anlagen der Produktion und Logistik wurden vorrangig vor dem Hintergrund einer raschen Amortisation getätigt. Dem Stromverbrauch im operativen Betrieb kam nur eine nebensächliche Bedeutung zu. Die Infrastruktur für Gebäudeautomatisierung und Leittechnik ermöglicht eine reibungslose Produktion, eine Aufnahme und Überwachung interner Verbräuche war jedoch nur mittels grober Messungen möglich. Die notwendige Transparenz für eine intelligente Steuerung war demnach nicht gegeben. Die für die Produktion und TGA erforderlichen Roh-, Hilfs- und Betriebsmittel wie beispielsweise Stickstoff als Schneidgas im Laserschneidverfahren wurden extern bezogen und per LKW zum Produktionsstandort transportiert. Auch die in der Produktion anfallende Abwärme wird häufig nicht zielgerichtet genutzt, sondern unkontrolliert in die Produktionshalle abgegeben. Dies betraf im Rahmen der Green Factory insbesondere die Eranschaffung der Laserschneidanlage, für welche gemeinsam mit dem Anlagenhersteller eine Lösung zur Integration der Abwärme in das Energiekonzept ausgearbeitet wurde.

2 Vorhabensumsetzung

2.1 Ziel des Vorhabens: Green Factory

Um den Herausforderungen der Energiewende zu begegnen, die genannten Potenziale zu nutzen und möglichen zukünftigen Verschärfungen bei Umweltauflagen wie möglichen CO₂-Preissteigerungen entgegenzuwirken, hat die Müller Produktions GmbH mit der Green Factory Allgäu ein innovatives, jedoch gleichzeitig risikoreiches Vorhaben umgesetzt. Sie verfolgt das langfristige Ziel einer energieeffizienten, -flexiblen und nahezu energieautarken Fabrik, in welcher verschiedene moderne Technologien zur dezentralen Energiegewinnung sowie Energiespeicherung dafür sorgen, den Bedarf an extern bezogener Energie zu minimieren sowie die Umweltwirkungen der Energieversorgung der Fabrik zu reduzieren. Die für Verwaltung und Produktion notwendige Energie in Form von Strom, Wärme und Kälte soll nahezu vollständig vor Ort und aus erneuerbaren Quellen bereitgestellt und optimal genutzt werden. Um dies zu erreichen sind umfangreiche Investitionen in modernste Produktionsanlagen und Komponenten der technischen Gebäudeausrüstung sowie zur intelligenten Vernetzung und Steuerung dieser notwendig. Die Müller Produktions GmbH plant mit ihrem Konzept der Green Factory eine zunehmende Unabhängigkeit von steigenden Stromkosten zu erreichen und sichert somit langfristig die eigene Wettbewerbsfähigkeit. Darüber hinaus werden die in der Green Factory Allgäu erzeugten Produkte mit einem Hinweis zu den in der Fertigung angefallenen CO₂-Äquivalente versehen, um so ein Alleinstellungsmerkmal zu schaffen und sich von Wettbewerbern abzugrenzen. Neben der Unabhängigkeit vom Netzbezug, den Potenzialen zur Energiekostenreduktion sowie der Dekarbonisierung der Energieerzeugung kann die energieautarke Fabrik auch einen Beitrag zur Stabilität der Stromnetze leisten. Durch die dezentrale Synchronisation von Energieangebot und -nachfrage können Lastspitzen ausgeglichen und so die öffentlichen Stromnetze entlastet werden. Die Müller Produktions GmbH möchte mit der Green Factory Allgäu zeigen, dass die Herausforderungen der Energiewende auch eine Chance für Unternehmen im internationalen Wettbewerb

sein können. Hierzu sollen regenerative Energien durch intelligente Vernetzung, Lastmanagement und Sektorenkopplung optimal und energieflexibel am Produktionsstandort genutzt werden. Die Green Factory Allgäu, in welcher Bauteile für die Heizungs- und Klimatechnik produziert sowie Auftragsfertigungen von Schweißkonstruktionen durchgeführt werden, ist hierzu zusätzlich zu umweltfreundlichen Produktionsanlagen und der ressourceneffizienten technischen Gebäudeausrüstung mit Systemen zur regenerativen Energieerzeugung, Energiespeicherung und zur intelligenten Vernetzung dieser mit den Produktionsanlagen ausgestattet.

2.2 Technische Lösung

Das 18.000 m² große Büro- und Produktionsgebäude umfasst 4.000 m² Fläche für Büro, Verwaltung, Schulung und Kantine sowie 14.000 m² Produktions- und Lagerflächen, welche nahezu energieautark betrieben werden sollen. Den benötigten Strom liefert eine Photovoltaikanlage mit 1,1 MW_p bestehend aus rund 200.000 Solarzellen auf dem Dach der Gebäude, was einer Gesamtfläche von 7675 m² entspricht. Der ideale jährliche Anlagenertrag beträgt etwa 1,13 GWh, was etwa 1027 Vollaststunden pro Jahr entspricht. Stromüberschuss wird in einen 200 kWh Batteriespeicher oder das öffentliche Netz gespeist. Derzeit dient der Batteriespeicher zur Reduzierung von Spitzenlasten und zur unterbrechungsfreien Stromversorgung (USV). Zukünftig soll er darüber hinaus auch zur Erhöhung des Eigenverbrauchs genutzt werden. Liefert die Solaranlage aufgrund der Witterungsverhältnisse nicht ausreichend Strom, wird dieser durch ein mit Ökogas¹ betriebenes stromgeführtes Blockheizkraftwerk (BHKW) mit 220 kW_{el} und 250 kW_{th} bereitgestellt.

Die Green Factory verfügt neben dem BHKW über einen 200 kW Holzpellet und einen 2.000 kW Gaskessel zur Deckung des eigenen Wärmebedarfs sowie zur Versorgung umliegender Verbraucher im Gewerbegebiet über ein Nahwärmenetz. Der Holzpelletkessel deckt dabei die Grundlast des Wärmenetzes

¹ Ökogas mit TÜV-zertifizierter Klimaneutralstellung (in der Nutzung); Anteil von 5 % Bio-Erdgas, erzeugt in Anlagen in der Region [9].

ab, sofern dies nicht durch das BHKW erfolgen kann. Bei längeren Kälteperioden oder Spitzenlasten wird der ebenfalls mit Ökogas betriebene 2.000 kW Gaskessel zugeschaltet. Dieser deckt alle weiteren, nicht durch BHKW und Pelletkessel, gedeckten Wärmebedarfe des Nahwärmenetzes und sichert im Fall von Störungen die Versorgung. Kälte wird durch eine thermische Brunnenanlage mit 600 kW Kälteleistung bereitgestellt, mit welcher Grundwasser für die Gebäudekühlung genutzt wird. Darüber hinaus speist diese ein Kältenetz, welches auch umliegende Unternehmen mit regenerativ erzeugter Kälte versorgt und Löschwasser im Gewerbegebiet bereitstellt. Um häufiges Ein- und Ausschalten der Erzeugungskomponenten zu vermeiden und somit deren Laufzeit zu verlängern sowie Schwankungen des Wärmebedarfs abzufedern, wird überschüssige Wärme und Kälte in einem 100.000 Liter Pufferspeicher zur Lagerung von Wasser im geschlossenen Kreislauf zwischengespeichert (siehe Abbildung 2). Darüber hinaus kann mittels dreier 200 kW Heizstäbe durch Power-to-Heat auch überschüssiger PV-Strom als Wärme gespeichert werden. Aus dem Pufferspeicher werden neben den Verwaltungsflächen und Produktionshallen der Green Factory auch benachbarte Unternehmen im Gewerbegebiet, wie die CB stone-tec GmbH, über ein Nahwärmenetz mitversorgt. Außerdem steht eine Erdwärmepumpe zur Verfügung, welche Erdwärme zur Heizung der Gebäude nutzbar macht. Zusätzlich ist der 30 kW Druckluftkompressor mit einer Wärmerückgewinnungsanlage ausgestattet.



Abbildung 2: Die Green Factory mit ihrer Energiezentrale und dem Pufferspeicher im Vordergrund

Neben der optimalen Nutzung der genannten Energieerzeugungs- und Speicherungstechnologien wird die Eigenverbrauchsquote des erzeugten Solarstroms erhöht. Prozessabhängige variable Verbraucher wie eine Laserschneidemaschine, eine Lackieranlage und eine Sandstrahlanlage werden im Sinne des Lastmanagements vorrangig dann betrieben, wenn ausreichend PV-Strom zur Verfügung steht. Über eine Plantafel in der Produktionshalle können die Mitarbeiter*innen die aktuelle Erzeugungs- und Verbrauchssituation am Standort verfolgen und – sofern Liefertermine und Kapazitäten es zu lassen – Aufträge so einplanen, dass der eigenerzeugte Strom optimal genutzt wird (siehe Kapitel 3.2.1.2). Auch Prozessmedien wie Druckluft, vollentsalztes Wasser (VE-Wasser) und Stickstoff werden vor Ort erzeugt und bieten als variable Verbraucher mit Speicher zusätzliche Flexibilität zur Anpassung an die volatile Erzeugung. Die Eigenerzeugung des Stickstoffs ermöglicht neben der Erhöhung der PV-Strom-Nutzung die Vermeidung von Transporten zur Anlieferung. Eine Infrastruktur für Elektromobilität mit zwei Schnell-Ladestationen bietet Durchreisenden auf der Autobahn A96 sowie für firmeneigene Elektrofahrzeuge die Möglichkeit zum Laden mittels klimaneutralem Strom. Simultanes Laden von acht Elektrofahrzeugen ist

möglich. Abbildung 3 zeigt das Konzept der Green Factory in einer schematischen Übersicht. Die Energieflüsse sind in Abbildung 4 bis Abbildung 6 dargestellt. Die Senke „Komponenten außerhalb der Auswertung “ des Strom Energieflussdiagramms in Abbildung 6 ist zurückzuführen auf erst nach dem Messzeitraum installierte Messinstrumente, welche nicht mit Maßnahmen des Förderprojektes verknüpft sind. Die Energieflussdiagramme werden in den Diagrammen von Abbildung 7 bis Abbildung 10 feiner unterteilt.

GREEN FACTORY DIE CO₂-NEUTRALE FABRIK

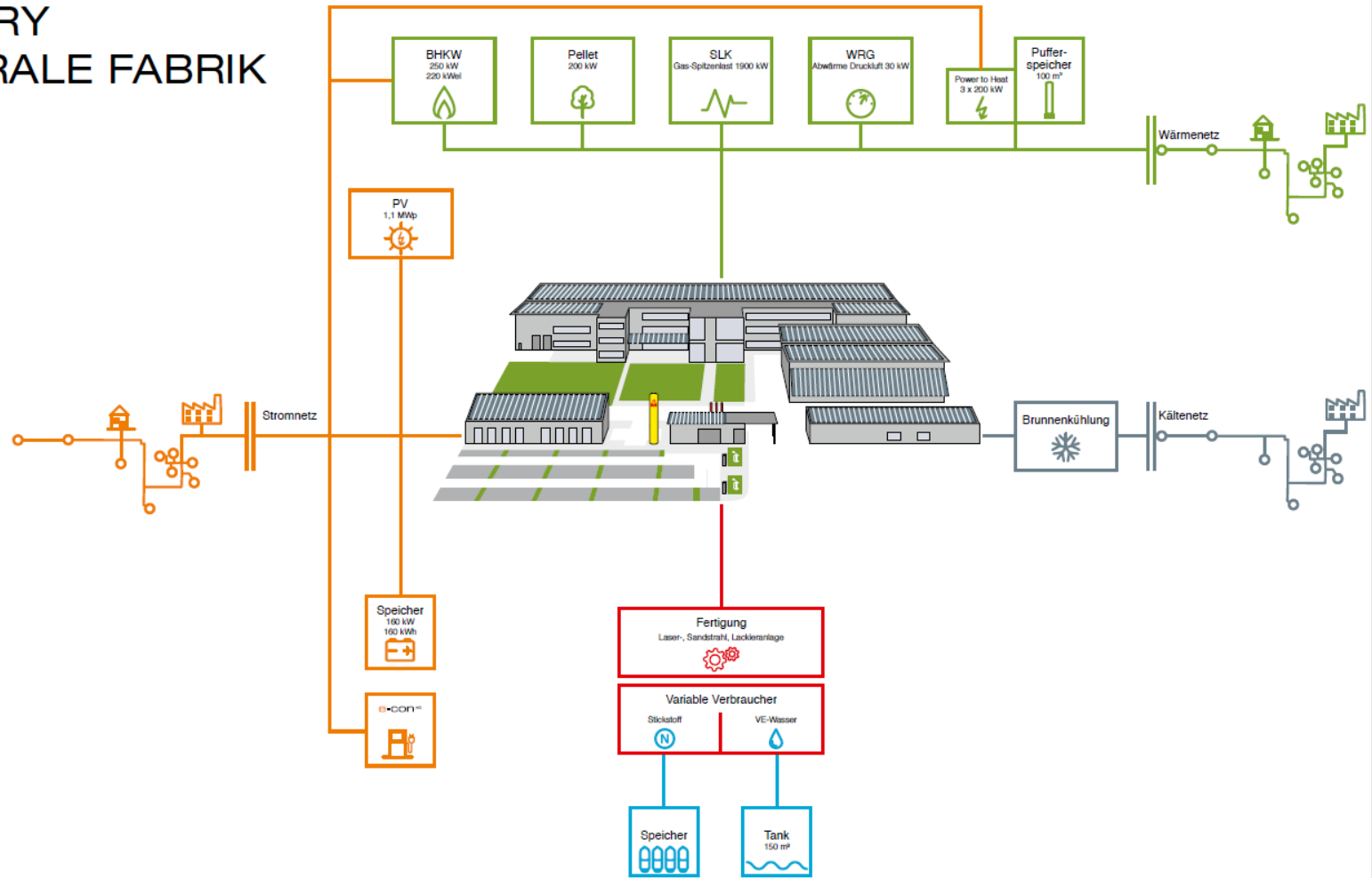


Abbildung 3: Schematische Übersicht der Green Factory

Basierend auf einer transparenten und belastbaren Analyse der vorherrschenden Energieströme, lag der Fokus dieses Vorhabens zum einen auf der Befähigung zum flexiblen Betrieb der Green Factory u.a. durch die Installation einer Luftzerlegungsanlage für Schneidgase und eines Batteriespeichers zur Steigerung des Energieautarkiegrads. Zum anderen wurden weitere Optimierungsmaßnahmen identifiziert und quantifiziert, die durch die intelligente Vernetzung der genannten technischen Lösungen (Eigenerzeugung- und Speichertechnologien) realisierbar sind. Die durchgeführten Maßnahmen lassen sich den Bereichen Transparenzschaffung und Flexibilitätsbefähigung, Eigenerzeugung und Flexibilisierung sowie Effizienz und Technologie zuordnen.

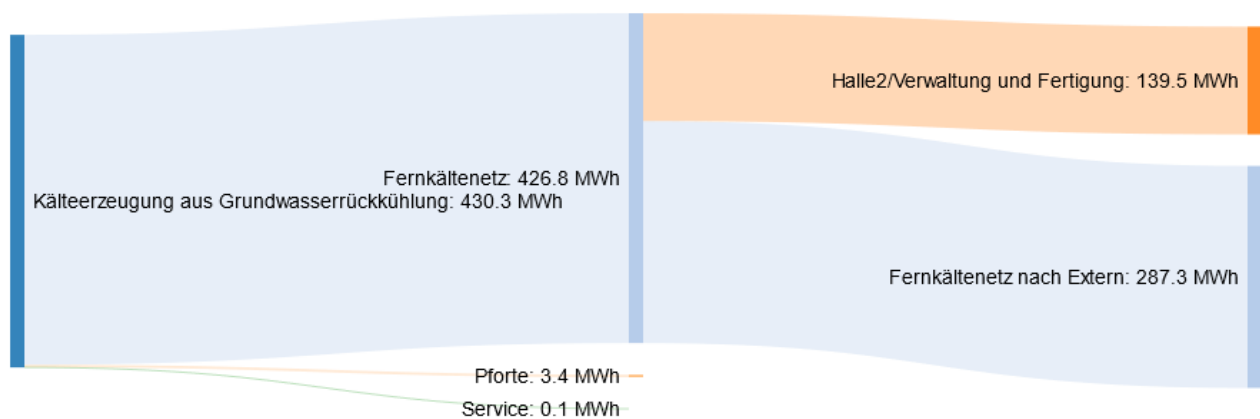


Abbildung 4: Kälte Energieflussdiagramm der Green Factory

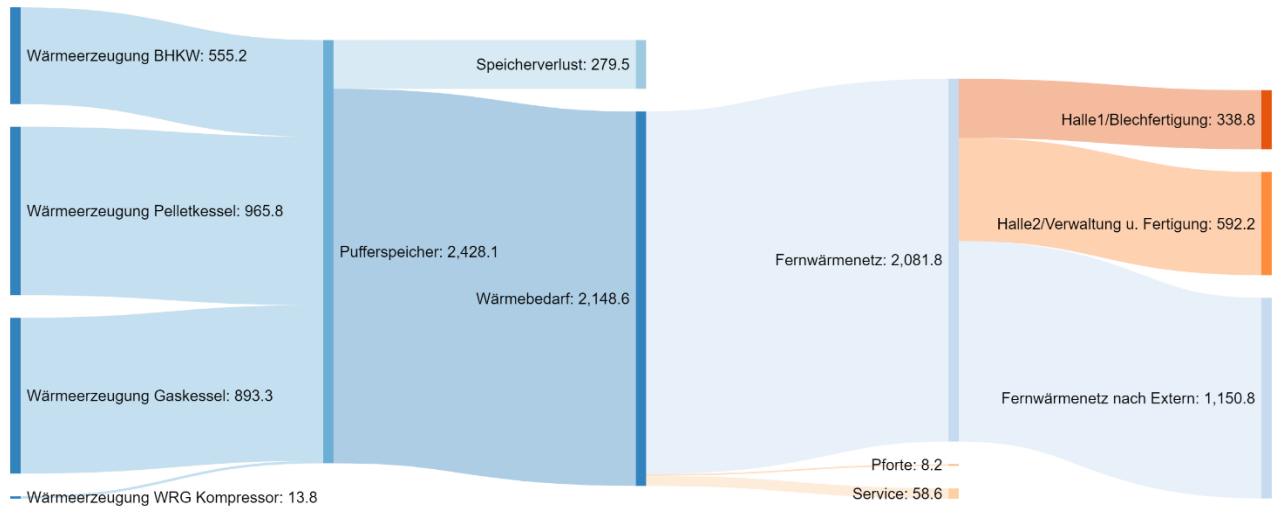


Abbildung 5: Wärme Energieflussdiagramm der Green Factory

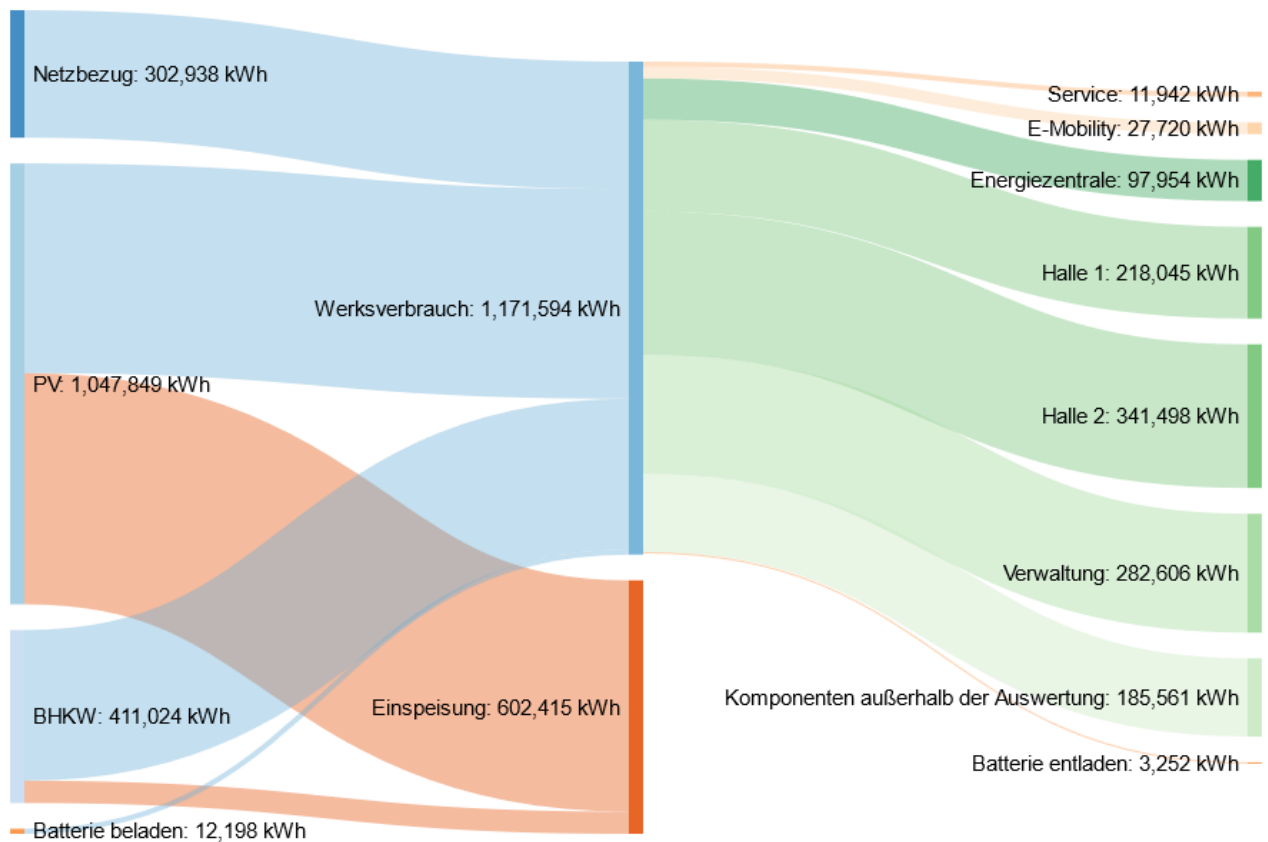


Abbildung 6: Strom Energieflussdiagramm der Green Factory

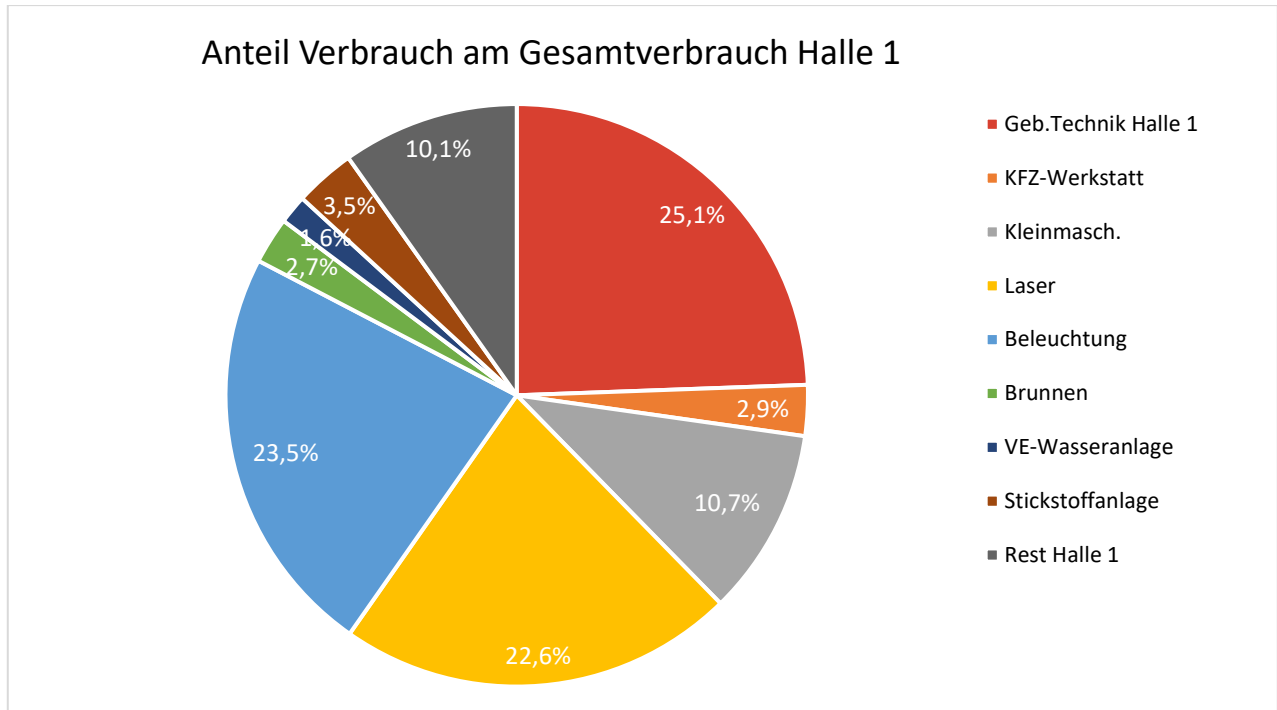


Abbildung 7: Anteile des Gesamtverbrauches von Halle 1

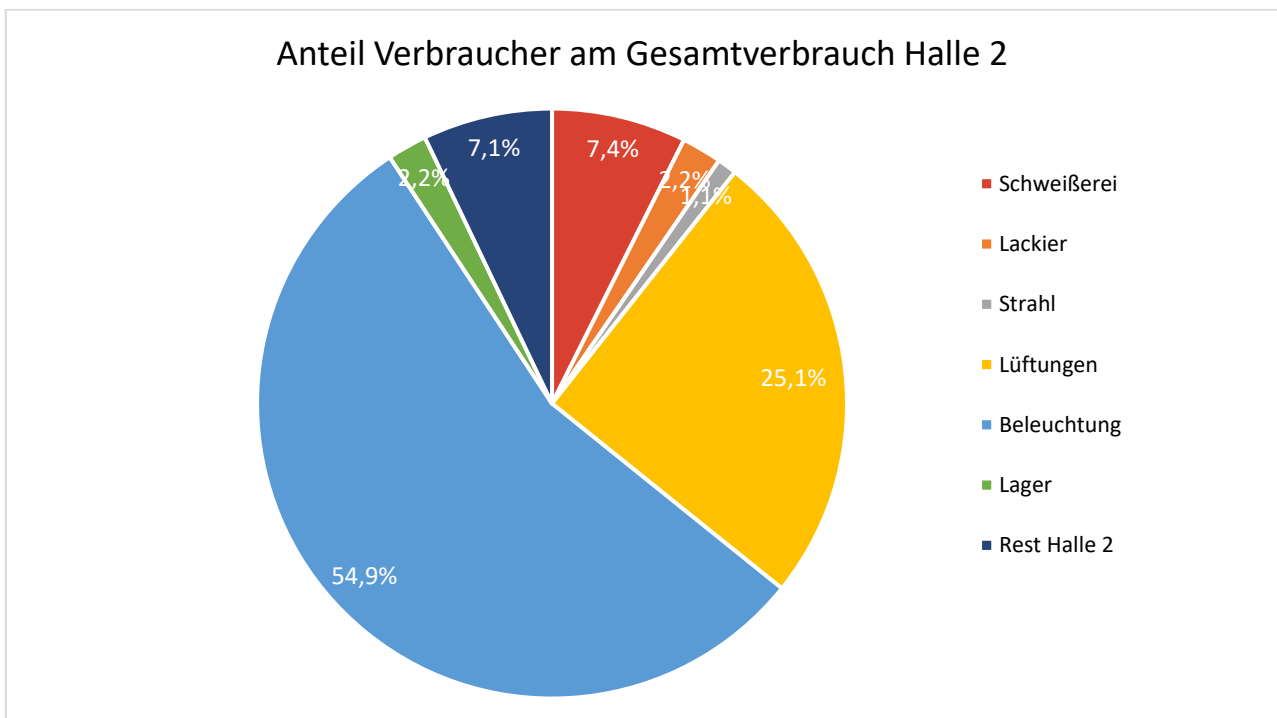


Abbildung 8: Anteile des Gesamtverbrauches von Halle 2

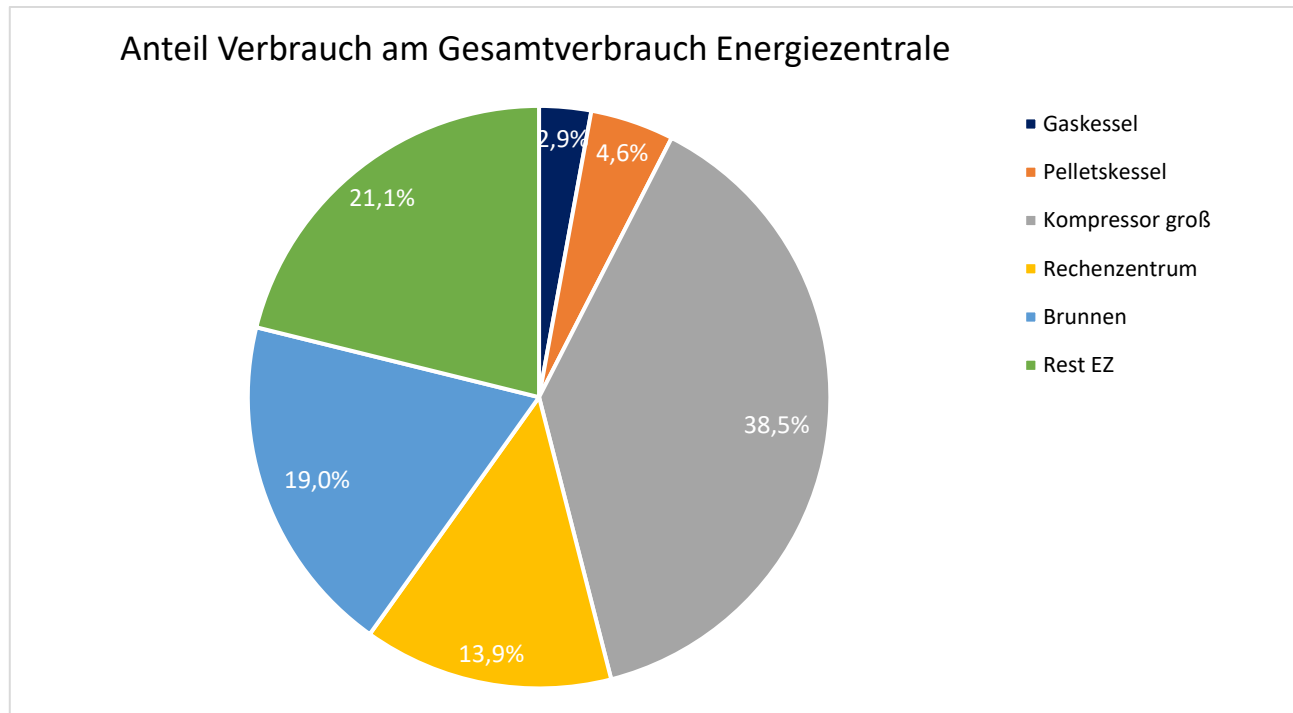


Abbildung 9: Anteile des Gesamtverbrauches der Energiezentrale

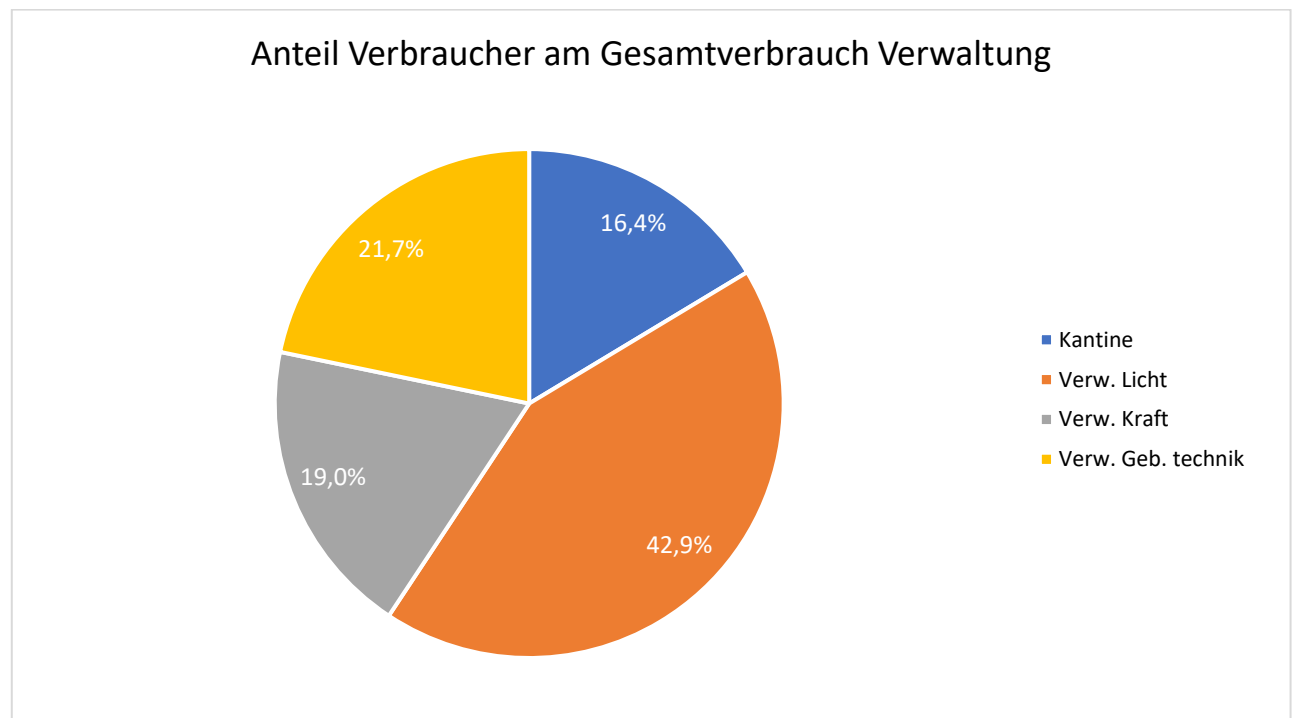


Abbildung 10: Anteile des Gesamtverbrauches der Verwaltung

2.2.1 Transparenzschaffung & Flexibilitätsbefähigung

Wie jedes produzierende Unternehmen steht die Müller Produktions GmbH vor der grundsätzlichen Herausforderung die logistischen Zielgrößen, wie eine geringe Durchlaufzeit, hohe Termintreue, hohe Auslastung und geringe Bestände, zu vereinen. So kann die Kundenzufriedenheit gesteigert werden und das Unternehmen wirtschaftlich agieren. Zusätzlich sollen nun auch verstärkt Nachhaltigkeitsziele im Sinne der effizienten und flexiblen Nutzung erneuerbarer Energien Berücksichtigung finden.

Voraussetzung für die ökonomische und ökologische Optimierung des Energiebezugs in der Fertigung, die u.a. durch einen energieflexiblen Betrieb der Green Factory realisiert werden kann, ist die Transparenzschaffung über alle Stoff- und Energieströme. Dies erfordert die digitale Erfassung aller Arbeitsabläufe, Energieverbräuche sowie Erzeugungsleistungen. Hierzu wurden sämtliche Energieverbraucher, -wandler, -speicher und -erzeuger mit feingranularer Energiemesssensorik ausgestattet und in ein übergeordnetes Energiemanagementsystem zur Befähigung der energieflexiblen Planung und Steuerung der Fabrik eingebunden. Die Dokumentation aller Verbräuche und deren Zuordnung zu einzelnen Arbeitsschritten ermöglicht die Planung des Energieverbrauchs. Zur Planung und Steuerung von Energieerzeugung, Gebäudetechnik und Produktion kommt ein Enterprise Resource Planning (ERP) -System sowie ein Gebäudeleitsystem zur Steuerung der Technischen Gebäudeausrüstung (TGA) zum Einsatz. Durch die Vernetzung des implementierten Energiemanagementsystems Siemens Energy Manager Pro (Monitoring) und Simatic WinCC RT Prof. (Lastmanagement; bis zur Erweiterung der Green Factory im Jahr 2019/20: Siemens B.DATA und Simatic WinCC/ Simatic powerrate) mit der Produktionsplanung wird die energieorientierte Auftragsplanung ermöglicht. Neben der Transparenzschaffung bezüglich des Energieverbrauchs muss für die energieorientierte Planung und Steuerung auch die Prognostizierbarkeit des zur Verfügung stehenden Stroms gegeben sein. Hierzu wurde ein Prognosesystem zur Vorhersage der dezentralen Energieerzeugung implementiert. So können Produktionsdaten wie die Auftragslage stets mit der prognostizierten Stromerzeugung abgeglichen werden und Fertigungsschritte unter Berücksichtigung

der regenerativen Erzeugung und den verfügbaren Arbeitskräften geplant werden. Dies ermöglicht die zeitliche Anpassung von energieintensiven Produktionsschritten und der Herstellung von Hilfs- und Betriebsstoffen an das Stromangebot. Abbildung 11 zeigt zusammenfassend eine Übersicht über das Energiemanagement der Müller Produktions GmbH, welches in Zusammenarbeit mit Siemens, der e-con AG, der Technischen Universität München sowie der Fraunhofer Gesellschaft entstanden ist und mit der wachsenden Green Factory erweitert wird.

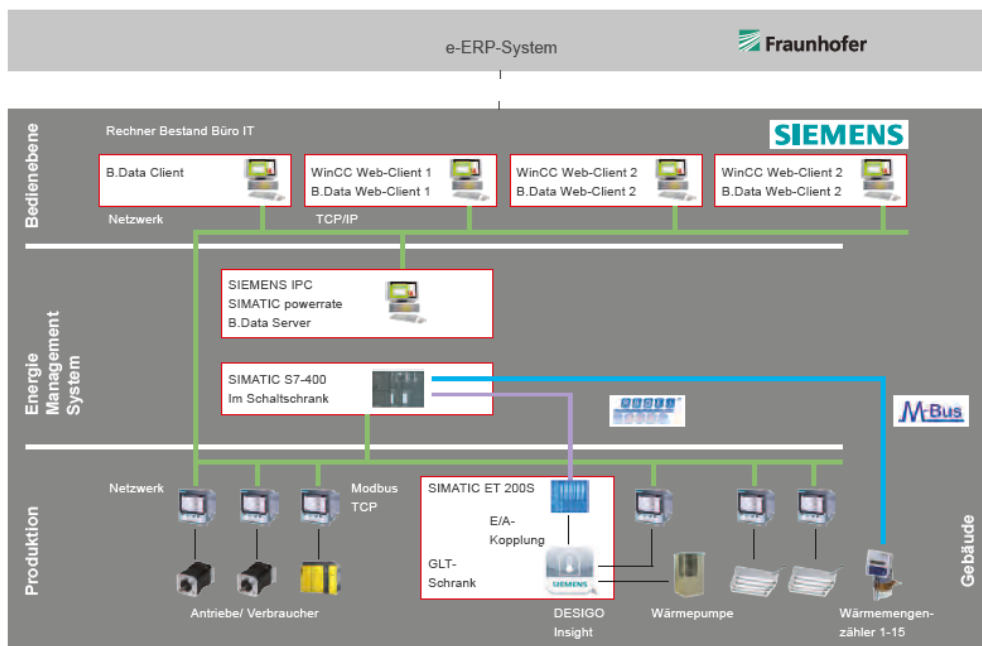


Abbildung 11: Energiemanagement der Müller Produktions GmbH für die Produktion in Ungerhausen [10]

2.2.2 Erzeugung & Flexibilisierung

Oftmals weichen Erzeugung und Verbrauch zeitlich voneinander ab. Um eine optimale Nutzung bzw. eine hohe Eigenverbrauchsquote¹ und einen hohen Autarkiegrad² zu erreichen wurden für den flexiblen Betrieb der Green Factory verschiedene Technologien der Erzeugung, Speicherung und Flexibilisierung umgesetzt.

2.2.2.1 Erzeugungsanlagen

Für eine erneuerbare und im Betrieb emissionsneutrale Versorgung wird Strom durch eine Photovoltaikanlage und ein mit Ökogas³ betriebenes BHKW erzeugt. Um den Wirkungsgrad der Solarmodule zu erhöhen und robuster gegenüber Witterung und Verschmutzung zu sein, ist die PV-Anlage zum Teil mit einem Reinigungssystem ausgestattet. Wärme wird durch ein mit nachwachsenden Rohstoffen betriebenen Pelletkessel (siehe Abbildung 12), das BHKW (siehe Abbildung 14), sowie Wärmerückgewinnungsanlagen (WRG) bereitgestellt. Spitzenlasten werden durch einen Gaskessel abgedeckt. Reicht der mittels PV-Anlage erzeugte Strom nicht aus, um den Bedarf zu decken, wird zuerst das BHKW zugeschaltet, bevor Strom aus dem Netz bezogen wird. Die Wärmeerzeugung wird über die Temperatur im Pufferspeicher gesteuert. Das BHKW wird hierbei grundsätzlich immer betrieben, sofern in der Green Factory ausreichender Strombedarf vorhanden ist und somit die mit dem Netzbetreiber vereinbarte maximale Rückspeisung von Strom aus dem BHKW in das öffentliche Netz nicht überschritten wird und die technischen Randbedingungen den Betrieb zulassen (bspw. eine ausreichend niedrige Rücklauftemperatur). Das BHKW mit einer maximalen Leistung von 220 kW_{el} ist aus technischen Gründen regelbar zwischen 50 und 100% Leistung und wird ab einer Netzeinspeisung von mehr als 50 kW am

¹ $\text{Eigenverbrauchsquote [\%]} = \frac{\text{Eigenverbrauch [kWh]}}{\text{Eigenerzeugung [kWh]}}$

² $\text{Autarkiegrad [\%]} = \frac{\text{Eigenverbrauch [kWh]}}{\text{Gesamtverbrauch [kWh]}}$

³ Ökogas mit TÜV-zertifizierter Klimaneutralstellung (in der Nutzung); Anteil von 5 % Bio-Erdgas, erzeugt in Anlagen in der Region [9].

