



**Lehrstuhl für Energieverbundtechnik**

Lehrstuhlleiter

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Thomas Kienberger

Franz-Josef-Straße 18, A-8700 Leoben

Website: [evt.unileoben.ac.at](http://evt.unileoben.ac.at)



## Masterarbeit

# CHARAKTERISIERUNG DER LEISTUNGSELEKTRONIK FÜR DIE ELEKTRISCHE NETZKOPPLUNG EINES SOFC SYSTEMS

erstellt am

Lehrstuhl Energieverbundtechnik

Vorgelegt von:

Philipp Prikoschnig, BSc

01535251

Betreuer:

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Thomas Kienberger

Dipl.-Ing. Benjamin Böckl

Dipl.-Ing. Dr. techn. Martin Hauth

Leoben, April 2018

## **EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG**

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

## **AFFIDAVIT**

I declare in lieu of oath, that I wrote this thesis and performed the associated research myself, using only literature cited in this volume.

---

Leoben, 01.05.2018

---

Unterschrift

### **KURZFASSUNG**

In Zukunft wird die Weltbevölkerung immer mehr Energie für ihren „Energiewohlstand“ benötigen. Um die dafür benötigte Energie bereitzustellen und gleichzeitig die Umwelt zu schonen, wird daher vermehrt auf erneuerbare Energieträger gesetzt. Doch trotz aller Bemühungen gibt es zurzeit, Situationen in der die Deckung dieses Energiebedarfs mit Erneuerbaren nicht gewährleistet werden kann. Daher wird noch stark auf fossile Energieträger gesetzt, die dafür jedoch möglichst effizient genutzt werden sollen. Ein SOFC System bringt eine sehr hohe Energieeffizienz mit sich und kann zusätzlich sowohl mit Erdgas aber auch mit Wasserstoff aus erneuerbaren Energien betrieben werden.

In dieser Arbeit liegt der Schwerpunkt darin, die elektrische Leistung die durch eine funktionierende 5 kW SOFC Anlage entsteht, bedarfsgerecht einsetzen zu können und in das elektrische Netz einzuspeisen. Diese Aufgabenstellung erscheint am ersten Blick als sehr einfach, da bereits Photovoltaikanlagen in diesem Leistungsbereich mit dem elektrischen Netz einfach gekoppelt werden. Auf Grund der speziellen Parameter der SOFC Anlage, bei der das System einen sehr hohen Strom bei einer verhältnismäßig niedrigen Spannung produziert, sind jedoch herkömmliche Wechselrichter für eine Einbindung in das elektrische Netz nicht nutzbar. Die meisten Wechselrichter können in diesem niedrigen Spannungsniveau nicht bei voller Leistung arbeiten. Daher ist es notwendig einen geeigneten DC/DC Wandler für diese Schaltung zu finden, um die Parameter des SOFC Systems für den Wechselrichter ideal aufzubereiten. Durch diese Anpassung der Parameter ist es möglich, einen herkömmlichen Photovoltaikwechselrichter für die elektrische Einspeisung zu verwenden. Dieses Einspeisekonzept soll jedoch möglichst effizient und dynamisch arbeiten, um minimale Verluste bei der Einspeisung zu erzeugen. Des Weiteren ist es wichtig, dass das System im Stande ist, eine hohe Spannungs- und Stromqualität an das Netz zu liefern und keine zusätzlichen Verzerrungen zu erzeugen.

Nachdem der prinzipielle Aufbau des Einspeisekonzeptes kreiert wurde, soll das Gesamtsystem für einen optimalen Betrieb der internen Versorgungsgeräte erstellt werden. Dabei soll neben einer sehr effizienten Nutzung, der zur Verfügung stehenden Energien, auch die Möglichkeit eines Inselbetriebes untersucht werden. An dieser Stelle wurden unterschiedliche Konzepte gegenübergestellt und anhand der möglichen Betriebsstrategien aufgegliedert. Dadurch ist zu erkennen, dass es sowohl Einschränkungen im Bereich der maximalen Ausgabeleistung, aber auch auf Grund des Betriebsmodus gibt. Auf diese Weise ergeben sich mehrere Lösungen, die für dieses Konzept eingesetzt werden können, wobei die Abwägung zu treffen ist, ob es wichtiger ist, den Eigendeckungsgrad der Anlage zu steigern, oder konstant mehr als 5 kW elektrische Leistung in das elektrische Netz zu liefern.

### **ABSTRACT**

In the future, the world's population will need more and more energy for its "energy wealth". In order to reach the ambitious goals of reducing CO<sub>2</sub> emissions as well as to satisfy growing global energy demand, an increasing amount of renewable energy production is necessary. As energy gained from renewable sources is highly dependent on weather, seasons and other influences, there the demand cannot be covered by the renewable production only. Thus there is still a dependence on fossil fuels, but they should be used as efficiently as possible. Fuel cells (SOFC systems) on the one hand are highly flexible and on the other hand also able to run on both natural gas and hydrogen which may be produced out of renewable sources.

This work, focuses on supplying the electrical power generated by a functioning 5 kW SOFC system into the electrical grid. In the first step, this formulation appears to be banal, since photovoltaic systems in this performance range are already commonly coupled to the electrical grid. However, due to the different operational parameters of the SOFC system, in which the system produces a very high current at a very low voltage, conventional PV inverters cannot be used for integration into the electrical grid without additional measures. Most inverters cannot operate their full power at this low voltage level. Therefore, it is necessary to find a suitable DC/DC converter which ideally fits to the parameters of the SOFC system and the inverter. By adjusting the parameters of the SOFC system, it is possible to use a conventional photovoltaic inverter for the electric supply. However, this concept is intended to work very efficiently and dynamically to generate minimal loss during the electric supply. Furthermore, it is important that the system is able to deliver high voltage and current quality to the grid as well as not to generate any harmonics.

Once the basic structure of the feed-in concept has been designed, the overall system has to be created for the optimum operation of the internal supply units. In addition to a very efficient use of the available energy, the possibility of an isolated operation will be investigated. Regarding these restrictions, different concepts were compared and analyzed on possible operating strategies. This indicates that there are limitations in the range of maximum output power, which leads to a limited number of operating modes. Due to those restrictions, several solutions are developed and presented within this thesis. The concepts can either increase the degree of self-sufficiency of the plant or constantly feed more than 5 kW of electrical power into the grid.

## **VORWORT**

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen beteiligten Personen, welche am erfolgreichen Abschluss dieser Arbeit mitgewirkt haben, bedanken.

Im Besonderen möchte ich mich dabei bei der Firma AVL List GmbH bedanken, die es mir möglich gemacht haben eine praxisnahe und interessante Arbeit durchzuführen. Bei der Durchführung meiner Arbeit habe ich immer positives Feedback erhalten. Speziell Herr Dipl.-Ing. Dr. techn. Martin Hauth stand mir immer mit Rat und den nötigen Kontakten für das jeweilige Fachthema zur Seite.

Des Weiteren möchte ich mich bei der Montanuniversität Leoben und speziell dem Lehrstuhl Energieverbundtechnik bedanken. Durch die Nutzung des dortigen Equipments, dass teilweise für diese Versuche angeschafft wurden, war es mir möglich die Ergebnisse meiner Arbeit zu erlangen und zu testen. Ein spezieller Dank gilt hierbei Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Thomas Kienberger, der mir mit seinen Expertisen zur Seite stand und die nötigen Beschaffungen ermöglichte. Ein großer Dank gilt auch Herrn Dipl.-Ing. Benjamin Böckl, der für mich immer ein offenes Ohr für meine Anliegen hatte und mit seinem umfangreichen Wissen einen großen Beitrag an dem Ergebnis hat.

Abschließend möchte ich meinen Eltern und meinen Studienkollegen danken, die mir ein angenehmes und erfolgreiches Studium ermöglicht haben.

## **INHALTSVERZEICHNIS**

<b>Akronyme und Abkürzungen</b> .....	<b>I</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>IV</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>VII</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Aufgabenstellung</b> .....	<b>2</b>
2.1 Vorgehensweise.....	2
<b>3 Theoretische Grundlagen</b> .....	<b>4</b>
3.1 SOFC System .....	4
3.1.1 SOFC Brennstoffzelle .....	6
3.1.2 Aufbau eines SOFC Systems .....	8
3.1.3 Betriebscharakteristik eines SOFC Systems .....	10
3.1.4 Marktanwendungen eines SOFC Systems.....	14
3.1.5 Netzeinbindung .....	19
3.2 Elektrische Netzeinbindung einer SOFC Anlage .....	20
3.2.1 Anforderungen der SOFC Anlage .....	20
3.2.2 Betriebsarten.....	35
3.2.3 Anschlussbedingungen einer SOFC Anlage .....	37
<b>4 Modellrealisierung einer SOFC Anlage für den Netzparallelbetrieb</b> .....	<b>44</b>
4.1 Direkter Netzanschluss .....	44
4.2 Indirekter Netzanschluss .....	45
4.2.1 Messaufbau indirekter Netzanschluss .....	46
4.3 Inbetriebnahme der Leistungselektronik .....	49
4.3.1 Kommunikation .....	49
4.3.2 Steuerung .....	51
<b>5 Charakterisierung der Leistungselektronik</b> .....	<b>53</b>
5.1 Datengrundlage .....	53
5.1.1 SOFC Kennlinien .....	53

# Inhaltsverzeichnis

---

5.1.2	Lastprofile.....	55
5.2	Charakteristik.....	57
5.2.1	Wirkungsgrad .....	58
5.2.2	Schnellstart.....	64
5.2.3	Dynamischer Lastwechsel .....	68
5.2.4	Selbstgeführter Betrieb .....	68
5.2.5	Lastgeführter Betrieb .....	71
5.2.6	Strom-Spannungsqualität.....	74
5.2.7	Blindleistungsverhalten.....	77
<b>6</b>	<b>Systemauslegung eines SOFC Systems .....</b>	<b>78</b>
6.1	Ausgangslage .....	78
6.2	Peripheriegeräte .....	79
6.2.1	Gebälse.....	79
6.2.2	Elektrische Versorgung.....	81
6.3	Konzepte .....	81
6.3.1	Netzparallelbetrieb .....	82
6.3.2	Notstrom-Inselbetrieb.....	86
6.3.3	Konzeptvergleich.....	91
6.4	Umschaltung der Betriebszustände.....	94
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung &amp; Ausblick .....</b>	<b>96</b>
<b>8</b>	<b>Diskussion.....</b>	<b>98</b>
8.1	Annahmen.....	98
8.2	Verzerrungen .....	98
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>99</b>
<b>10</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>105</b>

## AKRONYME UND ABKÜRZUNGEN

### Abkürzungen

AFC	Alkaline Fuel Cell
AKM	Absorbtionskältemaschine
BHKW	Blockheizkraftwerk
DC	Gleichspannung
E-Motor	Elektromotor
ENS	Einrichtung zur Netzüberwachung mit zugeordneten Schaltorganen
HGÜ	Hochspannungsgleichspannungsübertragung
HST	Hochsetzsteller
I	Strom
KTE	Kurzzeitige Trennung
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell
μKWK	Mikro-Kraft-Wärme-Kopplung
μKWKK	Mikro-Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cell
PEMFC	Polymer Electrolyt Membrane Fuel Cell
PV	Photovoltaik
RTU	Remote Terminal Unit
SOFC	Solid Oxid Fuel Cell
TCP	Transmission Control Protocol
THD	Total Harmonic Distortion /Gesamte harmonische Verzerrung

## Akronyme und Abkürzungen

---

U	Spannung
WR	Wechselrichter
Indizes	
$\cos(\varphi)$	Leistungsfaktor [/]
$E^{\circ}$	Standardpotenzial [V]
$E^{\circ}_{H}$	Heizwertspannung [V]
$E_{N}$	Nernstspannung [V]
$E_{Z}$	Zellspannung [V]
f	Frequenz [Hz]
F	Faraday Konstante [As/mol]
G	Freie Enthalpie/ Gibbs-Energie [J]
H	Enthalpie [J]
I1	Strom Phase 1 [A]
U1	Spannung Phase 1 [V]
n	Drehzahl [1/min]
$\eta_{z}$	Zellwirkungsgrad [%]
p	Polpaare [/]
$p_i$	Partialdruck [Pa]
$p_0$	Standarddruck [Pa]
P1	Wirkleistung auf der Phase L1 [W]
Pges	Wirkleistung gesamt [W]
Q	Wärmemenge [J]
$R_m$	Allgemeine Gaskonstante [J/kmolK]
S	Entropie [J/K]

## Akronyme und Abkürzungen

---

T	Temperatur [K]
$U_L$	Ausgangsspannung Hochsetzsteller [V]
$U_1$	Netzspannung Phase 1 [V]
$U_{21}$	Wechselrichter erzeugte Netzspannung [V]
$\nu$	Stöchiometrischer Koeffizient [/]
W	Technische Arbeit [J]
z	Ladungszahl [/]

### ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 3-1: Vergleich der Umwandlungsketten von Brennstoffenergie in elektrische Energie [3] ..	5
Abbildung 3-2: Wirkungsgradvergleich zwischen Brennstoffzellen und Wärmekraftmaschinen [3, 7]	5
Abbildung 3-3: Planarer Aufbau einer Brennstoffzelle [9] .....	7
Abbildung 3-4: SOFC Funktionsprinzip [10].....	7
Abbildung 3-5: Prozessschema SOFC Anlage [12, 14] .....	10
Abbildung 3-6: U/I Kennlinie SOFC mit begrenzten Brennstoff [13].....	13
Abbildung 3-7: Primärenergievergleich $\mu$ KWK und getrennte Erzeugung [15] .....	15
Abbildung 3-8: Trigeration SOFC Anwendungen [17] .....	16
Abbildung 3-9: SOFC System mit gekoppeltem Gaskreislauf [18].....	17
Abbildung 3-10: SOFC System Großanlage [20] .....	18
Abbildung 3-11: SOFC System als KWK-Anlage [18].....	19
Abbildung 3-12: $\mu$ KWKK-Anlage [22].....	20
Abbildung 3-13: Schaltung Hochsetzsteller mit ohmscher Last [27].....	22
Abbildung 3-14: Lückfreier Betrieb (links); Lückbetrieb (rechts) [27] .....	23
Abbildung 3-15: Ersatzschaltbild eines Eintakt-Durchflusswandlers [27] .....	25
Abbildung 3-16: Lückfreier Betrieb des Eintakt-Durchflusswandlers [27] .....	26
Abbildung 3-17: Ersatzschaltbild eines Sperrwandlers [27] .....	28
Abbildung 3-18: Trapezförmiger Stromverlauf von einem Sperrwandler [27] .....	29
Abbildung 3-19: Zweipuls-Mittelpunktschaltung; Motor(links); Generator (rechts) [27] .....	30
Abbildung 3-20: Spannungs-Stromverlauf vom netzgeführten Wechselrichter[27] .....	31
Abbildung 3-21: Selbstgeführter Wechselrichter-Schaltung [27] .....	32
Abbildung 3-22: Spannungsverlauf des Wechselrichterausgangs [27] .....	33
Abbildung 3-23: Leistungsentnahme (links); Leistungseinspeisung (rechts) [27] .....	33
Abbildung 3-24: Pulsbreitensteuerung (links); Zweipunktregelung (rechts) [27] .....	34
Abbildung 3-25: Sinusbewertete Pulsbreitensteuerung [27].....	34
Abbildung 3-26: Selbstgeführter 3-phasiger Wechselrichter [27] .....	35
Abbildung 3-27: Einbindungsmöglichkeiten einer SOFC Anlage in das elektrische Netz.....	35
Abbildung 3-28: Netzebenen [20] .....	38
Abbildung 3-29: Oberschwingungsbeurteilung Nieder- (NS) und Mittelspannungsnetze (MS) [37]....	41
Abbildung 3-30: Dynamische Netzstützung [41] .....	42
Abbildung 4-1: Direktes Netzeinspeisekonzept (SMA-Hydro Boy) [26] .....	45
Abbildung 4-2: Indirektes Netzeinspeisekonzept [20] .....	46
Abbildung 4-3: Versuchsanlage EVT .....	46
Abbildung 4-4: Messschaltung .....	47

## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 4-5: Fronius Energieflussdiagramm .....	50
Abbildung 4-6: LabView-Bedienfeld .....	52
Abbildung 5-1: Diagramm SOFC U/I-Kennlinie [53] .....	54
Abbildung 5-2: Diagramm SOFC Kennlinie [53].....	54
Abbildung 5-3: SOFC Kennlinie mit begrenzten Brennstoff (Planare und turbuläre Bauweise) [8].....	55
Abbildung 5-4: Elektrisches Lastprofil über eine Woche/August [51] .....	56
Abbildung 5-5: Dynamisches Lastprofil über 3 Tage/August [51].....	56
Abbildung 5-6: Lastprofil über eine Woche/September [52].....	57
Abbildung 5-7: Blockschaltbild der charakteristischen Messpunkte .....	58
Abbildung 5-8: Statischer und dynamischer Wirkungsgrad des Gesamtsystems ohne HST-Lüfter .....	59
Abbildung 5-9: Wirkungsgradabhängigkeit der Leistung des gesamten Einspeisesystems.....	60
Abbildung 5-10: Positive Rampenrate des Wechselrichters bei Warmstart.....	64
Abbildung 5-11: Negative Rampenrate des Wechselrichters .....	65
Abbildung 5-12: Warmstart der SOFC Anlage .....	65
Abbildung 5-13: Kaltstart der SOFC Anlage.....	66
Abbildung 5-14: Positive Rampenrate des Wechselrichters bei Kaltstart .....	67
Abbildung 5-15: Dynamische Lastwechsel Soll-Ist-Vergleich .....	68
Abbildung 5-16: Soll-Ist-Vergleich Ausgangsleistung .....	69
Abbildung 5-17: Sollleistung und Soll-Ist-Abweichung bei $\cos(\varphi) = 1$ .....	69
Abbildung 5-18: Soll-Ist-Vergleich $\cos(\varphi)$ bei $P_{max} 5 \text{ kW}$ .....	70
Abbildung 5-19: Soll- $\cos(\varphi)$ und Abweichung bei $P_{max} 5 \text{ kW}$ .....	70
Abbildung 5-20: Leistungsverlauf im lastgeführten Betrieb .....	71
Abbildung 5-21: Soll-Ist-Abweichung Ausgangsleistung im lastgeführten Betrieb.....	72
Abbildung 5-22: Energieabweichung im 15 min Intervall im lastgeführten Betrieb.....	72
Abbildung 5-23: Leistungsfaktorverlauf im lastgeführten Betrieb.....	73
Abbildung 5-24: Soll-Ist-Abweichung Leistungsfaktor im lastgeführten Betrieb.....	73
Abbildung 5-25: Strom-Spannungsverlauf bei 65 % Ausgangsleistung und Leistungsfaktor von 1 .....	74
Abbildung 5-26: Strom-Spannungsverlauf bei 20 % Ausgangsleistung und Leistungsfaktor von 1 .....	75
Abbildung 5-27: Stromüberschwingungsanteile Wechselrichterausgang Phase L3 .....	75
Abbildung 5-28: Flickerverlauf Wechselrichterausgang Phase L3 .....	76
Abbildung 5-29: Strom- und Spannungsverlauf am Eingang des Hochsetzstellers bei $P_{max} 5 \text{ kW}$ .....	76
Abbildung 5-30: U/I-Verlauf des Wechselrichterausgangs bei $\cos(\varphi) 0,8$ kapazitiv bei $P/P_{max} 50 \%$ .	77
Abbildung 6-1: Feldschwächbereich eines Gleichstrommotors [57] .....	81
Abbildung 6-2: Netzparallelbetrieb 5kW Wechselrichter [53, 54, 59, 61] .....	83
Abbildung 6-3: Sankey-Diagramm 5 kW Wechselrichter [53, 54, 59, 61] .....	84
Abbildung 6-4: Netzparallelbetrieb 6 kW Wechselrichter [53, 54, 59–61] .....	84

## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 6-5: Sankey-Diagramm 6 kW Wechselrichter [53, 54, 59–61] .....	85
Abbildung 6-6: Netzparallelbetrieb 6 kW Wechselrichter mit DC-BUS [53, 54, 60, 61].....	85
Abbildung 6-7: Sankey-Diagramm 6 kW Wechselrichter mit DC-BUS [53, 54, 60, 61] .....	86
Abbildung 6-8: Notstrom-Inselbetrieb 5 kW Wechselrichter [25, 32, 53, 54, 59–61] .....	87
Abbildung 6-9: Sankey-Diagramm 5 kW Wechselrichter mit Batterie [25, 32, 53, 54, 59–62].....	88
Abbildung 6-10: Notstrom-Inselbetrieb 5 kW Wechselrichter mit DC-BUS [53, 54, 59–61].....	89
Abbildung 6-11: Sankey-Diagramm 5 kW Wechselrichter mit Batterie und DC-BUS [53, 54, 59–61] ..	89
Abbildung 6-12: Notstrom-Inselbetrieb 6 kW Wechselrichter [53, 54, 59, 61–63] .....	90
Abbildung 6-13: Sankey-Diagramm 6 kW Wechselrichter mit Batterie [53, 54, 59, 61–63].....	90
Abbildung 6-14: Inselbetrieb Installation Österreich [32].....	95

## TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 3-1: Brennstoffzellenklassifizierung nach Temperatur und Elektrolyt [4].....	4
Tabelle 5-1: Einzel und Gesamtwirkungsgrade der Spannungsumwandlung .....	61
Tabelle 5-2: Wirkungsgradabhängigkeit durch Variation der Eingangsspannung bei Pmax 5kW .....	62
Tabelle 5-3: Hochsetzstellerwirkungsgradverlauf [25] .....	63
Tabelle 5-4: Wechselrichterwirkungsgrad [25] .....	63
Tabelle 5-5: Schnellstartvergleich [25] .....	67
Tabelle 6-1: Konzeptvergleich .....	91

# 1 EINLEITUNG

Seit einigen Jahren wird in der Öffentlichkeit eine vernünftige Alternative zu den fossilen Energieträgern auf Basis der erneuerbaren Energien gesucht. Vor allem seit dem Bericht des „Club of Rome“ der auf die Umweltschäden und die durch die fossilen Energieträger verursachte Klimaveränderung hingewiesen hat. Des Weiteren sind solche fossilen Energieträger auch mit einem großen Aufwand zu erschließen und begrenzt verfügbar. Um den „Energiewohlstand“ der jetzigen Weltbevölkerung aufrecht zu erhalten, müssen daher die fossilen Rohstoffe möglichst effizient genutzt und nach Möglichkeit durch erneuerbare Energien ersetzt werden. Eine langfristige Aufrechterhaltung des momentanen Energieverbrauchs kann so ausschließlich anhand von erneuerbaren Energien gelöst werden. Bis zu einer kompletten Nutzung erneuerbarer Energien ist die jetzige Energiewirtschaft jedoch noch einige Schritte entfernt. Vor allem die Tagesabhängigkeit der jetzigen Energieproduktion aus den erneuerbaren Energien ist hierbei ausschlaggebend. Während am Tag durch Photovoltaikanlagen und Windkraftanlagen ein Energieüberschuss besteht, gibt es in der Nacht Stunden, in denen die Energieproduktion nicht durch Erneuerbare gedeckt werden kann. Um diese Problematik zu lösen würde man große Energiespeicher benötigen, die die Energie bei einer Überproduktion zwischenspeichern, um diese bei Bedarf wieder zu nutzen. Zurzeit gibt es für einen solchen Bedarf Pumpspeicherkraftwerke und Druckluftspeicherkraftwerke die diesen Energiespeicher bereitstellen. Jedoch besitzen diese Technologien den Nachteil, dass ihre Energiedichten sehr niedrig sind und deshalb ein großer Flächenverbrauch auftritt, der diese Energiemenge begrenzt. [1]

Durch die Nutzung von Wasserstoff und der Verstromung über eine Brennstoffzelle ist es möglich, eine viel höhere Energiedichte für diese Zwischenspeicherung zu schaffen. Dabei kann Wasserstoff sowohl über fossile als auch nachhaltige Wege erstellt und gespeichert werden. Dadurch ist es problemlos möglich fossile Energieträger als Übergangslösung effizienter zu nutzen und langfristig auf erneuerbare Energien umzusteigen. [1]

Um diese Ziele zu erreichen arbeitet die AVL List GmbH mit Partnerunternehmen daran, ein elektrisches SOFC System so zu betreiben, dass diese Anlage elektrische Energie in ein bestehendes elektrisches Netz einspeist. Diese Anlagen sollen vor allem als dezentrale Kraftwerke in das bestehende Stromnetz eingegliedert werden, um den Eigenbedarf an Energie zu decken. Hierbei soll im ersten Schritt durch eine Reformierung die verwendeten fossilen Energieträger für eine effizientere Energieversorgung genutzt werden.

## 2 AUFGABENSTELLUNG

Um die vorhandenen Energieträger möglichst ressourcenschonend einzusetzen, soll das Potenzial der elektrischen Energieproduktion möglichst effizient ausgeschöpft werden. Dabei stellt die elektrische Netzeinbindung einer funktionierenden SOFC Brennstoffzelle eine sehr wichtige Rolle dar. Die damit verbundene Aufgabe besteht darin eine Brennstoffzelle, die bereits sehr effizient betrieben wird, möglichst ohne Verluste und ohne Einschränkungen in ein elektrisches System zu integrieren.

Diese Integration soll anhand eines technischen Modells realisiert und getestet werden. Dieses technische Modell beruht dabei auf realen Ausgangsparametern einer Brennstoffzelle, die ohne Netzeinspeisung getestet wurde. Auf Basis dieser Ausgangsdaten soll ein reales Konzept zur elektrischen Einspeisung einer SOFC Anlage realisiert und aufgebaut werden.

Aus diesem Aufbau sollen einige Eigenschaften (z.B.: Effizienz, Dynamik, ...) ermittelt werden, die für eine Einspeisung in das elektrische Netz relevant sind. Anhand dieser Daten sollen Anforderungen an einen Wechselrichter erstellt werden, die ein Gerät für eine Netzeinspeisung benötigt.

Auf Basis dieser Grundlagen soll eine möglichst effiziente und sinnvolle Konfiguration unterschiedlicher Peripheriegeräte der SOFC Anlage erstellt werden. Die hierfür benötigten Peripheriegeräte sind notwendig, um eine SOFC Anlage zu betreiben. Durch die unterschiedlichsten Spannungsversorgungsmöglichkeiten der Geräte, entstehen mehrere Möglichkeiten diese elektrisch zu versorgen. Anhand dieser Variationen sollen Konzepte für Netzparallelbetrieb und Inselbetrieb ausgelegt werden.

Nach der Bewertung der unterschiedlichen Konzepte soll sich die sinnvollste und effizienteste Anordnung herausstellen. Dabei sollen die Konzepte auf ihre Eignung der unterschiedlichen Betriebsmoden und deren Anforderungen untersucht werden.

### 2.1 Vorgehensweise

Um eine geeignete Einspeisung in das elektrische Netz zu finden, sollen alle möglichen Wechselrichter mit deren Eigenschaften recherchiert und dafür bewertet werden. Falls durch die speziellen Anforderungen einer SOFC Anlage kein geeignetes Gerät gefunden werden sollte, ist eine alternative indirekte Netzanbindung zu untersuchen und zu realisieren.

Anschließend soll diese Anlage realisiert werden und mit einer Spannungsquelle, analog zu einer Brennstoffzelle betrieben werden. Die Spannungsquelle soll dabei möglichst wie eine reale Zelle arbeiten und deren Kennlinie folgen. Durch diese Basis soll das unterschiedliche Betriebsverhalten der Einspeisung untersucht und bewertet werden. Diese Charakterisierung wird an unterschiedlichen Lastpunkten durchgeführt und auf deren Effizienz geprüft. Neben den relevanten Wirkungsgraden sollen auch die Dynamik und die Regelbarkeit der Einspeisung untersucht und bewertet werden.

Auf Basis dieses Wissens soll anhand der einzelnen Gerätewirkungsgrade und deren Anordnung ein geeignetes Konzept gefunden werden, wie die einzelnen Peripheriegeräte der SOFC Anlage in das elektrische Konzept eingebunden werden sollen.

Des Weiteren soll auch die Möglichkeit eines Inselbetriebs in Betracht gezogen werden. Hierfür soll aufgezeigt werden, was die Anforderungen für eine Umschaltung von einem Netzparallelbetrieb in einen Inselbetrieb sind.

### 3 THEORETISCHE GRUNDLAGEN

In diesem Kapitel sollen die technischen Grundlagen für den Betrieb einer SOFC Anlage am elektrischen Netz erläutert werden. Neben der Funktion der Brennstoffzelle soll vor allem die Anbindung an das elektrische Netz näher beschrieben werden. Dabei wird die Anwendung des SOFC Systems in Haushalten in den Vordergrund gestellt, weshalb sich die Anbindung grundlegend auf Kleinanlagen bezieht. Dieses Anbindungskonzept an das elektrische Netz ist prinzipiell auch für Großanlagen realisierbar.