Netzverknüpfungspunkt heruntergefahren und dann abgeschaltet. Das BHKW wird hochgefahren, wenn der Bezug aus dem Netz 110 kW übersteigt. Die Grenzen sind durch den Netzbetreiber vorgegeben.



Abbildung 12: Der Pelletkessel in der Energiezentrale der Müller Produktions GmbH

Kann die Wärmeerzeugung des BHKW allein das definierte Temperaturniveau im Speicher nicht halten, wird zuerst der Pelletkessel und anschließend der Gaskessel zugeschaltet. Über acht Temperaturfühler im Pufferspeicher werden die Erzeuger mittels Puffermanagement aktiv gesteuert (siehe Abbildung 13). Der Spitzenlast-Gaskessel wird hierbei abhängig von den Temperaturen an den beiden oberen Temperaturfühlern gesteuert. Fällt die Temperatur bei Fühler 2 unter 68°C wird der Gaskessel zugeschaltet, steigt die Temperatur an Fühler 1 über 70°C wird er abgeschaltet. Der Grundlast-Pelletkessel hingegen wird bereits zugeschaltet, wenn Fühler 4 unter 73°C fällt und abgeschaltet sobald die Temperatur an Fühler 2 73°C übersteigt. Das BHKW läuft immer dann, wenn die Temperatur an Fühler 5 weniger als 83°C beträgt bis die Temperatur an Fühler 8 auf mehr als 71°C gestiegen ist. Diese Differenz der Grenztemperaturen ermöglicht, dass das BHKW immer vorrangig betrieben wird. Als Backup steht zusätzlich eine Erdwärmepumpe in Verbindung mit einem Saug-/Schluckbrunnen zur Verfügung. Zukünftig kann

Überschussstrom aus der PV-Anlage auch mittels der Heizstäbe als Wärme im Pufferspeicher zwischengespeichert werden. Hierdurch und durch eine vermehrte Nutzung der Erdwärmepumpe kann die Nutzung des Gaskessels und damit der Erdgasbedarf weiter reduziert sowie die Eigenverbrauchsquote der PV-Anlage erhöht werden. Die Kühlung des Gebäudes übernimmt die thermische Brunnenanlage mittels Nutzung von Grundwasser. Es sind keine zusätzlichen Systeme zur Heizung und Kühlung notwendig. Abbildung 15 zeigt die Energiezentrale mit den genannten Erzeugungsanlage in schematischer Darstellung. Die Leistungsdaten der Erzeugungsanlagen sind Tabelle 1 zu entnehmen und die Energieflüsse den bereits vorgestellten Energieflussdiagrammen aus Abbildung 4 bis Abbildung 6.

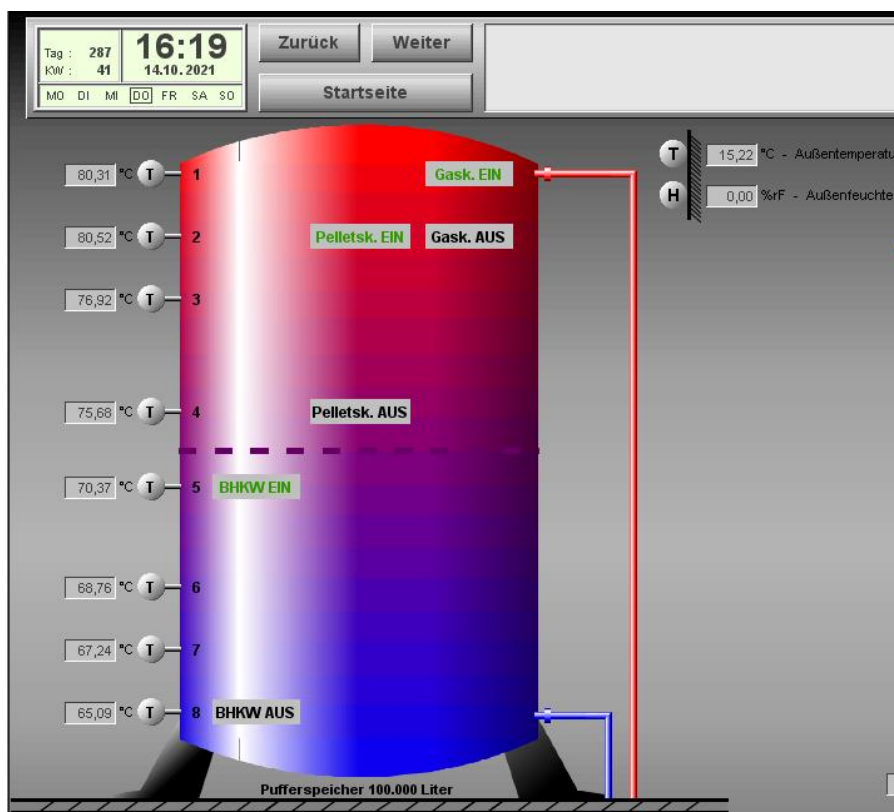


Abbildung 13: Puffermanagement mittels acht Temperaturfühler



Abbildung 14: Das Blockheizkraftwerk in der Energiezentrale der Müller Produktions GmbH



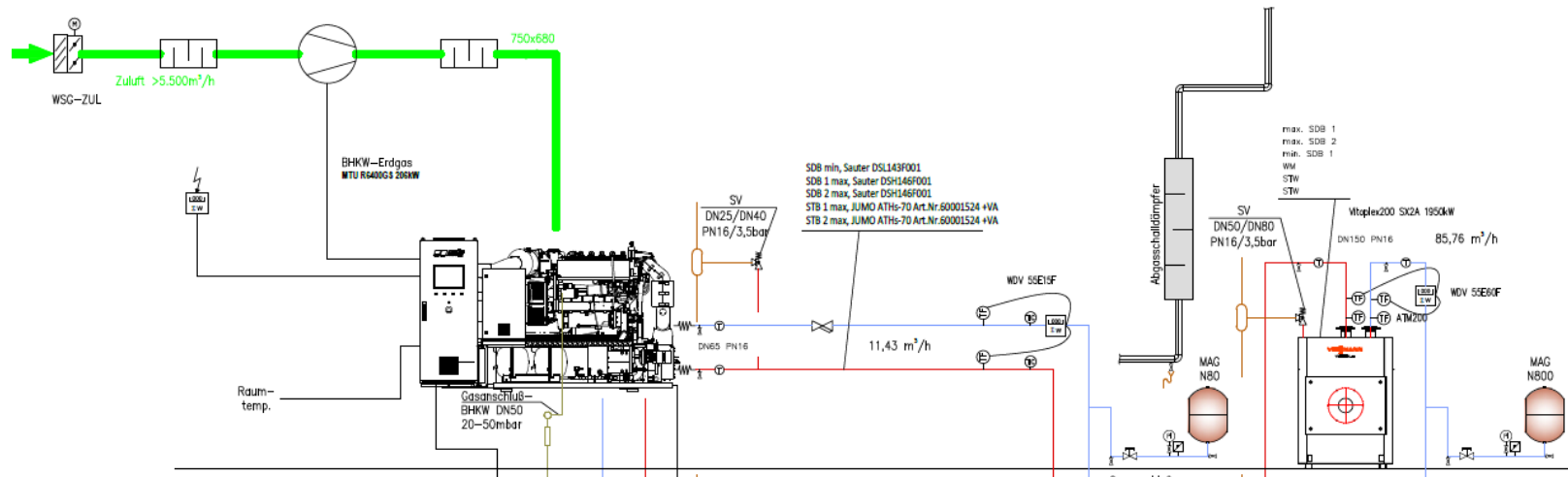
Tabelle 1: Leistungsdaten der Erzeugungsanlagen

Anlage	Typ	Hersteller	Techn. Daten	Jahreserzeugung	Eigenverbrauch
PV-Anlage	Dünnschichtmodule	Schüco MPE 125 BL-01 und MPE 210 PS 06, Solvis SV60 -270	Elektr. Leistung: 1,1 MW _p	1.047.849 kWh	498.267 kWh
Erdwärmepumpe	Sole/Wasser- Wärmepumpe SWP 1600	Alpha Innotec	Wärmenennleistung 161,6 kW COP: 4 ,4	0 kWh	0 kWh
BHKW	6R400 GS	MTU onsite energy	Elektr./Therm. Leistung: 220 kW _{el} / 251 kW _{th} Elektr. Wirkungsgrad: 45,0 % Gesamtwirkungsgrad 84,4 %	411.024 kWh Strom, 545,77 MWh Wärme	358.191 kWh Strom
Pelletkessel	ECO – PK 200	HARGASSNER Heiztechnik	Nennwärmeleistung: 199 kW Brennstoffwärmeleistung: 209,9 kW	965,79 MWh	1.277,27 MWh Wärme
Niedertemperatur-Gas- Heizkessel	VITOPLEX 200 Typ SX2A	Viessmann	Nennwärmeleistung: 1950 kW Nennwärmebelastung: 2120 kW	893,32 MWh	



Schraubenkompressor mit Wärmerückgewinnung	Schraubenkompressor ASD 60 SFC, Refrigeration Dryer TD61	Kaeser	Max. verfügbare Wärmeleistung: 26,6 kW	13,81 MWh	
Thermische Brunnenanlage	Saug-/Schluckbrunnen mit zwei Brunnenpumpen	Baugrund Süd	Kälteleistung: 600 kW	430,24 MWh ¹	142,94 MWh

¹ Ausgenommen Bestandsgebäude, da kein Messzähler vorhanden



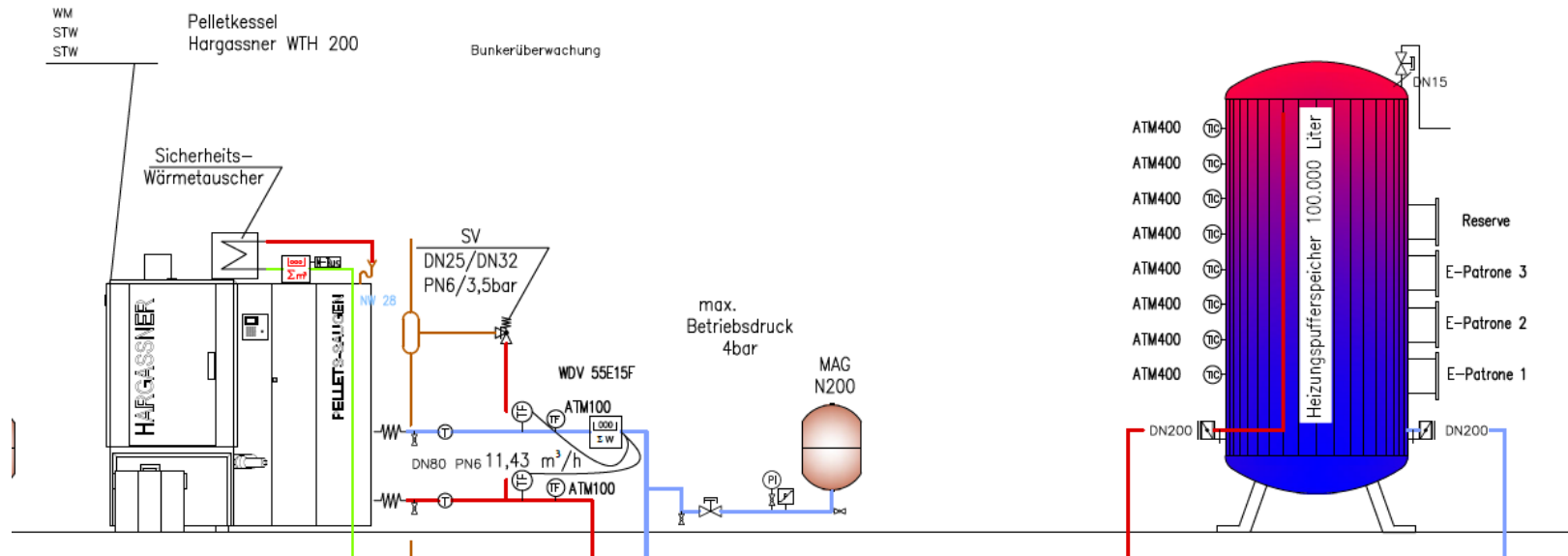


Abbildung 15: Energiezentrale mit den Eigenerzeugungsanlagen

2.2.2.2 Speichersysteme

Verschiedene Speichermedien gleichen in der Green Factory witterungsabhängige und somit nicht zu beeinflussende Schwankungen der Erzeugungsseite aus. Für die dezentrale Speicherung von Strom und Wärme sind die folgenden Systeme vorgesehen:

- 200 kWh Batteriespeicher zur Zwischenspeicherung von elektrischem Strom
- Betonpuffer zur Speicherung von Wärmeenergie mit einer Kapazität von etwa 5 MWh
- 100.000 Liter Pufferspeicher zur Lagerung von Wasser im geschlossenen Kreislauf mit einer Kapazität von etwa 2,09 MWh

In Zeiten von Strom- bzw. Wärmeüberschuss wird die Energie umgewandelt und zwischengespeichert. Die Wärmeerzeugungsanlagen speisen überschüssige Wärme in einen 100.000 Liter fassenden Pufferspeicher, in welchem diese mehrere Tage lang gespeichert werden kann. Auch überschüssiger Solarstrom kann mittels der Heizstäbe als Wärme in den Pufferspeicher gespeist werden. Die drei Power-to-Heat Anlagen sorgen so durch die Kopplung der Sektoren Strom und Wärme für zusätzliche Flexibilität. Darüber hinaus kann Wärme und Kälte in einem 600 m³ großen Betonspeicher unter der Fertigungshalle gespeichert werden. Hierbei handelt es sich um eine Betonplatte unter dem Bauwerk (siehe Abbildung 16), welche auf verschiedenen Ebenen mit Rohrregistern versehen ist und bei Energieüberschuss Wärme und Kälte speichert und bei Bedarf an die Heiz- und Kühlsysteme der Gebäudetechnik abgibt [10].



Abbildung 16: Betonplatte mit Rohrregistern

Überschüssiger Solarstrom kann neben der Umwandlung in Wärme und deren Speicherung im Pufferspeicher auch direkt einen 200 kWh Batteriespeicher speisen (siehe Abbildung 17). Diese Speichermöglichkeiten sind notwendig, um Schwankungen der Energiebereitstellung ausgleichen zu können und die sichere Versorgung der Green Factory und des Nahwärmenetzes mit dezentral erzeugter Energie in Form von Strom, Wärme und Kälte zu gewährleisten. In Zeiten der Überversorgung mit regenerativer Energie wird somit die überschüssige Energie einem Speicher zugeführt und in Zeiten der Unterversorgung wieder entnommen (siehe Abschnitt 2.2.2). Die Leistungsdaten der verschiedenen Speichersysteme sind in Tabelle 2 zusammengefasst.



Abbildung 17: Batteriespeicher

Tabelle 2: Leistungsdaten der Speichersysteme

Anlage	Typ	Hersteller	Techn. Daten
Batteriespeicher	Apos SirioPower Supply, LiFePO ₄ Lithium-Eisen- Phosphat-Batterie	Rjello Elettronica	Kapazität: 200 kWh (davon nutzbar: 160 kWh) Ladeleistung Laden: 107 kW Ladeleistung Entladen: 160 kW

Wärme- & Kältepuffer	Pufferspeicher zur Lagerung von Wasser im geschlossenen Kreislauf	BTD Behälter- und Speichertechnik Dettenhausen GmbH	Kapazität: 100.000 Liter; Kapazität von vorherrschender Temperatur abhängig (etwa 2,09 MWh _{th}) Laden über Heizstäbe und übrige Wärmeerzeuger
Heizstäbe	Elektro-Flanschheizkörper	heatsystems GmbH & Co. KG	Leistung: 600 kW (3x 200 kW)
Betonpuffer	Betondecke 250 mm mit Rohrregistern mit ca. 20 cm Betonüberdeckung	Uponor GmbH	Kapazität: ca. 5 MWh

2.2.2.3 Lastverschiebung produktionsabhängiger sowie variabler Verbraucher

Neben der Speicherung von überschüssiger Energie kann auch die Anpassung des Verbrauchs im Sinne des Lastmanagements auf die volatile Erzeugung die Eigenverbrauchsquote von witterungsabhängigen Erzeugungsanlagen wie PV-Anlagen erhöhen. Dies kann zur bestmöglichen Nutzung des eigenerzeugten Stroms beitragen. Solarenergie wird hierzu in der Produktionsplanung als knappe Fertigungsressource verstanden und große Stromverbraucher wie die Laserschneidanlage, die Lackierkabine und die Sandstrahlanlage vorrangig dann betrieben, wenn ausreichend Strom vorhanden ist. Andere Verbraucher in der Produktion mit einer Grundlast von etwa 100 kW wie beispielsweise Schweißgeräte sowie Bohrmaschinen und Winkelschleifer bieten diese Flexibilität nicht, da diese ständig in Betrieb sind und somit eine ständige Energieversorgung notwendig ist. Da für die Auftragseinplanung der Laserschneideanlage, der Lackier- und Sandstrahlkabinen eine gewisse zeitliche Flexibilität gegeben ist und unterschiedliche Aufträge sich in ihrem Energieverbrauch unterscheiden, bspw. in Abhängigkeit der Blechdicke beim Laserschneiden, können energieintensive Aufträge durch die gegebene Flexibilität in Zeiten des Stromüberschusses gelegt werden. Neben diesen produktionsabhängigen variablen Verbrauchern werden in der Green Factory auch für die Produktion notwendige Medien und Hilfsstoffe vor Ort erzeugt, welche ebenfalls für das Lastmanagement sowie als Speicher genutzt werden können. So erzeugt eine

Luftzerlegungsanlage (siehe Abbildung 18) - vorrangig betrieben mit überschüssiger regenerativer Energie
- Stickstoff als Schneidgas für die Produktion. Eine zusätzliche Anlage ermöglicht die Weiterverarbeitung des Stickstoffs zu Formiergas.



Abbildung 18: Luftzerlegungsanlage zur Herstellung von Schneidgasen

Diese Weiterverarbeitung erhöht die Nutzungsmöglichkeiten in der Produktion, da neben der Laserschneideanlage nun auch die Schweißanlagen als Abnehmer der erzeugten Prozessgase zur Verfügung stehen. Auch vollentsalztes Wasser in einer Umkehrosmoseanlage und Druckluft (siehe Abbildung 19) wird vor Ort erzeugt. Stickstoff kann in Hochdruckbehältern mit einem Fassungsvermögen von etwa 180 Liter bei bis zu 300 bar gespeichert werden. Dieser Vorrat ist für 2 bis 3 Tage ausreichend. Druckluft wird bei 6 bis 8 bar in Tanks und Leitungen mit einem gesamten Speichervolumen von 7 m³ gespeichert und ermöglicht somit eine Flexibilität von mehreren Stunden. Zur Lagerung und dem anschließenden Transport des VE-Wassers stehen ein 30.000 Liter Speicher ein 150.000 Liter Tank, sowie ein

25.000 Liter Tankwagen (siehe Abbildung 20) und 1000 Liter IBC¹-Behälter zur Verfügung [10]. Die Leistungsdaten der variablen und prozessabhängigen Verbraucher sind in Tabelle 3 dargestellt.



Abbildung 19: Druckluftanlage in der Energiezentrale



Abbildung 20: VE-Wasser Tankwagen

¹ Intermediate Bulk Container

Tabelle 3: Leistungsdaten der variablen Verbraucher

Anlage	Typ	Hersteller	Techn. Daten	Jahresverbrauch
Laserschneidanlage	TruLaser 5030, max. Laserleistung: 6.000 W	Trumpf	Nennleistung: 88 kW	49.385 kWh
Sandstrahlkabine			Nennleistung: 25 kW	3.642 kWh
Lackieranlage			Nennleistung: 26 kW	7.495 kWh
Luftzerlegungsanlage	Stickstoffgenerator: IMT PN 1550 PAN Verdichter: AIRCO LW-450ESN VD4	Inmatec Gase Technology LW Kompressoren	Nennleistung: 8 kW (davon 7,5 kW Verdichter)	7.532 kWh
VE-Wasseranlage		Berkefeld Veolia Water Solutions & Technologies Deutschland GmbH	Nennleistung: 10 kW	3.567 kWh
Druckluftkompressor	Schraubenkompressor ASD 60 SFC, Refrigeration Dryer TD61	Kaeser Kompressoren SE	Nennleistung: 30 kW	37.699 kWh

2.2.3 Effizienz & Technologien

Neben der Verwendung und optimierten Nutzung von erneuerbaren Energiequellen leistet auch die Reduktion des Energieverbrauchs insgesamt einen erheblichen Beitrag zur Erreichung der Klimaschutzziele. Bei allen Komponenten der Green Factory wurde darauf geachtet, dass modernste Technologien mit einem möglichst geringen Energieverbrauch genutzt werden, um den Gesamtenergieverbrauch des Standorts gering zu halten. Unter anderem wird eine energieeffiziente LED-Beleuchtung genutzt, welche zusätzlich

durch Tageslichtadaption geregelt wird. Die gesamten Räumlichkeiten der Fabrik sind zudem mit Heiz- und Kühldecken ausgestattet. In den Druckluftkompressor wurde ein Wärmerückgewinnungssystem integriert. Die hierdurch nutzbar gemachte Wärmemenge kann zur Klimatisierung genutzt werden. Letztlich bieten die Fertigungsprozesse an sich ein großes Energiesparpotenzial. In der Green Factory Allgäu soll deshalb das Zuschneiden von Blechen über eine energieeffiziente Laserschneidanlage erfolgen. Ein Kühlaggregat an der Laserschneidanlage, welches in den Kühlkreis eingebunden ist, sorgt für einen geringeren Energieverbrauch i.V. zu luftgekühlten Anlagen. Anhand eines mittig in der Produktionshalle angeordneten platzsparenden, vollautomatischen Hochregallagers (siehe Abbildung 21) werden innerbetriebliche Transportwege verkürzt, wodurch eine Emissionsreduktion der Flurförderfahrzeuge im Betrieb möglich ist. Mehrere Ein- und Auslagerstationen ersetzen einen Großteil der innerbetrieblichen Transporte.



Abbildung 21: Platzsparendes, vollautomatisches Hochregallager in der Mitte der Produktionshalle

2.3 Darstellung der Umsetzung des Vorhabens

Das Vorhaben startete am 25.11.2013 und hätte in Q4/2014 enden sollen. Aufgrund einiger Verzögerungen im Projektverlauf erfolgte die Inbetriebnahme der letzten Systemkomponente – des Batteriespeichers – erst im August 2020. Das begleitende Messprogramm startete am 01.04.2020 und endete am 31.03.2021. Der

nachfolgende Zeitplan (siehe Abbildung 22) gibt eine Übersicht über die Projektdurchführung untergliedert nach Teilprojekten.

Teilprojekt Luftzerlegungsanlage:

Im ersten Quartal 2015 wurde die Ausschreibungsphase der Luftzerlegungsanlage mit der Vergabe des Auftrags abgeschlossen. Auch das Prognosesystem zur Vorhersage des PV-Ertrags wurde in diesem Zeitraum beauftragt. In Q3 2015 konnte die Luftzerlegungsanlage in Betrieb genommen und anschließend bis Ende des Jahres 2015 in das Energiemanagementsystem eingebunden werden. Die Luftzerlegungsanlage wurde so Teil des Lastmanagements, um ihren Betrieb an das verfügbare Energieangebot anpassen zu können. Bei der Anbindung der Stickstoffanlage gab es zunächst Probleme mit der Anbindung der für die Laststeuerung relevanten Daten der Anlage. Dies konnte jedoch zeitnah behoben werden. Eine Erweiterung der Anlage um ein zusätzliches Stickstoffbündel zur Speicherung war im Projektverlauf notwendig, um häufiges Auftreten des Notbetriebes (Bündeldruck zu niedrig) zu verhindern und eine deutliche Steigerung der lastabhängigen Steuerbarkeit zu ermöglichen. Im Jahr 2016 wurde die Anlage dann um eine Formiergasanlage erweitert, um den produzierten Stickstoff nicht nur in der Laserschneidanlage, sondern auch in Schweißprozessen nutzen zu können.

Teilprojekt Batteriespeicher:

Zu Beginn des Projekts wurden verschiedene Batterietechnologien auf ihre Wirtschaftlichkeit hin untersucht. Eine Speicherung des überschüssigen Stroms mit dem Ziel der Erhöhung des Autarkiegrads ließ sich jedoch nicht wirtschaftlich darstellen. Erst die Erweiterung des Werksgeländes und die Planung der Energiezentrale ergaben neue Möglichkeiten für den Einsatz eines Batteriespeichers. Dieser wurde nun mit dem Ziel des Peak-Shavings ausgelegt und ab Q2 2015 startete die Ausschreibung für den Energiespeicher und die Verhandlungen und Vergabegespräche für den Batteriespeicher wurden aufgenommen. Das

Auswahlverfahren hatte sich verzögert, da die Ertragsdaten der PV-Anlagen als Basis für die Auslegung des Speichers ein Jahr lang aufgenommen und ausgewertet wurden. Im Jahr 2017 wurde der Energiespeicher, aufgrund neuer Erkenntnisse bezüglich der Speicherung elektrischer Energie und aufgrund Einbeziehung alternativer Batterietechnik in die Betrachtung, neu ausgelegt. Parallel wurde ein Konzept zur Einbindung des Batteriespeichers erarbeitet. Im Jahr 2018 kam es zu Verzögerungen bei der Beschaffung des Batteriespeichers aufgrund wirtschaftlicher Faktoren. Bis Ende 2019 konnte der Batteriespeicher dann jedoch konzeptioniert und der Auftrag vergeben werden. Die für Ende 2019 geplante Inbetriebnahme verspätete sich aufgrund von Lieferschwierigkeiten des Lieferanten und Verzögerungen beim Import bis Mitte 2020.

Teilprojekt ERP-System & Produktionsplanung:

Auch das Auswahlverfahren für das ERP-System zur Planung und Steuerung erforderte aufgrund der Komplexität der Bestimmung der notwendigen Funktionen im Pflichtenheft sowie des Wunsches der einfachen Übertragbarkeit auf andere Unternehmen mehr Zeit als im Projektplan vorgesehen. Da neben der energieflexiblen Planung auch sämtliche anderen Geschäftsprozesse beachtet werden musste, konnte zunächst kein machbares ERP-Projekt abgesteckt werden. Die Komplexität des Themas konnte mit den zur Verfügung stehenden (personellen) Ressourcen nicht gestemmt werden, weshalb eine neue Stelle zur Umsetzung des ERP-Projekts geschaffen wurde. In Q3 2015 konnten die Verhandlungen und Vergabegespräche für das ERP-System aufgenommen werden. Mit der Vertragsunterzeichnung in Q3 2018 endete die Ausschreibungsphase des ERP-Projekts, an welche sich direkt die Implementierungsphase anschloss. Die Entscheidung für einen ERP-Anbieter wurde nach redlicher Abwägung und ausführlichen Recherchen sowie Referenzgesprächen mit mittelständischen Unternehmen in der Region zu Gunsten SAP getroffen. Parallel wurden bereits mit Unterstützung eines Beratungshauses die aktuellen Geschäftsprozesse aufgenommen und in Form eines detaillierten Lastenheftes dokumentiert. Es wurde ein Prototyp aufgebaut sowie Workshops mit den Fachbereichen durchgeführt und eine Daten- und Prozessstruktur für die

Abbildung von Fertigungsprozessen als Basis für die Erweiterung der Produktionsplanung um den Faktor Energie erarbeitet. Die Implementierung und Konzeptionierung der energieflexiblen Planung verzögerte sich zudem durch Abhängigkeiten zur Erweiterung der Messtechnik. Zudem musste die Einführung der Funktionen zur energieflexiblen Planung verschoben werden, da zunächst die neu definierten Prozesse im ERP-System (als Voraussetzung für die Planung) verinnerlicht werden mussten. Der Prototyp wurde sukzessive weiterentwickelt, bis am 03.06.2019 das neue System in den Betrieb überführt wurde. Im Rahmen dessen wurden alle Fertigungsaufträge mit ihren Arbeitsschritten und Materialbedarfen aufgenommen. Für die Berücksichtigung des Faktors Energie in der Produktionsplanung wurden die folgenden zwei Aspekte berücksichtigt:

- Betrachtung historischer Energiedaten im Fertigungsprozess (Fertigstellung bis Ende 2019)
- Perspektivische Betrachtung von Energiedaten im Fertigungsprozess (für die Planung) (die geplante Fertigstellung bis Februar 2020 wurde aufgrund von Abhängigkeiten zum Teilprojekt Energietransparenz verzögert und konnte erst in Q3 2020 gestartet werden)

Teilprojekt Energietransparenz:

Im Jahr 2014 erfolgten die Arbeiten zur Einbindung der verbauten Messtechnik in die Energiemanagementsoftware. Im Jahr 2018 wurde das implementierte Messkonzept noch einmal um zusätzliche Messgeräte erweitert, was durch den Ausbau des Standortes erforderlich wurde und zu Projektbeginn nicht abzusehen war. Zur Einbindung dieser in das Energiemonitoring war die Anschaffung neuer Software und entsprechender Lizenzen notwendig. Durch dieses notwendige Softwareupgrade und durch die in den Zeitraum der Umsetzung fallende Corona-Pandemie verzögerte sich die Implementierung der Messgeräte. Die Implementierung und Systemerweiterung durch die Fa. Siemens startete Ende 2019 und dauerte bis Mitte 2020 an. Auch die grafische Darstellung wurde im Zuge dessen an das neue Messkonzept angepasst und das Lastmanagement um neue Komponenten wie das BHKW erweitert.

Anpassungen des Konzepts der Green Factory im Projektverlauf

Das ursprüngliche Wärmekonzept der Green Factory sah die mit PV-Strom betriebene Erdwärmepumpe als zentrale Komponente der Wärmeversorgung vor. Dieses Konzept wurde aufgrund der unzureichenden PV-Stromversorgung in den Wintermonaten, der Weiterentwicklung des Standorts, der aktuell noch gut vergüteten EEG-Umlage für Einspeiseanlagen sowie insbesondere der Ansiedlung weiterer Firmen im Gewerbegebiet erweitert. Das erweiterte Wärmekonzept umfasst ein eigenes lokales Wärmenetz, welches über eine Energiezentrale gesteuert wird. Diese wurde Ende 2019 in Betrieb genommen. Die Wärme wird aus den Erzeugungsanlagen BHKW, Pelletkessel und Gaskessel bereitgestellt. Die Green Factory ist mit diesem Konzept 100 % wärmeautark und versorgt zusätzlich weitere Unternehmen im Gewerbegebiet. Die ursprüngliche Kopplung über die Wärmepumpe dient im aktuellen System lediglich zur Absicherung. Ein erweitertes Regelungskonzept zur Entlastung des Gaskessels sowie Erhöhung der Eigenerzeugung ist aktuell jedoch in Planung und Prüfung.

Sonstiges

Auch der kurzfristige Weggang des Betriebsleiters sorgte für Verzögerungen, da eine Anpassung der Verantwortlichkeiten und des organisatorischen Ablaufs erforderlich war.

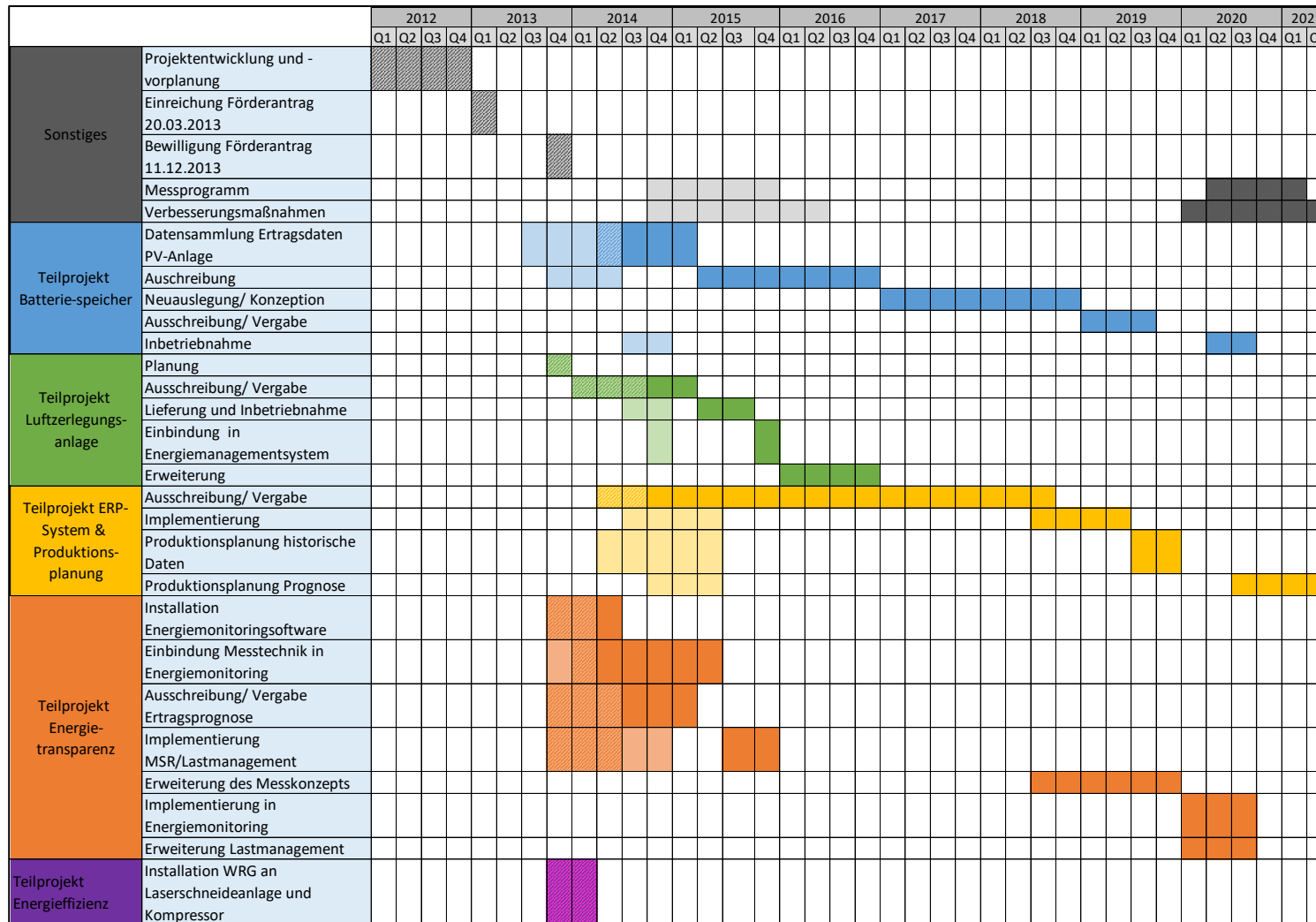


Abbildung 22: Projektplan des Vorhabens (hell: Plan; dunkel: IST, schraffiert: Plan = IST)

2.4 Behördliche Anforderungen

Einige Systemkomponenten der Green Factory erforderten behördliche Anträge und Genehmigungsverfahren. Für die Brunnenanlage mit ihrem Grundwasserbrunnen zur Kühlung der Verwaltungs- und Produktionsgebäude war die Genehmigung des zuständigen Landratsamts Unterallgäu nach § 9 Abs. 1 Nr. 5 WHG zur Entnahme, thermischen Nutzung und Wiedereinleitung des Grundwassers sowie eine beschränkte Erlaubnis nach § 10 Abs. 1 WHG, Art. 15 BayWG notwendig. Hierzu erfolgte ein entsprechender Genehmigungsantrag am 27.01.2012, welcher am 15.03.2012 genehmigt wurde. Zusätzlich wurde eine weitere Anlage am 23.02.2016 beantragt und am 14.11.2016 genehmigt. Während des Betriebs ist ein Berichtsheft zu führen, sowie ein jährlicher Bericht auf Monatsbasis zum Nachweis der Einhaltung der Vorgaben aus der Genehmigung (z.B. (Grund-)Wasserstände in den Brunnen, Entnahme- und Rückspeisetemperatur; Fördervolumen in m³ und Volumenströme) beim zuständigen Wasserwirtschaftsamt einzureichen.

Das BHKW wurde beim Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) zur KWKG-Förderung angemeldet. Seit dem zweiten Halbjahr 2019 ist für das BHKW zur Stromsteuerbefreiung nach dem "Gesetz zur Neuregelung von Stromsteuerbefreiungen sowie zur Änderung energiesteuerrechtlicher Vorschriften" ein Antrag auf Erlaubnis zur stromsteuerfreien Verwendung (Eigennutzung) beim Hauptzollamt zu beantragen. Die steuerrelevanten Mengen sind dem Hauptzollamt jährlich zu melden. Darüber hinaus muss die Anlage auch dem zuständigen Netzbetreiber gemeldet werden. Hier erfolgte die Abstimmung eines Messkonzepts als Grundlage zur Abrechnung von KWKG-Förderung und Einspeisevergütung. Auch die PV-Anlagen sowie der Batteriespeicher sind beim zuständigen Energieversorgungsunternehmen anzumelden sowie gegebenenfalls ein Betreibervertrag abzuschließen.

Auch der Pufferspeicher macht einen Antrag beim BAFA zur Zulassung nach dem Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz notwendig, da der Wärme- und Kältespeicher in ein Nahwärmenetz integriert ist. Darüber hinaus war aufgrund der Höhe des Pufferspeichers eine Baugenehmigung notwendig.

Nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz sind Betreiber von Anlagen des Strom- und Gasmarktes dazu verpflichtet, die Stammdaten ihrer Anlagen im Marktstammdatenregister der Bundesnetzagentur einzutragen. Dies gilt unter anderem für Solaranlagen, KWK-Anlagen und ortsfeste Batteriespeicher.

2.5 Vorgehen zur Bewertung der Zielerreichung: Konzeption des Messprogramms

Um die Primärenergieeinsparungen sowie die Reduktion der Treibhausgasemissionen für die einzelnen, durchgeführten Maßnahmen und das Gesamtsystem zu quantifizieren, wurde von April 2020 bis März 2021 ein einjähriges Messprogramm durchgeführt. Bei der Auswertung des Messprogramms gilt es insbesondere die beiden Energiearten Strom und Wärme im Detail zu analysieren und deren Abhängigkeiten bei der Erzeugung der Energiearten, welche u.a. durch das BHKW, aber auch durch den notwendigen Strombedarf beim Pelletofen und Gaskessel gegeben sind, mit zu betrachten. Außerdem sollen saisonale Schwankungen in der Erzeugung bewertet sowie der Autarkiegrad der Green Factory Allgäu bestimmt werden. Abbildung 23 zeigt das Vorgehen zur Bewertung der Zielerreichung der durchgeführten Effizienz- und Flexibilitätsmaßnahmen sowie zur Ermittlung möglicher weiterer Reduktionspotentiale.

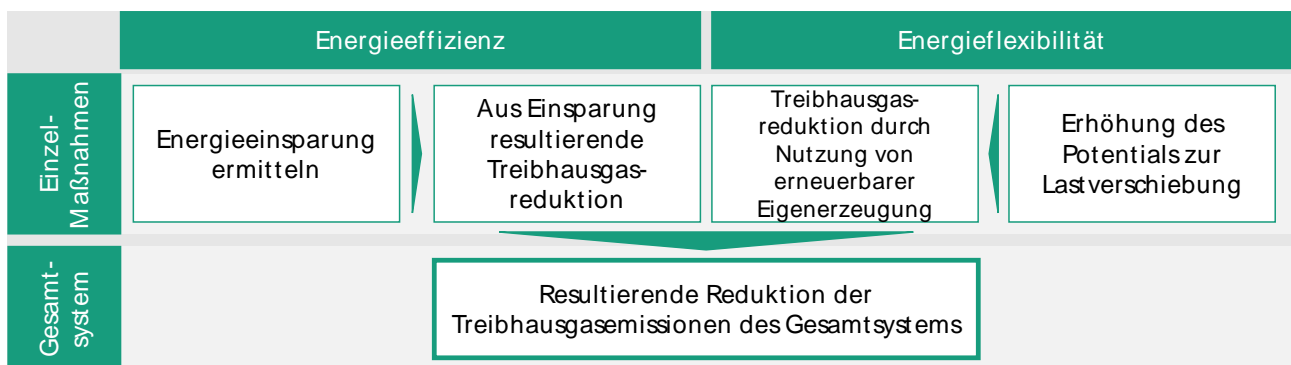


Abbildung 23: Vorgehen zur Bewertung der Zielerreichung

Für Energieeffizienzmaßnahmen wurden die Energieeinsparungen im Vergleich zu alternativen Technologien und die aus den Einsparungen resultierende Treibhausgasreduktion ermittelt. Für Flexibilitätsmaßnahmen wurde das Lastverschiebungspotenzial quantifiziert und die Treibhausgasreduktion

durch die vermehrte Nutzung von erneuerbarer Eigenerzeugung bestimmt. Aus den Potenzialen der einzelnen Maßnahmen wurde dann die resultierende Reduktion der Treibhausgasemissionen des Gesamtsystems abgeleitet. Zu allen Maßnahmen wurde ein Vorgehen zur Quantifizierung definiert, welches Tabelle 4 zu entnehmen ist.