#### 3.1 SOFC System

Das SOFC System gehört zu den Hochtemperatur-Brennstoffzellen, welche bei einer Temperatur von 800°C bis zu 1000°C betrieben werden können. Solche Systeme produzieren elektrische Energie und gleichzeitig nutzbare Wärme, die zur Bereitstellung von Warmwasser bzw. zum Heizen verwendet werden kann. Betrieben werden solche Systeme mit einem gasförmigen Brennstoff (z.B. Erdgas, Biogas) und Luft. Der Brennstoff wird in einem sogenannten Reformierungsprozess zu Wasserstoff umgewandelt. Durch die Reformierung können solche Systeme ohne großen Aufwand an ein bestehendes Erdgasnetz angeschlossen werden. Alternativ können solche Systeme mit anderen Brenngasen, die Wasserstoff enthalten, betrieben werden. Hierbei muss lediglich der Reformierungsprozess des Systems angepasst werden. [2, 3]

*Tabelle 3-1: Brennstoffzellenklassifizierung nach Temperatur und Elektrolyt [4]*

Typ	Temperatur [°C]		Elektrolyt	Aggregatzustand
	Typischer Wert	Bereich		
<b>Niedertemperatur-Brennstoffzellen</b>				
AFC	80	60-120	Kalilauge	Flüssig
PEMFC	80	50-120	Polymere Membran	Fest
<b>Mitteltemperatur-Brennstoffzellen</b>				
PAFC	200	160-220	Phosphorsäure	Flüssig
<b>Hochtemperatur-Brennstoffzellen</b>				
MCFC	650	620-660	Karbonatschmelze	Flüssig
SOFC	950	800-1000	Oxidkeramischer Elektrolyt	fest

Eine Brennstoffzelle wandelt einen gasförmigen Brennstoff mit Hilfe von Luft direkt in elektrische Energie um. Dies geschieht nicht wie bei herkömmlichen Verfahren über die Freisetzung von Wärme, sondern über eine chemische Umwandlung des Brennstoffes. Dabei kommt es zu keiner Verbrennung des Brennstoffes, sondern zu einer chemischen Reaktion von Wasserstoff und Sauerstoff in der Zelle selbst wie schematisch in Abbildung 3-1 dargestellt. [5, 6]

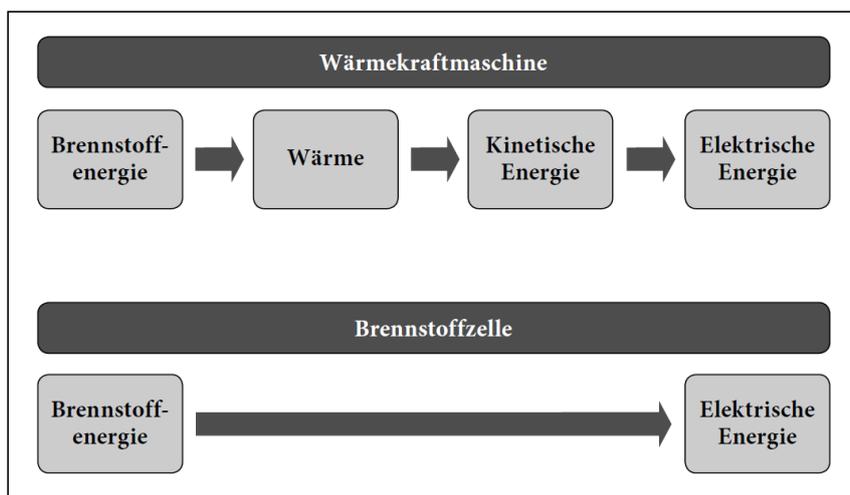


Abbildung 3-1: Vergleich der Umwandlungsketten von Brennstoffenergie in elektrische Energie [3]

Durch diese chemische Reaktion ergeben sich einige Vorteile gegenüber konventionellen Wärmekraftmaschinen was die Stromerzeugung betrifft. Auf Grund der direkten Umwandlung des Brennstoffgases (Erdgas, Biogas bzw. Wasserstoff) werden keine zusätzlichen Zwischenschritte geschaffen, die den Wirkungsgrad des Umwandlungsprozesses auf Carnot-Wirkungsgrad limitiert. Dieser Vorteil wirkt sich besonders bei niedrigen Temperaturen wie in Abbildung 3-2 dargestellt aus. [3]

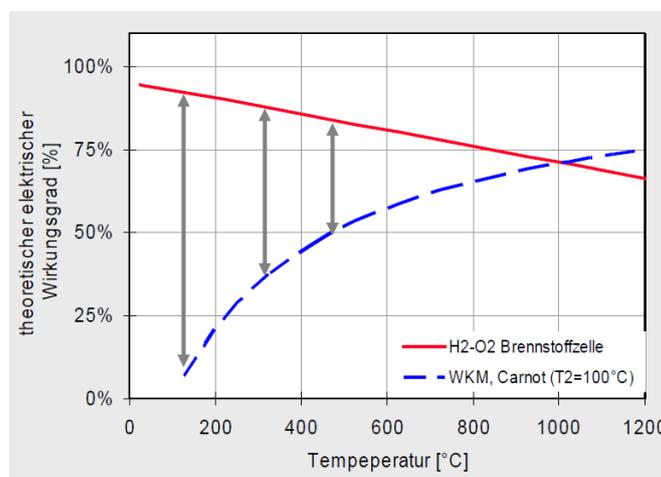


Abbildung 3-2: Wirkungsgradvergleich zwischen Brennstoffzellen und Wärmekraftmaschinen [3, 7]

Das Funktionsprinzip einer Brennstoffzelle entspricht dabei dem Umkehrprozess der Elektrolyse und ist so durch die Reaktionsgleichung (3-1) beschrieben. [3]



Durch die direkte Umwandlung des Brennstoffes ergeben sich einige Vorteile gegenüber Wärmekraftmaschinen.

- Hoher elektrischer Wirkungsgrad
- Keine bewegten Bauteile
- Emissionsarmer Betrieb
- Modulare Bauweise
- Gutes Regelverhalten
- Gutes Teillastverhalten, solange die Betriebstemperatur gehalten werden kann

Der Nachteil bei Brennstoffzellen ist jedoch, dass vor allem bei Kleinanlagen sehr viele Baukomponenten nötig sind, um eine Anlage zu betreiben. Dadurch ergibt sich eine höhere Komplexität als bei konventionellen Erzeugungsanlagen. Des Weiteren sind die Investitionskosten zum derzeitigen Stand, um einiges höher als bei Wärmekraftmaschinen desselben Leistungsniveaus.[3]

### 3.1.1 SOFC Brennstoffzelle

Die SOFC Brennstoffzelle besteht aus mehreren Komponenten, die in drei Hauptkomponenten aufgeteilt werden können. Dabei besteht eine Zelle jeweils aus einer Kathode, einem Elektrolyten und einer Anode. Diese Komponenten werden üblicherweise übereinander angeordnet (planare Bauweise wie in Abbildung 3-3). Die Anode wird dabei als Brenngaselektrode und die Kathode als Sauerstoffelektrode verwendet. Der Elektrolyt befindet sich zwischen den beiden Elektroden und lässt nur den Austausch von Ionen zwischen diesen zu. Um eine Ionenleitfähigkeit zu gewährleisten, muss der Elektrolyt auf eine Temperatur von ca. 800°C erhitzt werden. Für die Elektronen wirkt der Elektrolyt auch bei diesen Temperaturen als Isolator. Der Elektrolyt besteht dabei aus einer festen Oxidkeramik, die bei diesen Temperaturen für Ionen leitend wird. Die Anode hingegen besteht aus einem Verbundwerkstoff aus Nickel und Keramik, die dauerhaft elektrisch leitend ist. Die Kathode hingegen ist wieder aus einem keramischen Werkstoff wie z.B. aus Lanthan-Strontium-Manganit aufgebaut.[6, 8]

Die Brennstoffzelle wird anschließend von zwei Interkonnektoren eingeschlossen. Diese Bauweise wird als planare Bauweise bezeichnet und ist die Standardbauweise von

Brennstoffzellen. Die Interkonnektoren dienen zur elektrischen Kontaktierung der Brennstoffzelle. Des Weiteren besitzen diese die Aufgabe, die Gase gleichmäßig auf die Oberflächen von Anode bzw. Kathode zu verteilen und nach außen abzudichten. [6]

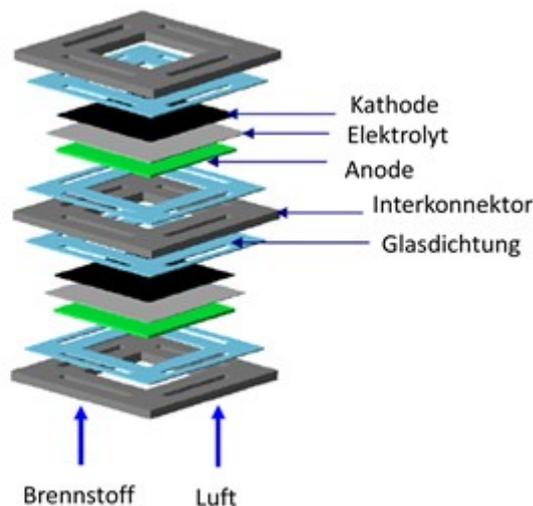


Abbildung 3-3: Planarer Aufbau einer Brennstoffzelle [9]

Der Aufbau einer SOFC Brennstoffzelle ist schematisch in Abbildung 3-4 dargestellt. Hierbei wird Wasserstoff als Brennstoff verwendet, der an der Anode zugeführt wird. Die Kathode wird Luft mit Luft versorgt, die den Sauerstoff an die Zelle abgibt und dadurch eine chemische Reaktion hervorruft. Dabei entsteht Wasser an der Anodenseite, welches abgeführt werden muss.

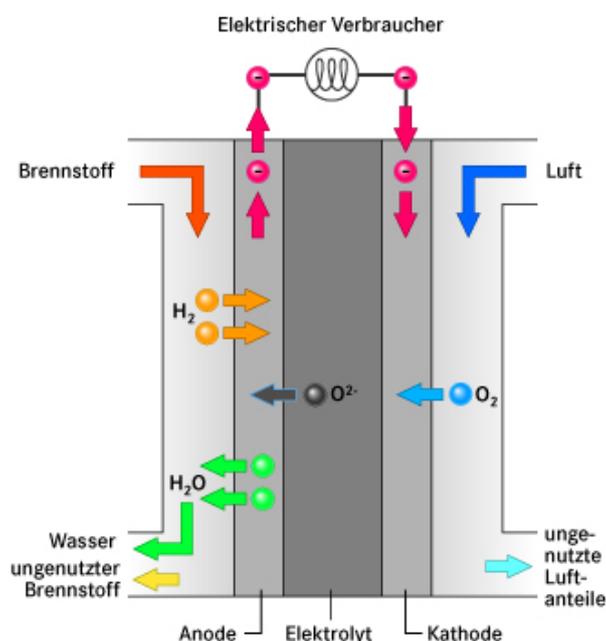


Abbildung 3-4: SOFC Funktionsprinzip [10]

Die in der Brennstoffzelle ablaufende chemische Gesamtreaktion (3-2) kann in zwei separate Teilreaktionen, an der jeweiligen Elektrode, aufgespalten werden.



An der Anode findet eine Teilreaktion statt, bei der ein Wasserstoffmolekül zwei Elektronen abgibt und sich dabei in zwei  $H^+$ -Ionen und freien Elektronen aufspaltet. [8]



Die dadurch entstehenden freien Elektronen können nun über eine elektrische Verbindung an die Kathodenseite gelangen. Auf Grund der fließenden Elektronen entsteht ein Stromfluss, der eine elektrische Leistung an einem Verbraucher, der sich zwischen den Elektroden befindet, abgibt. An der Kathode wird das Elektron vom Sauerstoff der durch die Luft zugeführt wird absorbiert. Infolge der Absorption ionisieren die Elektronen den Sauerstoff an der Kathode und bilden  $O^{2-}$ -Ionen, wie in der zweiten Teilreaktion (3-4) ersichtlich ist. [8]



Die dabei entstehenden  $O^{2-}$  Ionen können durch den Elektrolyten von der Kathodenseite zur Anodenseite diffundieren. Da sich auf der Anodenseite  $H^+$ -Ionen befinden und diese auf  $O^{2-}$  Ionen treffen, kommt es zu einer chemischen Reaktion bei der sich Wasser am Ausgang der Anodenseite bildet. [8]



Durch diese chemischen Prozesse wird in einer Brennstoffzelle aus Wasserstoff und Sauerstoff, elektrische Energie und Wasser produziert. [8]

### 3.1.2 Aufbau eines SOFC Systems

Ein SOFC System ist wie in Abbildung 3-5 dargestellt aufgebaut. Um eine SOFC betreiben zu können werden folgende zusätzliche Geräte benötigt: ein Rezirkulationsgebläse, ein Luftgebläse, ein Dampfreformer, ein Startbrenner, ein katalytischer Nachbrenner, ein Kathoden- bzw. Anoden-Wärmetauscher. Bei der Inbetriebnahme muss die Brennstoffzelle zuerst auf Betriebstemperatur, welche bei ca. 800°C liegt, gebracht werden. Um diese Temperatur zu erreichen wird durch das Luftgebläse Umgebungsluft angesaugt, welche über

den Kathodenwärmetauscher durch den katalytischen Nachbrenner zum Startbrenner geführt wird. Dem Startbrenner wird über eine Bypassleitung Brennstoff zugeführt. Im Startbrenner oxidiert der Brennstoff mit der Umgebungsluft und erzeugt dabei die für den Aufheizprozess benötigte Wärme. Diese Wärme wird durch den Abgasstrom teilweise an den Kathodenwärmetauscher abgegeben, der dadurch die Kathodenseite des Stacks erwärmt. Der übrige Teil des Abgasstromes und die damit verbundene Wärme wird über eine Drossel an den Dampfreformer befördert, der dabei erhitzt wird. Die verbleibende Energie im Abgas kann anschließend bereits als Nutzwärme verwendet werden. [11, 12]

Nachdem das System auf Betriebstemperatur gebracht wurde, wird auf der Anodenseite Brennstoff eingebracht. Das Brenngas wird mit dem erhitzten Wasserdampf vermischt. Die dadurch entstehende Reformierung der beiden Stoffe, lässt ein wasserstoffhaltiges Gasmisch, welches durch die Anodenseite des Stacks geführt wird, entstehen. Nachdem Durchlaufen der Brennstoffzelle wird ein Teil des Gases wieder in den Reformerprozess zurückgeführt. Auf diese Weise wird eine bessere Brennstoffausnutzung erzielt, da sich noch unverbrauchter Wasserstoff in diesem Gemisch befindet. Zugleich wird auch Wasserdampf für den Reformierprozess bereitgestellt, der nach der chemischen Reaktion anfällt. Der Gasanteil der nicht zur Reformierung zurückgeführt wird, wird in den katalytischen Nachbrenner geleitet. Hierbei wird der noch übrige Brennstoff im Abgasstrom oxidiert, um den kompletten Brennstoff umzusetzen und zugleich den Kathodenwärmetauscher zu betreiben. [11]