Tabelle 5 gibt eine Übersicht über alle definierten Messpunkte. An allen Messpunkten wurden Werte über den kompletten einjährigen Messzeitraum in viertelstündlicher Granularität aufgenommen.

Tabelle 4: Vorgehen zur Quantifizierung der Zielerreichung bezogen auf die einzelnen Maßnahmen

Maßnahme	Vorgehen
Transparenzschaffung & Flexibilitätsbefähigung	
Prognosesystem zur Vorhersage der dezentralen Energieerzeugung	Analyse der Vorhersagegenauigkeit
ERP-System für eine energieeffiziente Produktionsplanung	Beschreibung der automatisierten Berechnung des auftragsspezifischen CO ₂ -Verbrauchs
Gebäudeleittechnik zur Steuerung der TGA	Beschreibung des Lastmanagements
Erzeugung	
Photovoltaikanlage mit Reinigungssystem	Erzeugungsleistung aller vorhandenen PV-Anlagen über ein Jahr; Bewertung der Reinigungsanlage durch direkten Vergleich der Erzeugungsleistung mit angrenzenden PV-Anlagen
Fernwärme über BHKW	Erzeugungsleistung über ein Jahr sowie Potentiale für einen optimierten Gesamtenergiebezug
Pelletofen	
Gaskessel	
Heizstäbe	Erzeugungsleistung über ein Jahr
Wärmerückgewinnung für Kompressor	Quantifizierung der erzielten Wärmerückgewinnung des Druckluftkompressors
Flexibilisierung	
Batteriespeicher zur Zwischenspeicherung von elektrischem Strom	Quantifizierung des Lastverschiebungspotentials und Maximierung des Nutzens der Eigenerzeugung

Betonpuffer zur Wärmespeicherung	Keine aktuellen Daten vorhanden, daher theoretische Ermittlung des Speicherpotenzials
Luftzerlegungsanlage zur Herstellung von Schneidgasen	Vergleich mit Energieverbrauch bei Zukauf und Transport bei Berücksichtigung des Lastmanagementpotenzials und der Nutzung von Eigenerzeugung
Vollentsalzungsanlage zur Herstellung von entsalztem Wasser	Quantifizierung des Lastverschiebungspotenzials durch flexible Steuerung
Wärme- und Kältespeicher	Quantifizierung des Speicherpotenzials durch theoretische Speicherkapazität und reales Nutzungsprofil
Planung und Steuerung der produktionsabhängigen Verbraucher	Quantifizierung des Lastverschiebungspotenzials von Lackiererei, Sandstrahlen und Laserschneidanlage
Effizienz & Technologien	
Platzsparendes, vollautomatisches Hochregallager	Quantifizierung der Einsparung durch verringertes Transportaufkommen dank der zentralen Position des Hochregallagers
Tageslichtadaptive LED-Beleuchtung	Theoretischer Vergleich des Energieverbrauchs mit "herkömmlicher" Beleuchtung
Kühlung der Laserschneidanlagen	Quantifizierung der erzielten Einsparung der Wasserkühlung im Vergleich zu einer Luftkühlung

Tabelle 5: Definierte Messstellen für das einjährige Messprogramm

Anlage	Messstelle	Messwerte
Laser	Stromzähler Laser	Stromverbrauch, Lastgang
Lackierkabine	Stromzähler Lackierkabine	Stromverbrauch, Lastgang
Sandstrahlen	Stromzähler Sandstrahlen	Stromverbrauch, Lastgang
Kühlung Laserschneideanlage	Stromzähler Kühlpumpe	Stromverbrauch
Wärmerückgewinnung Druckluftkompressor	Wärmemengenzähler Kompressor	Nutzwärme
Wärmerückgewinnung Druckluftkompressor	Stromzähler Druckluftkompressor	Stromverbrauch
LED-Beleuchtung	Stromzähler Beleuchtung	Stromverbrauch, Lastgang
PV-Anlagen	Stromzähler PV-Anlagen	Erzeugungsleistung
Werksverbrauch	Stromzähler Netzverknüpfungspunkt	Lastgang Nettoeinspeisung
BHKW	Stromzähler BHKW	Erzeugungsleistung Strom



BHKW	Wärmezähler BHKW (Gemischkühlkreis, Heizwasser)	Erzeugungsleistung Wärme
BHKW	Erdgaszähler BHKW	Erdgasbedarf
Pellets-Ofen	Wärmezähler Pelletkessel	Erzeugungsleistung Wärme
Pellets-Ofen	Stromzähler Pelletkessel	Stromverbrauch
Gaskessel	Wärmezähler Gaskessel	Erzeugungsleistung Wärme
Heizstäbe	Stromzähler Heizstäbe	Stromverbrauch
Kälterzeugung mit Wärmepumpe	Stromzähler Wärmepumpe	Stromverbrauch
Kälterzeugung mit Wärmepumpe	Wärmezähler Kältekreis/Heizkreis	Erzeugungsleistung Kälte
Batteriespeicher	Stromzähler Batteriespeicher	Lastgang Beladen
Batteriespeicher	Stromzähler Batteriespeicher	Lastgang Entladen
Luftzerlegungsanlage	Stromzähler Stickstoffgenerator	Stromverbrauch Stickstoffabscheider
Luftzerlegungsanlage	Stromzähler Druckluftkompressor	Stromverbrauch Druckluft
Luftzerlegungsanlage	Druckluftzähler	Druckluftverbrauch
Luftzerlegungsanlage	Durchflusszähler Stickstoff	Erzeugung Stickstoff
Vollentsalzungsanlage	Stromzähler	Stromverbrauch
Wärme- und Kältespeicher	Temperaturverläufe	Nutzungsprofile

3 Ergebnisse

Nachfolgend werden auf die umgesetzten Maßnahmen sowie die daraus resultierenden Reduktionspotentiale im Detail eingegangen. Alle relevanten Ergebnisse sind darüber hinaus in einem Messbericht übersichtlich zusammengefasst. Die Ergebnisse beziehen sich auf ein Unternehmen mit einem jährlichen Umsatz der Fertigung von 5,3 Mio. Euro und ca. 18 T Maschinenstunden pro Jahr.

3.1 Bewertung der Vorhabendurchführung

Aufgrund der Komplexität und des in seinem Umfang neuartigen Konzepts war die Durchführung des Projekts mit vielen Unsicherheiten verbunden. Dies führte zum einen zu vielen Verzögerungen während des Projektverlaufs. Zum anderen ist festzuhalten, dass noch nicht alle Potentiale vollständig ausgeschöpft worden sind und sich somit die Green Factory Allgäu auch zukünftig kontinuierlich weiterentwickeln wird. Während der Projektlaufzeit wurde dies beispielsweise durch die Anpassung des Wärme-/Kältekonzepts aufgrund sich ändernder Randbedingungen sowie neuer Erkenntnisse aus dem Betrieb deutlich. Ursprünglich erfolgte der Heizbetrieb über eine Wärmepumpe. Mit der Erweiterung des Industriegebiets Ungerhausen ergab sich jedoch die Möglichkeit zur Errichtung eines lokalen Nahwärmenetzes. Auch die Green Factory selbst wuchs während der Projektlaufzeit, was in einem höheren Wärmebedarf resultierte. Gemeinsam mit den übrigen Abnehmern im Gewerbegebiet ergab sich somit die Möglichkeit einer effizienteren zentralisierten Wärmebereitstellung. Das errichtete Nahwärmenetz wird von der Energiezentrale der Firma Müller gespeist. Diese beinhaltet die Erzeugungsanlagen BHKW und Pelletkessel zur Grundlastdeckung sowie einen Gaskessel zur Spitzenlastdeckung und Redundanz, Mit den elektrischen Heizstäben im 100 m³ Wasser-Pufferspeicher verfügt die Green Factory über einen weiteren Wärmeerzeuger, welcher aktuell zur negativen Regelleistung genutzt wird. Mit Änderungen am Energiemarkt ist eine zukünftige Nutzung der Heizstäbe auch für Wärmeerzeugung aus Eigenstrom denkbar. Dies ist jedoch nur wirtschaftlich, wenn die Einspeisevergütung niedrigerer ist als die Kosten für die

Wärmeerzeugung. Parallel wird ein Kältenetz via Grundwasserkühlung betrieben. Bezüglich des Betonpuffers konnte festgestellt werden, dass der Energieeinsatz für die Nutzung als Wärmepuffer nicht rentabel ist. Aufgrund der zu geringen Prozessabwärme müsste der Speicher über die Wärmeerzeuger beladen werden, was in einem hohen elektrischen Energieeinsatz (durch die Wärmepumpe) resultiert. Die Verluste des Betonpuffers ergaben sich jedoch als zu hoch, was eine Beladung über die Wärmeerzeuger unrentabel macht. Zusätzlich verfügt das neue Nahwärmenetz des Gewerbegebiets Ungerhausen über eigene Speicherkapazitäten. Für die Nutzung als Kältespeicher ist der notwendige Energieeinsatz aufgrund der zur Verfügung stehenden Brunnenkühlung zwar deutlich geringer, aufgrund der zusätzlichen Verluste aber dennoch kaum in Benutzung. Es ist zukünftig durchaus möglich, dass sich mit anderen Voraussetzungen wieder ein mögliches praktikables Betriebskonzept ergibt (z.B. zur Kühlung oder Beladung durch die BHKW-Anlage bei geringerer Wärmeabnahme). Aktuell ist der Betonpuffer jedoch nicht in Benutzung.

Insbesondere die intelligente Steuerung aller Erzeuger, Verbraucher und Speicher der Green Factory wird auf Basis neuer Erkenntnisse und politischer Rahmenbedingungen fortwährend angepasst. Durch die Schaffung der Transparenz über alle Energieflüsse dank der installierten Messtechnik, der Visualisierung in der Energiemanagementsoftware sowie der Verknüpfung mit Produktionsdaten ist die notwendige Grundlage zur kontinuierlichen Anpassung und Optimierung einer effizienten, flexiblen und nahezu autarken Fabrik geschaffen (vgl. Abbildung 24).

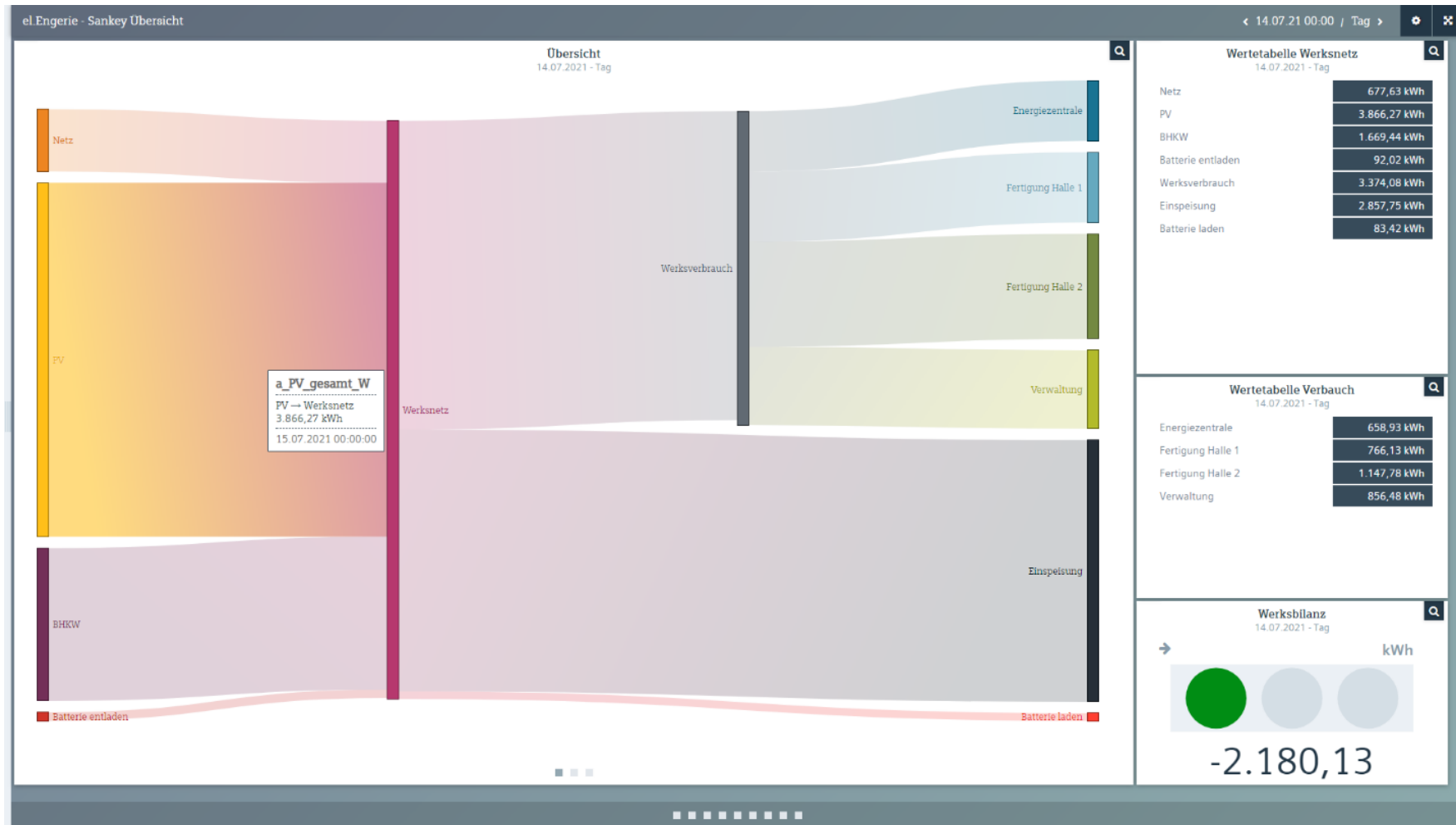


Abbildung 24: Transparenzschaffung durch das Energiemanagementsystem – Sankey-Diagramm hinsichtlich der Energieflüsse

3.2 Durchführung und Ergebnisse der Bewertung der Zielerreichung

3.2.1 Maßnahmen zur Transparenzschaffung und Flexibilitätsbefähigung

Die durchgeführten Maßnahmen zur Transparenzschaffung und Flexibilitätsbefähigung liefern die notwendige Voraussetzung zur intelligenten Steuerung von Erzeugung, Energiespeichern und produktionsabhängigen sowie variablen Verbrauchern. In den folgenden Abschnitten wird deshalb die Vorhersagegenauigkeit des Systems zur Prognose der PV-Erzeugung beziffert sowie ein Einblick in die automatisierte Berechnung des auftragsspezifischen CO₂-Verbrauchs sowie das Lastmanagement gegeben.

3.2.1.1 Prognosesystem zur Vorhersage der dezentralen Energieerzeugung

Um den zukünftigen Energieverbrauch der Green Factory mittels Lastmanagement an die volatile Stromerzeugung der PV-Anlage anpassen zu können, ist eine Prognose der zukünftigen Erzeugungsleistung ebenso notwendig wie die Transparenz bezüglich des Energieverbrauchs einzelner Arbeitsschritte.

Im Rahmen des von der Bayerischen Forschungstiftung geförderten Projekts „Energieautarke Produktion“ wurde ein System zur Erzeugungsprognose entwickelt, welche als Planungsgrundlage für eine energieorientierte Planung und Steuerung dienen kann [11]. Eingangsgrößen für das entwickelte System sind:

- eine Persistenzvorhersage P_{pers} (abgeleitet aus den Produktionsdaten der PV-Anlage unter der Annahme gleichbleibender Bewölkung),
- eine aus Satellitendaten abgeleiteten Wolkenzugvorhersage P_{cmv} und
- eine numerischen standortspezifische Wettervorhersage $PNWP$, welche auf eigenen Wettermodellen der meteocontrol GmbH basiert.

Die kombinierte Leistungsprognose P_{kombi} berechnet sich gemäß:

$$P_{kombi} = a \times P_{pers} + b \times P_{cmv} + c \times PNWP + d \quad (1)$$

wobei die Parameter a , b , c und d anhand historischer Messwerte für jede PV-Anlage trainiert wurden. Der im Projekt entwickelte Algorithmus bestimmt die Gewichtungsfaktoren anhand der vergangenen 30 Tage, wodurch saisonale Wetterabhängigkeiten besser erfasst werden. Es konnte gezeigt werden, dass der Vorhersagefehler der kombinierten Methode gegenüber den bisherigen Lösungen (Wolkenzugvorhersage, numerische Wettervorhersage) reduziert werden kann [11]. Im Rahmen des Projekts wurde das neu entwickelte und erfolgreich getestete Prognosesystem von der meteocontrol GmbH implementiert. Abbildung 25 zeigt beispielhaft die durchschnittlichen Tagesverläufe der gemessenen sowie der prognostizierten PV-Erzeugungsleistung in Juni und Dezember sowie beispielhafte Verläufe einzelner Tage. Insgesamt wurden im Betrachtungszeitraum 34.407 kWh PV-Strom mehr prognostiziert als tatsächlich erzeugt wurden (entspricht ca. 3%). Dies ist hauptsächlich auf die Überschätzung der Erzeugung an den PV-Anlagen auf der Produktionshalle sowie dem Neubau zurückzuführen und wird teilweise durch die Unterschätzung der beiden übrigen Anlagen kompensiert. Für die energieorientierte Planung und Steuerung der Produktion und der TGA ist insbesondere der kumulative Überschätzungsfehler relevant, da dieser diejenige Energiemenge angibt, welche prognostiziert, jedoch nicht erzeugt wurde. Werden zu diesen Zeiten auf Basis der Prognose energieintensive Aufträge eingeplant, kann dies zu zusätzlichem Netzbezug führen.

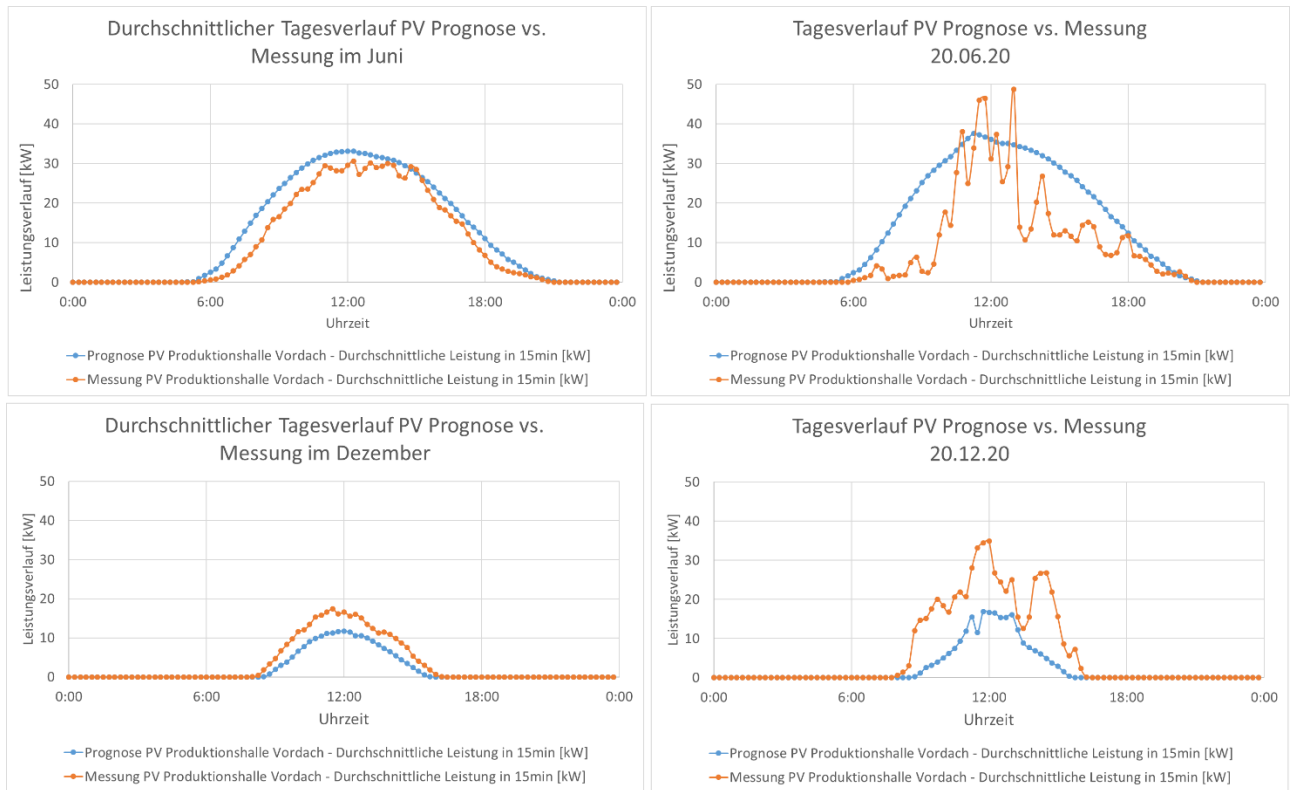


Abbildung 25: Durchschnittlicher Tagesverlauf der gemessenen und prognostizierten PV-Erzeugungleistung in Juni und Dezember (links), beispielhafte Tagesverläufe (rechts)

Im Betrachtungszeitraum fielen 46% (82.578 kWh) der überschätzten Stromerzeugung – also der Strommenge, welche prognostiziert jedoch nicht erzeugt wurde – in Zeiten an, in denen zusätzlich Strom aus dem Netz bezogen wurde. Dies entspricht 27% des gesamten im Betrachtungszeitraum aus dem Netz bezogenen Stroms, sowie 17% der insgesamt prognostizierten Stromerzeugung. Dabei handelt es sich häufig um Zeiten am frühen Morgen, in welchen die PV-Erzeugung zunimmt und die ersten Aufträge bearbeitet werden. In diesen Zeiten wäre eine Verschiebung energieintensiver Aufträge denkbar.

Tabelle 6: Auswertung der Vorhersagegenauigkeit der PV-Anlagen

	PV-Anlage Produktions- halle	PV-Anlage Kalthalle	PV-Anlage Produktions- halle Vordach	PV-Anlage Neubau	PV-Anlage Gesamt
Mittlerer positiver Prognosefehler [kW]	5,68	1,51	1,40	16,26	20,53
Mittlerer negativer Prognosefehler [kW]	-1,54	-2,45	-1,70	-13,03	-16,60
Mittlere Erzeugungsleistung prognostiziert [kW]	20,71	11,86	8,55	82,43	123,55
Mittlere Erzeugungsleistung gemessen [kW]	16,57	12,80	8,84	79,19	119,62
Kumulativer Überschätzungsfehler [kWh]	49.776	13.200	12.254	142.481	179.836
Kumulativer Unterschätzungsfehler [kWh]	-13.526	-21.439	-14.851	-114.120	-145.429
Erzeugung prognostiziert [kWh]	181.389	103.893	74.866	722.109	1.082.257
Erzeugung gemessen [kWh]	145.139	112.132	77.463	693.747	1.047.849

Diese verlässliche Vorhersage der Erzeugung ist somit die notwendige Grundlage für die Nutzung von Energieflexibilität und Lastverschiebung.

3.2.1.2 ERP-System für eine energieeffiziente Produktionsplanung

Die Implementierung des ERP-Systems sowie die Integration von Energiedaten in dieses ermöglicht zwei Anwendungsfälle. Zum einen werden Energie- und Produktionsdaten verknüpft und somit eine Betrachtung der tatsächlichen Energieverbräuche im Fertigungsprozess möglich. Zum anderen ermöglicht das ERP-System neben dieser Transparenzschaffung die vorausschauende energieorientierte Planung und Steuerung

der Produktion. Die produktionsabhängigen Verbraucher sind abhängig von der aktuellen Erzeugungs- und Verbrauchssituation manuell steuerbar, sie sind jedoch nicht Teil des automatischen Lastmanagements. Abbildung 26 zeigt das Mock-up einer entsprechenden Plantafel mit der Visualisierung des geplanten Auftrags, dem resultierenden Energieverbrauch in stündlicher Auflösung, sowie demgegenüber die prognostizierte Erzeugungssituation im Werk.

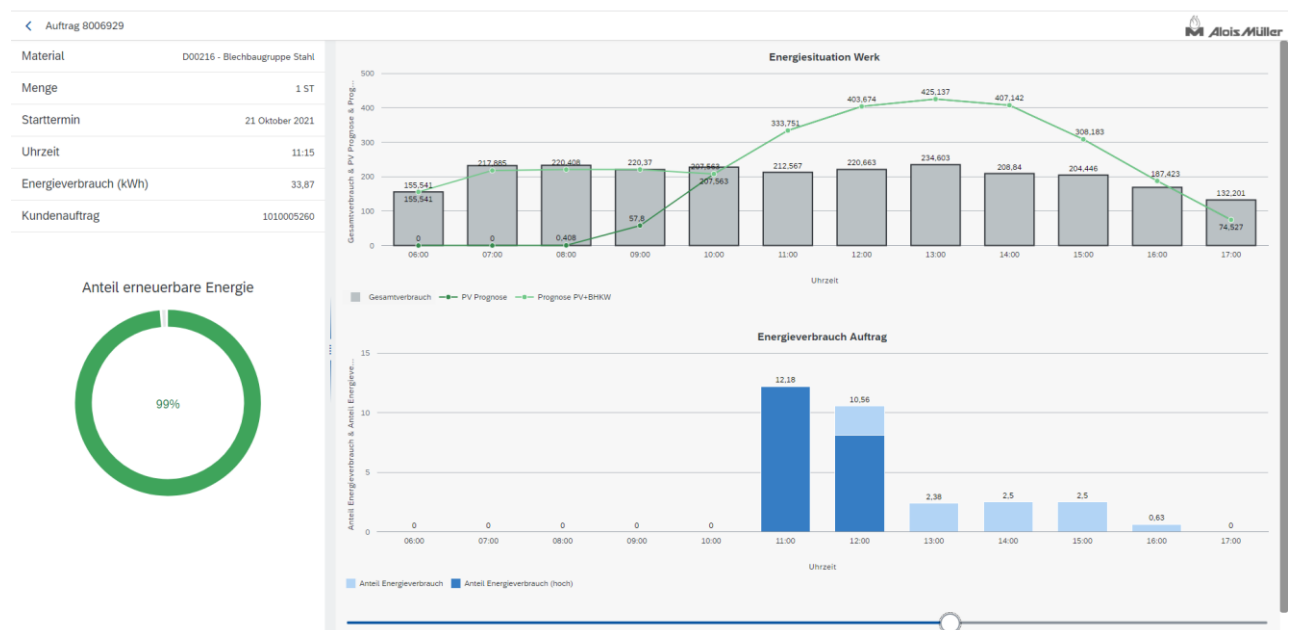


Abbildung 26: Mock-up der Plantafel für eine energieorientierte Planung und Steuerung

Auf Basis dieser Plantafel, welche die prognostizierte Erzeugungsleistung und die Auftragslage visualisiert, können in der Produktion kurzfristig Entscheidungen zur Verschiebung von Aufträgen getroffen werden. Oben ist neben der prognostizierten Erzeugungsleistung der zukünftige Gesamtverbrauch sichtbar. Anhand dieser Gegenüberstellung kann nun über die zeitliche Einplanung des Auftrags (unten) in Abhängigkeit der Erzeugungs- und Verbrauchssituation entschieden werden. Die Umplanung kann bis zu 2 bzw. 3 Tagen im Voraus (Reichweite der PV-Prognose) und bis kurz vor Auftragsstart erfolgen. Durch die Erfassung aller Energieverbräuche über die verbaute feingranulare Energiemesssensorik und die Dokumentation und Vernetzung über das ERP-System, ist es möglich, für jedes in der Green Factory produzierte Teil anzugeben,

wie viel CO₂-Äquivalente durch das Versorgungskonzept der Green Factory im Vergleich zu herkömmlicher Energieerzeugung eingespart werden konnten. So wird bei der Fertigung einer Vielzahl an Teilen kein zusätzliches Treibhausgaspotenzial durch die regenerative Energieversorgung verursacht.¹ Treibhausgasemissionen entstehen lediglich durch die Herstellung der Bleche und weiterer Materialien, sowie den Transport. Die Quantifizierung der eingesparten CO₂-Äquivalente eines in der Green Factory gefertigten Auftrags erfolgt in den folgenden Schritten:

1. Messung und Dokumentation des Energieverbrauchs bei der Fertigung des Auftrags in 15-minütiger Granularität
2. Messung der Erzeugungsleistung aller Stromerzeugungsanlagen (PV-Anlagen und BHKW) sowie des Netzbezugs in 15-minütiger Granularität
3. Ermittlung des Strom-Mix der Green Factory zu jedem Zeitschritt
4. Anteilige Verrechnung des Strom-Mix mit dem Energieverbrauch des Auftrags zu jedem Zeitschritt
5. Verrechnung mit den für jede Bezugsart hinterlegten CO₂-Äquivalenten/kWh
6. Ermittlung der verursachten CO₂-Äquivalente bei 100% Netzbezug (entspricht dem Deutschen Strom-Mix)
7. Ermittlung der Differenz – und somit der durch den vorhandenen Strom-Mix eingesparten CO₂-Äquivalente im Vergleich zum vollständigen Strombezug aus dem öffentlichen Stromnetz
8. Aufsummierung der Verbräuche und der damit einhergehenden verursachten und vermiedenen CO₂-Äquivalente über alle Zeitschritte

Beispielsweise hat ein Auftrag, welcher am 25.06.2020 von 07:30 bis 08:30 Uhr auf der Laserschneidanlage bearbeitet wurde, von 07:30 bis 07:45 Uhr einen Stromverbrauch von 2,6 kWh. Der interne Strom-Mix in

¹ Hierbei wird lediglich die Nutzungsphase der Erzeugungsanlagen berücksichtigt.



diesem Zeitschritt setzte sich zu 46% aus Netzbezug und 54% aus PV-Strom zusammen. Der Energieverbrauch des Auftrags wird deshalb anteilig den Erzeugern zugerechnet: 1,2 kWh gedeckt durch Netzbezug, 1,4 kWh gedeckt durch PV-Strom. Zur Quantifizierung der erzeugten CO₂-Äquivalente werden die folgenden Werte zugrunde gelegt, wobei einmal nur die Treibhausgasemissionen in der Nutzungsphase betrachtet wurden und im anderen Fall auch die Herstellung und Entsorgung der Energieerzeugungsanlagen sowie die zum Betrieb benötigten Materialien (z.B. Ökogas beim BHKW) mitberücksichtigt wurden (vgl. Tabelle 7).

Tabelle 7: Übersicht der mit der Strombereitstellung verbundenen Treibhausgasemissionen

	Betrachtung der Nutzungsphase der Energieerzeugung ¹ (gate-to-gate Betrachtung)	Betrachtung aller Lebenswegphasen der Energieerzeugung ² (cradle-to-grave Betrachtung)
PV-Strom	0 kg CO ₂ -äqv./kWh	0,067 kg CO ₂ -äqv./kWh
BHKW-Strom ³	0 kg CO ₂ -äqv./kWh	0,055 kg CO ₂ -äqv./kWh
Netzbezug	0,44 kg CO ₂ -äqv./kWh	0,452 kg CO ₂ -äqv./kWh

Der betrachtete Auftrag verursacht somit im entsprechenden Zeitschritt folgende Treibhausgasemissionen:

$$1,2 \text{ kWh} * 0,44 \text{ kg CO}_2\text{-äqv./kWh} = 0,53 \text{ kg CO}_2\text{-äqv. (gate-to-gate Betrachtung)}$$

Die eingesparten CO₂-Äquivalente werden durch die Subtraktion dieses Wertes von einer 100% Versorgung mit Strom aus dem öffentlichen Netz berechnet und entsprechend kenntlich gemacht:

$$2,6 \text{ kWh} * 0,44 \text{ kg CO}_2\text{-äqv./kWh} = 1,14 \text{ kg CO}_2\text{-äqv. (gate-to-gate Betrachtung)}$$

¹ Werte von der Müller Produktions GmbH zur Verfügung gestellt

² Werte wurden der GaBi Datenbank Professional Version 8.7 SP42 entnommen

³ Aufgrund der getroffenen Ausgleichsmaßnahmen wird die Verbrennung des Ökogas klimaneutral gewertet; bei der Ermittlung der Umweltwirkungen wurde darüber hinaus eine Preisallokation vorgenommen

1,14 kg CO₂-äqv. - 0,53 kg CO₂-äqv. = 0,61 kg CO₂-äqv. (gate-to-gate Betrachtung)

Abbildung 27 zeigt die Dokumentation der durch die Energieerzeugung in der Green Factory vermiedenen Treibhausgasemissionen für die Kund*innen der Müller Produktions GmbH.



Gemeinsame Sache für die Umwelt:

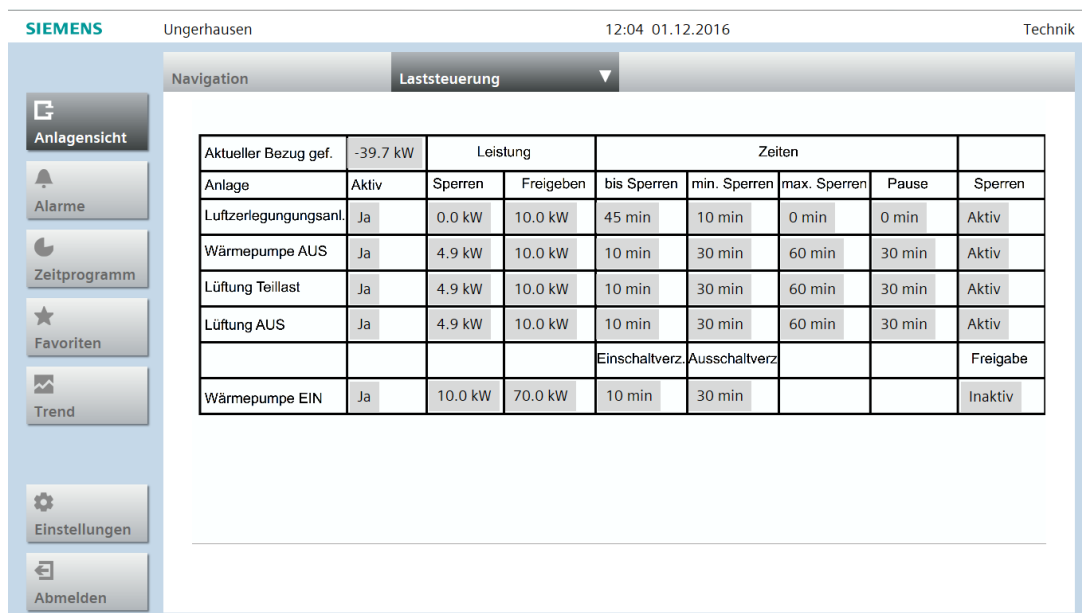
Die Produktion Ihres Auftrags in unserer Green Factory hat, im Vergleich zur herkömmlichen Produktion mit 100% Netzstrom, 833,018 kg CO₂ eingespart.

*Abbildung 27: Beziffern der durch die Energieerzeugung vermiedenen Treibhausgasemissionen für Kund*innen*

3.2.1.3 Gebäudeleittechnik zur Steuerung der TGA

Eine intelligente Steuerung variabler Verbraucher ist Voraussetzung, um die durch vorangegangene Maßnahmen geschaffene Energieflexibilität zur Erhöhung des Eigenverbrauchsanteils sowie des Autarkiegrads der Green Factory nutzbar zu machen. Deshalb wurde für die produktionsunabhängigen Verbraucher ein intelligentes Lastmanagement implementiert. Abbildung 28 zeigt das automatische Lastmanagement für die Verbraucher Luftzerlegungsanlage, Wärmepumpe und Lüftungsanlage. Da die Wärmepumpe mit Inbetriebnahme der Energiezentrale Ende 2019 lediglich zur Absicherung der Wärmebereitstellung genutzt wird, ist diese im aktuellen Lastmanagement als „inaktiv“ gekennzeichnet. In Zeiten eines Stromüberschusses am Standort und somit einer Einspeisung der überschüssigen Energie in das öffentliche Stromnetz werden die in das Lastmanagement eingebunden Verbraucher automatisch zugeschaltet. Bei einem Netzbezug von mehr als 0 kW wird zunächst die Stickstoffanlage ausgeschaltet und die Lüftungen gehen in den Teillastbetrieb. Bleibt der Netzbezug weiterhin größer als 4.9 kW, werden die Lüftungsanlagen im nächsten Schritt komplett ausgeschaltet. Beide Komponenten schalten sich an, wenn der Stromüberschuss größer als 10 kW ist. Zusätzlich umfasst die Lüftungssteuerung Sperrzeiten, welche die ausreichende Klimatisierung der Halle sicherstellen. Fällt der Bündeldruck in den Stickstoffbündeln ab,

produziert auch die Stickstoffanlage unabhängig von der Laststeuerung. Die Grenzwerte ergeben sich hierbei aus technischen Randbedingungen und Erfahrungswerten. Die Steuerungslogik des Lastmanagements kann Abbildung 67 im Anhang entnommen werden.



Aktueller Bezug gef.	-39.7 kW	Leistung		Zeiten				
Anlage	Aktiv	Sperren	Freigeben	bis Sperren	min. Sperren	max. Sperren	Pause	Sperren
Luftzerlegungsanl.	Ja	0.0 kW	10.0 kW	45 min	10 min	0 min	0 min	Aktiv
Wärmepumpe AUS	Ja	4.9 kW	10.0 kW	10 min	30 min	60 min	30 min	Aktiv
Lüftung Teillast	Ja	4.9 kW	10.0 kW	10 min	30 min	60 min	30 min	Aktiv
Lüftung AUS	Ja	4.9 kW	10.0 kW	10 min	30 min	60 min	30 min	Aktiv
				Einschaltverz.	Ausschaltverz.			Freigabe
Wärmepumpe EIN	Ja	10.0 kW	70.0 kW	10 min	30 min			Inaktiv

Abbildung 28: Lastmanagement der TGA

Zukünftig soll darüber hinaus die Lüftungsanlage nicht nur lediglich in Voll- und Teillast betrieben werden, sondern eine adaptive Anpassung der Lüftung je nach Arbeitsplatzbelegung umgesetzt werden, um zusätzliche Energieeinsparpotenziale zu realisieren.

3.2.2 Maßnahmen zur Erzeugung und Flexibilisierung

Eine wesentliche Maßnahme zur gleichzeitigen Verbesserung ökonomischer und ökologischer Kennzahlen produzierender Unternehmen stellt die Erhöhung des Eigenverbrauchsanteils dar. Hierbei wird versucht, einen möglichst hohen Anteil der durch eigene Anlagen erzeugten elektrischen Energie direkt selbst zu verbrauchen. Auf der ökonomischen Seite bewirkt die Erhöhung des Eigenverbrauchsanteils sinkende Stromkosten, da die Gestehungskosten der Eigenerzeugungsanlagen zumeist unter den Kosten des Strombezugs über einen Lieferanten liegen. Auf der ökologischen Seite entstehen Vorteile durch die

Nutzung des umweltverträglich produzierten Stroms, der im Vergleich zum Strom-Mix des öffentlichen Netzes eine geringere Umweltbelastung vorweist. Voraussetzung ist hierbei, dass die Unternehmen ökologisch verträgliche Eigenerzeugungsanlagen betreiben.

3.2.2.1 Versorgungssituation Strom im Betrachtungszeitraum

Im Messzeitraum wurden in der Green Factory 1.458.873 kWh Strom erzeugt, etwa 72% davon durch die PV-Anlagen und 28% durch ein BHKW. Knapp 59% des eigenerzeugten Stroms wurde in der Green Factory selbst verbraucht, 602.415 kWh wurden in das öffentliche Stromnetz eingespeist. In Zeiten der Unterdeckung wurden 302.938 kWh Strom aus dem Netz bezogen¹. Abbildung 29 zeigt die monatliche Erzeugungs- und Verbrauchssituation des Standorts in Ungerhausen im Betrachtungszeitraum.

¹ Derzeit speisen (kaufmännisch) alle PV-Anlagen den Strom zu 100% in das Netz ein. Der seitens der Müller Produktions GmbH benötigte Strom wird wiederum vom BHKW und vom Netz bezogen. Die dargestellten Analysen zeigen nun auf, in welchen Mengen der PV-Strom künftig direkt verbraucht werden kann. Die Ansteuerung und technische Anbindung wurden im Projekt ebenfalls bereits für das Eigenverbrauchsszenario entwickelt und umgesetzt, sodass beispielsweise das Lastmanagement bereits nach diesem Szenario regelt.

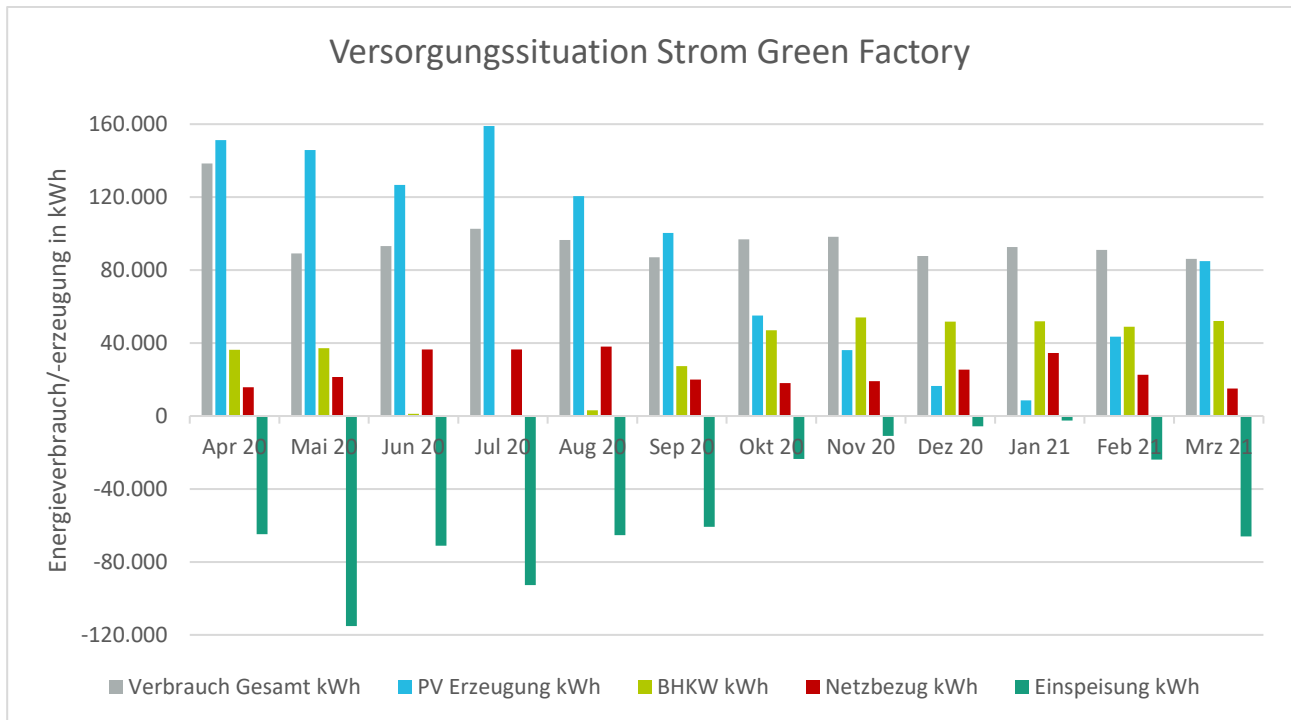


Abbildung 29: Versorgungssituation Strom der Green Factory im Betrachtungszeitraum

Der gesamte Stromverbrauch des Werks in Höhe von 1.159.396 kWh wurde im Betrachtungszeitraum zu knapp 43% mit eigenerzeugtem PV-Strom, zu 31% mit eigenerzeugtem BHKW-Strom sowie zu 26% mit Strom aus dem öffentlichen Netz gedeckt (siehe Abbildung 30). Letzteres ist notwendig, da insbesondere in den Wintermonaten aber auch ganzjährig nachts Strom benötigt wird, der zu diesen Zeitpunkten nicht über die PV-Anlagen oder das BHKW erzeugt werden kann. Eine Erhöhung des Eigenverbrauchs und somit eine Verminderung des Netzbezugs ist durch die erweiterte Nutzung des Batteriespeichers sowie des BHKWs möglich (siehe Abschnitte 3.2.2.5 und 3.2.2.6), wird jedoch aktuell noch nicht umgesetzt. Die aus der aktuellen Situation resultierende durchschnittliche Verteilung des Strombezugs wird im Folgenden als „Green Factory Strom-Mix “ bezeichnet.

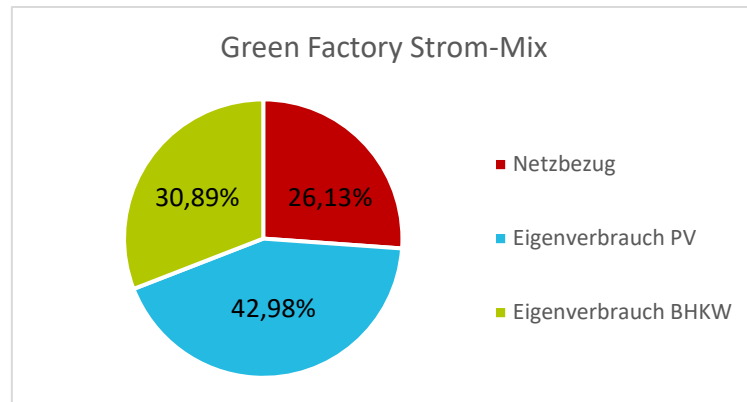


Abbildung 30: Green Factory Strom-Mix im Betrachtungszeitraum

Mit diesem Strom-Mix erreicht die Green Factory einen Autarkiegrad von 74%. Etwa 48% des erzeugten PV-Stroms sowie 87% des erzeugten BHKW-Stroms wurden am Produktionsstandort selbst verbraucht, der übrige erzeugte Strom wurde in das Netz eingespeist (siehe Abbildung 31).

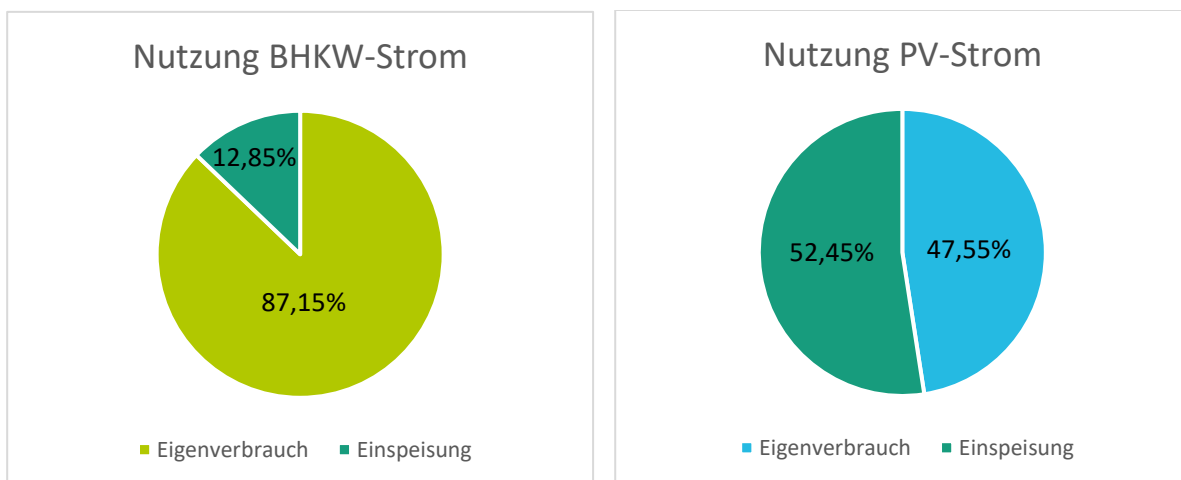


Abbildung 31: Eigenverbrauchsquoten des PV- sowie BHKW-Stroms

3.2.2.2 Versorgungssituation Wärme im Betrachtungszeitraum

Insgesamt wurden im Messzeitraum 2.428 MWh Nutzwärme erzeugt, 966 MWh mittels Pelletkessel, 893 MWh mittels Gaskessel, 555 MWh mittels BHKW sowie 14 MWh aus der Wärmerückgewinnungsanlage des Druckluftkompressors (siehe Abbildung 32). Mit der erzeugten Wärme wurde sowohl die Green Factory

(1.277 MWh) versorgt als auch in ein lokales Nahwärmenetz (1,15 GWh) eingespeist. In diesem Kontext ist zu erwähnen, dass aufgrund des geringen Treibhauspotentials die Wärmeerzeugung durch den Pelletkessel gegenüber dem Gaskessel bevorzugt wird. Das BHKW arbeitet wärmegeführt, wird jedoch stromseitig geregelt, wenn die vom Netzbetreiber festgesetzte Einspeisemenge von 50 kW überschritten wird und ist modulierend regelbar zwischen 50 und 100%, woraus eine minimale Erzeugungsleistung von 110 kW resultiert. Es wird zugeschaltet, sobald mehr als 110 kW Strom aus dem Netz bezogen werden und demnach abgeschaltet, wenn mehr als 50 kW¹ in das Netz eingespeist werden oder kein Wärmeabnehmer zur Verfügung steht und der Pufferspeicher bereits voll ist (Rücklauftemperatur im Pufferspeicher zu hoch, um die Rückkühlung des BHKWs zu gewährleisten). Aus diesem Grund werden Kapazitäten für die Abwärme des BHKW im Pufferspeicher vorgehalten (siehe Kapitel 2.2.2.1). Die in Abbildung 33 dargestellten Energiemengen stellen die Mengen in den jeweils betrachteten Monaten dar. Die stromseitigen Vorgaben für das BHKW als Erzeuger mit der höchsten Priorität sowie Faktoren wie Zeitpunkt der Anforderung (insgesamt wenig Bedarf, aber dieser fällt gleichzeitig an) oder Überschneidung mit Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten haben zur Folge, dass auch in den wärmeren Monaten eine Zuschaltung des Gaskessels vorkommen kann.

¹ Wenn die PV-Anlagen zukünftig als Eigenerzeugungsanlage betrieben werden, muss die BHKW-Einspeisung auf 0 kW geregelt werden, um die Nachweisbarkeit über die Herkunft des eingespeisten Stroms zu gewährleisten.

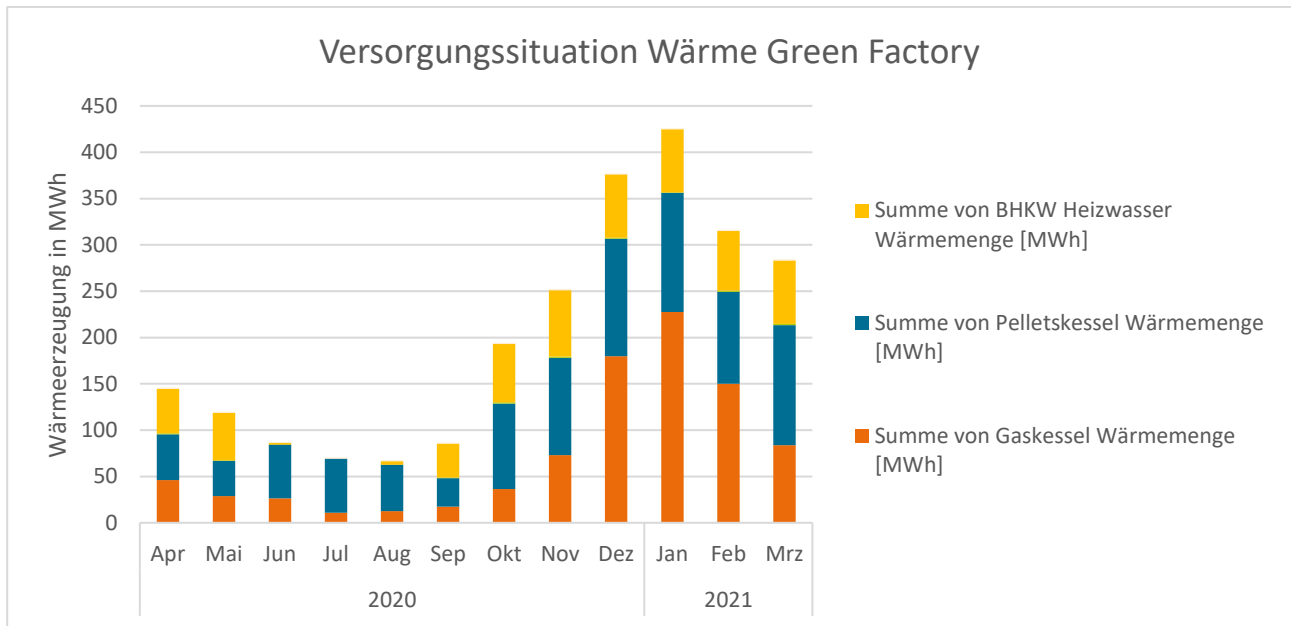


Abbildung 32: Wärmeerzeugung der Green Factory im Betrachtungszeitraum in monatlicher Granularität der einzelnen Erzeuger

Diese Zusammensetzung der Wärmeerzeugung führt zu dem in Abbildung 33 dargestellten „Green Factory Wärme-Mix“.

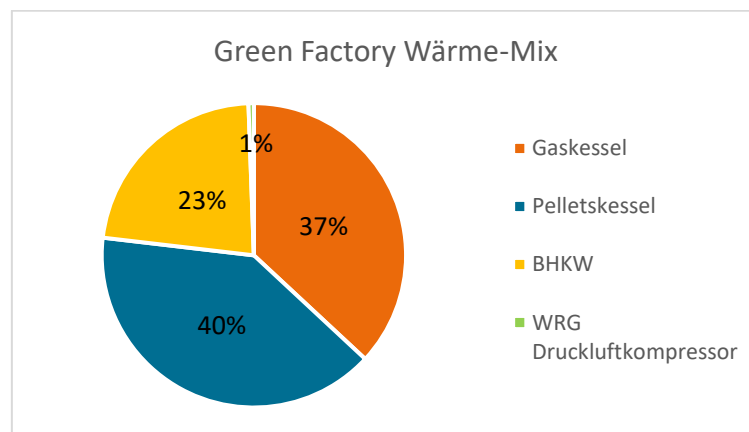


Abbildung 33: Green Factory Wärme-Mix im Betrachtungszeitraum

3.2.2.3 Detailanalyse der Photovoltaikanlagen

Die Green Factory wird durch vier PV-Anlagen mit insgesamt 1,1 MW_p Solarstrom versorgt. Abbildung 34 zeigt die monatliche Stromerzeugung der einzelnen PV-Anlagen. Die PV-Anlage auf dem Vordach der Produktionshalle wurde im Rahmen des Projekts mit einer Reinigungsanlage ausgestattet, um Verschmutzungen vorzubeugen und auch nach Schneefall die Versorgung mit Solarstrom zu gewährleisten. Der mögliche Nutzen, d.h. eine hierdurch mögliche verbesserte Erzeugungsleistung sollte im Rahmen des Vorhabens bewertet werden.

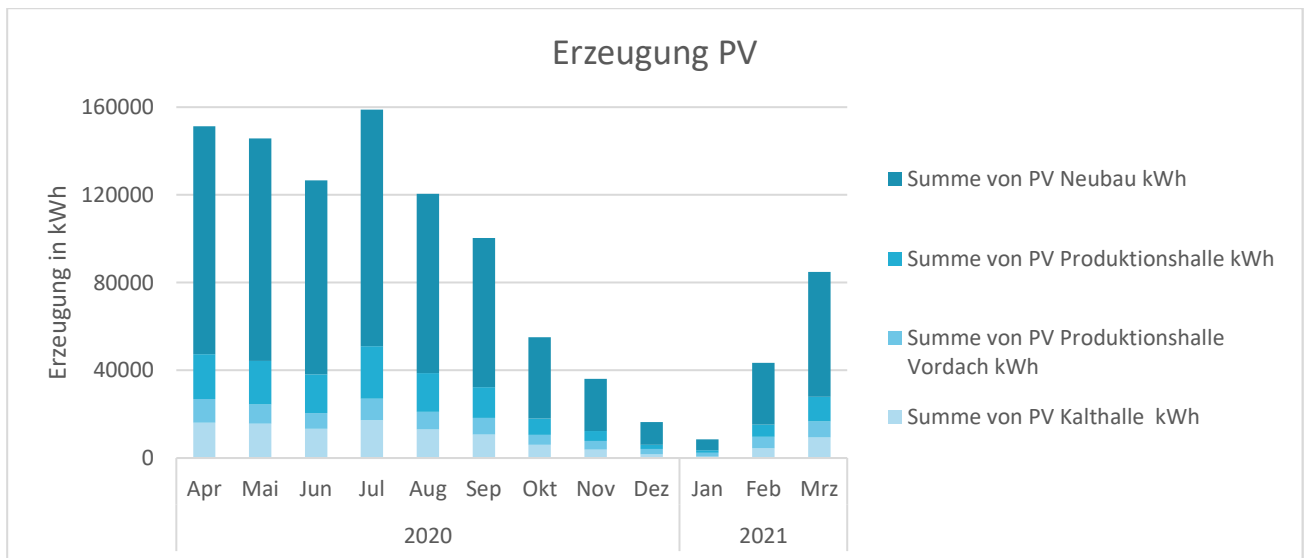


Abbildung 34: Monatliche Erzeugung der PV-Anlagen

Aufgrund der unterschiedlich installierten Leistung, können über die in Abbildung 34 dargestellten Absolutwerte keine Rückschlüsse über den Nutzen der Reinigungsanlage gezogen werden. Als Indikator für die Effizienz der PV-Anlagen wurde daher deren Performance Ratio berechnet. Tabelle 8 gibt einen Überblick über wichtige Kennzahlen der einzelnen PV-Anlagen. Die Performance Ratio errechnet sich aus:

$$\text{Performance Ratio } PR = \frac{\text{realer Anlagenertrag in kWh}}{\text{idealer Anlagenertrag in kWh}} \quad (2)$$

Der reale Anlagenertrag ist der gemessene Jahresertrag der entsprechenden Anlage. Der ideale Anlagenertrag ergibt sich aus:

$$\text{Idealer Anlagenertrag [kWh]} = \text{PV Generatorfläche [m}^2\text{]} * \text{spez. Einstrahlung in die Generatorebene [kWh/m}^2\text{]} * \text{Modulwirkungsgrad (3)}$$

Die PV-Anlage auf dem Vordach der Produktionshalle weist die höchste Performance Ratio auf. Dies kann auf die installierte Reinigungsanlage zurückzuführen sein. Aber auch mögliche Verschattungen oder Verluste in Leitungen und Wechselrichtern können Einfluss auf die Performance Ratio haben. Auch der höhere Neigungswinkel von 30° im Vergleich zu beispielsweise 5,5° der Anlage auf der Kalthalle kann dazu führen, dass Verdeckungen durch Schnee schneller abrutschen und so eine höhere Effizienz erreicht wird.

Tabelle 8: Kennzahlen der PV-Anlagen

PV-Anlage	PV Produktionshalle	PV Kalthalle	PV Produktionshalle Vordach	PV Neubau	Summe/ gewichteter Mittelwert
Installierte Leistung [kWp]	143,78	136,19	69,3	749,75	1099,02
Erzeugter Jahresertrag [kWh/a]	145.139	112.132	77.464	713.116	1.047.851
Spez. Jahresertrag [kWh/kWp]	1009	823	1118	951	953,26
Jährliche Globalstrahlung [kWh/m ²] [12]	1230,02	1207,71	1291,71	1162,95	1185,39
Idealer Anlagenertrag [kWh/a]	175.981	163.211	89.306	885.293	1.313.791
Performance Ratio (PR)	82,47%	68,70%	86,74%	80,55%	79,72%

Abbildung 35 zeigt den Einfluss der Reinigungsanlage der PV-Anlage auf dem Vordach der Produktionshalle bei Schneefall. In den Vortagen des 11. Januar hatte es geschneit, was dazu führte, dass die Erzeugungsleistungen der PV-Anlagen deutlich gemindert wurden. Lediglich die Anlage mit der installierten Reinigungsanlage (dunkelblaue Kurve) zeigt eine relativ hohe Erzeugungsleistung im Verhältnis zur installierten Leistung.

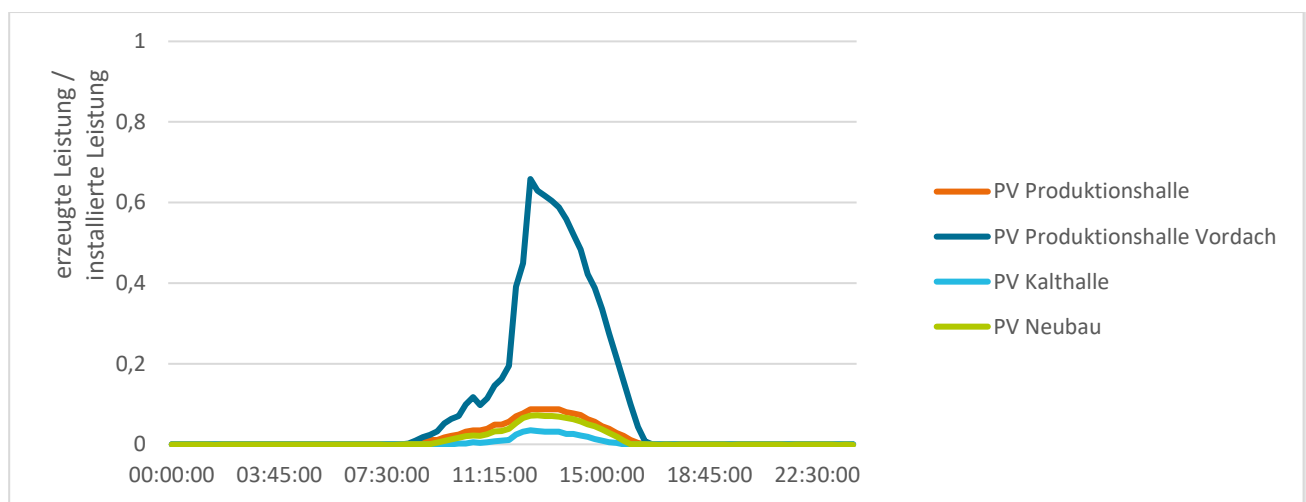


Abbildung 35: Verlauf der PV-Erzeugung am 11.01.2021

3.2.2.4 Betrachtungsfälle der Eigenverbrauchserhöhung

Die Müller Produktions GmbH nutzt nach den aktuellen Messreihen rund 59% des eigenerzeugten Stroms und weist einen Autarkiegrad von rund 74% auf (vgl. 3.2.2.1), da nicht die gesamte Eigenerzeugung genutzt werden kann bzw. die Eigenerzeugung nicht ausreicht, um den Bedarf vollständig zu decken.¹ Die Erhöhung dieser Kennzahlen wurde im Rahmen des Projekts durch die Simulation geeigneter Betriebsstrategien des BHKW, des Batteriespeichers und flexibler Verbraucher untersucht. Dabei wurde die elektrische Einspeisung der Photovoltaikanlagen als nicht regelbare Eingangsgröße auf der Erzeugungsseite berücksichtigt.

¹ Die Eigenverbrauchsquote ist definiert durch den Anteil des Eigenverbrauchs an der Eigenerzeugung. Der Autarkiegrad stellt den Anteil des Eigenverbrauchs am Gesamtverbrauch dar.

Abbildung 36 zeigt den Verlauf des Autarkiegrads und der Eigenverbrauchsquote im Betrachtungszeitraum. Ausgehend von dieser Darstellung lassen sich zwei Betrachtungsfälle unterscheiden:

- Betrachtungsfall A von März bis August ist gekennzeichnet durch eine verhältnismäßig geringe Eigenverbrauchsquote im Verhältnis zum Autarkiegrad.
- Betrachtungsfall B von Oktober bis Februar weist eine hohe Eigenverbrauchsquote bei einem geringeren Autarkiegrad auf.

Diese Unterscheidung von Betrachtungsfällen ermöglicht die strukturierte Anpassung der Betriebsstrategien der Technologien.

- In Betrachtungsfall A steht Energie der Photovoltaikanlage in hoher Quantität zur Verfügung (Autarkiegrad), jedoch wird nur ein verhältnismäßig geringer Teil durch den direkten Verbrauch genutzt (Eigenverbrauchsquote).
- In Betrachtungsfall B wird die zur Verfügung stehende Energie deutlich stärker selbst verbraucht (Eigenverbrauchsquote), jedoch sollte die Menge des eigenerzeugten Stroms erhöht werden (Autarkiegrad).

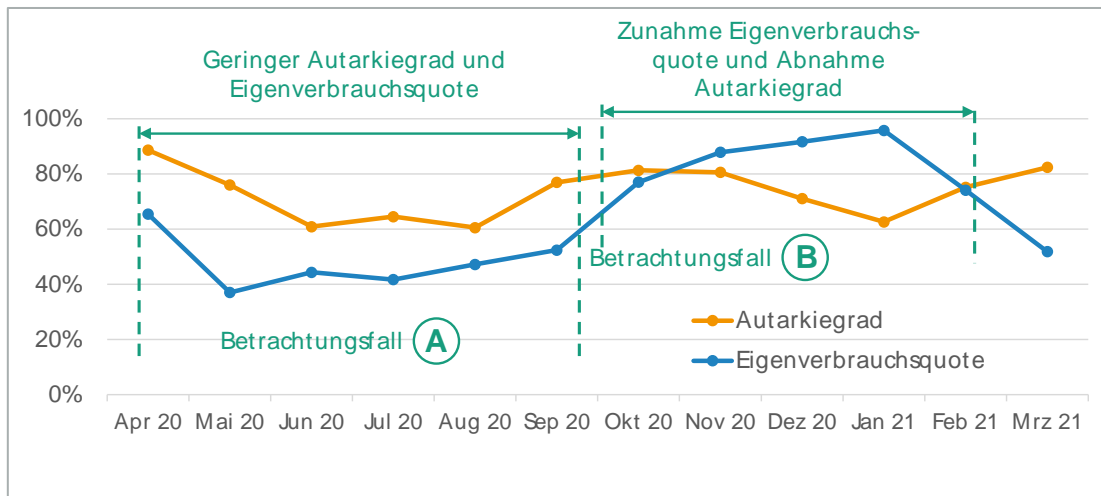


Abbildung 36: Verlauf des Autarkiegrads und der Eigenverbrauchsquote im Betrachtungszeitraum mit Unterscheidung von zwei Betrachtungsfällen

Die Betrachtung gemittelter Lastgänge exemplarischer Monate der Betrachtungsfälle in Abbildung 37 gibt Aufschluss über die Art der Maßnahmen und Größenordnungen der Verschiebungspotenziale. Im linken Teil der Abbildung ist ein Tag des Betrachtungsfalles A aufgeführt. Im Monatsmittel werden täglich 7 MWh elektrische Energie in das Stromnetz eingespeist. Dies errechnet sich durch die Differenz aus der Eigenerzeugung von PV-Anlagen sowie BHKW und dem Gesamtverbrauch. Nachts, wenn keine PV-Erzeugung erfolgt, werden dagegen 0,6 MWh Strom aus dem Stromnetz bezogen (roter Lastgang Netzbezug). Mit der Einbindung des Batteriespeichers in das Betriebskonzept lässt sich eine durch die grünen Pfeile skizzierte Verschiebung der überschüssigen PV-Einspeisung tagsüber in die Nachtzeit mit einer einhergehenden Reduktion des Netzbezugs erreichen. Auf die Vorgehensweise und Potenziale wird im nächsten Unterkapitel 3.2.2.5 eingegangen.

Für den Betrachtungsfall B im rechten Teil von Abbildung 37 sind die gemittelten Lastgänge eines Monats der PV-Erzeugung, BHKW-Erzeugung und des Netzbezugs dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die PV-Einspeisung (orange) deutlich geringer ausfällt und trotz zusätzlicher BHKW-Einspeisung (grün) ein Netzbezug (rot) über den ganzen Tag stattfindet. Entsprechend der Zielsetzung einer Erhöhung des Eigenverbrauchsanteils und des Autarkiegrads ist in diesem Betrachtungsfall die BHKW-Einspeisung zu

erhöhen. Potenziale hierzu bestehen durch die Verringerung von Netzbezug in Höhe von täglich rund 1,1 MWh. Die Nutzung des BHKWs zur Deckung des Strombedarfs ist begrenzt durch die Einspeisebeschränkung des Netzbetreibers und wird mittels der Temperaturfühler im Pufferspeicher geregelt (siehe Kapitel 2.2.2.1).

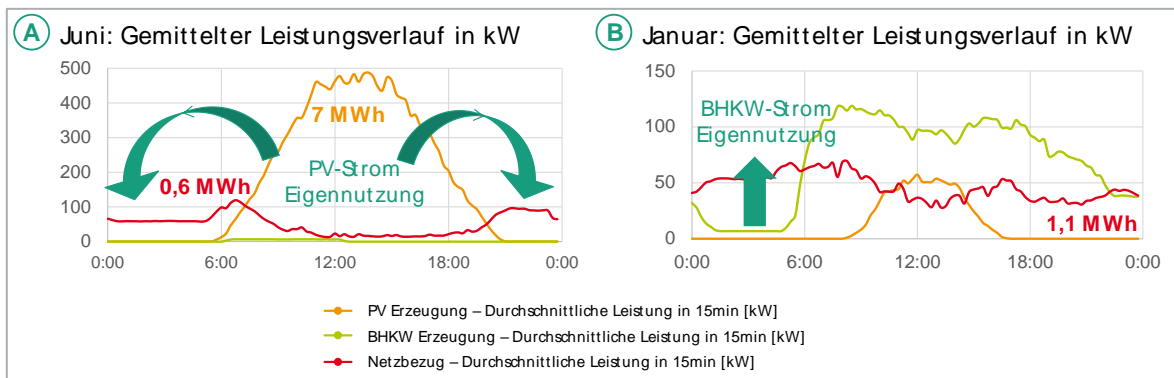


Abbildung 37: Gemittelte Lastgänge exemplarischer Monate der Betrachtungsfälle

3.2.2.5 Batteriespeichereinsatz zur Erhöhung des PV-Eigenverbrauchs

Im Messzeitraum wurde der Batteriespeicher lediglich zur Notstromversorgung sowie zur Reduktion von Spitzenlasten genutzt. Die Müller Produktions GmbH hat zur Reduktion des Leistungspreisanteils der Stromkosten eine maximale Bezugslast von 250 kW definiert. Ist dieser Wert überschritten, wird der Batteriespeicher entladen, um den Netzbezug auf weniger als 250 kW zu regeln. Der Batteriespeicher kann bis zu einem Füllstand von 80 kWh entladen werden, die übrige Kapazität wird zur Notstromversorgung zurückgehalten. Zukünftig sollen jedoch geeignete Betriebsstrategien umgesetzt werden, um den Eigenverbrauchsanteil der PV-Anlage sowie den Autarkiegrad zu erhöhen. Dies liegt darin begründet, dass in der ursprünglichen Konzeptphase eine Refinanzierung des Speichers nur mit dem Anwendungsfall der Lastspitzenkappung möglich war, da diese eine höhere Lebensdauer des Speichers ermöglicht. Da die notwendigen Lade- und Entladezyklen für die Spitzenlastkappung nur zu einer sehr geringen Auslastung

des Speichers führen, wird der Batteriespeicher zukünftig auch für die Verbesserung des Eigenverbrauchs genutzt. Allerdings nur in dem Maße, dass die Lebensdauer des Speichers nicht maßgeblich verkürzt wird. Die notwendige Anpassung der Steuerung zur Nutzung des Batteriespeichers zur Erhöhung des Eigenverbrauchs befindet sich deshalb aktuell in Arbeit.

Von März bis September konnte in Anwendungsfall A (vgl. Abbildung 37) ein Verschiebepotenzial von 160 kWh pro Tag ermittelt werden. Dieses ist durch die Speicherkapazität von 200 kWh und einem minimalen State of Charge (SoC) von 20% gegeben. In Abbildung 38 ist die Betriebsstrategie des Batteriespeichers durch grüne Pfeile schematisch dargestellt. Gegen 19:00 Uhr, wenn der Netzbezug durch die abfallende PV-Einspeisung zunimmt, kann der voll beladene Speicher beispielsweise über vier Stunden mit rund 40 kW Leistung entladen werden. Die Beladung des bis 20% entladenen Speichers erfolgt gegen 9:00 Uhr, wenn die PV-Eigenerzeugung den Bedarf übersteigt. Von März bis September können durch den Speicher somit jede Nacht rund 160 kWh Eigenstrom der PV-Anlagen genutzt werden. Dies entspricht insgesamt rund 34 MWh durch den Speichereinsatz zusätzlich genutzter Eigenerzeugung pro Jahr. Der Autarkiegrad wird somit um drei Prozentpunkte auf 77% erhöht. Die Eigenverbrauchsquote steigt um zwei Prozentpunkte auf 61% an. Durch den veränderten Strom-Mix lässt sich ein jährliches Einsparpotenzial von rund 4,5 t CO₂-äqv. erzielen.

Bei einer Dimensionierung des Speichers entsprechend dem nächtlichen Netzbezug (0,6 MWh) ließe sich ein Autarkiegrad von 81% und eine Eigenerzeugungsquote von 65% erreichen. Unabhängig davon kann der noch verbleibende überschüssige PV-Strom in beiden Fällen durch Lastverschiebungsmaßnahmen der Produktion (z.B. Laserschneiden, Lackierkabinen und Sandstrahlkabine) genutzt werden und somit weitere Potenziale ergänzend zum Speicher erzielt werden (vgl. 3.2.2.7).

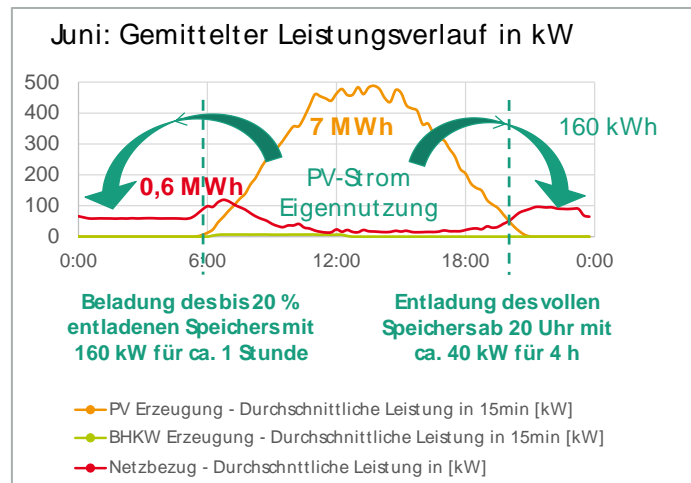


Abbildung 38: Tägliches Verschiebepotenzial durch den Batteriespeicher

3.2.2.6 Erweiterte Betriebsweise des BHKW

Von Oktober bis Februar zeigt sich die Möglichkeit zur Ausweitung des BHKW Betriebs, um die Eigenerzeugungsquote und den Autarkiegrad zu erhöhen. Das BHKW mit einer maximalen Leistung von 220 kW_{eI} ist aus technischen Gründen regelbar zwischen 50 und 100% Leistung und wird ab einer Netzeinspeisung von mehr als 50 kW am Netzverknüpfungspunkt heruntergefahren und dann abgeschaltet. Das BHKW wird hochgefahren, wenn der Bezug aus dem Netz 110 kW übersteigt. Die aktuelle Betriebsstrategie des BHKW orientiert sich am Bedarf. Wie in Abbildung 39 dargestellt, wird das BHKW tagsüber mit einer Leistung von rund 100 kW_{eI} betrieben. Aufgrund der Begrenzung der Rückspeisung in das Netz auf maximal 50 kW, wird das BHKW nachts heruntergefahren (vgl. Abbildung 39). Würde das BHKW auch nachts mit einer Leistung von rund 100 kW betrieben, so könnte die BHKW Erzeugung von Oktober bis Februar um rund 141 MWh erhöht werden. Der Netzbezug würde um 87 MWh reduziert, es entstehen zusätzliche Rückspeisungen in das Netz von 54 MWh. Mit dieser Betriebsstrategie wird die Grenze von 50 kW maximaler Netzeinspeisung, welche in Abstimmung mit dem Netzbetreiber festgesetzt worden ist, von etwa 1:00 Uhr bis 3:00 Uhr um bis zu 6 kW verletzt.

Wird jedoch der Batteriespeicher nachts zu dieser Zeit geladen und tagsüber in Zeiten von Netzbezug entladen, kann die 50 kW Grenze eingehalten werden. Die Verschiebung durch den Batteriespeicher führt von Oktober bis Februar weiterhin dazu, dass 24 MWh elektrische Energie nicht in das Netz eingespeist werden, sondern eigenverbraucht werden. Dies führt zu einem Autarkiegrad von 86% und einer Eigenverbrauchsquote von 63%.

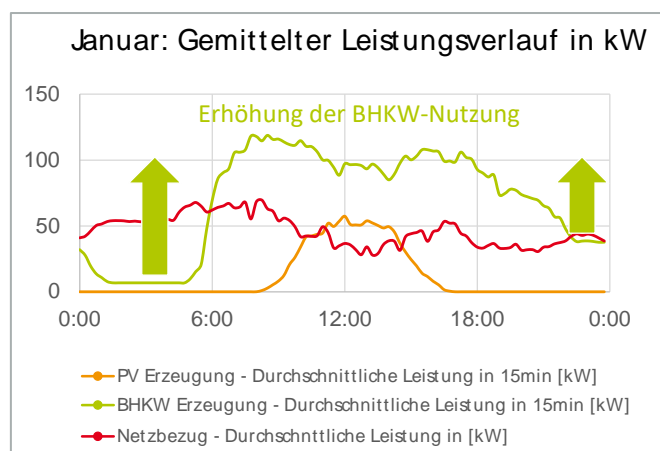


Abbildung 39: Gemittelter Leistungsverlauf von PV, BHKW und Netzbezug in einem Wintermonat

Durch die zukünftige Verwendung der PV-Anlagen als Eigenverbrauchsanlagen muss aus abrechnungsrelevanten Gründen gewährleistet sein, dass das BHKW keine Rückspeisungen mehr verursacht. Es ist dann eine Anpassung des Messkonzepts, oder alternativ die Erweiterung des Batteriespeichers zu prüfen, um diese Anforderung zu vermeiden bzw. der Anforderung gerecht zu werden.

Die Änderung der Betriebsweise des BHKW führt durch die Kraft-Wärme-Kopplung auch zu Auswirkungen bei der Wärmeversorgung des Standorts. Die benötigte Wärme wird im Wesentlichen durch das BHKW, sowie einen Pellet- und Gaskessel bereitgestellt. Wie in Abbildung 40 erkenntlich wird der Pelletkessel

aufgrund einer guten Ökobilanz bevorzugt betrieben. Der Gaskessel unterstützt bei Bedarf die Deckung der Wärmesenke.¹

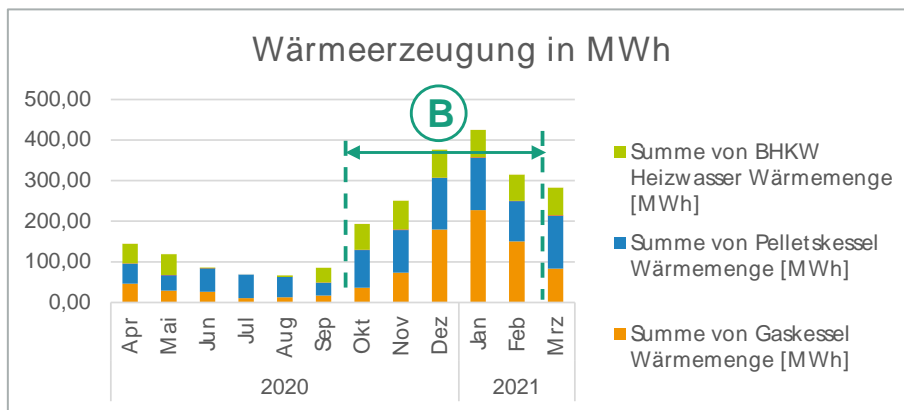


Abbildung 40: Bereitstellung der Wärme durch BHKW, Pellet- und Gaskessel

Abbildung 41 zeigt einen Tagesverlauf der Wärmeerzeugung des Gaskessels. Der Pelletkessel stellt während dieser Zeit eine Grundlast zur Verfügung, die durch das BHKW ergänzt wird. Es sind Spitzen aufgrund der Zuheizung durch den Gaskessel erkenntlich. Durch den erweiterten Betrieb des BHKW mit zusätzlichem nächtlichem erzeugtem Strom, können von Oktober bis Februar rund 191 MWh Wärme durch das BHKW außerdem gewonnen werden. Diese können beim ökobilanziell schlechter gestellten Gaskessel eingespart werden. Durch diese Substitution der Wärmeerzeugung des Gaskessels durch das BHKW sowie insbesondere durch die Nutzung von BHKW-Strom anstelle von Strom aus dem öffentlichen Netz, lässt sich ein jährliches Einsparpotenzial von rund 50 t CO₂-äqv. erzielen.

¹ Technologien mit kleinem Anteil an der Wärmebereitstellung sind aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht aufgeführt.

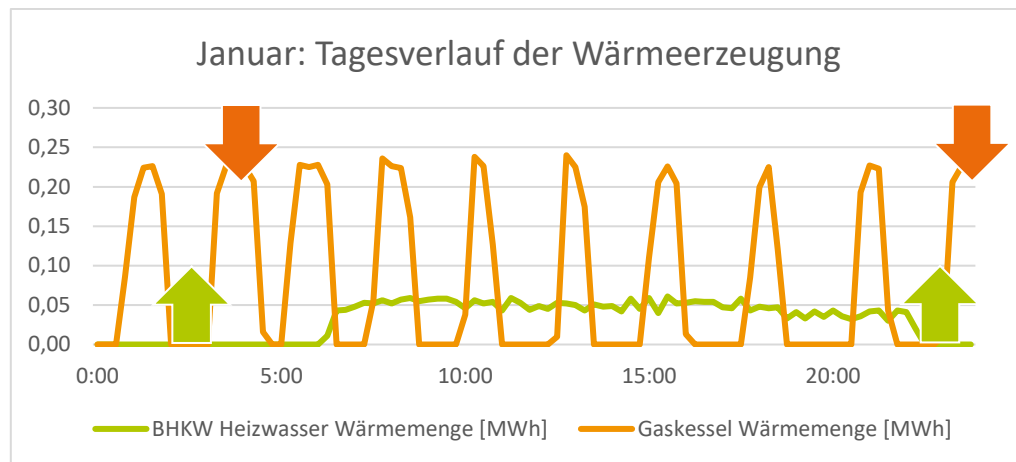


Abbildung 41: Tagesverlauf der Wärmeerzeugung mit skizzierter Reduktion von Erzeugungsspitzen des Gaskessels durch den Einsatz des BHKW auch bei Nacht

3.2.2.7 Energieflexibilität produktionsabhängiger Verbraucher

Analog zu der Erzeugungssituation im vorangegangenen Abschnitt wurden für die Quantifizierung des zusätzlichen Lastverschiebungspotenzials ebenfalls zwischen den beiden Betrachtungsfällen unterschieden:

- Betrachtungsfall A (April bis September): Es wird die Annahme getroffen, dass in diesem Zeitraum ausreichend eigenerzeugter Solarstrom vorhanden ist, um verschobene Aufträge am selben Tag nachzuholen, Schichtzeiten werden bei der Ermittlung des theoretischen Potenzials nicht berücksichtigt.
- Betrachtungsfall B (Oktober – März): Es wird die Annahme getroffen, dass die Erzeugung aus BHKW und PV-Anlagen nicht ausreichend ist, um zusätzliches Flexibilitätspotenzial zu nutzen.