Nach Erreichen der Betriebstemperatur des Systems, arbeitet der Reformer mit dem Brenngas und dem selbsterzeugten Wasserdampf selbstständig, so dass der Startbrenner abgestellt werden kann. Erst ab diesem Zeitpunkt ist es möglich elektrische Energie aus der Zelle zu beziehen. Der Aufheizvorgang für das ganze System ist stark von der Größe der Anlage abhängig. Prinzipiell kann man jedoch sagen, dass der Aufheizvorgang vier bis sechs Stunden dauert. Nach der Aufheizphase kann Leistung von der Brennstoffzelle bezogen werden. [8, 11]

Um den Betrieb des Systems aufrechtzuerhalten sind zwei Gebläse für eine solche Anlage notwendig. Ein Gebläse dient dazu, um die gewünschte Menge an Luft und den nötigen Betriebsdruck in das Stack zu fördern. Das zweite Gebläse ist für die Rezirkulation des Abgasstromes an den Reformer zuständig. Dadurch wird der abgezweigte heiße Abgasstrom in den Reformer zurückgeführt. Dabei werden im Reformer Drücke von 20 bis 40 mbar erzeugt. [11, 13]

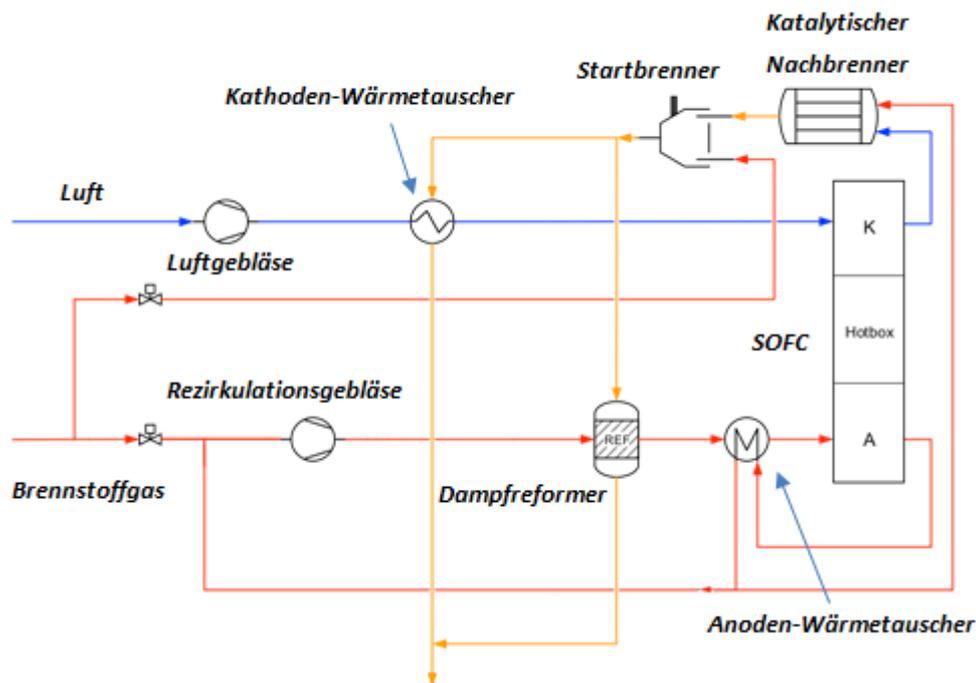


Abbildung 3-5: Prozessschema SOFC Anlage [12, 14]

### 3.1.3 Betriebscharakteristik eines SOFC Systems

Um die elektrochemische Betriebscharakteristik einer SOFC Anlage zu untersuchen geht man prinzipiell von der freien Enthalpie  $G$  (Gibbs-Energie) aus. Diese erhält man über die jeweilige Enthalpie  $H$  und die Entropie  $S$ . Die Gibbs-Energie ist wie in der Gleichung (3-6) allgemein definiert. [13]

$$G = H - TS \quad (3-6)$$

Daraus ist zu erkennen, dass neben den Größen Enthalpie  $H$  und Entropie  $S$  auch die Temperatur  $T$  einen Einfluss auf die Gibbs-Energie besitzt. Infolgedessen kann die freie Reaktionsenthalpie  $\Delta G$  daraus abgeleitet werden. [13]

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (3-7)$$

Die freie Reaktionsenthalpie lässt sich für eine allgemeine Reaktionsgleichung wie in der Reaktionsgleichung (3-8) folgendermaßen anwenden. [13]



Die freie Reaktionsenthalpie lässt sich dabei durch die Subtraktion der Edukte von den Produkten, mit Berücksichtigung der stöchiometrischen Koeffizienten wie in der Gleichung (3-9) allgemein darstellen.

$$\Delta_r G = \sum_{\text{Produkte}} \nu_i * \Delta G_i - \sum_{\text{Edukte}} \nu_j * \Delta G_j \quad (3-9)$$

Um eine Beziehung zwischen der freien Reaktionsenthalpie und der benötigten Arbeit herzustellen, geht man von der allgemeinen Definition der Enthalpie wie in (3-10) dargestellt, aus. [13]

$$dG = dH + d(T S) \quad (3-10)$$

Durch die Anwendung dieser Definition auf ein allgemeines System ergibt sich im reversiblen Prozess ( $dQ = TdS$ ) für eine isotherme Reaktion. [13]

$$dH = dW + d(Q) \quad (3-11)$$

$$dG = dW_{max} \quad (3-12)$$

Die daraus entstehende maximale Arbeit  $W_{max}$  wird durch die freie Reaktionsenthalpie einer Brennstoffzelle beschrieben. Diese Arbeit lässt sich ebenso durch die Ladungszahl  $z$ , der Zellspannung  $E$  und der Faraday-Konstante  $F$  darstellen. [13]

$$\Delta G^0 = W_{el} = -z * F * E^0 \quad (3-13)$$

So lässt sich das Standardpotential  $E^0$  einer galvanischen Zelle beschreiben.

$$E^0 = -\frac{\Delta G^0}{z * F} \quad (3-14)$$

Über einen analogen Zusammenhang lässt sich auch die Heizwertspannung  $E^0_H$  oder thermoneutrale Spannung ausdrücken. Diese Spannung bezieht sich nicht wie das Standardpotential auf die freie Reaktionsenthalpie  $\Delta G^0$ , sondern auf die Reaktionsenthalpie  $\Delta H^0$ . [13]

$$E^0_H = -\frac{\Delta H^0}{z * F} \quad (3-15)$$

Wendet man diese Gleichungen nun für die Wasserstoff-Sauerstoff-Brennstoffzelle an, so ergibt sich ein dementsprechendes Standardpotential bzw. eine Heizwertspannung. Für die

Berechnung dieser, ist die umgekehrte Elektrolyse-reaktion heranzuziehen. Hierbei ergibt sich eine Ladungszahl  $z = 2$ , da ein Sauerstoffmolekül zwei Elektronen zur Ionisierung benötigt. Des Weiteren ist auch die Faraday-Konstante  $F = 96485 \text{ As/mol}$  für diese Berechnung zu verwenden. [13]



$$W_{el,max} = \Delta G_m^0 = G_{mH_2O}^0 - G_{mH_2}^0 - \frac{1}{2} G_{mO_2}^0 = -237,3 \text{ kJ/mol } H_2 \quad (3-17)$$

$$E^0 = -\frac{\Delta G^0}{z * F} = -\frac{-237,3 * 10^3 \text{ J/mol}}{2 * 96485 \text{ As/mol}} = 1,23 \text{ V} \quad (3-18)$$

Jedoch treten in einem SOFC System auch einige Verluste auf, die sich negativ auf den Wirkungsgrad bzw. der Spannung jeder einzelnen Zelle auswirken. Die jeweiligen Verluste die dabei auftreten, lassen sich am besten in einem Spannungs-Strom-Diagramm wie in Abbildung 3-6 darstellen. In diesem Diagramm ist die Heizwertspannung  $E_H^0$  als maximale Spannung aufgetragen. Dieses Potential wird jedoch um den Entropieanteil  $T\Delta S$  verringert. Dieser Anteil entsteht aufgrund der jeweiligen Umgebungstemperatur und den dadurch nicht nutzbaren energetischen Anteil. Vom Standardpotenzial  $E^0$  gibt es jedoch noch weitere Differenzen auf die Nernstspannung  $E_N$  aufgrund der Abweichungen vom Standardzustand. Die Nernstspannung  $E_N$  kann als Leerlaufspannung angesehen werden, die die Temperatur und die Aktivitäten der Reaktionspartner berücksichtigt. [13]

$$E_N = E^0 - \frac{R_m * T}{z * F} * \sum v_i * \ln(a_i) = E^0 - \frac{R_m * T}{z * F} * \sum v_i * \ln\left(\frac{p_i}{p^0}\right) \quad (2-18)$$

$R_m =$  allgemeine Gaskonstante  $8314,472 \text{ J/kmolK}$

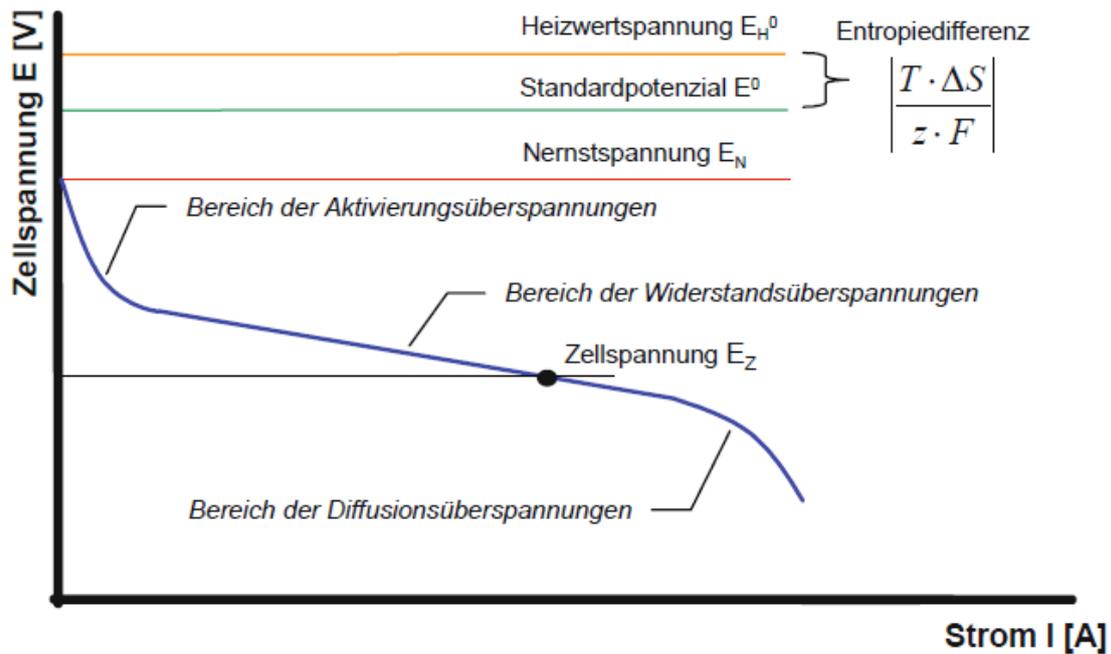


Abbildung 3-6: U/I Kennlinie SOFC mit begrenzten Brennstoff [13]

Die reale Zellenspannung  $E_Z$  einer Brennstoffzelle verringert sich je nach Beanspruchung von der Nernstspannung ausgehend. Je stärker die Zelle belastet wird, umso geringer ist die dadurch entstehende Zellenspannung. Die effektive Spannung der Zelle entsteht aufgrund drei verschiedene Bereichen an Verlusten. Diese drei Bereiche sind die Aktivierungsverluste, die Widerstandsverluste und die Diffusionsverluste. Diese Verluste reduzieren den gesamten Wirkungsgrad einer Brennstoffzelle. [13]

Die Aktivierungsverluste ( $\eta_A$ ) treten auf, da die Elektronengeschwindigkeit zwischen der Elektrode und der Phasengrenzfläche abgebremst wird. Dadurch ergibt sich wie in Abbildung 3-6 bei der Aktivierung ein nicht linearer Verlauf der Verluste. [13]

Die Widerstandsverluste ( $\eta_W$ ) entstehen aufgrund des Innenwiderstands der Brennstoffzelle. Diese steigen linear mit zunehmender Stromstärke an, was eine Minderung der Realspannung bewirkt. Die Widerstandsverluste verhalten sich analog wie ein Innenwiderstand an einer realen Spannungsquelle. Die Brennstoffzelle wird hauptsächlich in diesem Bereich betrieben, da sich die Zelle linear regeln lässt. Der größte Anteil dieses Innenwiderstands stellt der Elektrolyt zwischen den beiden Elektroden dar. [13]

Die Diffusionsverluste ( $\eta_D$ ) treten bei sehr hohen Strömen und Leistungen auf. Dabei wird der Gastransportprozess als unzureichend betrachtet. Die Zufuhr des Reaktionsgases bzw. der Abtransport des Produktgases aus der Reaktion erfolgen zu langsam, wodurch sich das System selbst hemmt. Durch diese Hemmung kommt es zu einem stärkeren Absinken der Zellspannung. [13]

Durch die einzelnen Verluste kommt es je nach Belastungsfall zum Absinken der Zellspannung  $E_Z$ . Dadurch entsteht je nach Betriebspunkt ein anderer Brennstoffzellenwirkungsgrad. [13]

Der Zellenwirkungsgrad einer Zelle ist wie folgend definiert:

$$\eta_Z = \frac{E_Z}{E_H^0} \quad (3-19)$$

Die heute erreichten elektrischen Wirkungsgrade einer Brennstoffzelle liegen bei ca. 60%, bei jedoch geringer Einzelleistung.

Um SOFC Systeme mit höheren Leistungen herzustellen, werden mehrere einzelne Zellen zu einem Stack miteinander verschalten. Diese Verschaltung der Zellen kann dazu führen eine höhere Spannung (Reihenschaltung) oder einen höheren Strom (Parallelschaltung) zu erzielen. Da Einzelzellen eine relativ geringe Spannung besitzen, werden die Brennstoffzellenstacks vor allem in Reihe geschalten. Dadurch ergibt sich eine höhere Gesamtspannung bei identischer Stromstärke. Die prinzipielle Verschaltung der einzelnen Zellen erfolgt über sogenannte Interkonnektoren. Dadurch wird eine möglichst kompakte Bauweise erzielt, durch die das Stack ein ähnliches Verhalten einer Einzelzelle annimmt. Jedoch kommt es durch diese Verschaltung zu einer geringfügigen Senkung des elektrischen Wirkungsgrades. Diese modulare Bauweise ermöglicht wiederum eine beliebige Skalierung des SOFC Systems. [13]

### 3.1.4 Marktanwendungen eines SOFC Systems

SOFC Systeme lassen sich aus technischer Sicht in viele unterschiedliche Anwendungen integrieren. Jedoch sind in einigen Anwendungen andere Energieerzeugungsanlagen oder andere Brennstoffzellentypen zu bevorzugen. SOFC Systeme werden vor allem bei stationären Anwendungen eingesetzt, da die Zellen mit einer relativ hohen Betriebstemperatur (bis zu 850 °C) betrieben werden müssen. Besonders ausgereifte Anwendungen der SOFC Systeme sind in den Bereichen Gebäudeenergieversorgung und Kraftwerken angesiedelt.