Im Zeitraum von April bis September verbrauchen die produktionsabhängigen Verbraucher etwa 33 MWh Strom. Hiervon entfallen 79% auf den Laser, 13% auf die Lackierkabine und 8% auf die Sandstrahlkabine. Um das ungenutzte theoretische Lastverschiebungspotenzial zu ermitteln, wurde der Residuallastgang (orangene Kurve) berechnet, welcher sich aus der Differenz des Lastgangs der PV-Erzeugung und dem

Lastgang des Gesamtverbrauchs ergibt. Das ungenutzte Potenzial ist dann diejenige Energiemenge, welche in Zeiten negativer Residuallast – also in Zeiten des Netzbezugs – zur Deckung des Stromverbrauchs der produktionsabhängigen Verbraucher genutzt wurde. Abbildung 42 zeigt das theoretische ungenutzte Lastverschiebungspotenzial des Lasers an einem Beispieltag. Die graue Kurve zeigt den Strombedarf des Lasers, welcher mit Strom aus dem öffentlichen Netz gedeckt wurde. Durch Energieflexibilitätsmaßnahmen wie das Verschieben von Aufträgen in Stillstands- oder Stand By-Zeiten oder das Tauschen von energieintensiven mit weniger energieintensiven Aufträgen kann dieses Potenzial ganz oder teilweise genutzt werden.

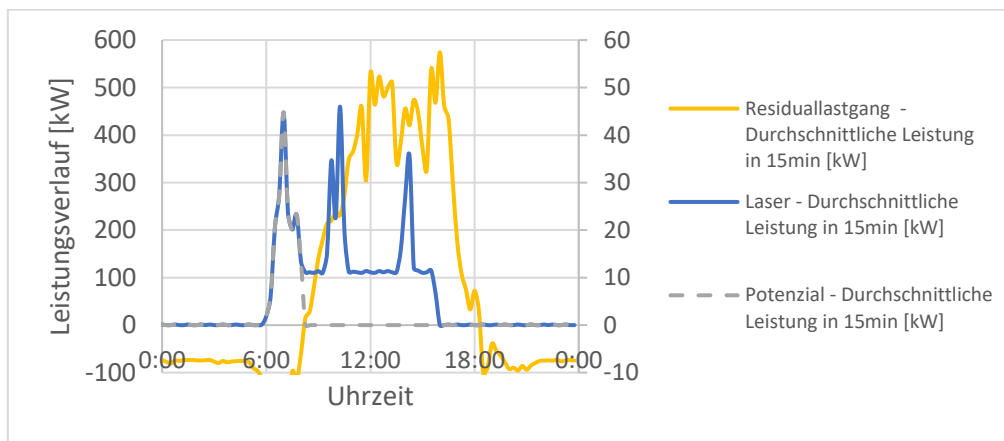


Abbildung 42: Theoretisches ungenutztes Lastverschiebungspotenzial Laser an einem Beispieltag

In den Sommermonaten wurde der Strombedarf von 33 MWh zu 55% durch PV-Strom, 10% durch BHKW-Strom und 35% aus Strom aus dem öffentlichen Netz gedeckt. 11.692 kWh Strom wurden zur Deckung des Bedarfs aus dem Netz bezogen, wobei die Annahme zugrunde gelegt wurde, dass die übrigen Verbraucher der Green Factory vorrangig mit eigenerzeugtem Strom gespeist wurden. Das ungenutzte theoretische Potenzial zur Lastverschiebung in PV-Überschuss-Zeiten betrug 14.915 kWh. Damit ist eine Einsparung von 4,5 t CO₂-äqv. und eine Erhöhung des Autarkiegrads um 1,01%-Punkte auf knapp 75% möglich. Dieses Potenzial zur Lastverschiebung ist zu etwa 77% der Laserschneideanlage zuzuordnen, wogegen die Lackierkabine und die Sandstrahlkabine lediglich mit etwas mehr als 10% ins Gewicht fallen. Insgesamt lässt

sich also sagen, dass der Strombedarf von Laser, Lackierkabine und Sandstrahlkabine zwar bereits zu einem Großteil mit eigenerzeugtem Strom gedeckt wurde, insbesondere die Laserschneidanlage aber noch zusätzliches ungenutztes Potenzial aufweist. In der praktischen Umsetzung kann dieses theoretische Potenzial jedoch von Randbedingungen wie Schichtzeiten oder Lieferterminen eingeschränkt sein. Die in Abschnitt 3.2.1.2 gezeigte Plantafel ermöglicht zukünftig die gezielte Erschließung und Nutzung dieses theoretischen Potenzials im Tagesgeschäft. Die Ergebnisse sind in Tabelle 9 zusammengefasst.

Tabelle 9: Lastverschiebungspotenzial der produktionsabhängigen Verbraucher

Betrachtungsfall A (April – September)	Wert	Einheit
Verbrauch	32.999	MWh
davon gedeckt mit PV-Strom	18.084	kWh
davon gedeckt mit BHKW-Strom	3.223	kWh
davon gedeckt mit Netzstrom	11.692	kWh
Lastverschiebung in PV-Überschusszeiten		
Lastverschiebungspotenzial	11.692	kWh
Erhöhung des Autarkiegrads	+ 1,01	%
Erhöhung der Eigenverbrauchsquote	+ 0,80	%
Treibhauspotenzial		
Mit aktueller Stromzusammensetzung	6,7	t CO ₂ -äqv./Jahr
Mit 100% PV-Strom	2,2	t CO ₂ -äqv./Jahr
Differenz (Einsparpotenzial)	4,5	t CO ₂ -äqv./Jahr

3.2.2.8 Energieflexibilität variabler Verbraucher

Die Vor-Ort-Erzeugung von Stickstoff und VE-Wasser hat zwei positive Effekte auf die Umweltwirkungen der Green Factory. Zum einen kann der eigenerzeugte Strom aus erneuerbaren Energien direkt genutzt werden, zum anderen werden Transportwege vermieden.

Im Messzeitraum wurden in der Green Factory 40.527 m³ Stickstoff erzeugt, hierzu wurden 140.160 m³ Druckluft und 7.532 kWh Strom für die Stickstoffherzeugung benötigt (siehe Abbildung 43). Dabei wurde auf

Basis der Marktpreise für Stickstoff, Druckluft, Wärme und Strom die Material- und Energieflüsse des Druckluftkompressors den erzeugten Produkten (Druckluft, Druckluft für Luftzerlegungsanlage, Wärme) mittels Preisallokation zugeordnet.

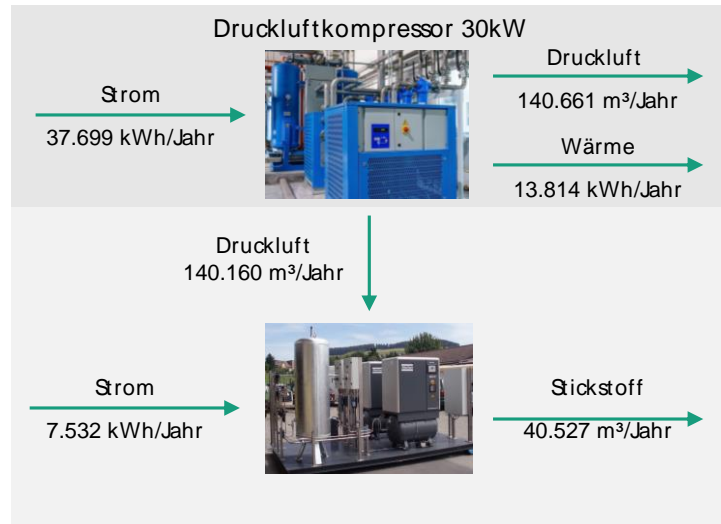


Abbildung 43: Übersicht der Energieflüsse der Druckluft- sowie Stickstoffherzeugung im Messzeitraum

Die Stromzusammensetzung für den Stickstoffgenerator sowie den Druckluftkompressor ist Tabelle 10 zu entnehmen.

Tabelle 10: Stromzusammensetzung Druckluftkompressor und Stickstoffgenerator im Messzeitraum

Stromzusammensetzung	BHKW	PV	Netz
Druckluftkompressor	34,04%	48,80%	17,17%
Stickstoffgenerator	35,97%	53,12%	10,91%

Mit der aktuellen Stromzusammensetzung verursacht die Stickstoffherzeugung Treibhausgasemissionen von 2,8 t CO₂-äqv. (preisallokiert). Durch die 100% Abdeckung des Stroms für Druckluft- und Stickstoffherzeugung mit PV-Strom ist eine weitere Reduktion der Treibhausgasemissionen um 1.2 t CO₂-äqv./Jahr möglich (siehe Tabelle 11). Aktuell werden bereits (unter den getroffenen Annahmen) 13,6 t CO₂-äqv. gegenüber dem

Fremdbezug eingespart (siehe Tabelle 12). Die Stickstoffherzeugung vor Ort trägt 2,02% zum Autarkiegrad und 1,36% zur Eigenverbrauchsquote bei.

Tabelle 11: Theoretisches Potenzial Luftzerlegungsanlage

	Wert	Einheit
Treibhauspotenzial		
Mit aktueller Stromzusammensetzung	2.853	kg CO ₂ -äqv./Jahr
Mit 100 % PV-Strom	1.570	kg CO ₂ -äqv./Jahr
Differenz (Einsparpotenzial)	1.283	kg CO ₂ -äqv./Jahr
Lastverschiebung in PV-Überschusszeiten		
Lastverschiebungspotenzial	822	kWh
Erhöhung des Autarkiegrads	+ 0,07	%
Erhöhung der Eigenverbrauchsquote	+ 0,06	%

Tabelle 12: Reduktion der Treibhausgasemissionen der Stickstoffherzeugung durch Eigenerzeugung

	Wert	Einheit
Transport		
Zusätzliche Anfahrten	4	Anzahl pro Monat
Entfernung einfach	21	km
Transportstrecke pro Jahr	2016	km
GWP Transport Diesel LKW ¹	0,0001	kg CO ₂ -äqv./kgkm
GWP Stickstoff (gasförmig) ¹	0,0804	kg CO ₂ -äqv./kg N ₂
Treibhauspotenzial		
Stickstoffherzeugung extern	4.073	kg CO ₂ -äqv./Jahr
Transport	12.460	kg CO ₂ -äqv./Jahr
SUMME	16.533	kg CO ₂ -äqv./Jahr
Differenz Eigenerzeugung zu Fremdbezug (Einsparpotenzial)	13.679	kg CO ₂ -äqv./Jahr

¹ Werte wurden der GaBi Datenbank Professional Version 8.7 SP42 entnommen

In der VE-Wasseranlage wurden im Messzeitraum 1.441 Nm³ vollentsalztes Wasser erzeugt. Mit einer 100% Stromeigenerzeugung ließe sich das Treibhauspotenzial der Vollentsalzungsanlage um weitere 489 kg CO₂-äqv. reduzieren. Das entspricht einem Reduktionspotential von 20,8% (siehe Tabelle 13). Die komplette Vermeidung des Netzbezugs ist jedoch durch Randbedingungen der Produktion wie dem Produktionshorizont und der Dauer zur Herstellung in Verbindung mit Lieferterminen begrenzt. Die aktuelle Auslastung ist demnach zu hoch, um das theoretische Potenzial vollständig zu nutzen.

Tabelle 13: Theoretisches Potenzial VE-Wasseranlage

	Wert	Einheit
Verbrauch	3.567	kWh
davon gedeckt mit PV-Strom	1.196	kWh
davon gedeckt mit BHKW-Strom	1.069	kWh
davon gedeckt mit Netzstrom	1.301	kWh
Treibhauspotenzial		
VE-Wasser Erzeugung IST Stromzusammensetzung	0,204	kg CO ₂ -äqv./kWh
VE-Wasser Erzeugung 100% Photovoltaik	0,067	kg CO ₂ -äqv./kWh
Erzeugte Menge VE-Wasser	1.441	kg VE-Wasser
Differenz (Einsparpotenzial)	489	kg CO ₂ -äqv./Jahr
Erhöhung Eigenverbrauch		
Erhöhung Eigenverbrauchsquote	+ 1.301	kWh
Erhöhung Autarkiegrad	+ 0,09	%
	+ 0,11	%

3.2.2.9 Betonpuffer zur Wärmespeicherung

Die Produktionshalle der Green Factory mit einer Grundfläche von 2800 m² wird über eine Industriefußbodenheizung geheizt. Bei einem Temperaturbereich von 20 bis 40°C kann der darunterliegende Speicher eine Wärmeleistung von etwa 5 MWh aufnehmen. Nach 40 h (5 Tage à 8 Stunden) ist die Betonplatte aufgeladen. Darüber hinaus kann die unter dem Betonpuffer liegende Erde

zusätzlich Wärme aufnehmen. Die gesamte Wärmeleistung ist ausreichend um das Gebäude mit ca. 35 W/m² Wärmebedarf (in Teillast) im Winter für ca. drei bis sechs Tage zu beheizen [13]. Für den Betonpuffer wurden im Messzeitraum keine Messungen durchgeführt, da keine aktuellen Daten zur Nutzung vorhanden sind. Die Erfahrungen der letzten Jahre haben jedoch gezeigt, dass der Betonpuffer vorrangig zur Kühlung und nur in seltenen Fällen zur Heizung genutzt wird. Dies ist darauf zurückzuführen, dass ein enormer Wärmeeintrag in den Betonpuffer notwendig ist, um diesen auf einem, für die Heizung notwendig, grundsätzlichen Niveau zu halten. Da keine Prozessabwärme zur Verfügung steht, die hierzu genutzt werden kann, sondern die Wärme extra erzeugt werden müsste, ist dies nicht rentabel.

3.2.2.10 Power-to-Heat: Wärme- und Kältepuffer mit Heizstäben

Die Green Factory verfügt über einen 100.000 Liter Pufferspeicher mit einer nutzbaren Kapazität von 90.000 Litern und einer maximalen Betriebstemperatur von 95°C. Dieser Wärme- und Kältespeicher ist ein Schichtspeicher mit gleichmäßiger Wärmeverteilung und Wasser als Speichermedium. Beladen werden kann der Speicher durch drei elektrische Heizstäbe (Power-to-Heat-Technologie) mit jeweils 200 kW sowie die übrigen Wärmeerzeuger der Green Factory. Der Pufferspeicher verfügt über acht Temperatursensoren, wobei die Temperatur von unten nach oben zunimmt. Die Wärmemenge im Speicher kann beschrieben werden durch:

$$Q = \rho * V * c * \Delta T \quad (4)$$

wobei ρ die Dichte, V das Volumen, c die Wärmekapazität und ΔT die Temperaturveränderung im Speicher darstellt. Die Wärmeerzeugungsanlagen der Green Factory werden abhängig von der Temperatur im Pufferspeicher gesteuert. Die Temperatur wird dabei so geregelt, dass 70°C Mindesttemperatur für den Betrieb der Lackierkabine gewährleistet sind und eine Überhitzung des BHKWs verhindert wird. Die Temperaturdifferenz im Speicher zwischen dem obersten und untersten Temperatursensor entspricht in

etwa 20 Kelvin. Für die Wärmekapazität des Pufferspeichers ergibt sich mit der spezifische Wärmekapazität von Wasser $c = 4,18 \frac{kJ}{kg \cdot K}$ und einer Dichte von $\rho = 1 \text{ kg/l}$ demnach:

$$Q = 90.000 \text{ kg} * 4,18 \frac{kJ}{kg \cdot K} * 20K = 7524 \text{ MJ} = 2,09 \text{ MWh} \quad (5)$$

Wenn das BHKW in Betrieb ist, sorgt dies für eine Wärmezufuhr von 240 kW_{th}. In dieser Zeit darf die Temperatur des untersten Sensors maximal 71°C betragen, um die Kühlung des BHKW durch eine ausreichend geringe Vorlauftemperatur zur gewährleisten. Um dies zu ermöglichen, muss eine ausreichende Wärmeabfuhr vorhanden sein. Die Wärmeabfuhr des Speichers ist jahreszeitabhängig – im Sommer kann das BHKW deshalb aktuell nur eingeschränkt betrieben werden, da der Wärmebedarf der Produktionshallen sowie des Nahwärmenetzes zu gering ist. Auch Pellet- und Gaskessel können den Speicher mit Wärme speisen. Sinkt die Temperatur am obersten Sensor unter die erforderlichen 70°C wird der Pelletkessel zugeschalten, bei einer Absenkung der Temperatur unter 68°C wird zusätzlich der Gaskessel betrieben. Im Winter soll das BHKW möglichst durchgehend betrieben werden, weshalb hierfür Puffer im Speicher vorgehalten wird. Im Messzeitraum konnte für die Wintermonate (Oktober bis März) eine durchschnittliche Temperaturdifferenz von $\Delta T = 17 \text{ K}$ und für die Sommermonate (April bis September) von $\Delta T = 11 \text{ K}$ ermittelt werden. Daraus ergibt sich die durchschnittlich im Pufferspeicher zwischengespeicherte Wärmemenge von:

$$\text{Winter: } Q = 90.000 \text{ kg} * 4,18 \frac{kJ}{kg \cdot K} * 17 \text{ K} = 6395 \text{ MJ} = 1,78 \text{ MWh} \quad (6)$$

$$\text{Sommer: } Q = 90.000 \text{ kg} * 4,18 \frac{kJ}{kg \cdot K} * 11 \text{ K} = 4138 \text{ MJ} = 1,15 \text{ MWh} \quad (7),$$

welche zur Versorgung des Green Factory Werksgeländes und weiterer Abnehmer des Gewerbegebiet Ungerhausen mittels Nahwärmenetz genutzt wird (siehe Abbildung 5). Diese Auswertung zeigt, dass sowohl im Winter als auch im Sommer noch Kapazität im Pufferspeicher vorhanden ist. Diese soll zukünftig dazu genutzt werden, überschüssigen PV-Strom mittels Nutzung der Heizstäbe zu speichern. Durch Nutzung der Heizstäbe anstatt des BHKWs im Frühjahr/Sommer ist beispielsweise eine höhere Temperatur im Speicher

fahrbar, da die Rückkühlung des BHKW nicht gewährleistet werden muss, und so zusätzliches Speicherpotenzial nutzbar ist. Aktuell befinden sich die Heizstäbe jedoch noch nicht in Betrieb. Zukünftig sollen diese aber zusätzliche Flexibilität schaffen und beispielsweise auch durch die Vermarktung als Regelleistung als Ausgleichsmaßnahme für Netzengpässe zur Verfügung stehen. Im Rahmen des Kopernikus-Projekts SynErgie werden das Potenzial der zur Verfügung stehenden Flexibilität sowie mögliche Steuerungskonzepte entwickelt. Die tatsächliche Nutzung ist jedoch abhängig von den wirtschaftlichen Rahmenbedingungen, welche aktuell die ökonomisch sinnvolle Nutzung für diesen Anwendungsfall nicht ermöglichen.

3.2.3 Maßnahmen im Bereich Energieeffizienz und Technologie

Neben der Flexibilisierung des Verbrauchs und der intelligenten Vernetzung und Steuerung der Erzeugungs-, Speicher-, und Verbrauchsanlagen können die Umweltwirkungen eines Produktionsstandorts insbesondere auch durch die Nutzung energieeffizienter Technologien gesenkt werden. Die in der Green Factory umgesetzten Effizienzmaßnahmen werden im Folgenden beschrieben.

3.2.3.1 Wärmerückgewinnung für Laserschneidanlagen und Kompressoren

Eine Maßnahme zur signifikanten Erhöhung der Energieeffizienz, welche in der Green Factory umgesetzt wurde, ist die Installation von Wärmerückgewinnungssystemen für Anlagen, welche große Abwärme verursachen. Hierzu wurde zum einen der Druckluftkompressor mit integriertem Wärmetauscher beschafft, zum anderen eine Brunnenkühlung für die Laserschneidanlage umgesetzt.

Laut der Deutschen Energieagentur können bis zu 90% der elektrischen Antriebsleistung von Druckluftkompressoren zur Heiz- oder Brauchwassererwärmung genutzt werden [14]. Erzeugte Druckluft wird durch Luft, Wasser oder Öl in einem Nachkühler gekühlt. Die dabei entstehende Abwärme sowie die Abwärme des Druckluftkompressors können zurückgewonnen werden. Laut eines Berichts, herausgegeben vom Bayerischen Landesamt für Umwelt, beläuft sich die Amortisationszeit für Plattenwärmetauschern zur

Wärmeeinspeisung in Heizsysteme laut Herstellerangaben auf ein halbes bis zwei Jahre [15]. Bei der Druckluftanlage in der Energieleitwarte handelt es sich um einen Schraubenkompressor der Firma Kaeser Kompressoren SE mit einer Bemessungsleistung von 30 kW, einem maximalen Betriebsdruck von 8,5 bar und einem Kältetrockner mit einer max. Leistungsaufnahme von 1,66 kW. Die Druckluftanlage verfügt über eine Luftkühlung sowie einen Plattenwärmetauscher zur Wärmerückgewinnung, welcher die vom Kühlöl aufgenommene Wärmemenge an ein Wärmeträgermedium übergibt. Die maximal verfügbare Wärmeleistung beträgt laut Herstellerangaben 26,6 kW bei einem Volumenstrom von 0,92 m³/h. Im Messzeitraum konnten so 13.814 kWh Nutzwärme aus der Abwärme erzeugt werden, welche sonst ungenutzt in die Umgebung abgegeben worden wäre. Dies entspricht 0,6% der gesamten Wärmeerzeugung im Nahwärmenetz. Hätte diese Wärmemenge aus anderen Erzeugungsanlagen zur Verfügung gestellt werden müssen, hätte dies zusätzliche Treibhausgasemissionen verursacht. Im Vergleich zu den übrigen Wärmeerzeugungsanlagen der Green Factory konnten so folgende Treibhausgasemissionen eingespart werden:

- 150 kg CO₂-äqv./Jahr im Vergleich zu Pelletkessel
- 377 kg CO₂-äqv. /Jahr im Vergleich zu BHKW
- 619 kg CO₂-äqv. /Jahr im Vergleich zu Gaskessel.

Daraus ergibt sich ein Reduktionspotenzial der Treibhausgasemissionen von 2,7% (für den Pelletkessel) bis 11,9% (für den Gaskessel) im Vergleich zu einer Drucklufterzeugung ohne Wärmerückgewinnung (Treibhauspotential: 4.863 kg CO₂-äqv./Jahr) und zusätzlicher Wärmeerzeugung.

Eine weitere häufige Abwärmequelle in Betrieben ist die Kühlung von Produktionsmaschinen, was im Projekt für die Laserschneideanlage relevant war. Die als Nebenprodukt erzeugte Energie in Form von Wärme wird häufig nicht zielgerichtet genutzt, stattdessen wird die anfallende Abwärme im Winter unkontrolliert in die Produktionshalle abgegeben und im Sommer aufwendig ins Freie geleitet. Eine Nutzung für die geregelte

Heizung oder Kühlung der Produktionshalle findet nicht statt. Mittels Wärmetauscher kann die Abwärme einer Maschinenkühlung beispielsweise zur Heizwassererwärmung nutzbar gemacht werden. Da in den meisten Fällen das Temperaturniveau sehr niedrig ist ($< 35^{\circ}\text{C}$), ist dies häufig nur in Kombination mit einer Wärmepumpe zur Temperaturerhöhung sinnvoll [15]. Handelt es sich um Wasserkühlungen kann die abgeführte Wärme zur Vorwärmung in das Heizsystem eingespeist werden [15].

Der in der Müller Produktions GmbH eingesetzte CO_2 -Laser benötigt eine effektive Kühlung des Lasers zur Minimierung von Temperaturschwankungen und Erhöhung der Maximalleistung der Anlage. Die Kühlung gewährleistet eine konstante Leistung des Lasers und so eine konstante Schnittqualität und Geschwindigkeit sowie eine erhöhte Lebensdauer [16]. Eine Wasserkühlung hat gegenüber einer Luftkühlung den Vorteil, dass sie einen konstanteren Wärmetransport gewährleistet und eine größere Wärmemenge abführen kann. Sie sind zudem unabhängiger von Klima und Umgebungstemperatur [16,17]. Sind also ein Kühlwassernetz und kein Nutzen für die warme Abluft in die Umgebung vorhanden, ist eine Wasserkühlung zur zielgerichteten Nutzung der Abwärme sinnvoll. Trotz des geringen elektrischen Wirkungsgrads von etwa 10% von CO_2 -Laserschneidanlagen, ist das Potenzial zur Abwärmerückgewinnung aufgrund der Konstruktion sowie niedrigen Temperaturniveaus begrenzt [18]. Eine technische Studie der TU Leuven analysiert die Möglichkeit zur Rückgewinnung eines Teils der Abwärme am Kondensator der Kühleinheit und ermittelt für einen 6 kW CO_2 -Laser unter Vollast eine Kondensationsabwärme von $Q = 65,4 \text{ kW}$ und bei 75% von 54,4 kW [18]. Bei Abführung dieser Abwärme bei 75% Laserleistung mittels konventioneller Kältemaschine mit Coefficient of Performance (COP) = 4 wäre eine elektrische Antriebsleistung von 13,6 kW nötig. Im Gegensatz dazu verfügt die thermische Brunnenanlage über einen COP von 12 und arbeitet somit deutlich effizienter [19]. Durch die Einbindung der Laserschneidmaschine in den Kühlkreislauf der Brunnenkühlung kann die notwendige Kühlung des Lasers effizient umgesetzt werden sowie die Abwärme abtransportiert werden. Im ursprünglichen Wärmekonzept hat die Abwärme des Lasers über den Kühlkreislauf die Primärseite der Wärmepumpe versorgt. Im aktuellen Konzept, in welchem die

Wärmepumpe nur als Absicherung dient, wird der Laser lediglich über die Brunnenkühlung effizient gekühlt [9]. Hierzu ist nur die elektrische Leistung der Brunnen-, Kühlkreis-, sowie Laserkühlpumpe notwendig. Bei 2.240 Betriebsstunden der Kühlpumpe des Lasers im Messzeitraum ergibt dies eine Einsparung von 24.044 kWh Strom im Messzeitraum im Vergleich zu einer Luftkühlung (siehe Tabelle 14). Dieser Berechnung liegt eine grobe Kalkulation anhand vorliegender Daten zu Betriebsstunden und der aufgenommenen Leistung der Pumpen zu Grunde. Für eine detaillierte Betrachtung der Einsparpotenziale sind in weiteren Arbeiten detaillierte Messdaten zu den Energieverbräuchen der einzelnen Anlagenkomponenten zu erfassen und in die Berechnungen einzubeziehen.

Tabelle 14: Vergleich Stromverbrauch Luftkühlung vs. Wasserkühlung Laser

	Wert	Einheit
Leistung konventionelle Kältemaschine mit COP 4 (Annahme Kondensationsabwärme bei 75% Laserleistung)	13,6	kW
Mittelwert Leistung Pumpen in Betrieb ¹	2,87	kW
Betriebsstunden Kühlpumpe Laser	2.240	h
Energieverbrauch Wasserkühlung Laser	6.430	kWh
Energieverbrauch Luftkühlung Laser (Referenz)	30.464	kWh
Einsparung Stromverbrauch	24.034	kWh

3.2.3.2 Platzsparendes, vollautomatisches Hochregallager

Die zentrale Positionierung des Hochregallagers in der Mitte der Produktionshalle führt zu einem signifikant verringerten Transportaufkommen. Transportaufwände fallen nur beim Füllen des Lagers an, da die

¹ Anhand des Monats Dezembers wurde die durchschnittliche Leistung der Brunnenpumpen, der Kühlkreispumpe, sowie der Laserpumpe abgeschätzt. Es wurde angenommen, dass in diesem Zeitraum der Einfluss von Nebenprozessen minimal ist.

Entnahme automatisiert direkt an die Fertigungsanlagen erfolgt (siehe Abbildung 44). Die für die Quantifizierung des Einsparpotenzials der mit dem Transport einhergehenden Treibhausgasemissionen getroffenen Annahmen und der daraus resultierende Kraftstoffverbrauch ist in Tabelle 15 übersichtlich dargestellt. Es wird angenommen, dass für drei Anlieferungen pro Monat je zehn Transportfahrten vom Anlieferungsfahrzeug hin zur Position der Einlagerung am Hochregallager notwendig sind. Für jede dieser Fahrten mit einer Strecke von etwa 30 Metern und dem Einsatz der Hub- und Neigefunktion wird eine Dauer von einer Minute angenommen. Für die durch die Anschaffung eines vollautomatischen Hochregallagers vermiedene manuelle Entnahme wird der Mehraufwand mit Faktor 5 des Einlagerungsaufwands abgeschätzt. Dies liegt darin begründet, dass eine hochkante Lagerung der Bleche aufgrund von Platzgründen mit einem erhöhten Handhabungsaufwand einherginge. Durch die vermiedenen Transportaufwände zur Entnahme wurden im Betrachtungszeitraum unter den getroffenen Annahmen etwa 138 Liter Dieselmotorkraftstoff eingespart.

Tabelle 15: Annahmen und resultierender Kraftstoffverbrauch Transportaufwände

Kennzahl	Wert	Einheit
Annahmen Einlagerung		
Anzahl Anlieferungen pro Monat	3	Stück
Anzahl Transportfahrten pro Anlieferung	10	Stück
Anzahl Transportfahrten Einlagerung im Betrachtungszeitraum	360	Stück
Transportaufwand pro Fahrt	0,0167	h
Transportaufwand Einlagerung	6	h
Annahmen Entnahme		
Faktor Transportaufwand Entnahme	x 5	
Transportaufwand Entnahme	30	h
Kraftstoffverbrauch		
Kraftstoffverbrauch Stapler nach VDI Testzyklus (VDI 2198:2002) [20]	4,6	l/h
Kraftstoffverbrauch Einlagerung	27,6	l

Kraftstoffverbrauch Entnahme	138	l
Summe Kraftstoffverbrauch ohne Maßnahme	165,60	l
Summe Kraftstoffverbrauch mit Maßnahme	27,6	l

Mit den in Tabelle 16 dargestellten Werten ergibt sich eine Reduktion der Treibhausgasemissionen von etwa 422 kg CO₂-Äquivalenten (siehe Tabelle 17). Bisher kommt aufgrund der ursprünglich geplanten Nutzung des Staplers im Winter als Räumfahrzeug kein Elektrostapler zum Einsatz, da der Stapler deshalb auch bei Minusgraden im Freien verwendbar sein musste. In der Erweiterung des Lagerkonzeptes im Jahr 2020 wurde dann jedoch auf Elektrostapler gesetzt

Tabelle 16: Werte

Kennzahl	Wert	Einheit
Spezifische Dichte Diesel	0,86	kg/l
Heizwert Dieseldieselkraftstoff 2019 [21]	10.186	[kcal/kg]
Energiedichte	11,85	[kWh/kg]
GWP DE Diesel Mix ab Tankstelle ¹	0,329	kg CO ₂ -äqv./kg Diesel
GWP Verbrennung von Diesel ^{1,2}	3,24	kg CO ₂ -äqv./kg Diesel
Primärenergieverbrauch Diesel (nicht reg Ressourcen; unterer Heizwert)	47,9	MJ/kg Diesel

Tabelle 17: Treibhausgaspotenzial- und Energieeinsparungen Hochregallager

Kennzahl	Wert	Einheit
Treibhausgasemissionen		
Ohne Maßnahme	505,98	kg CO ₂ -äqv.
Mit Maßnahme	84,33	kg CO ₂ -äqv.

¹ Werte wurden der GaBi Datenbank Professional Version 8.7 SP42 entnommen

Einsparung	421,65	kg CO ₂ -äqv.
Energieeinsparung		
Primärenergieeinsparung	5.663	MJ

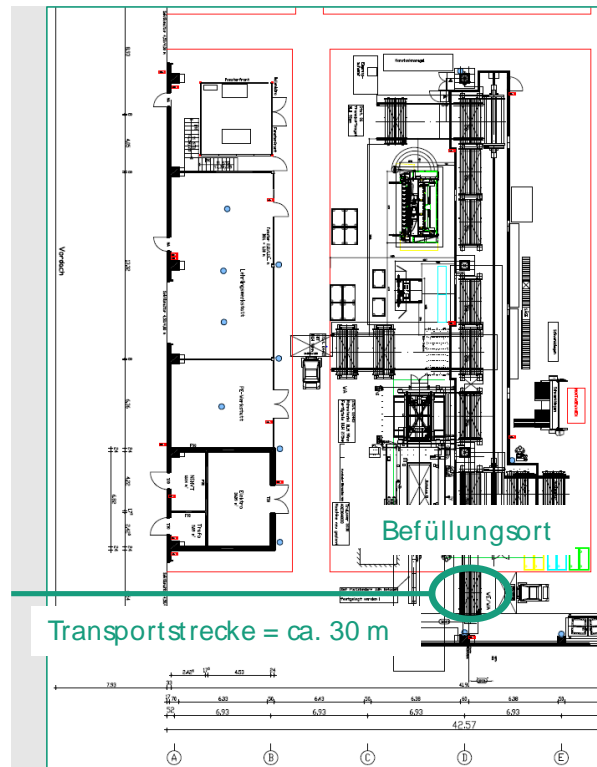


Abbildung 44: Zentrales Hochregallager in der Mitte der Produktionshalle

3.2.3.3 Tageslichtadaptive LED-Beleuchtung

In der Green Factory Allgäu wird energieeffiziente Beleuchtung in Form von LED-Beleuchtung mit Tageslichtadaption in den Produktionshallen eingesetzt. Verbaut wurden LEDs mit einer initialen Lichtausbeute von 167 lm/W. Eine Studie des Fraunhofer ISE und des Instituts für Ressourceneffizienz und Energiestrategien (IREES) zeigt, dass durch energieeffiziente Beleuchtungssysteme hochrentable Energieeinsparpotenziale in Unternehmen bestehen, wobei die Umsetzung dieser Maßnahme mit vergleichsweise geringer Komplexität verbunden ist [22]. Neben den Einsparpotenzialen nennen die Autor*innen vor allem auch die Steigerung des Komforts der Mitarbeiter*innen durch die Anpassung der

Beleuchtung an das einfallende Tageslicht, bis die gewünschte Beleuchtungsstärke erreicht wird, als Vorteil intelligenter Beleuchtungssysteme. Auf Basis von Daten aus rund 1.000 Unternehmen mit über 9.000 vorgeschlagenen Energieeffizienzmaßnahmen ermitteln die Autor*innen für Unternehmen mit 251 bis 500 Beschäftigten ein jährliches Einsparpotenzial von 255 kWh pro Mitarbeiter*in durch den Austausch der Beleuchtungsanlage sowie 98 kWh durch die Optimierung der Beleuchtungskomponenten und Lichtmanagement. Die mittlere jährliche Stromeinsparung pro Jahr in der Branche „Herstellung von Metallerzeugnissen“ wird für den Austausch der Beleuchtungsanlage mit 53 MWh/Jahr und für die Optimierung von Beleuchtungskomponenten mit 66 MWh/ Jahr angegeben [22]. Abbildung 45 zeigt den Stromverbrauch für die Beleuchtung in der Fertigungshalle im Messzeitraum. Die monatliche Auswertung zeigt, dass der Stromverbrauch in den Sommermonaten geringer ausfällt als in den Wintermonaten, was auf die implementierte Tageslichtadaption zurückzuführen ist. Im Messzeitraum hatte die Beleuchtung einen Stromverbrauch von 51.283 kWh.

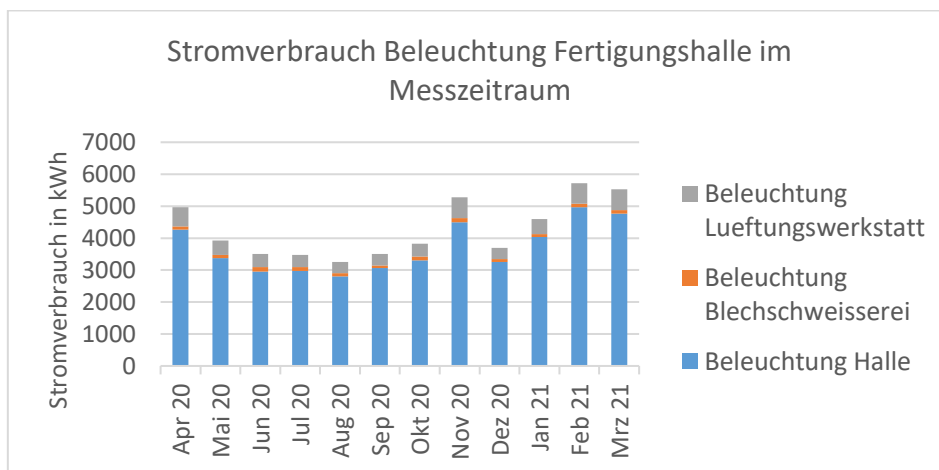


Abbildung 45: Stromverbrauch Beleuchtung der Fertigungshalle im Messzeitraum

Allerdings ist der Einfluss der Tageslichtadaption in den Messdaten des Messzeitraums nicht ersichtlich (siehe Abbildung 46 links). Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Steuerung im Messzeitraum fehlerhaft war. Deshalb wurde zusätzlich für die Beleuchtung der Halle ein Lastgang aus dem Jahr 2018 ausgewertet, in

welchem der Effekt der Tageslichtadaptation sichtbar ist (siehe Abbildung 46 rechts). Dieser durch einen Programmfehler verursachte Defekt wurde in der Zwischenzeit behoben.

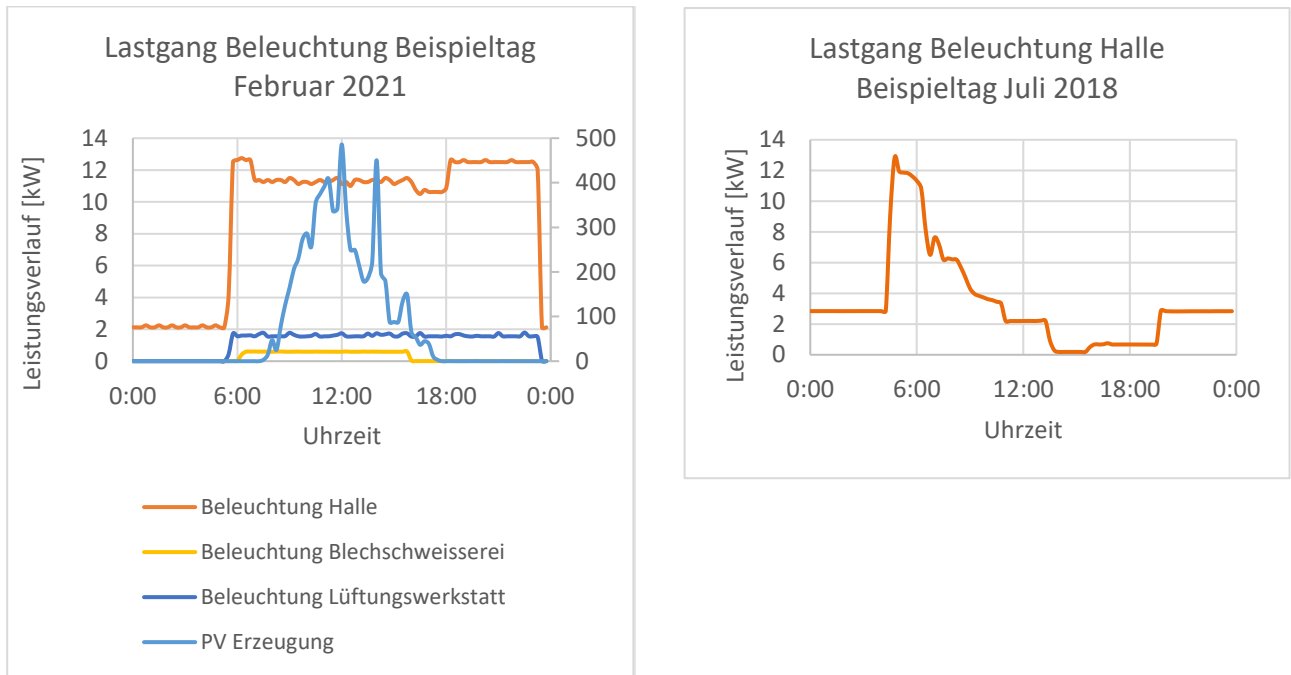


Abbildung 46: Lastgang Beleuchtung an einem Beispieltag im Februar 2021 (links) und an einem Beispieltag im Juli 2018 (rechts)

3.2.4 Störungen der Projekttechnik im Messzeitraum

Die im Messzeitraum aufgetretenen Störungen der Anlagen sowie der Messtechnik, welche Einfluss auf die Auswertungen hatten sind in Tabelle 18 aufgelistet. Fehlende Messwerte wurden auf Basis der Daten aus dem übrigen Messzeitraum abgeschätzt.

Tabelle 18: Störungen der Projekttechnik im Messzeitraum

Messpunkt/ Anlage	Zeitraum	Beschreibung	Ausfalldauer	Auswirkungen auf Produktion
Kühlpumpe Laser	01.04.2020 bis 15.05.2020	Vorsehentliche Deaktivierung des Messpunkts bedingt durch die	45 Tage	Keine Auswirkungen auf die Produktion

		Softwaremigration der Messtechnik bei der Erweiterung der Energiedatenerfassung		
Stickstoffanlage	13. bis 14.06.2020	Störung des Hochdruckverdichters der Stickstoffanlage: im Betrieb lief die Anlage daraufhin zunächst auf Druckhaltung des Vorratstanks, der den Verdichter speist; Bündeldruck nahm ab	2 Tage	Aufgrund des Ausfalls musste bei Wiederinbetriebnahme der Mindestdruck in den Stickstoffbündeln zuerst wieder erreicht werden, dadurch kein Lastmanagement möglich; keine Auswirkungen auf die Produktion
Stickstoffanlage	07.09.2020 bis 14.09.2020	Störung Stickstoffanlage, defekter Speicher in der Steuereinheit	8 Tage	Zwischenpuffer über extern bezogenen Stickstoff nötig; keine Auswirkungen auf die Produktion
Stickstoffanlage	27.12.2020 bis 11.01.2021	Störung der Stickstoffanlage führte zu Werteabbruch und Stillstand bis 11.01.2021 aufgrund Feiertage/Urlaub	15 Tage	Aufgrund des Ausfalls musste bei Wiederinbetriebnahme der Mindestdruck in den Stickstoffbündeln zuerst wieder erreicht werden, dadurch kein Lastmanagement möglich.; keine Auswirkungen auf die Produktion
Diverse Messpunkte	16.01.2021 bis 18.01.2021	Ausfall/Fehler bei diversen Messungen (z.B. PV Bürogebäude u. Verwaltung; BHKW), Ursache unklar	3 Tage	Keine Auswirkungen auf die Produktion
PV-Anlage 750 kWp	16.01.2021 bis 22.02.2021	Nach Ausfall der Messungen am 16.01. fehlerhafte Messdaten	7 Tage	Keine Auswirkungen auf die Produktion

3.3 Umweltbilanz des Gesamtsystems

Zur Bewertung der Umweltbilanz des Gesamtsystems wird das Treibhauspotenzial quantifiziert. Zudem wird der Primärenergieverbrauch¹ ausgegeben - dieser führt alle entnommenen Ressourcen zu einer Einheit zusammen, beschreibt selbst jedoch keine Umweltwirkung. Die zugrundeliegenden Werte für die Umweltbilanz wurden der GaBi Datenbank Professional Version 8.7 SP42 (2021.01) entnommen. Für die Energieerzeugung wurden die jeweilige Anlagenherstellung (unter Berücksichtigung der Nutzungsdauer), die Anlagennutzung und die Entsorgung berücksichtigt. Die Berechnung des Treibhauspotentials erfolgte anhand des Charakterisierungsmodells CML 2001 (Jan. 2016). Der Primärenergiebedarf entspricht dem kumulierten Energieaufwand (KEA) nach der VDI-Richtlinie 4600, wobei nur der Primärenergiebedarf der nicht regenerativen Ressourcen ausgewiesen wird.

Wie zuvor beziehen sich die Ergebnisse auf ein Unternehmen mit einem jährlichen Umsatz der Fertigung von 5,3 Mio. Euro und ca. 18 T Maschinenstunden pro Jahr.

3.3.1 Definition der betrachteten Szenarien

Für eine detailliertere Bewertung der Maßnahmen sowie eine Abschätzung des zukünftigen Einsparpotenzials hinsichtlich der Treibhausgasemissionen insbesondere in der Stromversorgung wurden verschiedene Szenarien definiert (siehe Tabelle 19 und Tabelle 20). Als Vergleichsbasen dienen das Referenzszenario, welches einem konventionellem Energieversorgungskonzept (Strom-Mix Deutschland, thermische Energie aus Erdgas) entspricht, der Ausgangs-Zustand der Müller Produktions GmbH vor Projektstart, d.h. die Verwendung des spezifischen Green Factory Mix für die Strom- und Wärmeversorgung und der IST-Zustand der Müller Produktions GmbH nach dem Forschungsprojekt, der bereits einige Anlagen

¹ Primärenergie ist Energie, die der Umwelt entnommen und einem technischen System zugeführt wird.

zur Flexibilisierung und zur vermehrten Nutzung des eigenerzeugten PV-Stroms beinhaltet. Alle Maßnahmen wurden innerhalb des Berichtszeitraums umgesetzt. Darauf aufbauend beinhaltet Szenario 1 die unterschiedlichen Flexibilitätsmaßnahmen, die letztendlich nur durch die Einführung von Erzeugungsprognosen und der Planungs- und Steuerungssysteme (Produktion und Gebäudeleittechnik) umgesetzt werden können sowie die Einbindung der Laserschneidmaschine in den Kühlkreislauf der Brunnenkühlung. Da sich dieses Szenario ausschließlich auf den Strombedarf auswirkt, entspricht wärmeseitig Szenario 1 dem IST-Zustand. Szenario 2 beinhaltet den optimierten Betrieb des beschafften Batteriespeichers in den Sommermonaten, welches aufgrund der verzögerten Inbetriebnahme ein zukünftiges Einsparpotential darstellt. Dies gilt auch für Szenario 3, welches das weitere Reduktionspotential der Treibhausgasemissionen durch den vermehrten Einsatz des BHKW untersucht.

- Referenz: Stromversorgung mit Strom-Mix Deutschland, Wärmeversorgung mittels Erdgas
- Ausgangs-Zustand: Im Vergleich zur Referenz wird der Green Factory Mix für die Energieerzeugung betrachtet. Dies entspricht dem Zustand vor Projektstart (vgl. Kapitel 3.2.2.1 und 3.2.2.2).
- IST-Zustand: Zusätzlich zum Ausgangs-Zustand ist die dezentrale Stickstoffherzeugung durch eine Luftzerlegungsanlage, die Einführung eines zentralen Hochregallagers und die Wärmerückgewinnung bei der Druckluftherzeugung berücksichtigt (vgl. Kapitel 3.2.3.1 und 3.2.3.2).
- Szenario 1: Zusätzlich zum IST-Zustand ist eine vermehrte Lastverschiebung produktionsabhängiger Verbraucher sowie die Einführung einer Wasserkühlung bei der Laserschneidanlage berücksichtigt (vgl. Kapitel 3.2.2.7 und 3.2.2.8).

- Szenario 2: Zusätzlich zu Szenario 1 ist eine vermehrte Nutzung des Batteriespeichers zur Eigenverbrauchserhöhung des PV-Stroms (in den Sommermonaten) berücksichtigt (vgl. Kapitel 3.2.2.5).
- Szenario 3: Zusätzlich zu Szenario 2 ist eine vermehrte Nutzung des Batteriespeichers und des BHKWs zur Eigenverbrauchserhöhung des BHKW-Stroms (in den Wintermonaten) sowie vermehrte Erzeugung von BHKW-Strom in Zeiten der Unterdeckung (vgl. Kapitel 3.2.2.6) berücksichtigt.

Tabelle 19: Szenarien der Versorgungssituation Strom

Maßnahmen	Referenz	Ausgangs-Zustand	Ist-Zustand	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Erzeugung & Flexibilisierung						
Energieerzeugung	Netzbezug	Green Factory Mix	Green Factory Mix	Green Factory Mix	Green Factory Mix	Green Factory Mix
Vermehrte Lastverschiebung (variable Verbraucher, Laserschneid- und Vollentsalzungsanlage)				X	X	X
Vermehrte Nutzung Batterie-speicher					X	X
Luftzerlegungsanlage			X	X	X	X
Vermehrte BHKW-Nutzung						X
Effizienz & Technologie						
Wassergekühlte Laserschneidanlage				x	x	x

Auch für die Detailbetrachtung der Wärmeversorgung wurden analog zur Stromversorgung verschiedene Zukunftsszenarien definiert (siehe Tabelle 20). Die vermehrte Nutzung des Batteriespeichers sowie des BHKWs (Szenario 2, Szenario 3) führen nicht nur auf der Stromseite zu Veränderungen des Erzeugungsmix, sondern auch auf der Wärmeseite.

Tabelle 20: Szenarien der Versorgungssituation Wärme

Maßnahmen	Referenz	Ausgangs-Zustand	Ist-Zustand	Szenario 1 (wie Ist-Zustand)	Szenario 2	Szenario 3
Erzeugung & Flexibilisierung						
Energieerzeugung	Thermische Energie aus Erdgas	Green Factory Mix	Green Factory Mix	Green Factory Mix	Green Factory Mix	Green Factory Mix
Vermehrte BHKW-Nutzung						X
Effizienz & Technologie						
Wärmerückgewinnung beim Druckluft-kompressor	Keine Wärmerück-gewinnung	Keine Wärmerück-gewinnung	Wärmerück-gewinnung	Wärmerück-gewinnung	Wärmerück-gewinnung	Wärmerück-gewinnung

3.3.2 Vergleich mit konventioneller Energiebeschaffung

Im Messzeitraum betrug das Treibhauspotential des Green Factory Strom-Mix 0,164 kg CO₂-äqv. pro kWh Strom, was einer Reduktion gegenüber dem deutschen Strom-Mix von 64% entspricht. Auch bezüglich der Primärenergie ist eine erhebliche Einsparung von 35% gegenüber dem aus dem Netz bezogenen Strom möglich (siehe Abbildung 47).

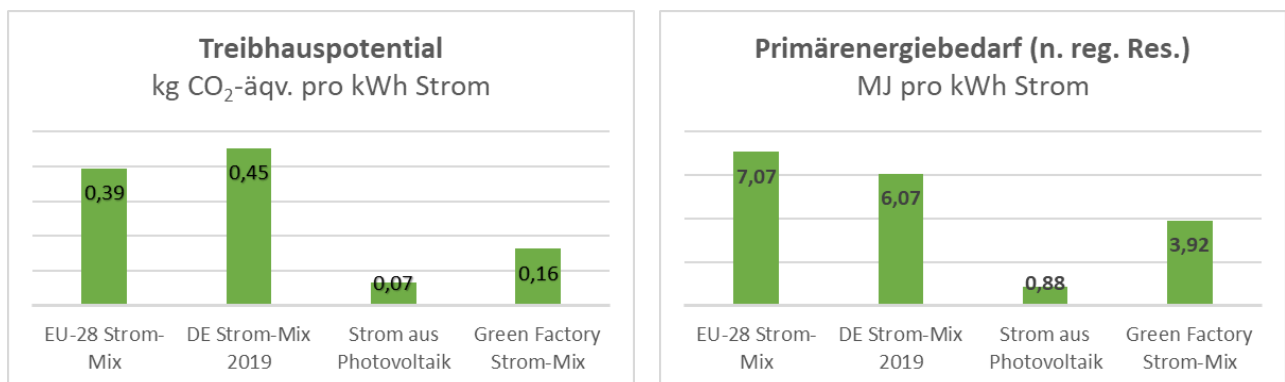


Abbildung 47: Vergleich des Treibhauspotenzials (links) sowie des Primärenergieverbrauchs (rechts) pro kWh Strom des Green Factory Strom-Mix mit konventioneller Strombeschaffung

Auf Basis dieser ermittelten Treibhausgas- sowie Primärenergiefaktoren können die absolut im Betrachtungszeitraum vermiedenen Treibhausgasemissionen sowie der reduzierte Primärenergieverbrauch

ermittelt werden. Im Vergleich zum reinen Bezug des Stroms aus dem deutschen Stromnetz vermeidet die Green Factory 334 t CO₂-äqv. pro Jahr und spart 2.496 GJ Primärenergie pro Jahr ein (siehe Abbildung 48).

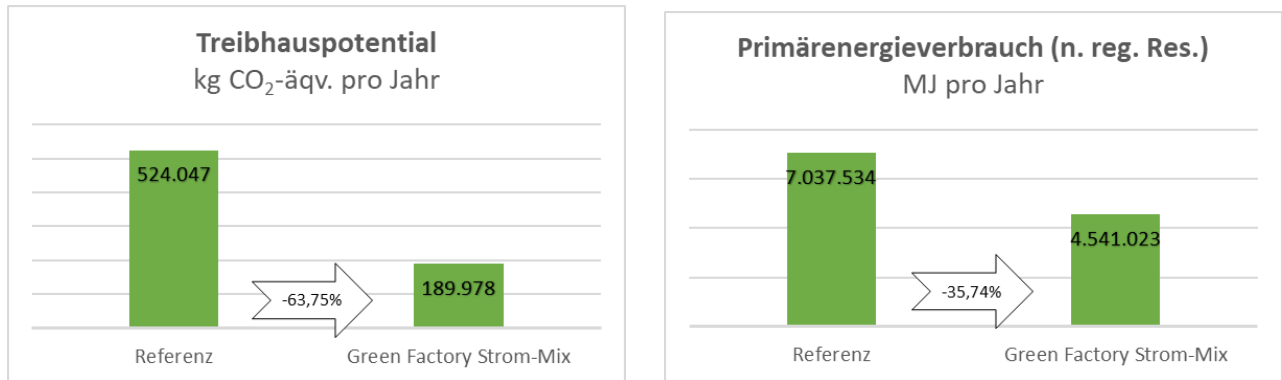


Abbildung 48: Vermiedene Treibhausgasemissionen (links) sowie reduzierter Primärenergieverbrauch (rechts) der Stromversorgung im Betrachtungszeitraum

Auch der Green Factory Wärme-Mix spart erhebliche Treibhausgasemissionen im Vergleich zum Fernwärme Mix sowie zur Gewinnung von thermischer Energie aus Erdgas ein (siehe Abbildung 49).

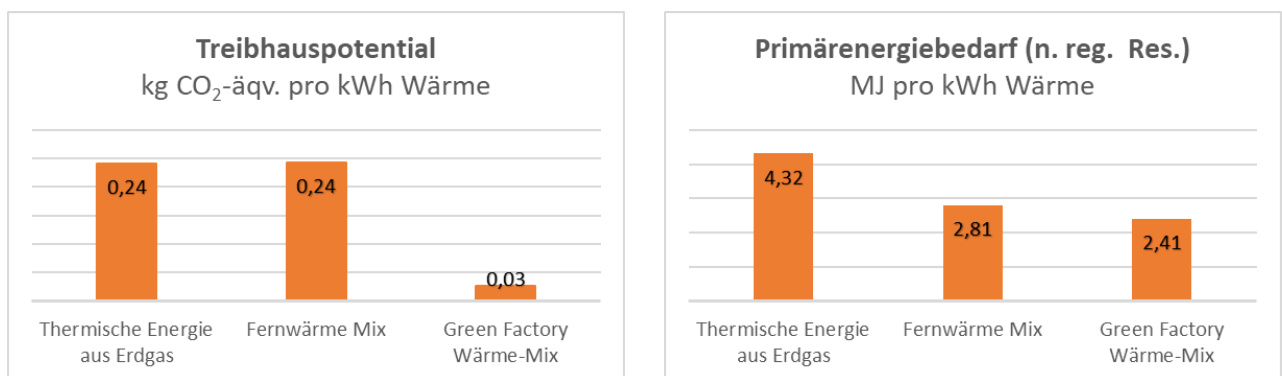


Abbildung 49: Vergleich des Treibhauspotenzials (links) sowie des Primärenergieverbrauchs (rechts) pro kWh Wärme des Green Factory Wärme-Mix mit konventioneller Wärmebeschaffung

Im Vergleich zur 100%-igen Wärmeversorgung durch Erdgas ermöglicht der Green Factory Wärme-Mix die Reduktion der Treibhausgasemissionen um 521 t CO₂-äqv. im betrachteten Jahr (inkl. der Wärmeerzeugung für das Nahwärmenetz). Dies entspricht einer Reduktion um 89% sowie eine Primärenergieeinsparung von 4.645 GJ pro Jahr (44%) (siehe Abbildung 50).

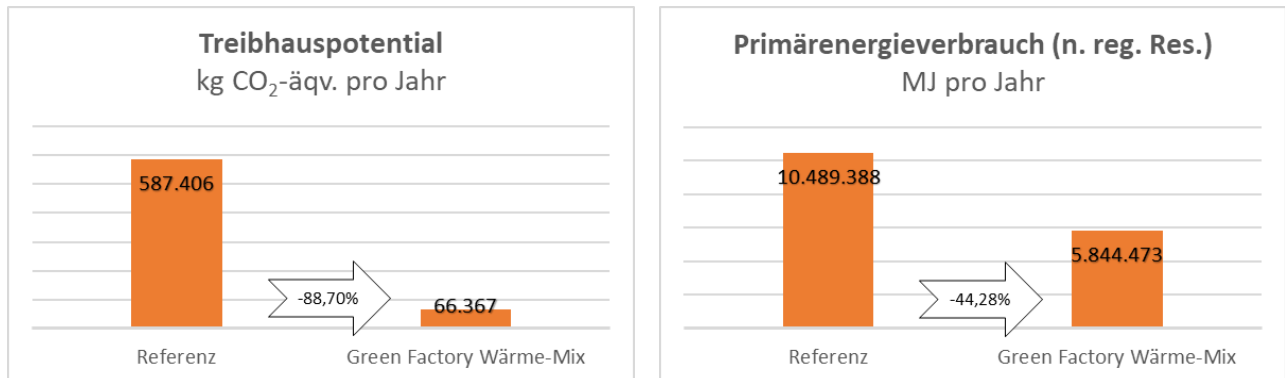


Abbildung 50: Vermiedene Treibhausgasemissionen (links) sowie reduzierter Primärenergieverbrauch (rechts) der Wärmeerzeugung im Betrachtungszeitraum

3.3.3 Umweltbilanz der Stromversorgung

Für die detaillierte Betrachtung der Umweltbilanz der Stromversorgung werden die Szenarien aus Kapitel 3.3.1 zur Hilfe genommen. Abbildung 51 zeigt die Zusammensetzung des Stromverbrauchs der Referenz ohne Anschaffung der Luftzerlegungsanlage und des Batteriespeichers. Insgesamt umfassen die flexibilisierbaren Verbraucher 8% des gesamten Strombedarfs der Müller Produktions GmbH. Mit 5% fallen insbesondere die produktionsabhängigen variablen Verbraucher ins Gewicht.

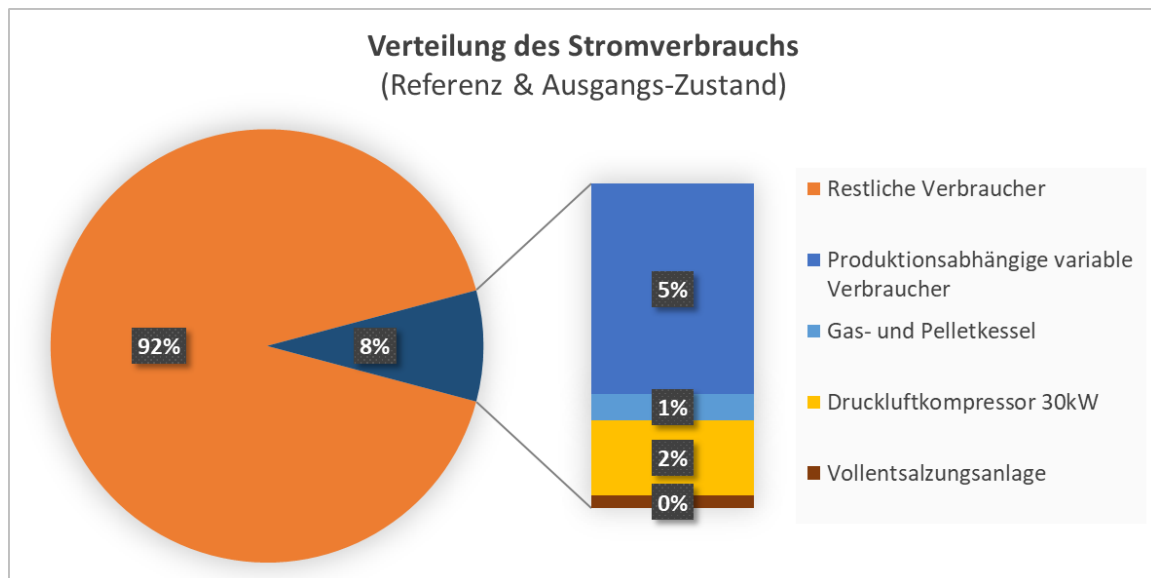


Abbildung 51: Zusammensetzung des Stromverbrauchs Ausgangsbasis

Im Vergleich zum Referenzszenario bzw. dem Ausgangs-Zustand ist der IST-Zustand durch einen leicht erhöhten Stromverbrauch und leicht erhöhte strombezogene Treibhausgasemissionen gekennzeichnet. Dies ist auf die Vorort-Erzeugung von Stickstoff mittels der Luftzerlegungsanlage in der Green Factory zurückzuführen. Szenario 1 mit zusätzlicher Lastverschiebung und einer wassergekühlten Laseranlage führt hingegen zu einer geringfügigen Reduktion des Stromverbrauchs. Beide Maßnahmen reduzieren die Treibhausgasemissionen um insgesamt 5,4% i.V. zum IST-Zustand. Die vermehrte Nutzung des Batteriespeichers zur Eigenverbrauchserhöhung (Szenario 2) führt zu einer Erhöhung des Stromverbrauchs (+1,4%), resultiert jedoch in einer weiteren Treibhausgasemissionsreduktion von 2,4%. Mit einer vermehrten Erzeugung von BHKW-Strom in den Wintermonaten sowie einer Speicherung des überschüssigen BHKW-Stroms ist eine weitere deutliche Reduktion der strombezogenen Treibhausgasemissionen um 25% möglich (siehe Abbildung 52 und Abbildung 53). Da es sich bei den in den Szenarien betrachteten Maßnahmen um Maßnahmen zur Flexibilisierung und nicht zur Reduktion des Stromverbrauches handelt, bleibt dieser über alle Szenarien hinweg nahezu konstant, lediglich der Mehraufwand für die entsprechenden Technologien kommt hinzu. Durch die Lastverschiebung und Speicherung verschieben sich jedoch die Anteile des

genutzten Strom-Mix hin zu einer vermehrten Nutzung erneuerbarer Energien und somit zu einer weiteren Reduktion der strombezogenen Treibhausgasemissionen (siehe Abbildung 54).

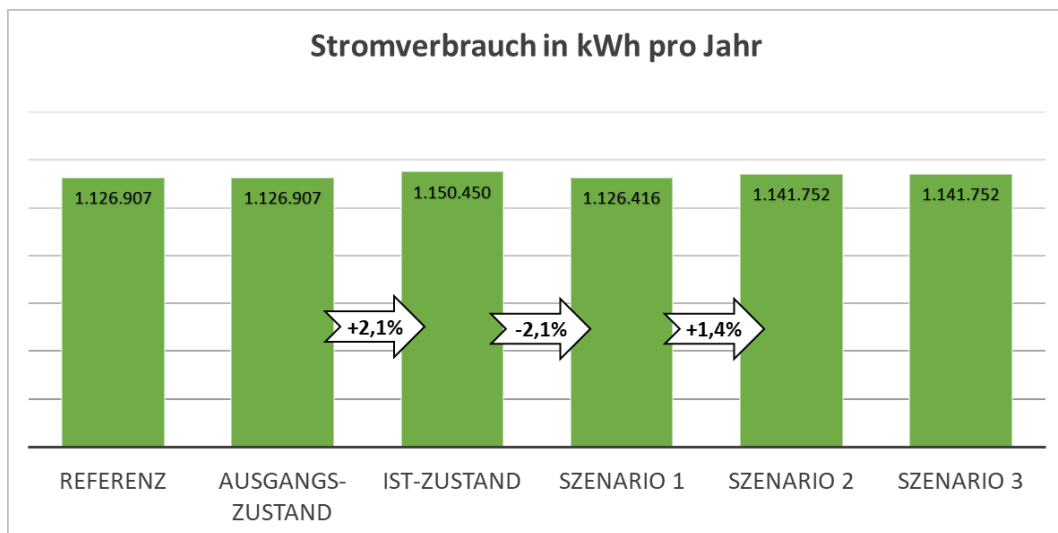


Abbildung 52: Stromverbrauch der verschiedenen Szenarien

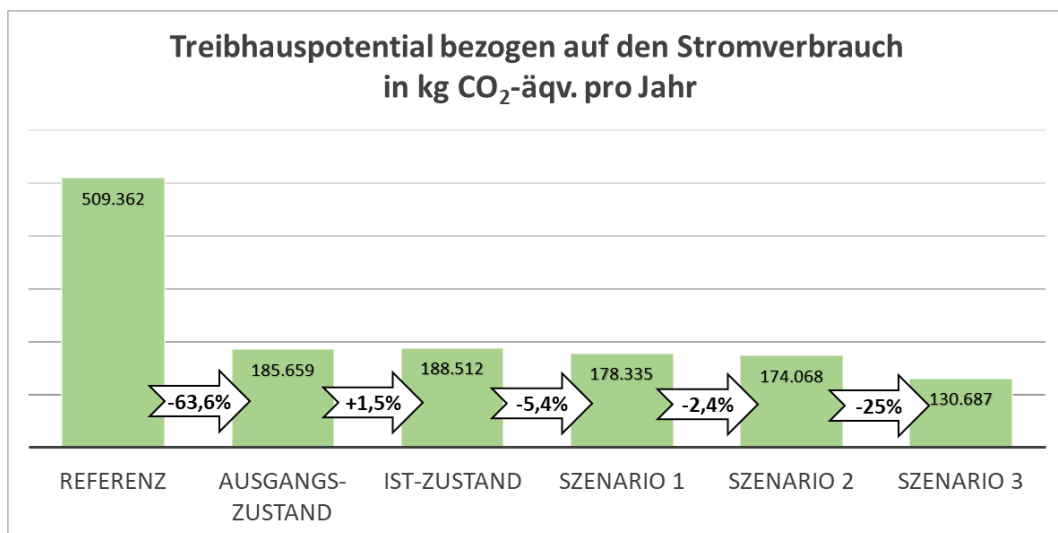


Abbildung 53: Verursachte Treibhausgasemissionen der verschiedenen Szenarien - Stromverbrauch

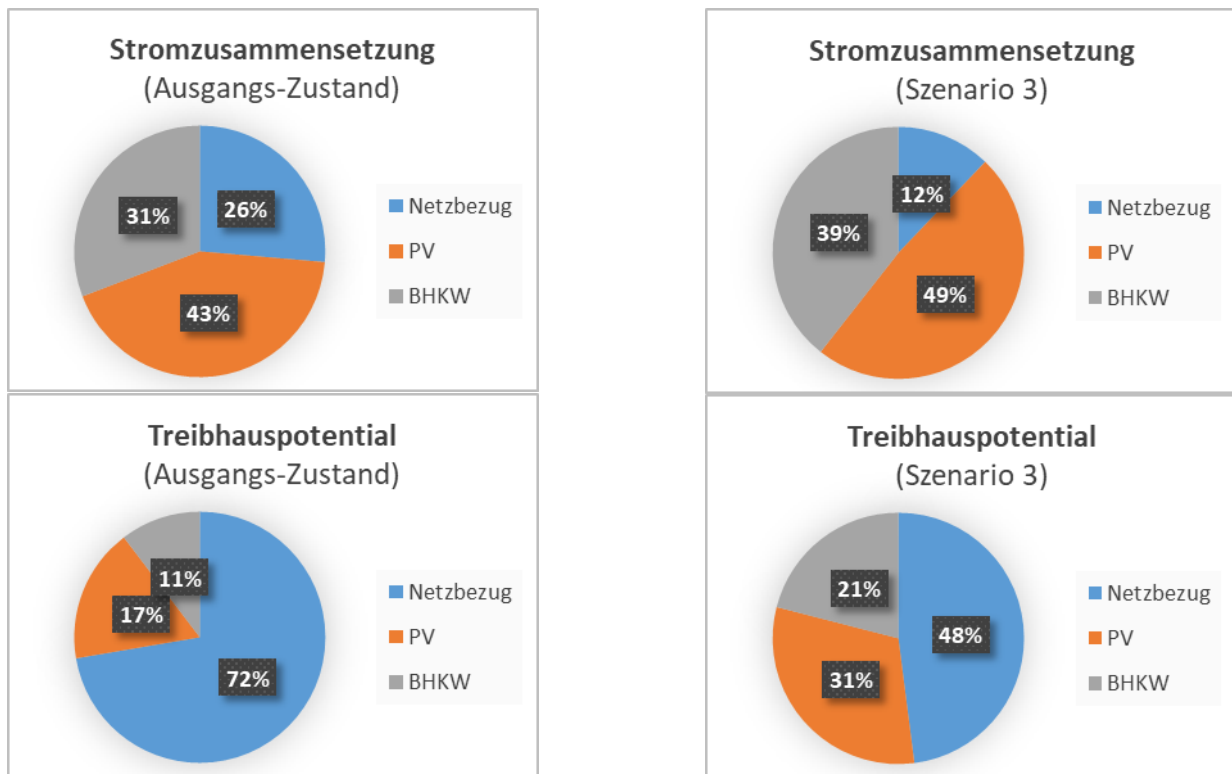


Abbildung 54: Verteilung des Stromverbrauchs und des daraus resultierenden Treibhauspotentials für den Ausgangs-Zustand und Szenario 3

Im einjährigen Messzeitraum vom 01.04.2020 bis zum 31.03.2021 wurden 1.159.396 kWh Strom im Werk Ungerhausen verbraucht und insgesamt liefen die dortigen Anlagen 18.129 Stunden. Eine ausführlichere Betrachtung der Maschinenstunden aller Verbraucher (Schweißerei, Lüftungswerkstatt, Blechwerkstatt, LVD, Wickelfalz-, Bördelmaschine, Lackierkabine, Laserschneideanlage und Sandstrahlkabine) im Betrachtungszeitraum ist in Abbildung 55 zu sehen. Bei Betrachtung der mittleren Leistung der energieintensiven Verbraucher (Lackierkabine, Laserschneideanlage und Sandstrahlkabine) ist die Abweichung des gemittelten Verbrauchs pro Maschinenstunde zum Jahresmittelwert von 50 kW gering (siehe Abbildung 56). Weshalb festgehalten werden kann, dass die Verschiebung keinen Einfluss auf den Verbrauch hat, da Anlagen nur zu einem anderen Zeitpunkt laufen und es sich somit um eine reine Verschiebung handelt.

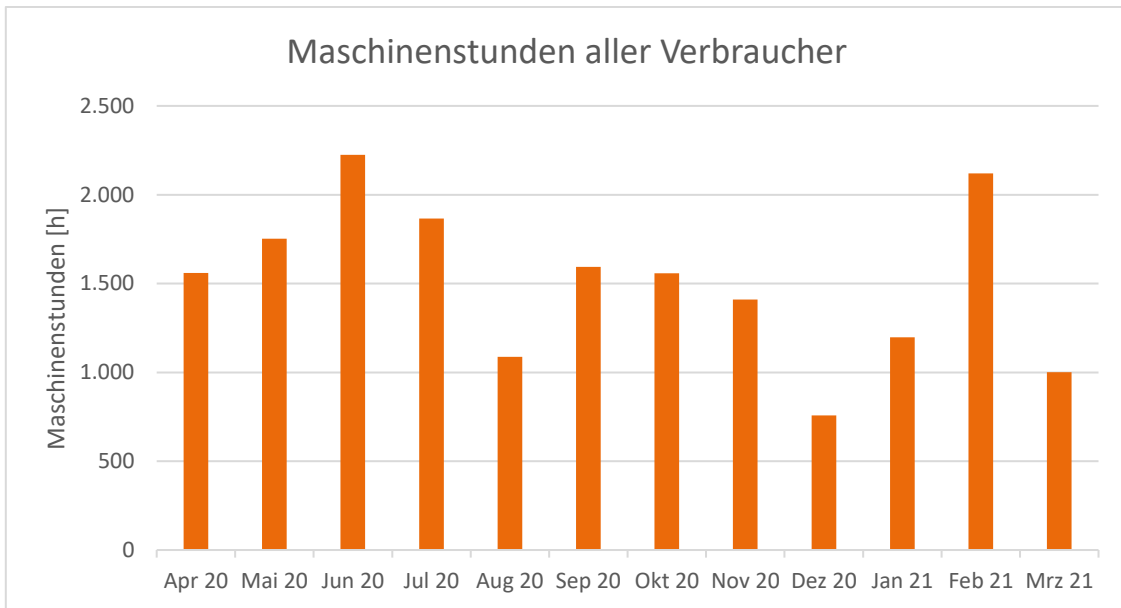


Abbildung 55: Maschinenstunden aller Verbraucher im Betrachtungszeitraum

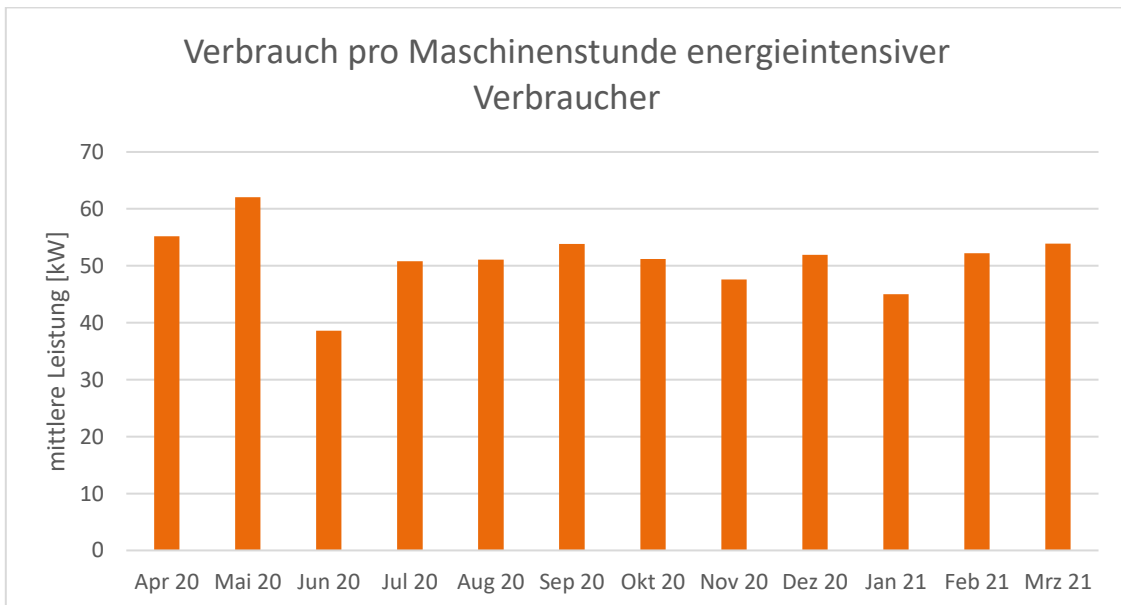


Abbildung 56: Mittlere Leistung der energieintensiven Verbraucher im Betrachtungszeitraum

3.3.4 Umweltbilanz der Wärmeversorgung

Wie im vorherigen Kapitel 3.3.3 wird für eine detaillierte Betrachtung der Umweltbilanz der Wärmeversorgung die Szenarien aus Kapitel 3.3.1 zur Hilfe genommen. Die Anschaffung einer Wärmerückgewinnungskomponente für den Druckluftkompressor führt im IST-Zustand zu einem geringfügigen Anstieg der Treibhausgasemissionen, da durch die Allokation der Energieflüsse des Druckluftkompressors die Wärmerückgewinnung mit einem höheren Treibhauspotential verbunden ist als z.B. die Wärmeerzeugung im Gaskessel. Ganzheitlich betrachtet, d.h. unter Berücksichtigung des Treibhauspotentials der erzeugten Druckluft und des Wärmeverbrauchs führt diese Maßnahme aber zu einer Reduktion der Umweltwirkungen von bis zu 619 kg CO₂-äqv. pro Jahr. Durch die zusätzliche Speicherung von PV- und BHKW-Strom im Batteriespeicher sind zukünftig weitere Reduktionen um 1 bzw. 5,5% möglich.

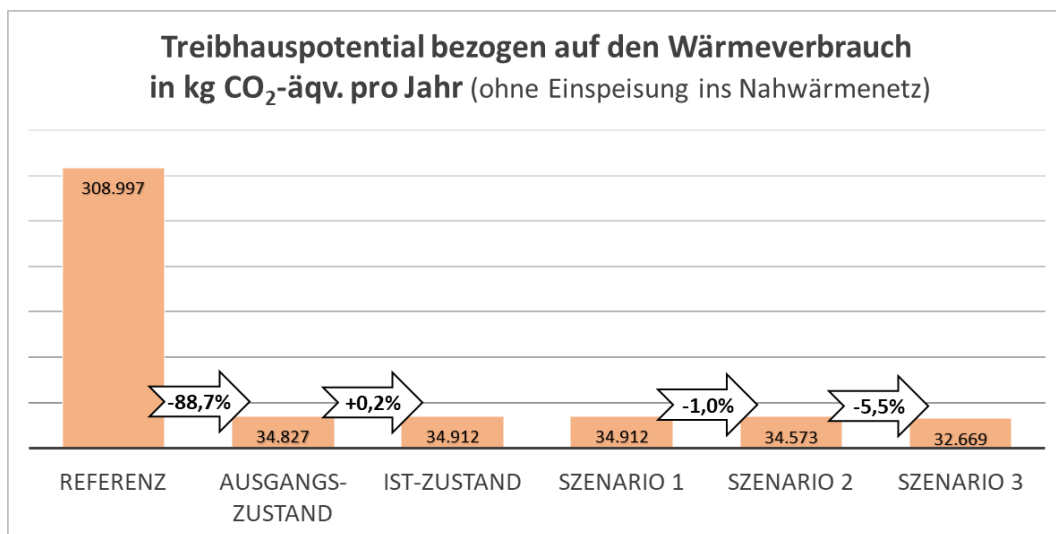


Abbildung 57: Verursachte Treibhausgasemissionen der verschiedenen Szenarien – Wärmeverbrauch

3.3.5 Umweltbilanz der Transportaufwände sowie des Stickstoffbezugs

Neben der Optimierung der Strom- und Wärmeversorgung haben auch vermiedene Transportaufwände sowie die Vor-Ort-Erzeugung von Stickstoff einen positiven Effekt auf das Treibhausgaspotenzial sowie den

Primärenergieverbrauch der Green Factory. Tabelle 21 zeigt die durchgeführten Maßnahmen im Vergleich zur Referenz.

Tabelle 21: Maßnahmen zur Vermeidung von Transportaufwänden

Referenz	IST-Zustand Betrachtungszeitraum
Effizienz & Technologien	
Dezentrale Lagerung	Hochregallager
Externer Stickstoffbezug	Stickstoffherzeugung vor Ort

Durch die Reduktion der Transportaufwände und die vorrangig mit PV-Überschuss-Strom gespeiste Eigenerzeugung des Stickstoffs können die Treibhausgasemissionen im Vergleich zur Referenz um 83% reduziert werden (siehe Abbildung 58)

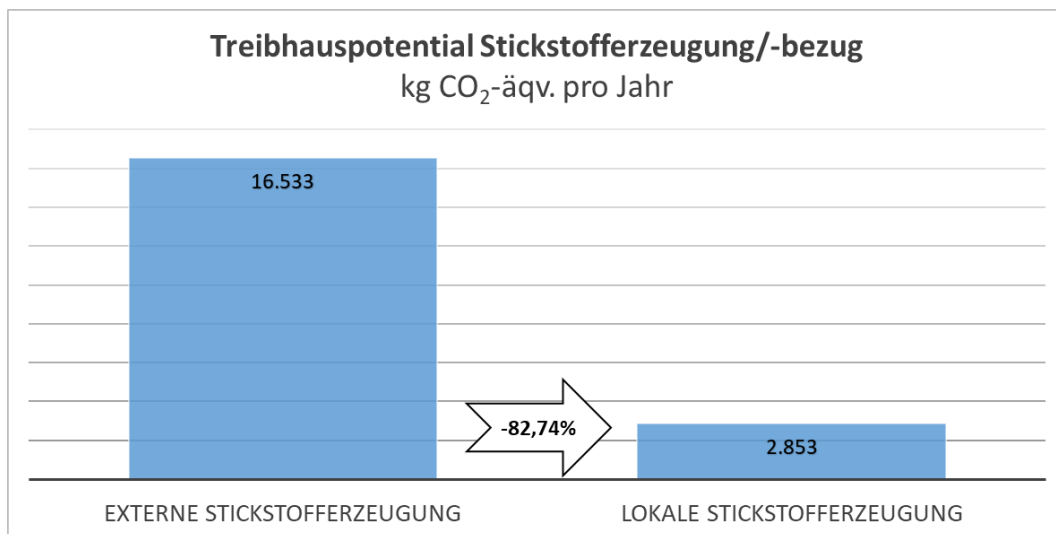


Abbildung 58: Verursachte Treibhausgasemissionen der verschiedenen Szenarien - Stickstoffbezug

Durch die Reduktion der Transportaufwände bei der Einlagerung sowie Entnahme aus dem vollautomatischen Hochregallager können 83% der Treibhausgaspotenziale für Transportaufwände eingespart werden.