#### 3.1.4.1 Gebäudeenergieversorgung

Etwa ein Drittel des gesamten Energiebedarfs wird für den Gebäudebereich benötigt. Dabei wird vor allem Energie zur Bereitstellung von Wärme und Warmwasser benötigt. Auf Grund der enormen Menge ist es wichtig die erneuerbaren Energien und die Energieeffizienz in diesen Bereichen zu steigern, um den Einsatz von fossilen Primärenergien zu senken. Ein

SOFC System kann sowohl mit erneuerbaren Energien (Biogas) betrieben werden und besitzt zusätzlich einen sehr hohen elektrischen Wirkungsgrad bzw. Brennstoffausnutzungsgrad. Zusätzlich liefert die stationäre Brennstoffzelle neben der benötigten Wärme auch elektrischen Strom für den Haushalt. Aus diesen Gründen ist die Brennstoffzelle eine interessante Option für Haushalte und deren Energieversorgung. [1, 5]

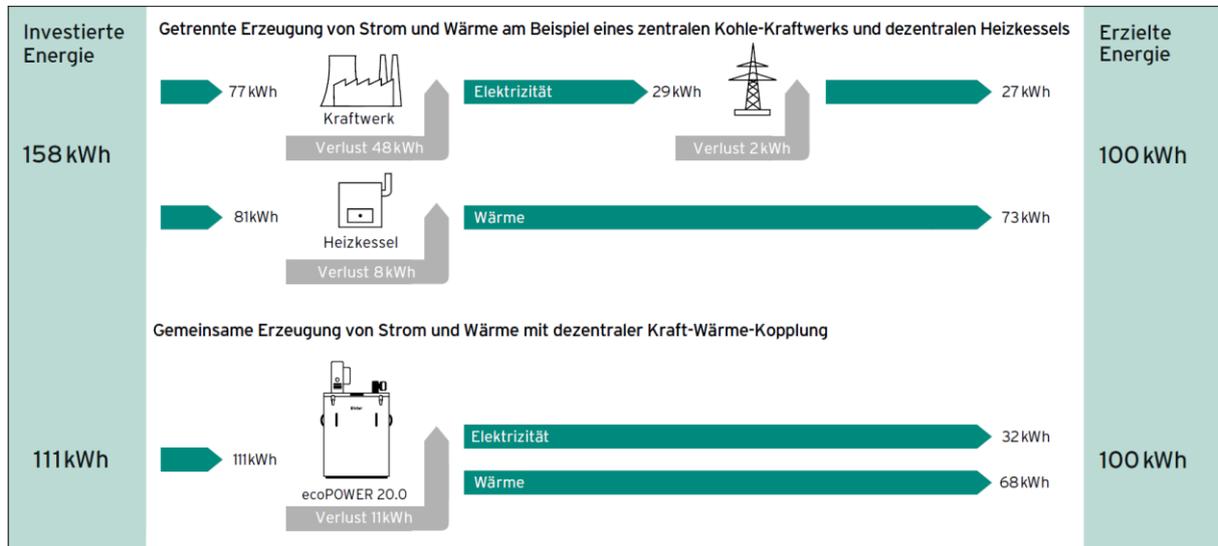
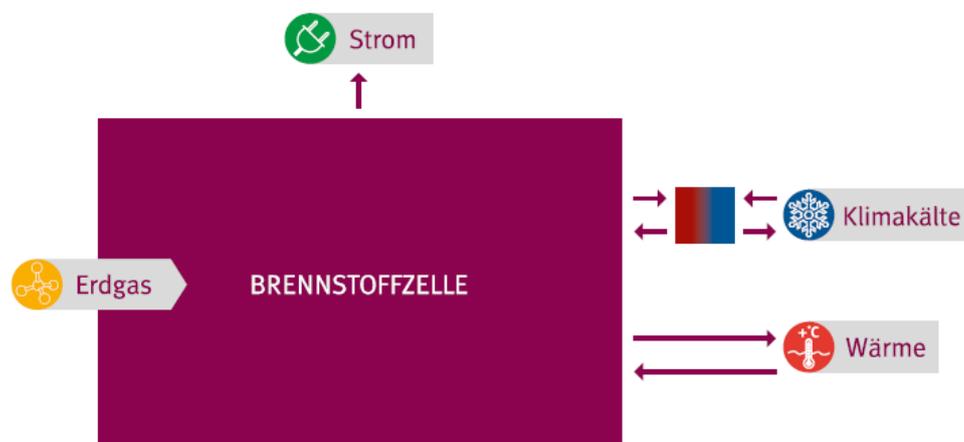


Abbildung 3-7: Primärenergievergleich  $\mu$ KWK und getrennte Erzeugung [15]

Bei konventioneller Erzeugung muss wie in Abbildung 3-7 dargestellt, eine hohe Menge an Primärenergie eingesetzt werden, um die nötige Energie in den Haushalt zu führen. Durch den Einsatz eines SOFC  $\mu$ KWKs sinkt diese Primärenergie signifikant ab, was aus energetischer Sicht zu bevorzugen ist. Des Weiteren fällt bei Großkraftwerken in der Regel ein Abwärmestrom an, der aufgrund des niedrigen Temperaturniveaus zur Verteilung nicht geeignet ist. Bei dezentraler Kraftwärmekopplung sind aufgrund des Anfalls direkt am Ort des Bedarfs teilweise auch niedrigere Temperaturniveaus nutzbar. Durch den Einsatz von dezentralen  $\mu$ KWKs kann ein sehr hoher Brennstoffausnutzungsgrad erzielt werden. [1]

Durch eine ständige Weiterentwicklung im Bereich der Wärmedämmung und Wärmeisolation sinkt der Wärmebedarf in zukünftigen Gebäuden. [16] Zusätzlich hebt sich der elektrische Energiebedarf der Bevölkerung durch eine vermehrte Nutzung von Elektrogeräten auf Grund der steigenden Lebensqualität. Aus diesen beiden Gründen kristallisiert sich heraus, dass ein SOFC System optimal für den Betrieb in Haushalten abgestimmt ist, da die Verteilung von Strom zu Warmwasser 60% zu 40% ist. Im optimalen Betriebspunkt wandelt die Brennstoffzelle den Großteil ihrer Leistung in elektrische Energie um. Die restliche Energie, die dabei als Wärme anfällt kann optimal zur Warmwasseraufbereitung genutzt werden. Wird aber eine höhere thermische Leistung im

Haushalt benötigt, ist es auch möglich diese mit Hilfe der Brennstoffzelle zu liefern. Um die thermische Leistung zu erhöhen muss jedoch die elektrische Leistung reduziert werden. Ein SOFC System kann prinzipiell seine technologiebedingten Stärken besonders dann ausspielen, wenn eine ausreichend große Wärmesenke für den Normalbetrieb vorhanden ist. Die Wärmesenke kann dabei entweder der eigene Warmwasserbedarf, Heizbedarf oder der Anschluss an ein Fernwärmenetz darstellen. Alternativ ist auch der Einsatz einer Absorptionskältemaschine als Wärmesenke vorstellbar. Kann diese Abwärme nicht genutzt werden, verringert sich auch der Nutzungsgrad dieser Technologie. [1]



**Abbildung 3-8: Trigeneration SOFC Anwendungen [17]**

Ein Einsatz von SOFC Systemen in Gebäuden kommt auf Grund der Vorteile in der Prozessführung zum Tragen. Während  $\mu$ KWKs mit Gasmotoren einen sehr hohen Geräuschpegel aufweisen, arbeiten Brennstoffzellen nahezu geräuschlos. Dadurch ist eine Integration in ein Gebäude wesentlich einfacher zu realisieren als bei herkömmlichen  $\mu$ KWK Anlagen. SOFC Systeme besitzen nahezu keine bewegten Bauteile, abgesehen von Luft- und Rezirkulationsgebläse. Infolgedessen ist auch kaum eine Ölschmierung von bewegten Teilen notwendig, was einen sehr wartungsarmen Betrieb erlaubt. [1, 5]

Eine Brennstoffzelle benötigt jedoch wasserstoffhaltige Brennstoffe, um elektrische Energie zu erzeugen. Da in den seltensten Fällen ein Haushalt mit einem Anschluss für eine Wasserstoffleitung ausgestattet ist, ist es notwendig eine geeignete Alternative dafür aufzugreifen. Die meisten Haushalte besitzen hingegen einen Anschluss zu einem fossilen Brennstoff (Erdgas, Heizöl). Dadurch ist es sinnvoll mittels eines Reformers, Wasserstoff dezentral herzustellen. Es gibt aber auch Konzepte die nicht mit fossilen Brennstoff, sondern mit CO<sub>2</sub>-frei hergestellten Brenngasen, wie Synthesegas oder Windgas arbeiten. Das Synthesegas wird zum Großteil über die Vergasung von Biomassen hergestellt. Das Windgas

hingegen, wird aus der Elektrolyse von Wasser durch die überschüssige Windenergie bereitgestellt. Die dabei entstehende Abwärme kann ebenfalls als Prozesswärme verwendet werden und für die Warmwasseraufbereitung dienen. [1, 5]

### 3.1.4.2 Kraftwerke

Brennstoffzellen können auf Grund ihres modularen Aufbaus auch zu großen Kraftwerken zusammengeschaltet werden. Für die Erzeugung von elektrischer Energie gibt es hierfür zwei verschiedene Arten das Kraftwerk zu betreiben. Die beiden Varianten unterscheiden sich durch die Nachnutzung der Abwärme des SOFC Systems. Man unterscheidet SOFC Systeme die die Abwärme in einen Wärmetauscher führen, um Fernwärme zu erzeugen (KWK Anlagen) und SOFC Systeme mit einer nachgelagerten Kopplung zu einer Gasturbine, um die elektrische Leistung zusätzlich zu erhöhen. [18, 19]

Bei der Kopplung zur Gasturbine wird das Abgas wie in Abbildung 3-9 dargestellt in einen Nachbrenner geführt. Nach dem Verbrennen des restlichen Brennstoffes, wird das Abgas in die Gasturbine geleitet. Dieser Gaskreislauf erzeugt über eine Turbine, die an einen Generator gekoppelt ist, weitere elektrische Energie die in das elektrische Netz eingespeist werden kann. [18]

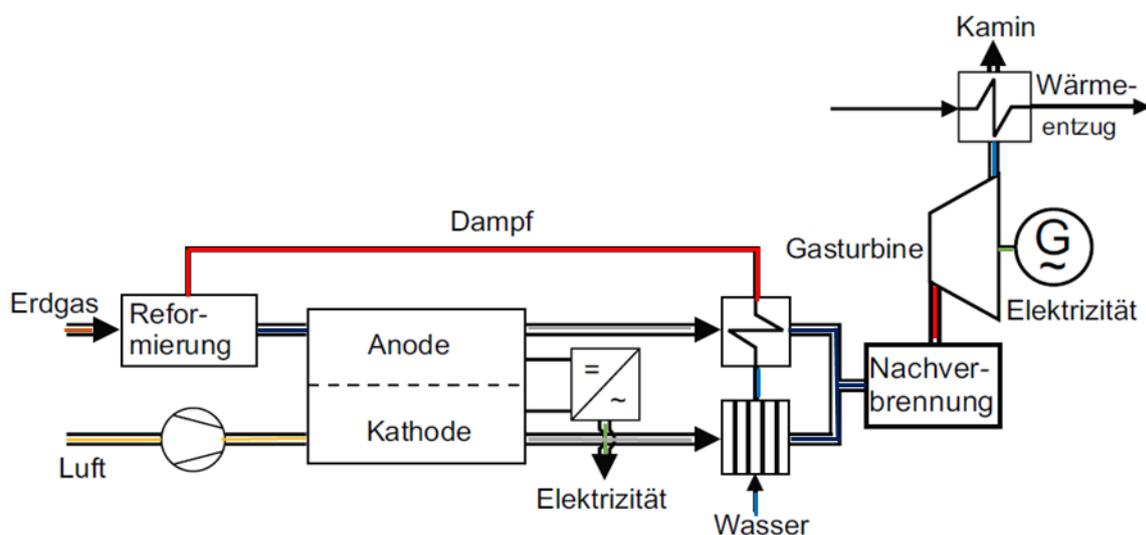
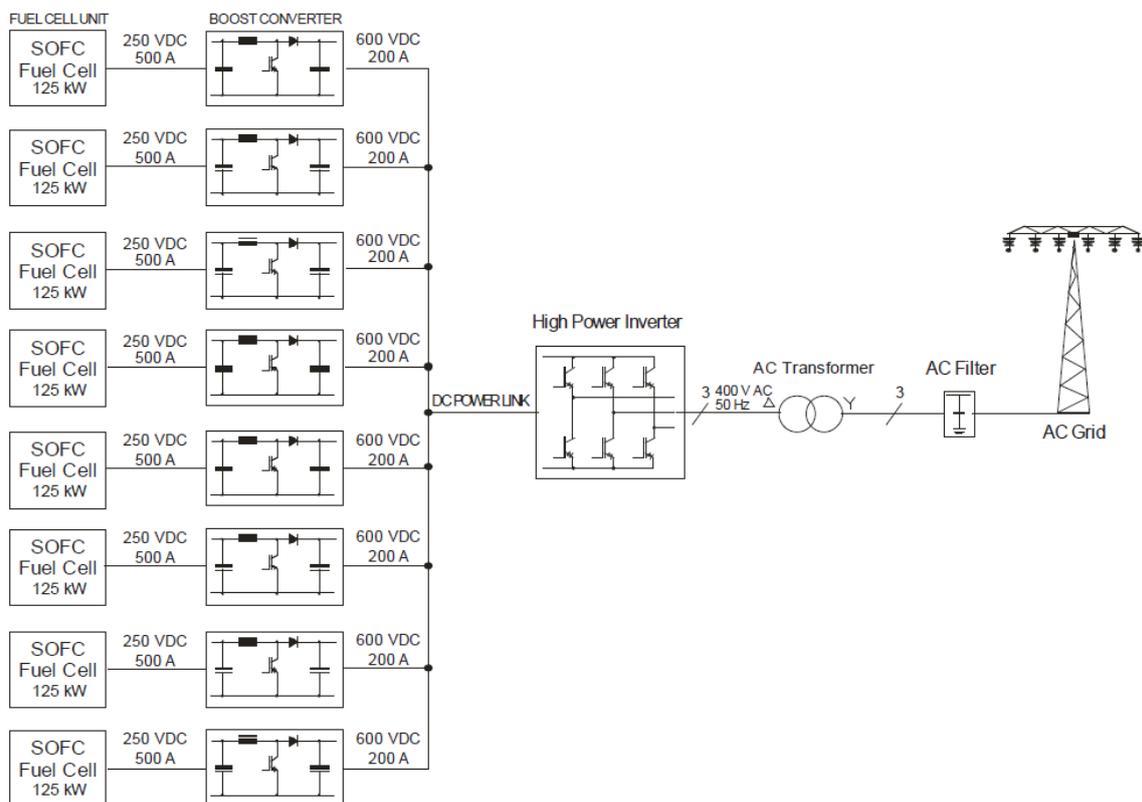


Abbildung 3-9: SOFC System mit gekoppeltem Gaskreislauf [18]

Brennstoffzellenkraftwerke wandeln Brennstoffe mit einem hohen Wirkungsgrad in elektrische Energie um. Dabei sind die grundlegenden Komponenten der beiden Kraftwerksarten gleich ausgeführt. Die Hauptkomponenten solcher Anlagen sind:

- Brennstoffaufbereitungsteil
- Brennstoffzelle
- Leistungselektronik

Diese Komponenten sind je nach Leistungsgröße der Anlage zu dimensionieren. Prinzipiell arbeiten kleine Brennstoffzelleneinheiten nach dem gleichen Prinzip wie Brennstoffzellenkraftwerke. Die Komponenten werden hierbei nur modular erweitert. Durch die einfache Erweiterung lassen sich mehrere Einheiten parallel miteinander verschalten, wodurch aus vielen kleinen Brennstoffzelleneinheiten eine große Gesamtanlage wie in Abbildung 3-10 dargestellt, entsteht. [18, 19]



**Abbildung 3-10: SOFC System Großanlage [20]**

Dabei werden sowohl die hohen Temperaturen der Abgasströme für Fernwärme, sowie die erzeugte elektrische Energie wie im Schema in Abbildung 3-11 dargestellt, genutzt. [18]



werden, um bei Bedarf einer höheren thermischen Leistung diese zu beziehen. Alternativ lässt sich in die Gesamtanlage auch eine Absorptionskältemaschine (AKM) integrieren, um zusätzlich die Abwärme zu nutzen. Hierbei wird der Überschuss an Wärme in Kälte für die Raumkühlung umgewandelt wie in Abbildung 3-12 dargestellt. Darüber hinaus ist es auch denkbar die überschüssige Wärme in ein Fernwärmenetz zu speisen. [22, 23]

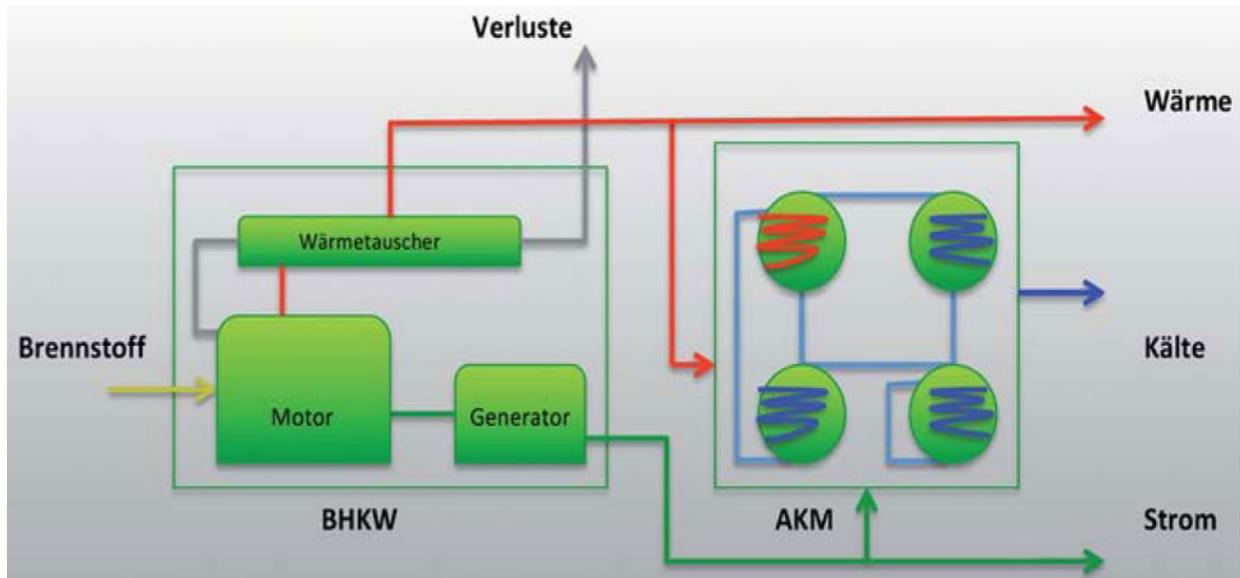


Abbildung 3-12:  $\mu$ KWKK-Anlage [22]

## 3.2 Elektrische Netzeinbindung einer SOFC Anlage

Die SOFC Anlage produziert durch ihre chemischen Reaktionen einen elektrischen Gleichstrom. Diese elektrische Energie muss von einem Wechselrichter umgeformt werden, da das elektrische Netz und die meisten Verbraucher auf ein Drehstromnetz aufgebaut sind. Zwar gibt es seltene Fälle einer Gleichspannungsübertragung und dadurch auch ein Gleichspannungsnetz (z.B. HGÜ), jedoch operieren diese in einer Netzebene und einer Spannungshöhe, die für eine SOFC Anlage nicht erreichbar sind. Die elektrische Gleichspannung kann auch von geeigneten elektrischen Verbrauchern teilweise abgebaut werden, jedoch handelt es sich hierbei um kleinere Leistungsbereiche. Daher ist es sinnvoll die elektrische Energie so umzuwandeln, dass diese in das elektrische Netz eingespeist werden kann. [24]

### 3.2.1 Anforderungen der SOFC Anlage

Die SOFC Anlage kann mit einem geeigneten Wechselrichter, Energie direkt in das elektrische Netz einspeisen. Jedoch sind die SOFC Ausgangsparameter sehr speziell und können daher zurzeit nicht direkt für die Eingangsseite eines handelsüblichen Wechselrichters verwendet werden. Ausschlaggebend für diese speziellen Anforderungen

sind dabei die Eingangsspannung und der dazugehörige Eingangsstrom. Der Eingangsstrom für einen Wechselrichter ist im Vergleich zu handelsüblichen Wechselrichtern, derselben Leistungsklasse viel zu hoch. Dadurch müsste man einen überdimensionierten Wechselrichter verwenden. Des Weiteren gibt es aber noch ein viel erheblicheres Problem. Da die Ausgangsspannung der Brennstoffzelle sehr niedrig ist, arbeitet der Wechselrichter nicht im optimalen Betriebspunkt. Dadurch ist die Eingangsleistung des Wechselrichters stark beschränkt und lässt nicht auf den Nennleistungspunkt anheben. Durch Verwendung eines Gleichstromumrichters behilft man sich diese Parameter anzupassen. Der Gleichstromumrichter hebt die Eingangsspannung an und senkt gleichzeitig den hohen Strom der SOFC Anlage. Dadurch ist es möglich handelsübliche Wechselrichter mit der für ihn betriebsbedingten idealen Spannung zu betreiben. Des Weiteren wird der hohe Ausgangsstrom des SOFC System herabgesenkt, wodurch die Nennleistung des Wechselrichters gesenkt werden kann. [20, 25, 26]

### *3.2.1.1 Gleichstromumrichter/Gleichstromsteller*

Gleichstromumrichter dienen dazu eine bestimmte Eingangsspannung auf eine gewünschte Ausgangsspannung umzuwandeln. Prinzipiell unterscheidet man zwischen Gleichstromumrichtern und Gleichstromstellern. Diese unterscheiden sich in der Verwendung eines Transformators. Gleichstromsteller arbeiten als selbstgeführte Stromrichter, die in unterschiedlichsten Formen ausgeführt werden können. Dieser wandelt die elektrische Spannung mittels einer elektronischen Schaltung in eine andere Form von Gleichspannung um. Dabei wird im Gegensatz zu den Gleichstromumrichtern kein Transformator für die Umwandlung benötigt. Der Gleichstromsteller wird auf Grund seiner Funktion auch als Boost converter oder Chopper bezeichnet. [27]

Bei Gleichstromumrichtern wird stets ein Transformator verwendet, der eine galvanische Trennung zwischen dem Eingangs- und Ausgangssignal gewährleistet. Der dabei eingesetzte Transformator wird mit einer hohen Frequenz betrieben, wodurch der Trafo relativ klein aufgebaut werden kann. Dadurch besitzen Gleichstromumrichter und Gleichstromsteller eine nahezu gleichgroße Baugröße. Gleichstromumrichter müssen nach dem Transformator wieder gleichgerichtet werden, um eine Gleichspannung auszugeben. Durch diese Gleichrichtung entstehen jedoch zusätzliche Verluste. [27]

### *Hochsetz-Gleichstromsteller*

Der Hochsetz-Gleichstromsteller (Boost converter), der zu den Gleichstromstellern zählt, wandelt eine niedrige elektrische Gleichspannung in eine höhere Gleichspannung um. Bei

dieser Art der Schaltung unterscheidet man zwischen einem lückfreien Betrieb und einem Lückbetrieb. Auf Grund des leichteren Verständnisses wird in diesem Kapitel nur auf den lückfreien Betrieb eingegangen. [27]

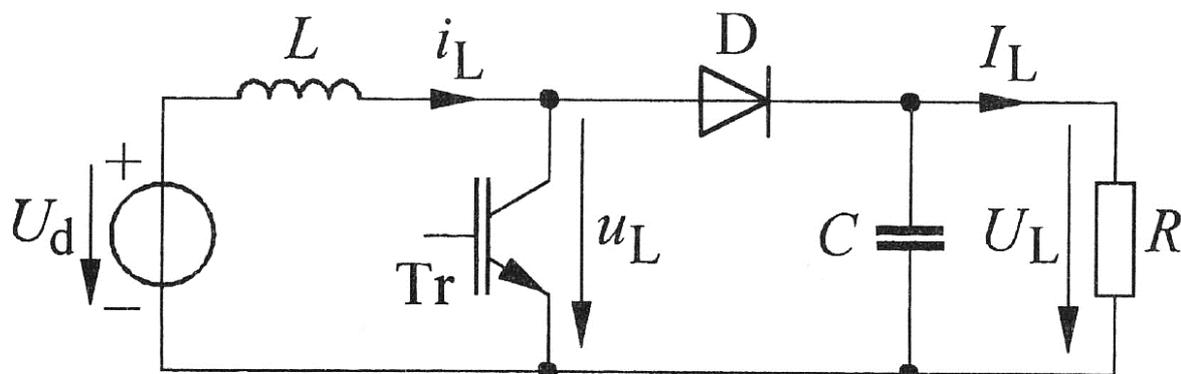


Abbildung 3-13: Schaltung Hochsetzsteller mit ohmscher Last [27]

Der Hochsetzsteller wird wie in Abbildung 3-13 betrieben, wobei  $U_d$  die Eingangsspannung darstellt. Die in der Schaltung verwendete Induktivität  $L$  dient hierbei als Energiespeicher, der abwechselnd geladen und entladen wird. Dies geschieht durch den Transistor  $Tr$  der mit einer gewissen Frequenz aus- und eingeschaltet wird. Durch die Frequenz der Schaltung lässt sich die Ausgangsspannung  $U_L$  in einem gewissen Spannungsbereich steuern. Der Kondensator  $C$ , der sich parallel zur Last  $R$  befindet, dient zur Glättung der Ausgangsspannung  $U_L$ . Dadurch kommt es trotz der Schaltfrequenz des Transistors  $Tr$  zu einer stabilen Spannung  $U_L$  am Ausgang der Schaltung. [27]

Die Schaltfrequenz wird durch die Schaltgeschwindigkeit des Transistor  $Tr$  geändert. Wenn der Transistor  $Tr$  geschaltet, und dadurch leitend ist, ergibt sich  $u_L = 0V$ . Der Eingangsstrom besitzt dadurch die Steilheit wie in Formel (3-20).

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{U_d}{L} \quad (3-20)$$

Durch das Ansteigen des Stroms  $i_L$  wird Energie in die Induktivität  $L$  geladen. Während dieser Zeit verhindert die Diode  $D$  eine Entladung des Kondensators  $C$  über den Transistor  $Tr$ . Geht der Transistor  $Tr$  anschließend wieder in die Sperrphase, so fließt der Strom  $i_L$  der durch die Induktivität  $L$  getrieben wird über die Diode auf die Ausgangsseite. Durch dieses Abfließen verändert sich der Verlauf des Stromes  $i_L$  wie in Gleichung (3-21) dargestellt.

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{U_d - U_L}{L} \quad (3-21)$$

Durch die in der Induktivität L gespeicherten Energie ergibt sich, dass  $U_L$  größer als  $U_d$  ist und der Stromverlauf von  $i_L$  wie in der Abbildung 3-14 abnimmt. Dabei ist  $T_E$  die Zeit in der der Transistor Tr eingeschaltet ist und  $T_A$  die Zeit in der dieser sperrt. [27, 28]

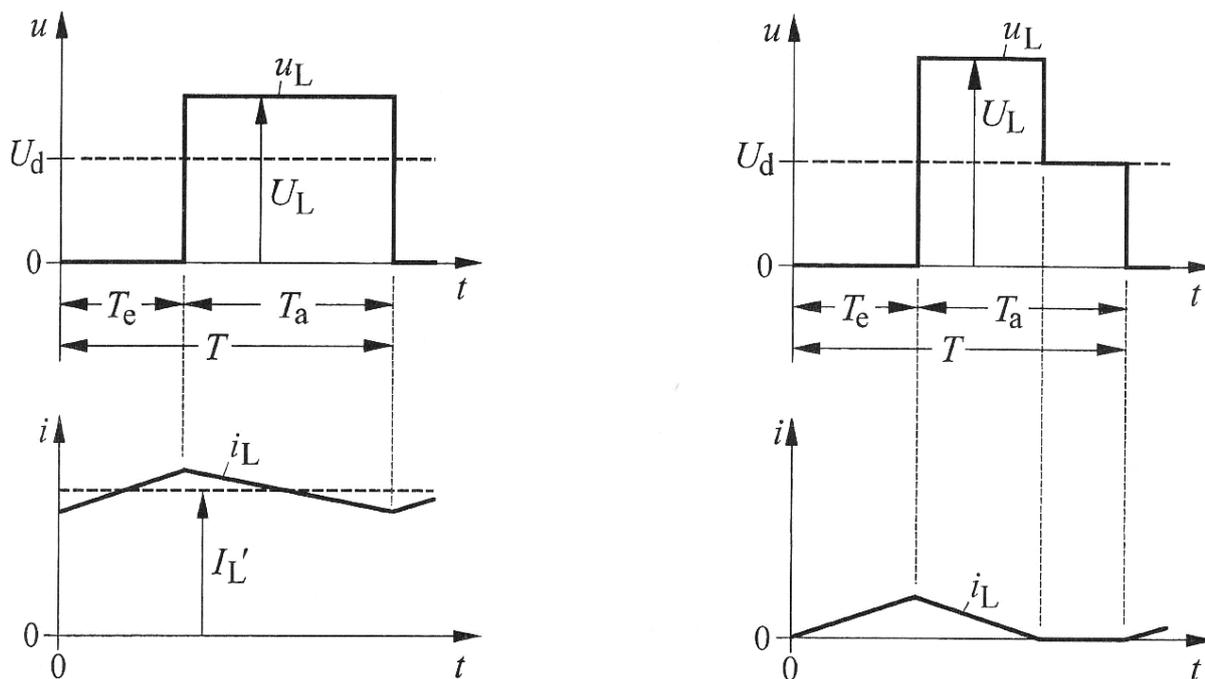


Abbildung 3-14: Lückfreier Betrieb (links); Lückbetrieb (rechts) [27]