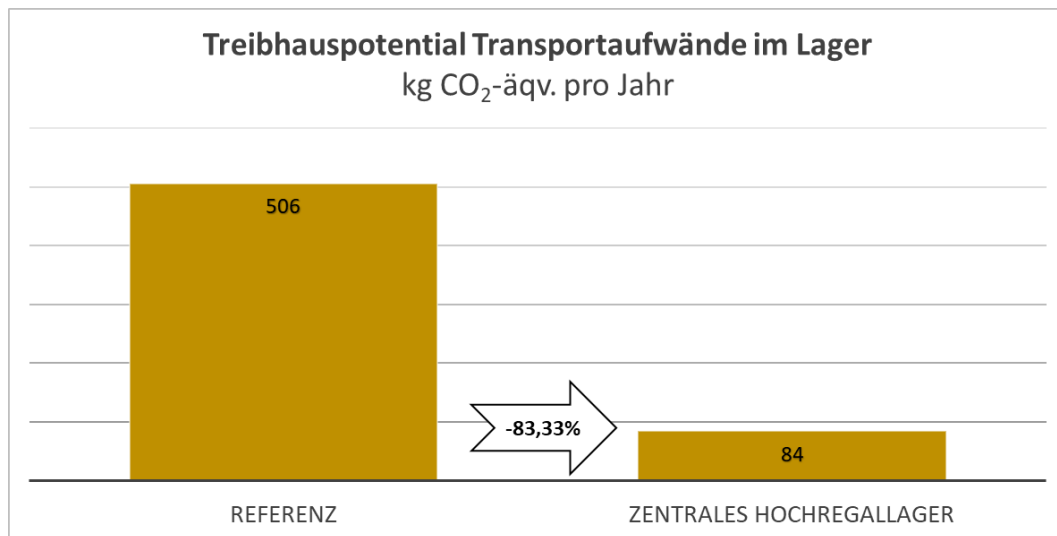


Abbildung 59: Verursachte Treibhausgasemissionen der verschiedenen Szenarien – Hochregallager

3.3.6 Umweltbilanz des Gesamtsystems

Tabelle 22 und Abbildung 60 zeigen zusammengefasst die Ergebnisse der Abschnitte 3.3.3 bis 3.3.5. Zusätzlich zu den Einsparungen, welche die Green Factory durch die Zusammensetzung ihres Strom- und Wärme-Mix im Vergleich zur konventionellen Energiebeschaffung ermöglicht (siehe Abschnitt 3.3.3), wurden in der Green Factory weitere Treibhausgasemissionen durch die Vorort-Erzeugung des Stickstoffs, Vermeidung von Treibhausgasemissionen beim Transport durch das zentrale Hochregallager und durch die Flexibilisierung des Stromverbrauchs eingespart. Diese Einsparungen betragen im Messzeitraum 14 t CO₂-äqv. (-5,9%). Durch die erweiterte Nutzung der Lastverschiebung (siehe Abschnitt 3.2.2.7, Szenario 1 in Tabelle 22), des Batteriespeichers (siehe Abschnitt 3.2.2.5, Szenario 2 in Tabelle 22) und des BHKW (siehe Abschnitt 3.2.2.6, Szenario 3 in Tabelle 22) sind zukünftig weitere Einsparungen möglich (siehe Tabelle 22).

Tabelle 22: Zusammenfassung Reduktionspotenzial der Treibhausgasemissionen für den Betrieb der Green Factory

Treibhauspotential [kg CO ₂ -äqv./Jahr]	Referenz	Ausgangs- Zustand	IST-Zustand	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Strom	509.362	185.659	185.659	176.765	172.497	129.117
Wärme	308.997	34.827	34.912	34.912	34.573	32.669
Stickstoff	16.533	16.533	2.853	1.570	1.570	1.570
Transport	506	506	84	84	84	84
Gesamt	835.398	237.524	223.508	213.331	208.725	163.440
Reduktionspotenzial Treibhausgasemissionen		Ausgangs- Zustand	IST-Zustand	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Strom in kg CO ₂ -äqv./Jahr i.V. zum vorherigen Szenario		-323.703	0	-8.894	-4.268	-43.380
in % i.V. zum vorherigen Szenario		-63,55%	0,00%	-4,79%	-2,41%	-25,15%
Wärme in kg CO ₂ -äqv./Jahr i.V. zum vorherigen Szenario		-274.171	85	0	-338	-1.905
in % i.V. zum vorherigen Szenario		-88,73%	0,24%	0,00%	-0,97%	-5,51%
Stickstoff in kg CO ₂ -äqv./Jahr i.V. zum vorherigen Szenario		0	-13.679	-1.283	0	0
in % i.V. zum vorherigen Szenario		0,00%	-82,74%	-44,97%	0,00%	0,00%
Transport in kg CO ₂ -äqv./Jahr i.V. zum vorherigen Szenario		0	-422	0	0	0
in % i.V. zum vorherigen Szenario		0,00%	-83,33%	0,00%	0,00%	0,00%
Gesamt in kg CO ₂ -äqv./Jahr i.V. zum vorherigen Szenario		-597.874	-14.016	-10.177	-4.606	-45.285
in % i.V. zum vorherigen Szenario		-71,57%	-5,90%	-4,55%	-2,16%	-21,70%

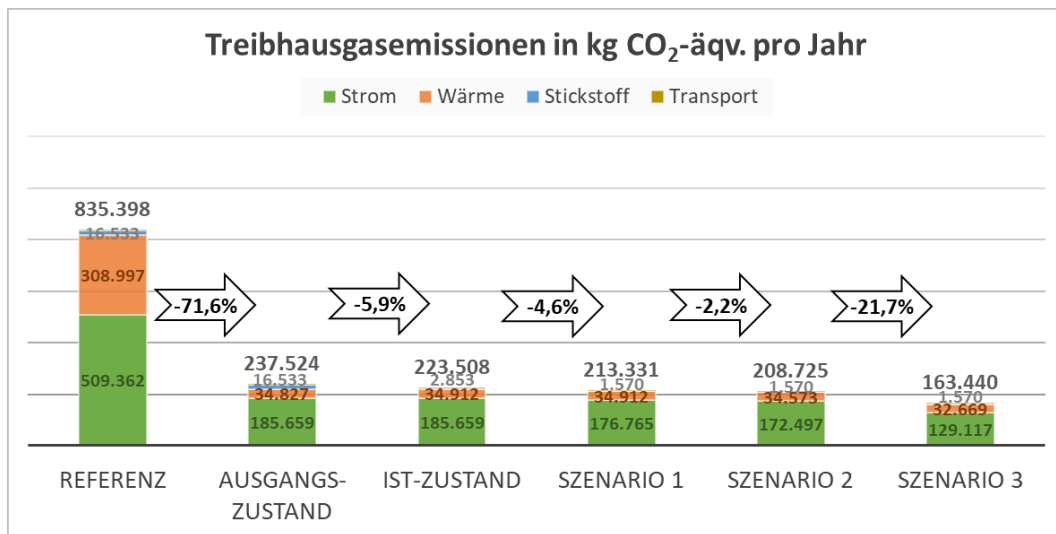


Abbildung 60: Treibhausgasemissionen des Gesamtsystems

3.3.7 Erhöhung des Autarkiegrads

Einige Maßnahmen wie die Vor-Ort-Erzeugung des Stickstoffs und weiterer Formiergase leisten bereits heute einen Beitrag zur Erhöhung des Autarkiegrads sowie der Eigenverbrauchsquote. Im Rahmen des Vorhabens konnten weitere noch ungenutzte theoretische Potenziale zur Lastverschiebung sowie intelligenten Betriebsweise von BHKW und Batteriespeicher identifiziert werden. Abbildung 61 gibt einen grafischen Überblick über den Einfluss der einzelnen Szenarien auf den Autarkiegrad und die Eigenverbrauchsquote. Aufgrund der im Vergleich geringen zusätzlich verschiebbaren Energiemenge durch die Energieflexibilität produktionsabhängiger sowie variabler Stromverbraucher, haben diese einen nur geringen Einfluss. Insbesondere durch die erweiterte Betriebsweise des BHKW (vgl. 3.2.2.6) ist jedoch eine signifikante Erhöhung des Autarkiegrads um 10% (i.V. zu Szenario 2) möglich.

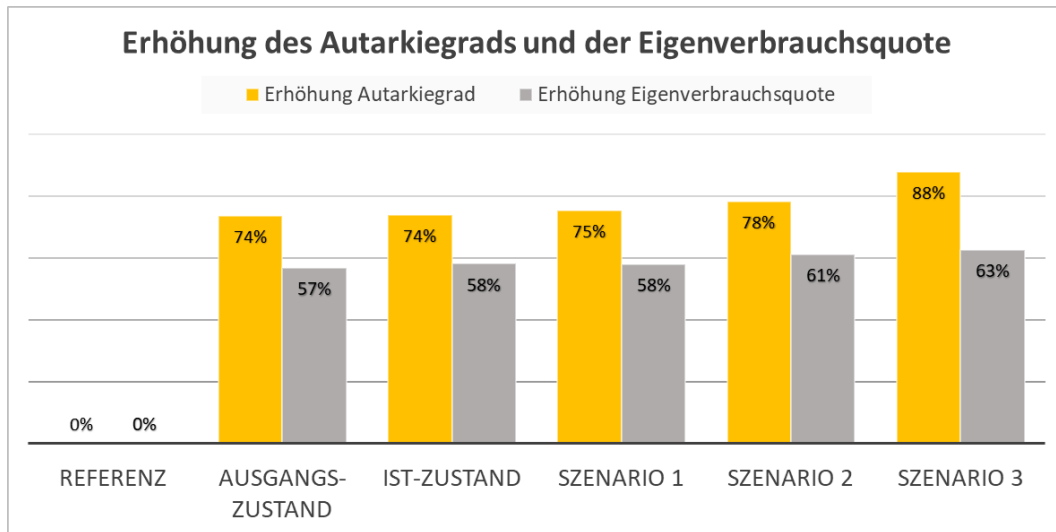


Abbildung 61: Einfluss der einzelnen Maßnahmen auf die Erhöhung des Autarkiegrads sowie die Eigenverbrauchsquote

3.4 Wirtschaftlichkeitsanalyse

Die Folgenden Analysen sind für die Müller Produktions GmbH berechnet worden, welche einen jährlichen Umsatz von 5,3 Mio. Euro und 18T Maschinenstunden aufweist. Es wurden förderfähige Investitionen in Höhe von 1,4 Mio. € zur Umsetzung des Vorhabens getätigt. Tabelle 23 enthält auch nicht förderfähige Investitionen des Projekts, welche im Rahmen dieses Berichts thematisiert wurden. Der geförderte Anteil der Investitionen ist zu entnehmen. Es wurden 92% der bewilligten Mittel in Anspruch genommen.

Tabelle 23: Übersicht förderfähigen und nicht förderfähigen Investitionen

Förderfähige Investitionen	Kosten
Energiespeicherung	248.341,73 €
Batteriespeicher	152.207,87 €
Erstinstallation Luftzerlegungsanlage	81.609,98 €
Erweiterung Luftzerlegungsanlage für Lastmanagement/MSR-Kopplung	5.873,88 €
Gasmischanlage für die Schneidgase	8.650,00 €
Energietransparenz (inkl. MSR Siemens)	248.325,07 €
Hardwareeinrichtung und Messsensorik sowie Implementierung Energiemonitoring	243.879,07 €
Dienstleistung Meteocontrol	4.446,00 €
Software	551.725,81 €
ERP-System: Projektierung und (Teil)-Umsetzung	467.504,03 €
Leittechnik	84.221,78 €
Produktionsanlagen und Fördertechnik	222.404,08 €
Anteil Kompressor mit WRG Neu	8.325,90 €
Laserkühlung	8.400,00 €
Fertigungsmaschinen	205.678,18 €
Personalkosten	135.269,30 €
geförderter Anteil Personalkosten	135.269,30 €
SUMME förderfähige Investitionen	1.406.065,99 €
Nicht förderfähige Investitionen	Kosten
Erweiterung Monitoring inkl. Lastmanagement	58.094,71€
Druckluftanlage	29.461,36 €
Platzsparendes, vollautomatisches Hochregallager	699.232,00 €
Energieeffiziente Laserschneideanlage	986.165,00 €
Heiz- und Kühldecken (Teil)	7.760,00 €
Photovoltaikanlage mit Reinigungssystem	574.435,00
100 m ³ Puffer für Nahwärmenetz	61.980,38 €
SUMME nicht förderfähige Investitionen	2.417.128,45 €
SUMME Gesamtvorhaben	3.823.194,44 €

Tabelle 24: Förderanteil

Gesamtinvestition mit Förderung (netto)	
Gesamtinvestitionen (nur förderfähiger Teil)	1.406.065,99 €
Anteil Förderung	287.712,61 €
Anteil Eigenfinanzierung	1.118.353,38 €
Förderquote	20,32 %

Für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurde auf Basis der gemessenen Werte im Betrachtungszeitraum eine Kalkulation für das Jahr 2020 sowie anhand der identifizierten zukünftigen Potenziale und Betriebsstrategien eine Prognose für die Folgejahre vorgenommen. Der Betrachtungszeitraum der Wirtschaftlichkeitsanalyse beträgt 20 Jahre. Berücksichtigt wurden nur diejenigen ermittelten Effizienz- und Flexibilitätsmaßnahmen, welche direkt mit einer geförderten Investition einhergingen. In den folgenden Tabellen sind die Werte und Annahmen zusammengestellt, welche der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zugrunde liegen. Tabelle 25 führt die berücksichtigten Effizienzmaßnahmen mit den jeweiligen Auswirkungen auf den Bezug von Strom, Wärme und Stickstoff auf.

Tabelle 25: Berücksichtigte Effizienzmaßnahmen

Effizienzmaßnahme	Strom	Wärme	Stickstoff
Wärmerückgewinnung Kompressor		13.814 kWh	
Kühlung Laserschneideanlage	-24.034 kWh		
Stickstoffanlage: vermiedener Fremdbezug			40.527 m ³

Von der Lastverschiebung produktionsabhängiger Verbraucher ist durch Nutzung der Plantafel eine Eigenverbrauchserhöhung von 11.692 kWh PV-Strom und 3.223 kWh BHKW-Strom zukünftig zu erwarten. Dies ist in den Kapiteln 3.2.2.5, 3.2.2.7 und 3.2.2.8 noch genauer beschrieben.

Tabelle 26 zeigt analog hierzu die Auswirkungen der berücksichtigten Flexibilitätsmaßnahmen auf den Strombezug. Durch die genannten Flexibilitätsmaßnahmen können die in der Tabelle aufgelisteten Strommengen aus Zeiten des Netzbezugs beziehungsweise der BHKW-Erzeugung in Zeiten der PV-Erzeugung verschoben werden. Beispielsweise können so durch die Luftzerlegungsanlage zusätzlich 11.692 kWh PV-Strom durch Eigenverbrauch genutzt werden. Des Weiteren wurden durch die Nutzung des Batteriespeichers im Messzeitraum 5.575 kWh PV-Strom mehr verbraucht. Mit der zukünftig geplanten Nutzung zur Eigenverbrauchserhöhung kann dies auf bis zu 34.240 kWh erhöht werden. Von der Lastverschiebung produktionsabhängiger Verbraucher ist durch Nutzung der Plantafel eine Eigenverbrauchserhöhung von 11.692 kWh PV-Strom und 3.223 kWh BHKW-Strom zukünftig zu erwarten. Dies ist in den Kapiteln 3.2.2.5, 3.2.2.7 und 3.2.2.8 noch genauer beschrieben.

Tabelle 26: Berücksichtigte Flexibilitätsmaßnahmen

Flexibilitätsmaßnahme	Strom
Zusätzliche Nutzung PV-Strom durch Luftzerlegungsanlage	11.692 kWh
Zusätzliche Nutzung PV-Strom durch Batteriespeicher	Messzeitraum: 5.575 kWh Zukünftig: 34.240 kWh
Lastverschiebung produktionsabhängige Verbraucher	Messzeitraum: 0 kWh Zukünftig: 11.692 kWh (vorher Netzbezug), 3.223 kWh (vorher BHKW-Strom)

In Tabelle 27 sind die der Berechnung zugrundeliegenden Preise und Vergütungen für Energiebezug bzw. Verkauf und weitere Positionen dargelegt.

Tabelle 27: Preise und Vergütungen

Position	Wert	Einheit	Annahme Steigerung
Erdgaspreis 2020	4,21	ct/kWh	+ 4%/a
KWK Zuschlag bis 50 kW	5,41	ct/kWh	Bis 2031

KWK Zuschlag 50- 250 kW	4,0	ct/kWh	Bis 2031
Vermiedene Netznutzung BHKW	0,12	ct/kWh	
Grundvergütung BHKW	3,28	ct/kWh	+ 2%/a
EEG-Umlage auf Eigenverbrauch PV	2,7	ct/kWh	
Strompreis 2020	18,57	ct/kWh	+ 4%/a
Einspeisevergütung BHKW	8,81	ct/kWh	
Einspeisevergütung PV	11,08	ct/kWh	
Pelletpreis	199,79	€/t	+ 2%/a
Stickstoffpreis	0,33	€/m ³	+ 2%/a
Fernwärme	8,75	ct/kWh	+ 2%/a

Tabelle 28 zeigt die jährlichen Verbrauchs- und Erzeugungsmenge der Green Factory. Auf Basis dessen sowie der individuellen Zusammensetzung des Strombezugs der Verbraucher und der in Tabelle 27 aufgelisteten Preise wurden für jede Erzeugungsanlage die Kosten pro erzeugter kWh Strom, kWh Wärme, m³ Stickstoff bzw. VE-Wasser ermittelt (siehe Tabelle 29).¹

Tabelle 28: Jährliche Erzeugungsmengen im Betrachtungszeitraum

Anlage	Input	Einheit	Output	Einheit
Netzbezug			302.938	kWh Strom/Jahr
Eigenverbrauch PV-Anlage			498.267	kWh Strom/Jahr
BHKW	108.517	m ³ Ökogas/Jahr	411.022	kWh Strom/Jahr
davon Eigenverbrauch			358.191	kWh Strom/Jahr
			555.190	kWh Wärme/Jahr
Pelletkessel	220,58	t Pellets/Jahr	965.790	kWh Wärme/Jahr
	4.551	kWh/Jahr		
Gaskessel	93.248	m ³ Ökogas/Jahr	893.320	kWh Wärme/Jahr
	2.821	kWh/Jahr		
Luftzerlegungsanlage	23.543 ¹	kWh/Jahr	40.527	m ³ Stickstoff/Jahr

¹ Investitions- sowie betriebsgebundene Kosten der Erzeugungsanlagen wurden hierbei vernachlässigt, da im Rahmen des Green Factory Projekts Investitionen zu Transparenzschaffung und Flexibilisierung getätigt wurden, welche die Nutzung bestehender Erzeugungsanlagen optimieren sollen.

VE-Wassererzeugung	3.567	kWh/Jahr	1.441	Nm ³ VE-Wasser/Jahr
Wärmerückgewinnung	5.655 ¹	kWh/ Jahr	13.814	kWh Wärme/Jahr

Tabelle 29: Verbrauchsgebundene Kosten/Erlöse

Verbrauchsgebundene Kosten/Erlöse	Wert	Einheit
Kostenvorteil PV Eigenverbrauch zu Einspeisung	-4,79	ct/kWh
eigenverbrauchter Strom aus PV-Anlage	2,70	ct/kWh
eigenverbrauchter Strom aus BHKW	8,47	ct/kWh
eingespeister Strom aus BHKW	2,49	ct/kWh
Strom-Mix Green Factory Betrachtungszeitraum	2,30	ct/kWh
Wärme aus Pelletkessel	4,57	ct/kWh
Wärme aus Gaskessel	6,41	ct/kWh
Wärme aus BHKW	5,09	ct/kWh
Wärme aus WRG	0,94	ct/kWh
Wärme-Mix Green Factory	5,35	ct/kWh

Tabelle 30: Betriebsgebundene Kosten

Betriebsgebundene Kosten	Wert	Einheit	Annahme Steigerung
Wartung & Instandhaltung Druckluftanlage (Anteil WRG)	225	€/a	+ 1,5%/a
Wartung & Instandhaltung Stickstoffanlage	6.500	€/a	+ 1,5%/a
Wartung & Instandhaltung Batteriespeicher ²	1.522	€/a	+ 1,5%/a

Es wurden die jährlichen Aufwendungen und Erlöse sowie der EBITDA (Gewinn vor Zinsen, Steuern und Abschreibung) ermittelt. Abbildung 62 zeigt die Entwicklung des EBITDA sowie des kumulierten EBITDA. Der EBITDA steigt aufgrund des zunehmenden Kostenvorteils des eigenerzeugten Stroms gegenüber steigenden Strompreisen an.

¹ Anteilige Berücksichtigung der Energieflüsse für die Erzeugung von Druckluft und Wärme

² Annahme: 1,5% der Anschaffungskosten

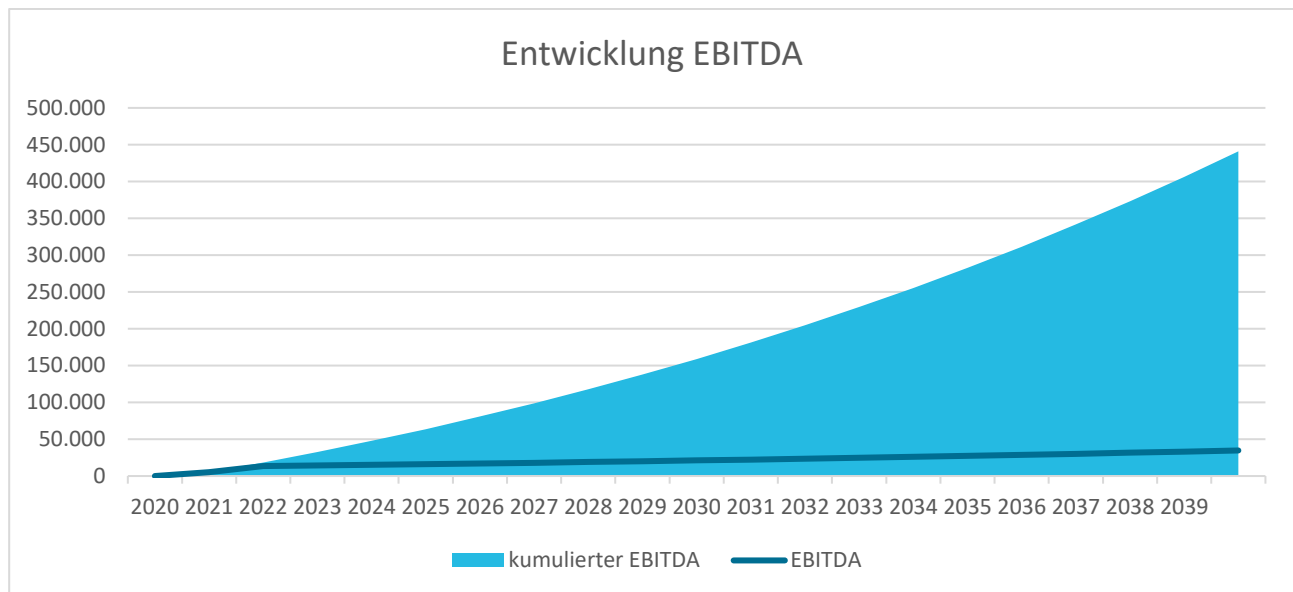


Abbildung 62: Entwicklung des EBITDA

Dennoch amortisieren sich die betrachteten förderfähigen Investitionen über einen Zeitraum von 20 Jahren nicht. Dies ist auf die hohen Investitionen zur Transparenzschaffung (Messtechnik, Energiemonitoring etc.) zurückzuführen, welche nicht mit einer unmittelbaren, monetär bewertbaren Kostenreduktion oder Erlösgenerierung einhergehen. Dennoch schaffen diese die nötige Transparenz, um Effizienz- und Flexibilitätspotenziale zu identifizieren und sind teilweise eine Grundvoraussetzung für intelligente Steuerung. Diese intelligente Steuerung wird im Bereich der Erzeugungsanlagen, Speicher und flexibler Verbraucher der Green Factory aktuell bereits weiterentwickelt, um weitere Einsparpotenziale beispielsweise durch die Nutzung der Power-to-Heat Anlage zur Erhöhung des Eigenverbrauchs sowie zur Regelleistungsvermarktung zu heben. Auch eine adaptive Lüftungssteuerung zur Anpassung der Lüftung an die Hallenbelegung wird aktuell implementiert. Weiterhin kann der Batteriespeicher neben der im Rahmen der Studie betrachteten Eigenverbrauchserhöhung auch zur Lastgangglättung für die Netzentgeltreduktion oder zur Lastverschiebung für die atypische Netznutzung eingesetzt werden [23]. Durch die Investitionen in Messtechnik und Energiemonitoring, steht die erforderliche Datenbasis für die Umsetzung dieser Anwendungen zur Verfügung.

Die separate Betrachtung der Maßnahmen führt hingegen zumeist zu moderaten, teils zu wettbewerbsfähigen Amortisationszeiten, da hier die Investitionen in Messsensorik und Energiemonitoring nicht in den Kostenbestandteilen integriert sind. Wie Tabelle 31 zeigt, ergibt sich für die Wärmerückgewinnung (WRG) der Druckluftanlage sowie für die Laserkühlung durch die Förderung eine akzeptable Amortisationszeit von 2 bzw. 5 Jahren. Batteriespeicher und Luftzerlegungsanlage liegen mit 10 bzw. 14 Jahren Amortisationszeit mit Förderung ebenfalls in moderaten Bereichen.

Tabelle 31 Amortisationszeit der Einzelmaßnahmen

Maßnahme	Amortisationszeit ohne Förderung	Amortisationszeit mit Förderung
Luftzerlegungsanlage	13 Jahre	10 Jahre
WRG Druckluftanlage	2 Jahre	2 Jahre
Batteriespeicher	16 Jahre	14 Jahre
Laserkühlung	6 Jahre	5 Jahre

Durch die Kombination der verschiedenen Strom- und Wärmerzeugungsanlagen konnte die Müller Produktions GmbH im Messzeitraum 186.358€ (87%) Stromkosten gegenüber dem Netzbezug sowie 108.515€ (51%) Wärmekosten einsparen. Abbildung 63 zeigt mit dem orangen linken Balken als Referenz die Kosten, welche anfallen würden, wenn die Müller Produktions GmbH ihren Strombedarf vollständig über Netzbezug decken würde. Der Strom-Mix Müller, dargestellt als grauer Balken, zeigt die im Messzeitraum in der Green Factory angefallenen Stromkosten. Mit rund 29 T€ Stromkosten entspricht der Strom-Mix Müller einer Kostenreduktion von rund 87% gegenüber der Referenz mit Kosten für den Netzbezug von rund 215 T€. In Abbildung 63 sind mit der dritten, gestapelten Säule, die Aufteilung der Kosten des Strom-Mix Müller aufgeführt. Diese ergeben abzüglich der Erlöse durch Stromlieferung (rechte Säule) den Strom-Mix Müller.

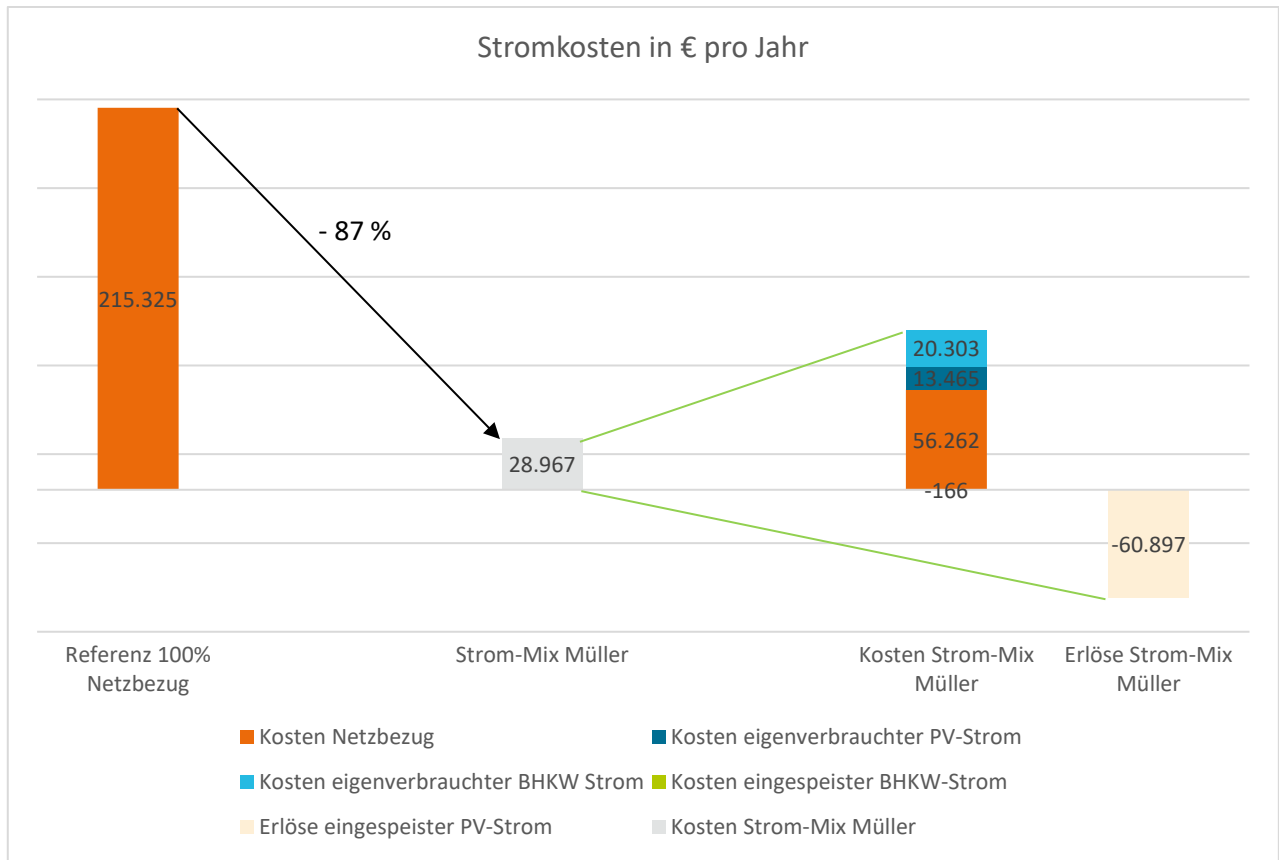


Abbildung 63: Jährliche Stromkosteneinsparungen der Green Factory

Abbildung 64 zeigt die Zusammensetzung der Kosten und Erlöse des Green Factory Wärme Mix. Als Referenz dient hierbei der Bezug von Fernwärme, mit Kosten von rund 212 T€ (beiger Balken). Der Wärme-Mix Müller, mit BHKW, Pelletkessel und Wärmerückgewinnung (WRG) und weiteren Anlagen weist demgegenüber 51% geringere Kosten auf.

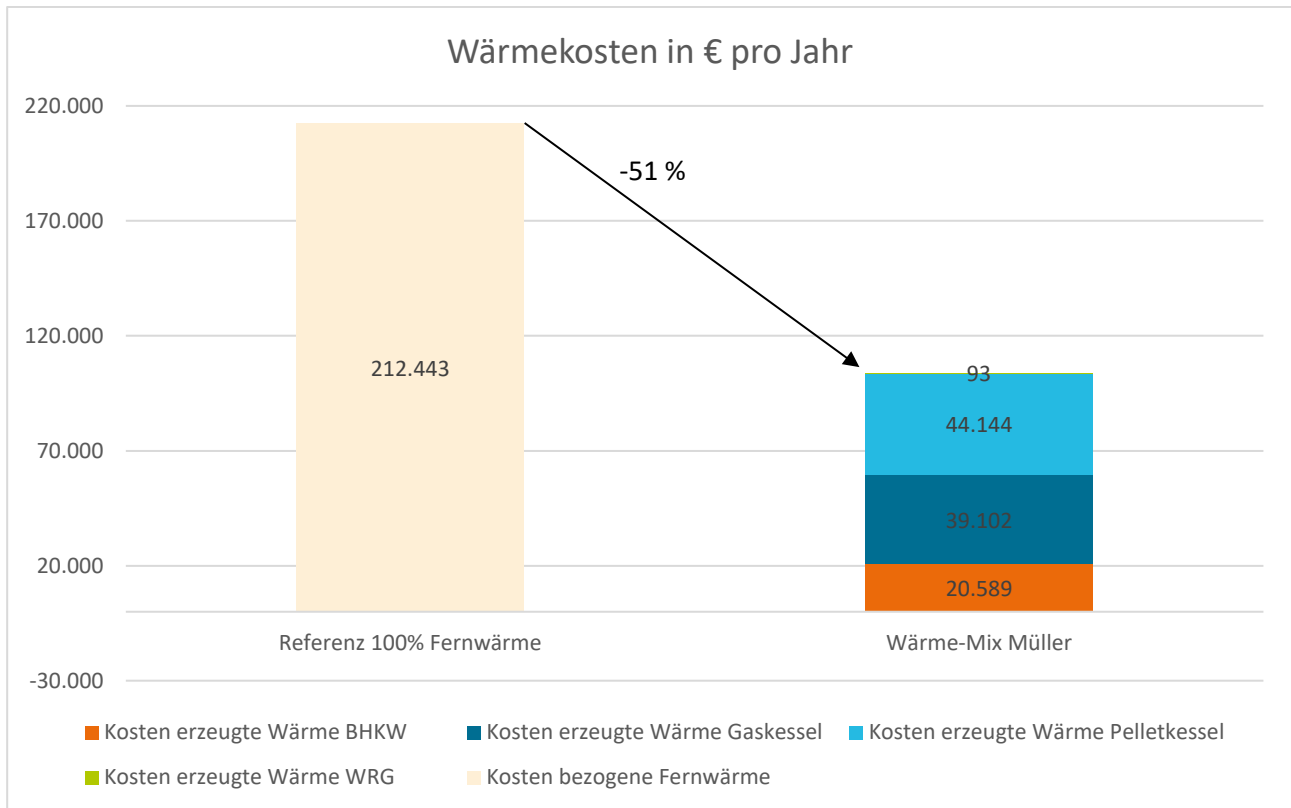


Abbildung 64: Wärmekosteneinsparung der Green Factory pro Jahr

3.5 Technischer Vergleich zu konventionellen Verfahren / Innovation

In ihrer Kombination verschiedener modernster Technologien aus den Bereichen dezentraler, regenerativer Energieerzeugung, dezentraler Energiespeicherung sowie intelligenter Vernetzung mit Fertigung und Gebäudetechnik geht die Green Factory Allgäu deutlich über den Stand der Technik hinaus. Zentrales Alleinstellungsmerkmal ist hierbei insbesondere die Vernetzung und aufeinander abgestimmte Steuerung der einzelnen Systemkomponenten, wobei einzelne umgesetzte Lösungselemente bereits aus dem Stand der Technik bekannt sind. Darüber hinaus kommen in der Green Factory Allgäu verschiedene Energiespeichertechnologien zum Einsatz, die es zum einen ermöglichen, elektrische Energie zu speichern (Batteriespeicher) und zum anderen dazu geeignet sind, für die Green Factory Allgäu notwendige Betriebsstoffe in Form von Stickstoff selbst herzustellen.

Zusammenfassend zeichnen die Green Factory Allgäu die vier folgenden Elemente gegenüber dem Stand der Technik aus:

- Nutzung von Batteriespeichern zur Reduzierung von Spitzenlasten und zur Notstromversorgung in der industriellen Produktion, zukünftig Nutzung des Batteriespeichers zur Eigenverbrauchserhöhung
- Dezentrale Erzeugung von Betriebsstoffen (Stickstoff) durch überschüssige regenerative Energie zur Eigenverbrauchserhöhung
- Einsatz von Prognosewerkzeugen wie eine Prognose der zukünftigen PV-Erzeugung und des zukünftigen Strombedarfs zur vorausschauenden Abstimmung von Produktionsaktivitäten auf das Angebot an regenerativer Energie
- Integrierte Betrachtung, Planung und Steuerung der dezentralen Energieerzeuger, Energiespeicher sowie der Produktionsplanung und –steuerung zur Erhöhung des Eigenverbrauchs des PV-Stroms mittels Lastmanagement, Stromspeicherung sowie energieorientierter Produktionsplanung und –steuerung im ERP-System.



Damit wurden in der Green Factory Funktionalitäten umgesetzt, die bisher nur in Grundzügen in akademischen Demonstrationsfabriken zu finden sind, nicht aber in der produzierenden Industrie.

4 Empfehlungen

4.1 Erfahrungen aus der Praxiseinführung

Die Umsetzung eines solchen, in seinem Umfang neuartigen Konzepts einer energieautarken Fabrik, ist komplex, risikoreich und geprägt von einer Vielzahl an Unsicherheiten. Die Inbetriebnahme der Systemkomponenten erfolgt parallel zum laufenden Produktionsprozess – es ist daher von großer Bedeutung, dass dies keinen negativen Einfluss auf die Betriebsabläufe nach sich zieht. Insbesondere die Definition der Anforderungen und die Auswahl eines geeigneten Lieferanten benötigte in der Umsetzung in Bezug auf das ERP-System und den Batteriespeicher deutlich länger, als ursprünglich veranschlagt. Auch für die Inbetriebnahme dieser Systeme und die Optimierung der Betriebsweise sowie die Entwicklung eines geeigneten Steuerungskonzepts sollte ausreichend Zeit eingeplant werden. Insbesondere die intelligente Steuerung der Green Factory konnte nicht im durchgeführten Vorhaben abgeschlossen werden. Diese wird kontinuierlich – in folgenden Projekten – unter Berücksichtigung sich ändernder Rahmenbedingungen weiterentwickelt und angepasst. Die durch die installierte feingranulare Messtechnik vorhandene umfangreiche Datengrundlage ermöglicht dies.

Die Weiterentwicklung des Wärmekonzepts hat gezeigt, dass Lösungen für den Umgang mit den saisonalen Schwankungen der Erzeugungsleistung der PV Anlage notwendig sind. Im durchgeführten Projekt wurden diese durch die verschiedenen Speichertechnologien sowie die Kombination mit einem BHKW zwar gemindert, dennoch war eine Anpassung des Wärmekonzepts im Projektverlauf notwendig.

Zentrale Herausforderung des Projekts war zudem der Umgang mit Unsicherheiten und der Komplexität der energiewirtschaftlichen und energierechtlichen Rahmenbedingungen, welche die Planungssicherheit eines solchen Großprojekts deutlich erschweren. Hierbei sind insbesondere häufige Anpassung in Bezug auf die KWK- und EEG-Gesetzgebung zu nennen.

Darüber hinaus können folgende zentrale Herausforderungen des Projekts genannt werden:

- Komplexität der korrekten Parametrierung und Anbindung von Messgeräten, sowie der Einbindung in die Datenaufzeichnung (Adressierung, Netzwerkparameter etc.)
- Einführung einer energieflexiblen Planung und Steuerung erfordert die Berücksichtigung von Anforderungen unterschiedlicher Stakeholder und aufgrund fehlender Lösungen am Markt eine individuelle Entwicklung
- Fehlende Langzeiterfahrungen in Bezug auf die Nutzung von Batteriespeichern im industriellen Umfeld erschweren die Auswahl einer geeigneten Technologie
- Anbindung und Steuerung des Speichersystems an das Lastmanagement war gekennzeichnet durch diverse Störungen und Fehler. Trotz der gesammelten Erfahrungen seit Inbetriebnahme wird es hier voraussichtlich noch etwas Zeit brauchen, bis ein ähnlich reibungsloser Betrieb, wie bei anderen Teilen des Lastmanagements möglich ist.

Im Projekt konnten die folgenden zentralen Erfahrungen gesammelt werden:

- Messdaten liefern wichtige Einblicke in das Verbrauchsverhalten des eigenen Standortes
- Visualisierung von Energiedaten mittels Dashboards schafft Transparenz für Mitarbeiter sowie Kunden/Besucher
- die Vor-Ort Erzeugung des Stickstoffs und das Lastmanagement der Luftzerlegungsanlage ermöglicht automatisiert und weitgehend störungsfrei die Erhöhung des Eigenverbrauchs der PV-Anlage
- Wärmerückgewinnung bei Druckluftkompressoren ist ohne nennenswerte Zwischenfälle komplett automatisiert in die Gebäudetechnik integrierbar
- Die Steuerung des Lastmanagements erfordert eine Anpassung der Parameter basierend auf Erfahrungswerten bis der vollautomatische Betrieb ohne Störungen möglich ist

4.2 Modellcharakter/ Übertragbarkeit

Neben der technologischen Realisierung der nahezu energieautarken Green Factory war es insbesondere auch Ziel des Projekts eine Modellfabrik zu errichten, welche die Umsetzbarkeit eines solchen Vorhabens demonstriert und als Vorbild für nachahmende Projekte dienen kann. Hierzu wurde ein besonderer Fokus auf die Transparenzschaffung sowie die Visualisierung des Projektfortschritts sowie wichtiger ökologischer Kennzahlen gelegt. Dies richtet sich zum einen an Mitarbeiter*innen, welche sich aktiv an der Erreichung des Ziels einer energieautarken Fabrik beteiligen sollen. Die Vision der Green Factory soll innerhalb des Unternehmens sowie nach außen sichtbar gemacht werden. Monitore in der Produktionshalle stellen beispielsweise die aktuellen Energieverbräuche, die aktuelle sowie zukünftige Erzeugungssituation sowie Ladezustände der Energiespeicher dar. Diese Visualisierung und die damit einhergehende Informationstransparenz erlaubt es, Mitarbeiter*innen aktiv in den kontinuierlichen Verbesserungsprozess einzubeziehen, eine Sensibilität zur effizienten Nutzung erneuerbarer Energien unter Angestellten zu schaffen und diese so zur Partizipation an der Zielerreichung zu motivieren. Darüber hinaus bietet die Green Factory der Alois Müller GmbH Interessierten und Kund*innen die Möglichkeit, sich vor Ort als externe Besucher*innen im Rahmen von Besichtigungen über den Aufbau, den Betrieb und die Potenziale der energieautarken Fabrik zur informieren. So sollen die im Vorhaben gewonnen Erkenntnisse externen Besucher*innen zur Verfügung gestellt werden und als Grundlage für weitere Vorhaben dienen.