T stellt dabei die Periodendauer dar, wodurch man auf Grund des Kehrwerts auf die Schaltfrequenz des Transistors Tr schließen kann. [27, 28]

$$T = T_E + T_A \tag{3-22}$$

Da die Induktivität L keine Gleichspannung  $U_d$  aufnimmt, kann man wie in Formel (3-23) auf den Mittelwert der Spannung  $u_L$  schließen. [27–29]

$$U_L T_A = U_d * T \tag{3-23}$$

Daraus ergibt sich das Übersetzungsverhältnis a der Schaltung von Eingangsspannung  $U_d$  zur Ausgangsspannung  $U_L$ .

$$U_L = \frac{T}{T_A} * U_d \tag{3-24}$$

$$a = \frac{T}{T_A} \tag{3-25}$$

Da die Eingangsleistung  $U_d I_L'$  auf Grund der geringen Verluste annähernd gleich groß sein muss wie die Ausgangsleistung  $U_L I_L$  ergibt sich ein mittlerer Eingangsstrom  $I_L'$  wie in Formel (3-26). [27–29]

$$I_L' = \frac{U_L}{U_d} * I_L \quad (3-26)$$

Die hier angeführten Formeln gelten jedoch nur für einen lückfreien Betrieb. Bei einem Lückbetrieb ist die Ausgangsspannung auf einem anderen Weg zu berechnen. Da der Laststrom relativ niedrig ist, lässt sich das Übersetzungsverhältnis nicht anlog dieser Formeln anwenden. Bei einem Lückbetrieb sinkt der Laststrom zwischenzeitlich auf null ab. Dies muss man bei der Berechnung des Übersetzungsverhältnisses mitbetrachten. [27–29]

Die Ausgangsspannung des Hochsetzstellers lassen sich prinzipielle über drei verschiedene Ansteuerverfahren ändern

- Pulsbreitensteuerung (T konstant und  $T_A$  variabel)
- Pulsfolgesteuerung (T variabel und  $T_A$  konstant)
- Ansteuerung mittels Zweipunktregelung (Transistor schaltet bei Erreichen des Stromes vom oberen bzw. unteren Limit)

Dabei wird die Pulsbreitensteuerung auf Grund ihrer einfachen Handhabung, am üblicherweise verwendet. [27, 29]

### *Durchflusswandler*

Der Durchflusswandler (Forward converter), in Abbildung 3-15 dargestellt, besitzt einen Transformator zur Verstellung der Ausgangsspannungshöhe, wodurch dieser zur Art der Gleichstromumrichter zählt. Die Durchflusswandler lassen sich je nach Leistungs- und Anwendungsbereich prinzipiell in drei verschiedenen Ausführungen unterscheiden, die nach dem gleichen Arbeitsprinzip funktionieren.

Man unterscheidet zwischen:

- Eintakt-Durchflusswandler
- Gegentakt-Durchflusswandler
- Vollbrücken-Durchflusswandler

Das Funktionsprinzip des Gleichstromumrichters wird am Beispiel des Eintakt-Durchflusswandler erläutert (siehe Abbildung 3-15). Die Schaltung wird mit Hilfe eines Leistungs-Feldeffekttransistors  $T_r$  betrieben. Dieser wird in schneller Folge aus bzw.

eingeschalten. Dadurch liegt im eingeschalteten Zustand die Versorgungsspannung  $U_d$  an der Primärwicklung des Transformators an. [27]

$$u_1 = U_d \tag{3-27}$$

Im selben Augenblick beträgt die Sekundärspannung  $u_2$  des Transformators, die selbe Form der Eingangsspannung, jedoch um dessen Übersetzungsverhältnis  $\ddot{u}$  erhöht. Das Übersetzungsverhältnis  $\ddot{u}$  geht aus dem Windungsverhältnis des Transformators hervor. [27]

$$\ddot{u} = \frac{N_2}{N_1} \tag{3-28}$$

$$u_2 = \frac{U_d}{\ddot{u}} \tag{3-29}$$

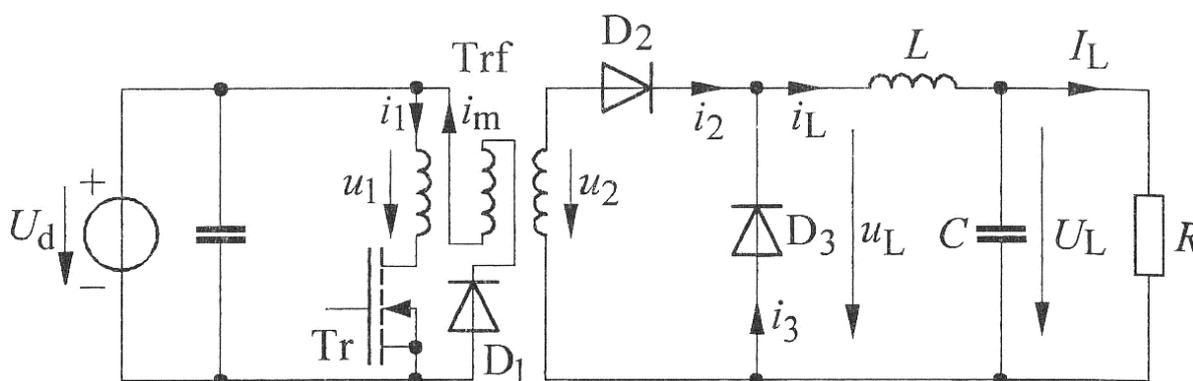


Abbildung 3-15: Ersatzschaltbild eines Eintakt-Durchflusswandlers [27]

In Abbildung 3-15 ist zu erkennen, dass die Kapazität  $C$  parallel zur Last  $R$  geschaltet wird, um die Ausgangsspannung  $U_L$  konstant zu halten und zu glätten. Durch eine ideale Glättung der Spannung kann der Transformator-Sekundärstrom  $i_2$  als ideal betrachtet werden, wodurch sich eine konstante Steilheit wie in (3-30) ergibt. Die dabei angeführte Induktivität  $L$  ist eine Drosselspule im Sekundärkreis der Schaltung, die als Energiespeicher dient. [27]

$$\frac{di_2}{dt} = \frac{di_L}{dt} = \frac{u_L - U_L}{L} = \frac{U_d - U_L}{\ddot{u} L} \quad \text{für } u_L = u_2 \tag{3-30}$$

Der Transformator-Primärstrom kann daraus wie in der Formel (3-31) dargestellt werden.

$$i_1 = \frac{i_2}{\ddot{u}} + i_\mu \tag{3-31}$$

Der Strom  $i_\mu$  stellt dabei den Magnetisierungsstrom des Transformators dar, der für die einwandfreie Funktion der Schaltung bereitgestellt werden muss.

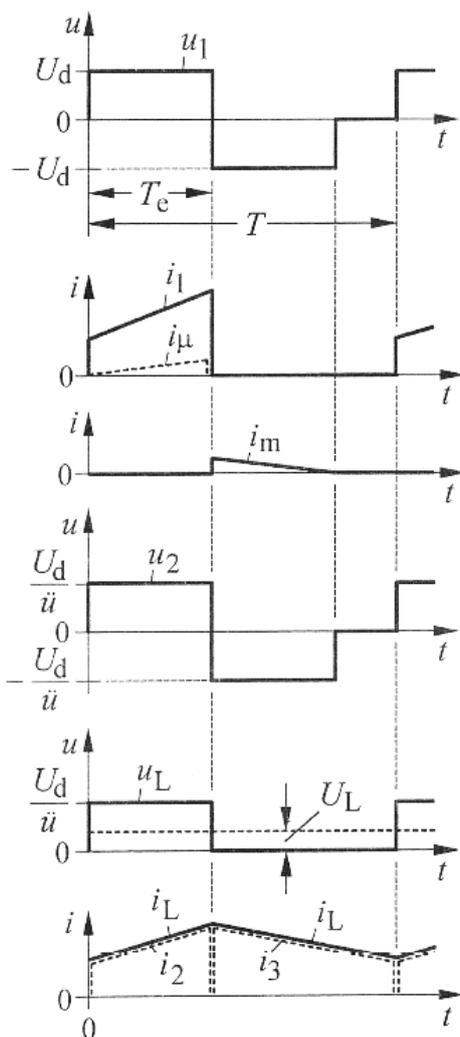


Abbildung 3-16: Lückfreier Betrieb des Eintakt-Durchflusswandlers [27]

Durch das Ausschalten des Transistors  $T_r$  wird der Strom  $i_1$  null. Aus diesem Grund muss das Magnetfeld vom Transformator kern durch eine negative Spannung abgebaut werden. Um dies zu realisieren benötigt man eine sogenannte Entmagnetisierungswicklung die in Reihe mit einer Diode  $D_1$ , parallel zur Primärwicklung geschaltet ist. Durch das Abbauen des Magnetfeldes wird eine Spannung induziert, die eine andere Polarität besitzt, als beim Aufmagnetisierungsprozess. Durch diesen Effekt wird die Diode  $D_1$  leitend und die gewünschte Spannung am Transformator wirksam. Die dabei gespeicherte Energie wird über den Entmagnetisierungsstrom  $i_m$  wieder der Versorgungsquelle zugeführt. [27]

Während der Entmagnetisierung gilt:

$$u_1 = -U_d \quad (3-32)$$

$$u_2 = -\frac{U_d}{\ddot{u}} \quad (3-33)$$

Auf Grund des Abbaus des Magnetfeldes sind beide Spannungen auf null. Durch das Ausschalten des Transistors  $T_r$  kommutiert der Strom  $i_L$  von der Diode  $D_2$  auf die Diode  $D_3$ . Infolgedessen wird die Spannung  $u_L$  null, was bewirkt, dass der Strom  $i_L = i_3$  mit der Steilheit wie in der Formel (3-34) abnimmt. [27, 29]

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{di_3}{dt} = -\frac{U_L}{L} \quad (3-34)$$

Die Ausgangsspannung  $U_L$  erhalten wir aus der Überlegung, dass die Spule  $L$  keine Gleichspannung aufnehmen kann. Daher kann die Ausgangsspannung  $U_L$  durch das Verhältnis der Einschaltzeit  $T_E$  zur Gesamtzeit  $T$  dargestellt werden. Dadurch lässt sich die Ausgangsspannung  $U_L$  durch das Tastverhältnis  $a$ , das nicht größer wie 0,5 betragen darf, beschreiben. So lässt sich die Ausgangsspannung sowohl über das Übersetzungsverhältnis  $\ddot{u}$  bzw. über das Tastverhältnis  $a$  variieren. [27]

$$U_L = \frac{T_E}{T} * \frac{U_d}{\ddot{u}} \quad (3-35)$$

$$a = \frac{T_E}{T} \quad (3-36)$$

Der Durchflusswandler kann wie der Hochsetz-Gleichstromsteller sowohl in einem lückfreien Betrieb und einem Lückbetrieb arbeiten. [27]

### *Sperrwandler*

Der Sperrwandler (Flyback converter) ist eine andere Art eines Gleichstromumrichters, der ebenfalls einen Transformator verwendet. Die Schaltung verhält sich dabei sehr ähnlich eines Hochsetz-Gleichstromstellers, jedoch mit galvanischer Trennung. Der Kondensator  $C$  in der Schaltung parallel zur Last dient zur Glättung der Ausgangsspannung. Der Sperrwandler wird ähnlich wie die zwei davor angeführten Wandler betrieben. Ein Transistor  $T_r$  wird in schneller Abfolge aus- und eingeschalten. Dabei liegt im eingeschalteten Zustand die Versorgungsspannung  $U_d$  an der Eingangsseite des Transformators an. Die Ausgangsspannung  $U_L$  des Transformators entspricht dabei der um das Übersetzungsverhältnis  $\ddot{u}$  skalierten Eingangsspannung  $U_d$ . Die Diode  $D$  wird vorübergehend in Sperrrichtung betrieben, was keinen Stromfluss von  $i_2$  zulässt. Der Strom  $i_1$  steigt derweil mit der Steilheit wie in der Formel (3-37) an. [27, 29]

$$\frac{di_1}{dt} = \frac{U_d}{L_1} \quad (3-37)$$

Die Induktivität  $L_1$  ist hierbei die Primärwicklung des Transformators. Die von der Gleichspannungsquelle  $U_d$  abgegebene Energie baut im Transformator ein Magnetfeld auf, worin die Energie gespeichert wird. Nachdem der Transistor  $Tr$  ausgeschaltet wird, baut sich das Magnetfeld wieder ab, was zur Folge hat, dass die Spannung  $u_2$  die Polarität ändert. Infolgedessen beginnt die Diode  $D$  zu leiten und der Transformator gibt die gespeicherte Energie an den Ausgangskreis ab. Durch Abgabe der Energie ändert sich die Steilheit des Transformator-Sekundärstroms  $i_2$  wie in der Formel (3-38).

$$\frac{di_2}{dt} = -\frac{U_L}{L_2} \quad (3-38)$$

Der Sekundärstrom  $i_2$  fließt durch die sekundärseitige Transformatorinduktivität und nimmt dabei ab. Dabei kann der Sperrwandler sowohl mittels eines trapezförmigen aber auch dreieckförmigen Strom betrieben werden. [27]