Von den zu Beginn dieses Berichts adressierten Herausforderungen in Bezug auf steigende Energiekosten sowie einer unsicheren zukünftigen Versorgungslage ist die gesamte produzierende Industrie in Deutschland betroffen. Das mit der Green Factory umgesetzte Vorhaben bietet umfangreiche Erkenntnisse und Erfahrungen (siehe Abschnitt 4.1), welche auf die gesamte Branche der produzierenden Industrie übertragbar sind und hat somit enormen Modellcharakter. Dieser ist unter anderem darin begründet, dass die Fertigungsprozesse der Green Factory wie die Blechverarbeitung und das Schweißen weit verbreitete und branchenunabhängige Prozesse sind. Das macht das Konzept der Green Factory auf eine Vielzahl an

Unternehmen in Deutschland direkt übertragbar. Darüber hinaus ist es jedoch auch auf andere Branchen adaptierbar.

Die Aktualität und Relevanz der adressierten Thematik wird auch durch die Vielzahl an positiven Reaktionen deutlich, welche die Alois Müller GmbH mit ihrer Green Factory Allgäu erhalten hat. So zeichnete die Lechwerke AG die Green Factory mit dem LEW Innovationspreis Klima und Energie 2015 aus. Der Förderverein KUMAS – Kompetenzzentrum für Umwelt e.V. ernannte die Green Factory zum KUMAS Leitprojekt 2020 als eines von drei ausgezeichneten vorbildlichen Umweltprojekten. Im Jahr 2020 erhielt die Alois Müller GmbH zudem den Bayerischen Energiepreis in der Kategorie „Energieverteilung und Speicherung – Strom, Wärme “. 2021 wurde der Handelsblatt Energy Award für die Green Factory vergeben.

Die Green Factory zeigt eindrucksvoll, wie Unternehmen die Energiewende für sich nutzen und einen Beitrag zu Ihrem Gelingen leisten können. Durch die Branchenunabhängigkeit des realisierten Konzepts und den modularen Aufbau ist dies auf Unternehmen unterschiedlichster Ausrichtung und Größe adaptierbar. Die Green Factory ist durch ihre Kombination vielseitiger Technologien zur Versorgung, Speicherung und Kopplung der Sektoren flexibel und resilient gegenüber zukünftigen Entwicklungen im Energiemarkt. Sie optimiert die dezentrale Nutzung erneuerbarer Energien und kann gleichzeitig durch Energieflexibilität und Lastmanagement zur Stabilisierung der Stromnetze beitragen.

5 Zusammenfassung / Summary

5.1 Einleitung / Introduction

Um den Herausforderungen der Energiewende zu begegnen hat die Müller Produktions GmbH mit dem Projekt "Green Factory Allgäu" innovative Maßnahmen für eine umweltverträgliche und wirtschaftliche Energieversorgung sowie Effizienzmaßnahmen in verschiedenen Bereichen der Produktions- und Versorgungstechnik entwickelt und umgesetzt. Sie verfolgt das langfristige Ziel einer energieeffizienten, -flexiblen und nahezu energieautarken Fabrik, in welcher verschiedene moderne Technologien zur dezentralen Energiegewinnung sowie Energiespeicherung dafür sorgen, den Bedarf an extern bezogener Energie zu minimieren sowie die Treibhausgasemissionen der Energieversorgung der Fabrik zu reduzieren. Die für Verwaltung und Produktion notwendige Energie in Form von Strom, Wärme und Kälte wird nahezu vollständig vor Ort und aus erneuerbaren Quellen bereitgestellt und optimal genutzt. Um dies zu erreichen waren umfangreiche Investitionen in modernste Produktionsanlagen und Komponenten der technischen Gebäudeausrüstung sowie zur intelligenten Vernetzung und Steuerung dieser notwendig. Die Müller Produktions GmbH plant mit ihrem Konzept der Green Factory eine zunehmende Unabhängigkeit von steigenden Stromkosten zu erreichen und sichert somit langfristig die eigene Wettbewerbsfähigkeit. Am Standort in Ungerhausen werden regenerative Energien durch intelligente Vernetzung, Lastmanagement und Sektorenkopplung optimal und energieflexibel am Produktionsstandort genutzt. Die Green Factory Allgäu ist hierzu zusätzlich zu umweltfreundlichen Produktionsanlagen und der ressourceneffizienten technischen Gebäudeausrüstung mit Systemen zur regenerativen Energieerzeugung, Energiespeicherung und zur intelligenten Vernetzung dieser mit den Produktionsanlagen ausgestattet.

To meet the challenges of the energy transition, in the "Green Factory Allgäu" project Müller Produktions GmbH has developed and implemented several innovative measures for an environmentally friendly energy supply as well as efficiency measures in various areas of production and supply technology. The Green

Factory is pursuing the long-term goal of an energy-efficient, flexible and nearly energy-sufficient factory in which various modern technologies for decentralized energy generation and energy storage ensure that the need for energy sourced from the grid is minimized and the greenhouse gas emissions of the factory's energy supply are reduced. The energy required for administration and production in the form of electricity, heating and cooling is provided almost entirely on site and from renewable sources. For this, extensive investments in state-of-the-art production facilities and components of the technical building equipment as well as for intelligent planning and control of these were necessary. With its Green Factory concept, Müller Produktions GmbH plans to achieve increasing independence from rising electricity costs and thus secure its own competitiveness in the long term. At the site in Ungerhausen, regenerative energies are used optimally and energy-flexibly at the production site through intelligent planning and control, load management and sector coupling. In addition to environmentally friendly production facilities and resource-efficient technical building equipment, the Green Factory Allgäu is equipped with systems for regenerative energy generation, energy storage and intelligent planning and control of these.

5.2 Vorhabensumsetzung / Project implementation

Den in der Green Factory benötigten Strom liefert eine Photovoltaikanlage mit 1,1 MW_p bestehend aus rund 200.000 Solarzellen auf dem Dach der Gebäude. Stromüberschuss wird in einen 200 kWh Batteriespeicher oder das öffentliche Netz gespeist. Derzeit dient der Batteriespeicher zur Reduzierung von Spitzenlasten und zur unterbrechungsfreien Stromversorgung (USV). Zukünftig soll er darüber hinaus mittels modifizierter Betriebsweise auch zur Erhöhung des Eigenverbrauchs genutzt werden. Liefert die Solaranlage aufgrund der Witterungsverhältnisse nicht ausreichend Strom, wird dieser durch ein mit Ökogas betriebenes Blockheizkraftwerk (BHKW) mit 220 kW_{el} und 250 kW_{th} bereitgestellt. Die zusätzlich notwendige Wärme liefert ein 200 kW Holzpelletkessel. Bei längeren Kälteperioden oder Spitzenlasten wird ein ebenfalls mit Ökogas betriebener 2.000 kW Gaskessel zugeschaltet. Außerdem steht eine Erdwärmepumpe zur

Verfügung. Zusätzlich ist der 30 kW Druckluftkompressor mit einer Wärmerückgewinnungsanlage ausgestattet. Überschüssige Wärme und Kälte kann in einem 100.000 Liter Pufferspeicher mit einer Kapazität von etwa 2,09 MWh zwischengespeichert werden. Mittels dreier 200 kW Heizstäbe kann durch Power-to-Heat auch überschüssiger PV-Strom als Wärme gespeichert werden. Aus dem Pufferspeicher werden neben den Verwaltungsflächen und Produktionshallen der Green Factory auch benachbarte Unternehmen im Gewerbegebiet, wie die CB stone-tec GmbH, über ein Nahwärmenetz mitversorgt. Kälte wird durch eine thermische Brunnenanlage mit 600 kW Kälteleistung bereitgestellt, mit welcher Grundwasser für die Gebäudekühlung genutzt wird. Prozessabhängige variable Verbraucher wie eine Laserschneidemaschine, eine Lackieranlage und eine Sandstrahlanlage werden im Sinne des Lastmanagements vorrangig dann betrieben, wenn ausreichend PV-Strom zur Verfügung steht. Auch Prozessmedien wie Druckluft, vollentsalztes Wasser (VE-Wasser) und Stickstoff werden vor Ort erzeugt und bieten als variable Verbraucher mit Speicher zusätzliche Flexibilität zur Anpassung an die volatile Erzeugung.

Basierend auf einer transparenten und belastbaren Analyse der vorherrschenden Energieströme, lag der Fokus dieses Vorhabens zum einen auf der Befähigung zum flexiblen Betrieb der Green Factory u.a. durch die Installation einer Luftzerlegungsanlage für Schneidgase und eines Batteriespeichers zur Steigerung des Energieautarkiegrads. Zum anderen wurden weitere Optimierungsmaßnahmen identifiziert und quantifiziert, die durch die intelligente Vernetzung der genannten technischen Lösungen (Eigenerzeugung- und Speichertechnologien) realisierbar sind. Die durchgeführten Maßnahmen lassen sich den Bereichen Transparenzschaffung und Flexibilitätsbefähigung, Eigenerzeugung und Flexibilisierung sowie Effizienz und Technologie zuordnen. Um die Primärenergieeinsparungen sowie die Reduktion der Treibhausgasemissionen für die einzelnen, durchgeführten Maßnahmen und das Gesamtsystem zu quantifizieren, wurde von April 2020 bis März 2021 ein einjähriges Messprogramm durchgeführt, welches dem Messbericht zu entnehmen ist.

The electricity required in the Green Factory is supplied by a 1.1 MWp photovoltaic plant consisting of around 200,000 solar cells on the roof of the buildings. Excess electricity is fed into a 200 kWh battery storage system or the public power grid. Currently, the battery storage serves to reduce peak loads and provide uninterruptible power supply (UPS). In the future, it will also be used to increase self-consumption. Therefore the operating strategy has to be modified. If the solar system does not supply sufficient electricity due to weather conditions, the needed electricity is provided by an eco-gas operated combined heat and power unit (CHP) with 220 kW_{el} and 250 kW_{th}. The additional heat demand is supplied by a 200 kW wood pellet boiler. For longer cold periods or peak loads, a 2,000 kW gas boiler, also powered by Ökogas, is used. Additionally, a geothermal heat pump is available. The 30 kW air compressor is equipped with a heat recovery system. Excess heat and cold can be temporarily stored in a 100,000 liter buffer tank with a capacity of about 2.09 MWh. By means of three 200 kW heating rods, surplus PV electricity can also be stored as heat through power-to-heat. In addition to the administration areas and production halls of the Green Factory, neighboring companies in the industrial park, such as CB stone-tec GmbH, are also supplied from the buffer storage via a local heating network. Cooling is provided by a thermal well system with 600 kW cooling capacity, with which groundwater is used for building cooling. Process-dependent variable consumers such as a laser cutting machine, a painting system and a sandblasting system are primarily operated in the sense of energy flexible production when sufficient PV power is available. Process media such as compressed air, demineralized water (DI water) and nitrogen are also generated on site and, as variable consumers with storage, provide additional flexibility to adapt to volatile generation.

Based on a transparent and resilient analysis of the prevailing energy flows, the focus of this project was, on the one hand, on enabling flexible operation of the Green Factory by, among other things, installing an air separation plant for cutting gases and a battery storage system to increase the degree of energy self-sufficiency. On the other hand, further optimization measures were identified and quantified that can be realized through the intelligent networking of the technical solutions mentioned (self-generation and storage

technologies). The measures implemented can be assigned to the areas of transparency creation and flexibility enablement, self-generation and flexibilization, and efficiency and technology. In order to quantify the primary energy savings as well as the reduction of greenhouse gas emissions for the individual measures implemented and the overall system, a one-year measurement program was carried out from April 2020 to March 2021, which can be taken from the measurement report.

5.3 Ergebnisse / Project results

Die durchgeführten Maßnahmen zur Transparenzschaffung und Flexibilitätsbefähigung liefern die notwendige Voraussetzung zur intelligenten Steuerung von Erzeugung, Energiespeichern und produktionsabhängigen sowie variablen Verbrauchern. Hierzu wurde ein System zur Prognose der PV-Erzeugung, ein ERP-System für die energieeffiziente Produktionsplanung sowie Gebäudeleittechnik zur Steuerung der TGA und Umsetzung eines automatisierten Lastmanagements implementiert.

Im einjährigen Messzeitraum wurden in der Green Factory 1.458.873 kWh Strom erzeugt, etwa 72% davon durch die PV-Anlagen und 28% durch ein BHKW. Knapp 59% des eigenerzeugten Stroms wurde in der Green Factory selbst verbraucht, 602.415 kWh wurden in das öffentliche Stromnetz eingespeist. In Zeiten der Unterdeckung wurden 302.938 kWh Strom aus dem Netz bezogen. Der gesamte Stromverbrauch des Werks in Höhe von 1.159.396 kWh wurde im Betrachtungszeitraum zu knapp 43% mit eigenerzeugtem PV-Strom, zu 31% mit eigenerzeugtem BHKW-Strom sowie zu 26% mit Strom aus dem öffentlichen Netz gedeckt. Mit diesem Strom-Mix erreicht die Green Factory einen Autarkiegrad von 74%. Etwa 48% des erzeugten PV-Stroms sowie 87% des erzeugten BHKW-Stroms wurden am Produktionsstandort selbst verbraucht, der übrige erzeugte Strom wurde in das Netz eingespeist. Insgesamt wurden im Messzeitraum 2.428 MWh Nutzwärme erzeugt, 966 MWh mittels Pelletkessel, 893 MWh mittels Gaskessel, 555 MWh mittels BHKW sowie 14 MWh aus der Wärmerückgewinnungsanlage des Druckluftkompressors. Mit der

erzeugten Wärme wurde sowohl die Green Factory versorgt als auch in ein lokales Nahwärmenetz eingespeist.

Durch geeignete Betriebsstrategien des Batteriespeichers und des BHKWs können Eigenverbrauchsanteil und Autarkiegrad signifikant erhöht werden. In den Sommermonaten führen diese zu einem zusätzlichen Eigenverbrauch von 34 MWh PV-Strom, der ansonsten in das Netz eingespeist werden würde. Der Eigenverbrauchsanteil erhöht sich so auf 61%, der Autarkiegrad auf 77%. Durch den veränderten Strom-Mix können rund 4,5 t CO₂-Äquivalente eingespart werden. Die Ausweitung des BHKW-Betriebs ermöglicht eine Erhöhung des Eigenverbrauchsanteils auf 63% und des Autarkiegrads auf 86%. Restriktionen bei der maximalen Rückspeisung – festgesetzt durch den Netzbetreiber - werden durch Verschiebungen mittels des Batteriespeichers umgangen. Durch den erweiterten Betrieb des BHKW können infolge höherer Laufzeiten rund 191 MWh Wärme durch das BHKW zusätzlich zu den 555 MWh gewonnen werden. Durch diese Substitution des Gaskessels sowie der Verwendung des zusätzlichen BHKW-Stroms anstatt einem Netzbezug lässt sich ein jährliches Einsparpotenzial von ca. 50 t CO₂-äqv erzielen. Zur Erweiterung des Flexibilisierungspotenzials können Anlagen aus der Produktion und Produktionsinfrastruktur in ihrem Stromverbrauch angepasst werden. Insbesondere eine Laserschneidanlage, Sandstrahl- und Lackierkabinen können den Batteriespeicher durch Lastmanagement ergänzen.

Neben der Flexibilisierung des Verbrauchs und der intelligenten Vernetzung und Steuerung der Erzeugungs-, Speicher-, und Verbrauchsanlagen können die Umweltwirkungen eines Produktionsstandorts insbesondere auch durch die Nutzung energieeffizienter Technologien gesenkt werden. Effiziente Technologien sorgen in der Green Factory Allgäu auf der Verbrauchsseite dafür, dass der Energieverbrauch möglichst gering gehalten werden kann und leisten so einen weiteren Beitrag zur Erhöhung des Eigenverbrauchsanteils und des Autarkiegrads. Unter anderem die Tageslichtadaptive LED-Beleuchtungssysteme, Heiz- und Kühldecken, ein vollautomatisches Hochregallager sowie eine energieeffiziente Laserschneidanlage wurden im Rahmen des Projekts beschafft.

Im betrachteten Jahr konnten durch das innovative Konzept der Green Factory die Treibhausgasemissionen der Wärmeerzeugung im Vergleich zur 100%-igen Wärmeversorgung durch Erdgas um 521 t CO₂-äqv. und 4.645 GJ Primärenergie (nicht reg. Ressourcen) pro Jahr reduziert werden¹. Dies entspricht einer Reduktion um 89 bzw. 44%. Das Treibhauspotenzial des Green Factory Strom-Mix beträgt 0,164 kg CO₂-äqv. pro kWh Strom, was einer Reduktion gegenüber dem deutschen Strom-Mix von 64% entspricht. Auch bezüglich der Primärenergie ist eine erhebliche Einsparung von 35% gegenüber dem aus dem Netz bezogenen Strom möglich. Im Vergleich zum reinen Bezug des Stroms aus dem deutschen Stromnetz vermeidet die Green Factory 334 t CO₂-äqv. pro Jahr und spart 2.496 GJ Primärenergie (nicht reg. Ressourcen) pro Jahr ein. Durch die Reduktion der Transportaufwände und die vorrangig mit PV-Überschuss-Strom gespeiste Eigenerzeugung des Stickstoffs können die Treibhausgasemissionen im Vergleich zum Bezug des Stickstoffs von extern um 83% reduziert werden. Auch durch die Reduktion der Transportaufwände bei der Einlagerung sowie Entnahme aus dem vollautomatischen Hochregallager können 83% der Treibhausgasemissionen eingespart werden. Insgesamt konnten in der Green Factory so 869 t CO₂-äqv. pro Jahr im Vergleich zur konventionellen Energie- und Medienversorgung eingespart werden¹. Durch die Kombination der verschiedenen Strom- und Wärmeerzeugungsanlagen sowie der Flexibilisierungs- und Effizienztechnologien konnte die Müller Produktions GmbH im Messzeitraum 186.358 € (87%) Stromkosten gegenüber dem Netzbezug sowie 108.515 € (51%) Wärmekosten einsparen.

Einige Maßnahmen wie die Vor-Ort-Erzeugung des Stickstoffs sowie weiterer Formiergase leisten bereits heute einen Beitrag zur Erhöhung des Autarkiegrads sowie der Eigenverbrauchsquote. Im Rahmen des Vorhabens konnten weitere noch ungenutzte theoretische Potenziale zur Lastverschiebung sowie intelligenten Betriebsweisen von BHKW und Batteriespeicher identifiziert werden.

¹ Hierbei sind auch die Reduktionspotentiale für die Erzeugung der Wärme, die in das Nahwärmenetz eingespeist wird, berücksichtigt

Um deren Potential abzuschätzen, wurden unterschiedliche Szenarien sowohl hinsichtlich des Treibhauspotential als auch hinsichtlich des Autarkiegrads und der Eigenverbrauchsquote bewertet (vgl. Abbildung 65). Insbesondere eine vermehrte Nutzung des BHKWs in den Wintermonaten (Szenario 3) kann zu einer weiteren signifikanten Reduktion der Treibhausgasemissionen und zu einer Erhöhung des Autarkiegrads führen. Werden alle Maßnahmen umgesetzt, kann i.V. zu einem Netzbezug (Referenz) 672 t CO₂-äqv. pro Jahr und i.V. zum Ausgangs-Zustand, d.h. vor Projektstart, 74 t CO₂-äqv. pro Jahr für den Betrieb¹ der Green Factory eingespart werden.

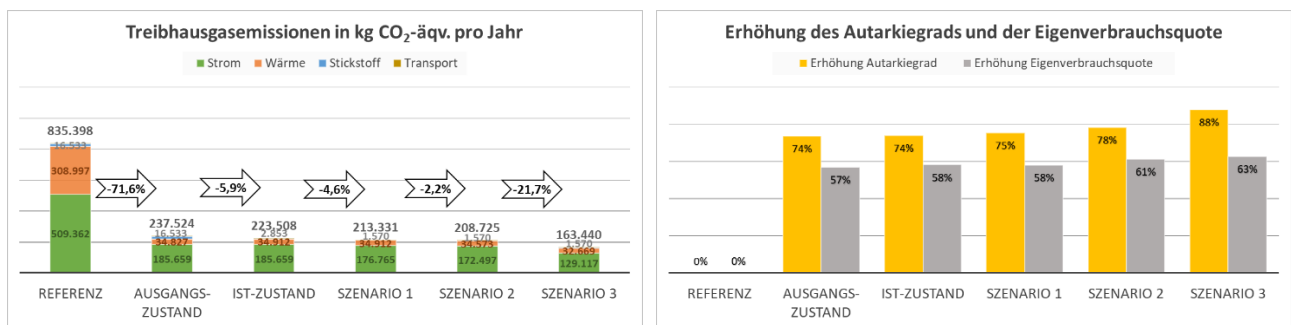


Abbildung 65: Übersicht der wichtigsten Ergebnisse der Szenarienanalyse für den Betrieb der Green Factory

The measures implemented to create transparency and enable flexibility provide the necessary prerequisite for the intelligent control of generation, energy storage and production-dependent and variable consumers. For this purpose, a system for forecasting PV generation, an ERP system for energy-efficient production planning, and building control technology for controlling the building services and implementing automated load management were implemented.

During the one-year measurement period, the Green Factory generated 1,458,873 kWh of electricity, about 72% of which was generated by the PV systems and 28% by a CHP unit. Just under 59% of the self-generated

¹ Die Reduktion der Umweltwirkungen durch die Einspeisung von PV- und BHKW-Strom in das öffentliche Netz sowie dem Green Factory Wärme-Mix ins Nahwärmenetz sind hier nicht berücksichtigt.

electricity was consumed at the Green Factory itself, and 602,415 kWh was fed into the public power grid. During periods of shortage, 302,938 kWh of electricity was purchased from the grid. During the period under review, the factory's total electricity consumption of 1,159,396 kWh was covered by almost 43% self-generated PV electricity, 31% self-generated CHP electricity and 26% electricity from the public grid. With this electricity mix, the Green Factory achieved a self-sufficiency level of 74%. About 48% of the generated PV electricity as well as 87% of the generated CHP electricity was consumed at the production site itself, the remaining generated electricity was fed into the grid. A total of 2,428 MWh of useful heat was generated during the measurement period, 966 MWh by means of a pellet boiler, 893 MWh by means of a gas boiler, 555 MWh by means of a CHP unit and 14 MWh from the heat recovery system of the air compressor. The heat generated was used both to supply the Green Factory and to feed into a local district heating network. Suitable operating strategies of the battery storage and the CHP unit can significantly increase the self-consumption share and the degree of autarky. In the summer months, these lead to additional self-consumption of 34 MWh of PV electricity that would otherwise be fed into the grid. The self-consumption share thus increases to 61% and the degree of self-sufficiency to 77%. The change in the electricity mix can save around 4.5 t of CO₂ equivalents. The expansion of the CHP operation enables the self-consumption share to be increased to 63% and the degree of self-sufficiency to 86%. Restrictions on the maximum amount of electricity that can be fed back into the grid imposed by the grid operator are circumvented by shifting it using the battery storage system. This also results in a further increase in the self-consumption share to 66% and the degree of self-sufficiency to 83%. The extended operation of the CHP unit means that around 191 MWh of additional heat on top of the 555 MWh can be generated due to increased operating hours. This substitution of the gas boiler and a reduction of electricity from the public grid can achieve an annual savings potential of around 50 t CO₂-eq. To expand the flexibility potential, plants from production and production infrastructure can be adapted in their electricity consumption. In particular, a laser cutting system, sandblasting and painting booths can supplement battery storage through load management.

In addition to making consumption more flexible and intelligently networking and controlling the generation, storage and consumption systems, the environmental impact of a production site can also be reduced in particular by using energy-efficient technologies. In the Green Factory Allgäu, efficient technologies on the consumption side ensure that energy consumption can be kept as low as possible and thus make a further contribution to increasing the proportion of self-consumption and the degree of self-sufficiency. Among other things, daylight-adaptive LED lighting systems, heated and chilled ceilings, a fully automated high-bay warehouse, and an energy-efficient laser cutting system were procured as part of the project.

In the year under review, the Green Factory's innovative concept reduced greenhouse gas emissions from heat generation by 521 kg CO₂ eqv. and 4,646 GJ of primary energy per year compared to a 100% heat supply by natural gas¹. This corresponds to a reduction of 89 respectively 44%. The greenhouse potential of the Green Factory electricity mix is 0.164 kg CO₂-eqv. per kWh of electricity, which corresponds to a reduction of 64% compared to the German electricity mix. Also, in terms of primary energy, a significant saving of 35% is possible compared to electricity purchased from the grid. Compared to only purchasing electricity from the German grid, the Green Factory avoids 334 t CO₂-eqv. per year and saves 2,496 GJ primary energy per year. By reducing transportation efforts and generating its own nitrogen primarily fed by PV surplus electricity, greenhouse gas emissions can be reduced by 83% compared to purchasing nitrogen from external sources. Also, by reducing the transportation effort for storage as well as removal from the fully automated high-bay warehouse, 83% of greenhouse gas emissions for internal transports can be saved. In total, 869 t CO₂-eq. per year could be saved in the Green Factory compared to conventional energy and media supply¹. By combining the various electricity and heat generation systems, Müller Produktions GmbH was able to save € 186,358 (87%) in electricity costs compared to grid purchases and € 108,515 (51 %) in heat costs during the measurement period.

¹ The reduction potentials for the generation of the heat that is fed into the local heating network are also taken into account.

Some measures, such as the on-site generation of nitrogen and other forming gases, already contribute to increasing the degree of self-sufficiency and the self-consumption rate. Within the scope of the project, further still unused potentials for load shifting as well as intelligent operation of CHP and battery storage were identified.

In order to estimate their potential, different scenarios were evaluated both with regard to the global warming potential as well as with regard to the degree of self-sufficiency and self-consumption (see Abbildung 66). In particular, increased use of the CHP in the winter months (scenario 3) can lead to a further significant reduction in greenhouse gas emissions and an increase in the degree of self-sufficiency. If all measures are implemented, 672 t CO₂-eq. can be saved per year compared to a grid purchase (reference) and in relation to the initial state, i.e. before the start of the project, 74 t CO₂-equivalent can be saved annually for the operation of the Green Factory¹.

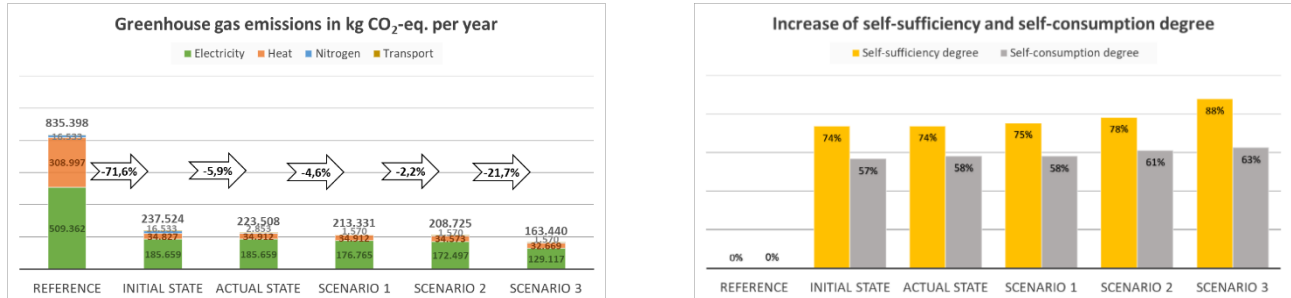


Abbildung 66: Overview of the most important results of the scenario analysis for the operation of the Green Factory

5.4 Ausblick / Prospects

Aufgrund der Komplexität und des in seinem Umfang neuartigen Konzepts war die Durchführung des Projekts mit vielen Unsicherheiten verbunden. Dies führte zum einen zu vielen Verzögerungen während des

¹ The reduction of the environmental impact by feeding PV and CHP electricity into the public network as well as the Green Factory heat mix in the local heating network are not taken into account here.

Projektverlaufs. Zum anderen ist festzuhalten, dass noch nicht alle Potentiale vollständig ausgeschöpft worden sind und sich somit die Green Factory Allgäu auch zukünftig kontinuierlich weiterentwickeln wird. Während der Projektlaufzeit wurde dies beispielsweise durch die Anpassung des Wärme-/Kältekonzepts aufgrund sich ändernder Randbedingungen sowie neuer Erkenntnisse aus dem Betrieb deutlich. Insbesondere die intelligente Steuerung aller Erzeuger, Verbraucher und Speicher der Green Factory wird auf Basis neuer Erkenntnisse und politischer Rahmenbedingungen fortwährend angepasst. Durch die Schaffung der Transparenz über alle Energieflüsse dank der installierten Messtechnik, der Visualisierung in der Energiemanagementsoftware sowie der Verknüpfung mit Produktionsdaten ist die notwendige Grundlage zur kontinuierlichen Anpassung und Optimierung einer effizienten, flexiblen und nahezu autarken Fabrik geschaffen.

Die Green Factory zeigt eindrucksvoll, wie Unternehmen die Energiewende für sich nutzen und einen Beitrag zu Ihrem Gelingen leisten können. Durch die Branchenunabhängigkeit des realisierten Konzepts und den modularen Aufbau ist dies auf Unternehmen unterschiedlichster Ausrichtung und Größe adaptierbar. Die Green Factory ist durch ihre Kombination vielseitiger Technologien zur Versorgung, Speicherung und Kopplung der Sektoren flexibel und resilient gegenüber zukünftigen Entwicklungen im Energiemarkt. Sie optimiert die dezentrale Nutzung erneuerbarer Energien und kann gleichzeitig durch Energieflexibilität und Lastmanagement zur Stabilisierung der Stromnetze beitragen.

Due to the complexity and innovation regarding the scope, the implementation of the project was associated with many uncertainties. This led to many delays during the course of the project. It should be noted that not all potentials have been fully exploited yet and thus the Green Factory Allgäu will continue to develop continuously in the future. During the course of the project, this became clear, for example, through the adaptation of the heating/cooling concept due to changing boundary conditions as well as new findings from the operation. In particular, the intelligent control of all generators, consumers and storage units of the Green Factory will be continuously adapted based on new findings and political framework conditions. By

creating transparency over all energy flows thanks to the installed measurement technology, the visualization in the energy management software as well as the linkage with production data, the necessary basis for the continuous adaptation and optimization of an efficient, flexible and almost self-sufficient factory has been created.

The Green Factory impressively demonstrates how companies can use the energy transition for themselves and contribute to its success. Due to the industry-independence of the implemented concept and the modular structure, this can be adapted to companies of different orientation and size. The Green Factory is flexible and resilient to future developments in the energy market due to its combination of versatile technologies for supply, storage and coupling of sectors. It optimizes the decentralized use of renewable energies and, at the same time, can contribute to the stabilization of the power grids through energy flexibility and load management.

6 References

1. Alois Müller GmbH. Green Factory: Die CO₂-neutrale Fabrik. Available online: <https://alois-mueller.com/unternehmen/energiekonzept/> (accessed on 18 June 2021).
2. BMU. Das neue Klimaschutzgesetz. Available online: <https://www.bmu.de/mehrklimaschutz/> (accessed on 18 June 2021).
3. BMU. *Klimaschutzplan 2050. Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung, 2016.* Available online: <https://www.bmu.de/publikation/klimaschutzplan-2050/> (accessed on 1 June 2021).
4. BDEW. Stromverbrauch in Deutschland nach Verbrauchergruppen 2020: Industrie nutzt die Hälfte des Stroms. Available online: https://www.bdew.de/media/documents/Nettostromverbrauch_nach_Verbrauchergruppen_2020_online_o_jaehrlich_Ki_1812202_jlKEAHV.pdf (accessed on 1 June 2021).
5. UBA. Energieverbrauch nach Energieträgern und Sektoren. Available online: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energieverbrauch-nach-energietraegern-sektoren#allgemeine-entwicklung-und-einflussfaktoren> (accessed on 1 June 2021).
6. BDEW. BDEW-Strompreisanalyse Januar 2021. Haushalte und Industrie. Available online: https://www.bdew.de/media/documents/BDEW-Strompreisanalyse_no_halbjaehrlich_Ba_online_28012021.pdf (accessed on 1 June 2021).
7. Ernst & Young GmbH Wirtschaftsprüfungsgesellschaft. *Wirtschaft unter Strom. Wie Unternehmen sich unabhängiger und kostengünstiger selbst mit Energie versorgen., 2016.*
8. Deutsch, M.; Jahn, A.; Krampe, L.e.a. Eigenversorgung aus Solaranlagen. Das Potenzial für Photovoltaik-Speicher-Systeme in Ein- und Zweifamilienhäusern, Landwirtschaft sowie im Lebensmittelhandel. Available online: https://www.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2016/Dezentralitaet/Agora_Eigenversorgung_PV_web-02.pdf.
9. erdgas schwaben gmbh. Günstiges Öko-Gas für alle. Available online: <https://www.erdgas-schwaben.de/privat/gas/mein-oekogas> (accessed on 18 June 2021).
10. Alois Müller Gruppe. Heute und morgen - Ihr Partner: Geschäftsbroschüre. Available online: https://alois-mueller.com/wp-content/uploads/2019/07/Brosch%C3%BCre_Gesch%C3%A4ftskunden.pdf (accessed on 18 June 2021).
11. Fraunhofer IGCV. *Abschlussbericht an die Bayerische Forschungstiftung. Energieautarke Produktion, 2019.*
12. European Comission. PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM. Available online: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/#PVP (accessed on 18 June 2021).
13. Stette, J. *Schlussbetrachtung Bauvorhaben Energiespeicher. Projektbericht, 2012.*

14. Deutsche Energie-Agentur GmbH. *Erfolgreiche Abwärmenutzung im Unternehmen: Energieeffizienzpotenziale erkennen und erschließen.*, 2015. Available online: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2019/1445_Broschuere_Abwaermenutzung.pdf (accessed on 9 June 2021).
15. Bayerisches Landesamt für Umwelt. *Abwärmenutzung im Betrieb. Klima schützen - Kosten senken*, 2012. Available online: https://www.hannover.ihk.de/fileadmin/data/Dokumente/Themen/Energie/Abw%C3%A4rmenutzung_im_betrieb_LFU_Bayern.pdf (accessed on 9 June 2021).
16. eurolaser GmbH. *Energieeffiziente Kühleinheiten - Welchen Einfluss die Raum-Temperatur auf Ihre Produktion.* Available online: <https://www.eurolaser.com/de/lasersysteme/system-komponenten/kuehleinheiten/> (accessed on 9 June 2021).
17. Mantwill, E.; Pflieger, D.; Tobler, M. Warum ein passgenauer Kühler die Leistungsfähigkeit des Lasers unterstützt und Energiekosten reduziert. Available online: <https://www.blechnet.com/warum-ein-passgenauer-kuehler-die-leistungsfahigkeit-des-lasers-unterstuetzt-und-energiekosten-reduziert-a-740445/> (accessed on 9 June 2021).
18. Kellens, K.; Rodrigues, G.C.; Dewulf, W.; Duflou, J.R. Energy and Resource Efficiency of Laser Cutting Processes. *Physics Procedia* 2014, *56*, 854–864, doi:10.1016/j.phpro.2014.08.104.
19. Müller, A. *Macher berichten aus der Praxis. Best-Practice: Brunnen als Wärme- und Kältequelle.* Energie im Fokus, Green Factory 2.0, 1. Forum Erdwärme und Wärmepumpe in Bayern. Available online: <http://docplayer.org/125423911-Macher-berichten-aus-der-praxis-best-practice-brunnen-als-waerme-und-kaeltequelle.html> (accessed on 3 September 2021).
20. Linde Material Handling. *Typenblatt H 50/500 erhöhter Fahrerplatz*, 2011.
21. AG Energiebilanzen. Heizwerte 2005 bis 2019. Available online: https://ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=heizwerte2005bis2019.pdf (accessed on 9 June 2021).
22. Steinbach, J.; Gerspacher, A.; Schlomann, B.; Chassein, E.; Emsmann, F.; Ashley-Belbin, N. Potential für energieeffiziente Beleuchtungssysteme in Unternehmen und Hemmnisse bei der Umsetzung. Available online: https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/ccx/2019/FraunhoferISI-IREES-Effiziente-Beleuchtungssysteme_2019.pdf.
23. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH. *Ökologische und ökonomische Bewertung des Ressourcenaufwands: Stationäre Energiespeichersysteme in der industriellen Produktion*, 2018.



7 Anhang

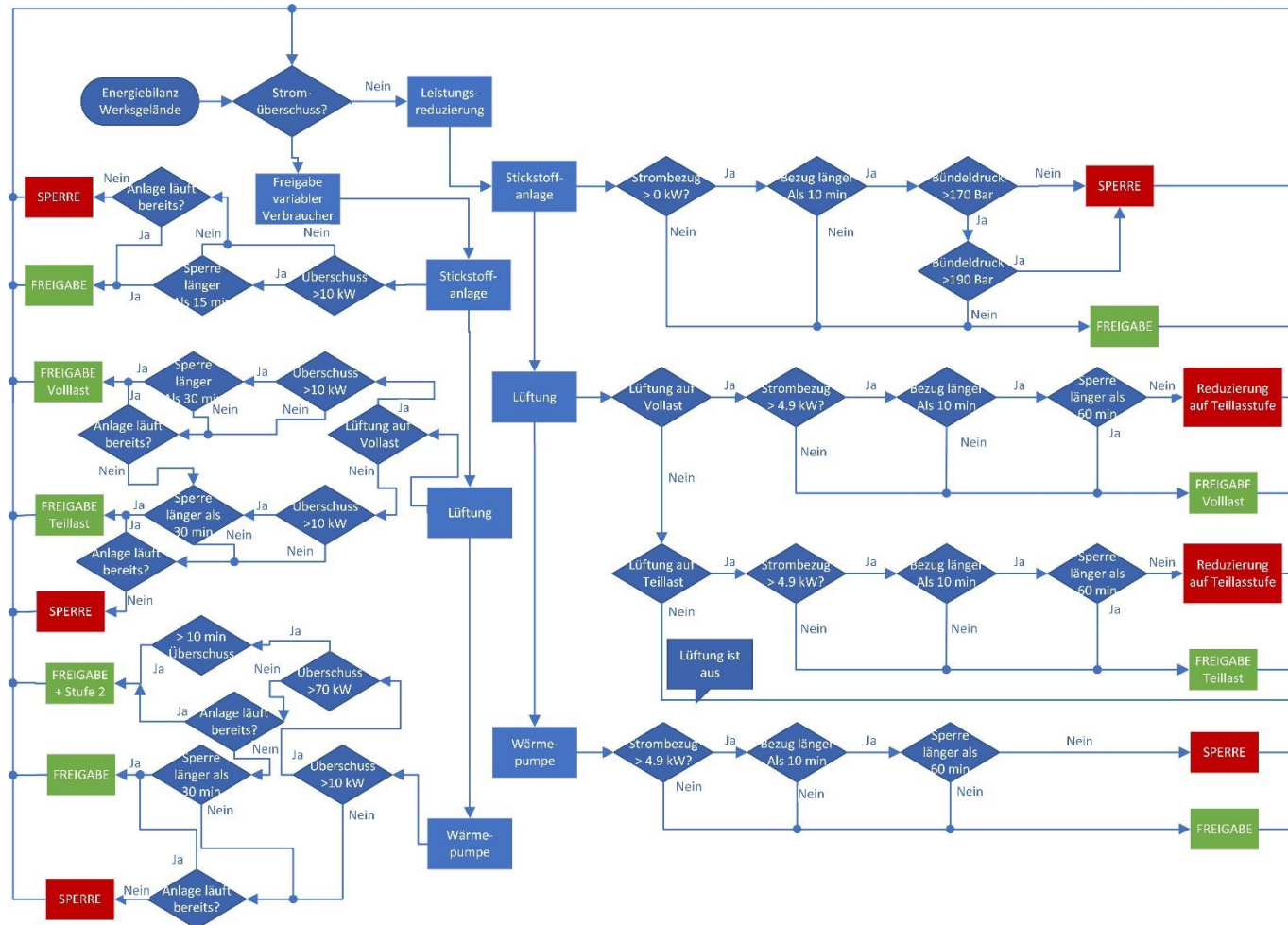


Abbildung 67: Logik zur Steuerung des Lastmanagements bestehend aus Stickstoffanlage, Lüftung und Wärmepumpe