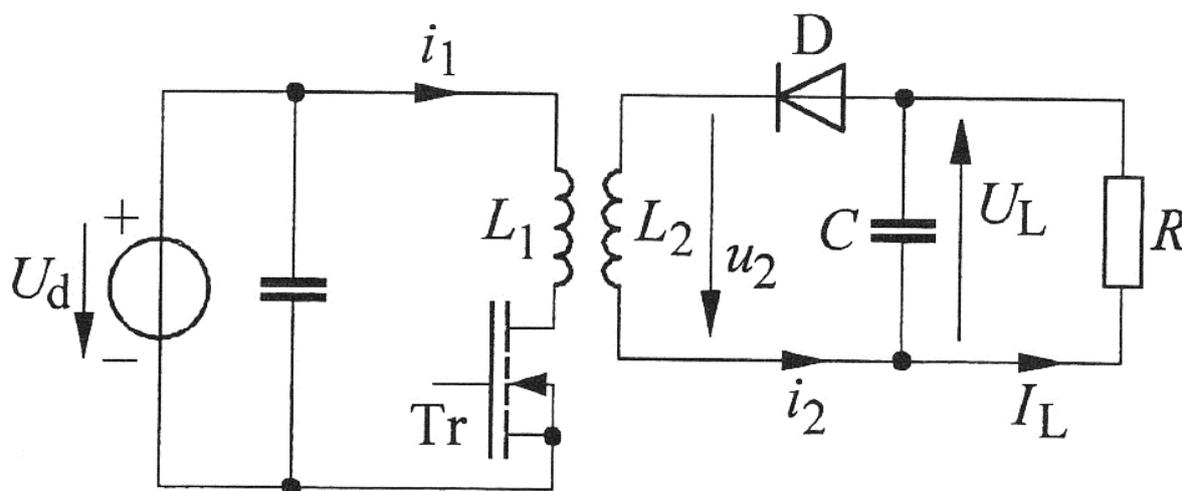


Abbildung 3-17: Ersatzschaltbild eines Sperrwandlers [27]

Die Höhe der Sekundärspannung  $U_L$  kann dadurch, dass ein Transformator keine Gleichspannung übertragen kann wie in der Formel (3-39) errechnet werden

$$U_L = \frac{T_E}{T_A} * \frac{U_d}{\ddot{u}} \quad (3-39)$$

Daraus ergibt sich eine Periodendauer wie in der Gleichung (3-40) dargestellt.

$$T = T_E + T_A \quad (3-40)$$

Auf diese Weise ist zu erkennen, dass die Ausgangsspannung vom Verhältnis  $T_E/T_A$ , als auch vom Übersetzungsverhältnis  $\ddot{u}$  was in Abbildung 3-18 ersichtlich, abhängig ist. [27]

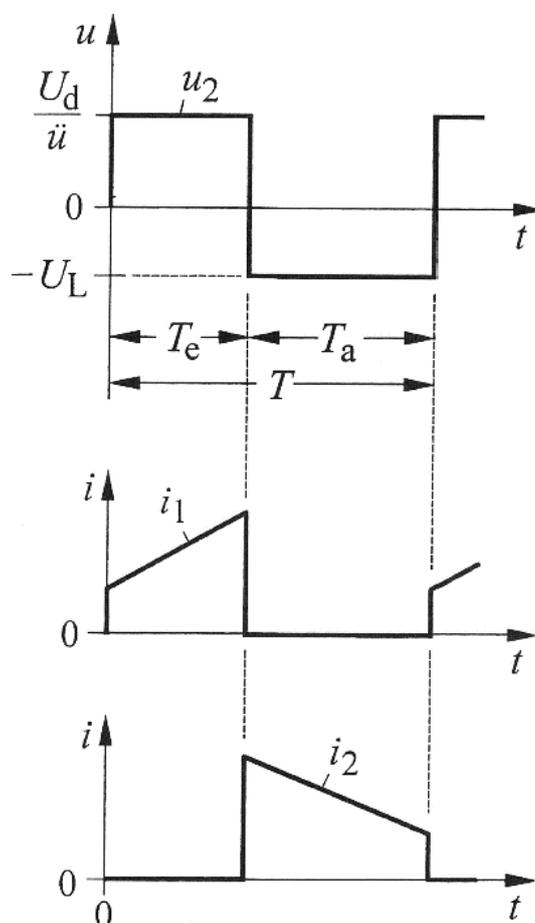


Abbildung 3-18: Trapezförmiger Stromverlauf von einem Sperrwandler [27]

### 3.2.1.2 Wechselrichter

Ein Wechselrichter ist für die Umwandlung von Gleichstrom in Wechsel- bzw. Drehstrom verantwortlich. Dadurch kann die SOFC Anlage, die Gleichstrom liefert an das elektrische Netz angeschlossen werden. Eine Einspeisung ist jedoch erst möglich wenn der Wechselrichter eine feste Frequenz, eine feste Spannung, einen festen Phasenwinkel und die richtige Phasenfolge aufweist. Um dies zu gewährleisten muss der Wechselrichter die genannten Faktoren prüfen und berücksichtigen. Ein Netzwechselrichter hat neben der Spannungsumwandlung noch eine weitere Aufgabe. Ein Wechselrichter muss in der Lage sein, nicht nur reine Wirkleistung in das Netz einzuspeisen, sondern wenn nötig auch induktiv bzw. kapazitive Blindleistung. Der Netzwechselrichter muss seinen Leistungsfaktor je nach Bedarf verändern können, um die Netzstabilität zu erhalten. Das bedeutet, dass

dieser im Bedarfsfall sowohl induktive als auch kapazitive Blindleistung im Bereich  $\cos(\varphi)$  von 0,8 bis 1,0 einspeisen muss. Des Weiteren muss der Wechselrichter zur Kompensation der Oberschwingungen beitragen und auch selbst keine weiteren Oberschwingungen in das elektrische Netz einspeisen. [27, 30, 31]

### Netzgeführte Wechselrichter

Netzgeführte Stromrichterschaltungen dienen hauptsächlich als Gleichrichter, die Wechselstrom in Gleichstrom umwandeln können. Jedoch sind diese netzgeführten Stromrichterschaltungen auch als Wechselrichter einsetzbar. Prinzipiell unterscheidet man zwischen gesteuerten und ungesteuerten Schaltungen, wobei eine ungesteuerte nur als Gleichrichter arbeiten kann. Bei der gesteuerten Schaltung lässt sich die Spannungshöhe der Schaltung verstellen, wodurch der Energiefluss in beide Richtungen steuerbar ist. Dies kann anhand einer Zweipuls-Mittelpunktschaltung einfach wie in Abbildung 3-19 dargestellt werden. [27]

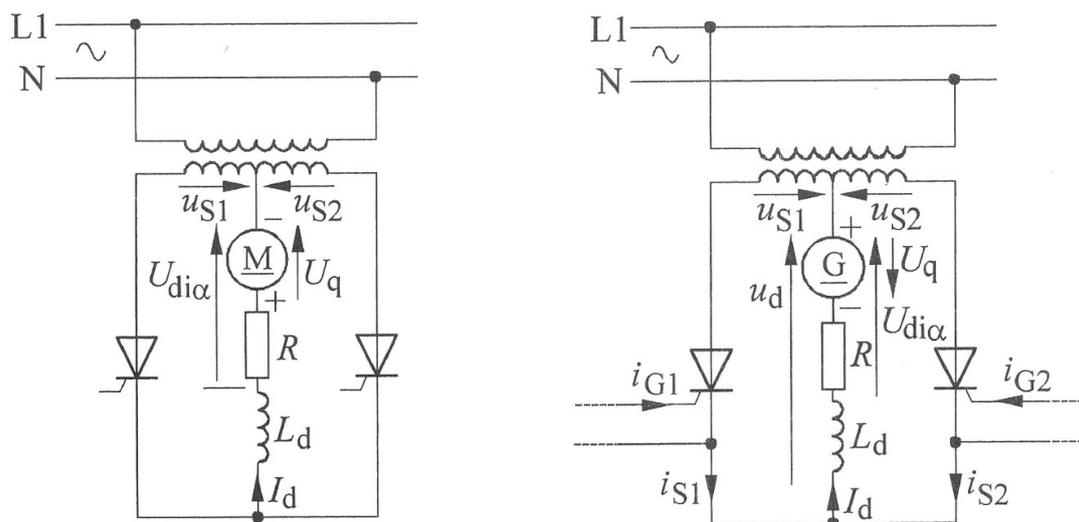


Abbildung 3-19: Zweipuls-Mittelpunktschaltung; Motor(links); Generator (rechts) [27]

Durch die entsprechende Beschaltung der Thyristoren geht diese Schaltung in den Wechselrichterbetrieb über. Hierbei muss der Ansteuerwinkel des Thyristors über  $90^\circ$  gewählt werden. Dadurch, dass die Spannung  $U_q$  der Quelle genügend hoch ist, wird durch die Glättungsdrossel  $L_d$  den Strömen  $i_{S1}$  und  $i_{S2}$  ein entsprechender Verlauf aufgezwungen (Abbildung 3-20). [27]

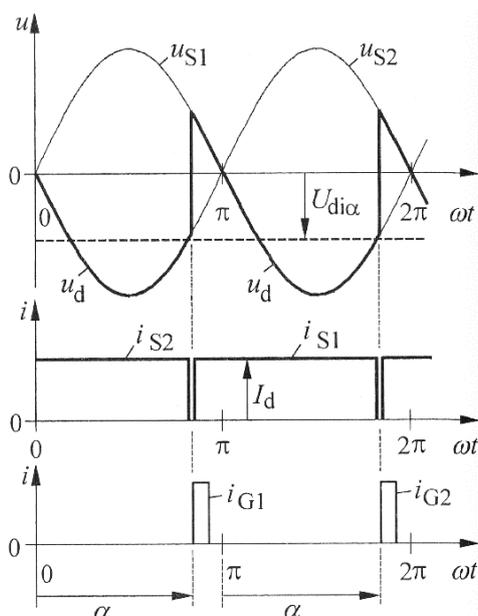


Abbildung 3-20: Spannungs-Stromverlauf vom netzgeführten Wechselrichter[27]

Auf Grund der Beschaltung ergibt sich ein überwiegender negativer Teil des Mittelwertes der Spannung  $U_{di\alpha}$ . Die Spannung  $U_{di\alpha}$  ist jene, die durch die Beschaltung des Wechselrichters ab dem Winkel  $\alpha$  für das elektrische Netz erzeugt wird. Durch diese negative Spannung wird Leistung in das elektrische Netz eingespeist. Um diese Leistung zu steuern, kann der Steuerwinkel  $\alpha$  zwischen  $90^\circ$ - $180^\circ$  variiert werden. Dabei sollte der Winkel jedoch nicht zu nahe an die  $180^\circ$  herangeführt werden, da die Stromventile eine gewisse Zeit für die Stromsperrung benötigen. Ist diese Zeitreserve nicht mehr gewährleistet beginnt der Wechselrichter zu kippen, was zu einer kurzschlussartigen Zunahme des Stromes führt. [27]

### Selbstgeführte Wechselrichter

Ein selbstgeführter Wechselrichter wandelt einen Gleichstrom in einen Wechselstrom/Drehstrom um, wobei die Frequenz dabei frei wählbar ist. Dadurch kann die Höhe der erzeugten Spannung verstellt werden. Soll der Wechselrichter jedoch an das elektrische Netz geschlossen werden, muss sowohl die Frequenz, der Phasenwinkel, die Phasenfolge und die Spannungshöhe synchron mit der des elektrischen Netzes sein. Um dies zu realisieren verwendet man sogenannte Synchronisationseinrichtungen. Diese Anlage garantiert eine ordnungsgemäße Koppelung bzw. Einhaltung der zuvor angegebenen Faktoren für das Netz. [27]

Die selbstgeführten Wechselrichter kann man noch weiter unterscheiden in stromgeführte und spannungsgeführte Schaltungen. Bei stromgeführten Systemen wird ein eingepprägter Strom auf die DC-Seite geführt. Bei spannungsgeführten Schaltungen wird hingegen eine

eingepreßte Gleichspannung aufgepreßt. Im Gegensatz zu netzgeführten Schaltungen, wird keine äußere Wechselspannung verwendet, um die Ventile zu sperren. Die Ein- und Ausschaltvorgänge werden vom Wechselrichter selbst gesteuert. Selbstgeführte Stromrichter vermeiden weitgehend eine starke Abweichung von der Sinusform des Stromes und des dadurch entstehenden Phasenwinkels. [27]

Um bei einem Wechselrichter den bestmöglichen Wirkungsgrad zu erhalten, muss die Eingangsspannung  $U_d$  des Wechselrichters, größer als der Scheitelwert der Netzspannung  $u_1$  sein. Der parallelgeschaltete Kondensator  $C_d$  dient dazu die Gleichspannung bei Schaltvorgängen zu stützen. Am Ausgang des Wechselrichters befindet sich eine Spule als passives Filterelement, die dazu führt Schaltspitzen zu verringern. [25, 27]

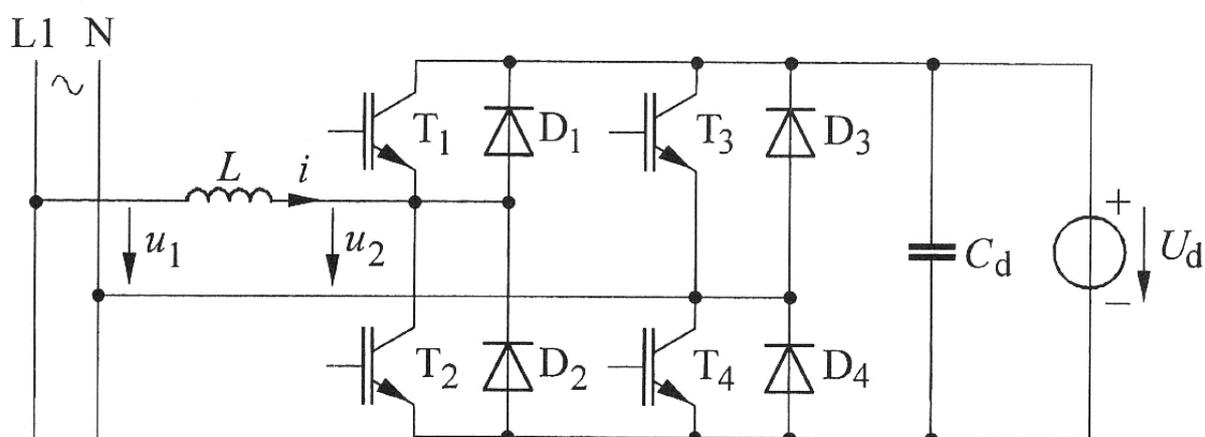


Abbildung 3-21: Selbstgeführter Wechselrichter-Schaltung [27]

Bei der Erzeugung der Wechselspannung ist zu beachten, dass die Transistoren  $T_1$  und  $T_2$  bzw.  $T_3$  und  $T_4$  im Gegentakt ein und aus geschaltet werden. Jedoch sollte zwischen den beiden Schaltpunkten eine kurze Sicherheitszeit vergehen, um einen Kurzschluss zu vermeiden. Die Transistoren werden so geschaltet, dass sich ein Spannungsmuster von  $u_2$  wie in Abbildung 3-22 ergibt. Dadurch werden bei einer positiven Halbwelle die Transistoren  $T_1$  und  $T_4$  so beschalten, dass man ein gewünschtes Blockmuster erhält. Bei einer negativen Halbwelle hingegen werden die Transistoren  $T_2$  und  $T_3$  nach dem Pulsmuster der negativen Halbwelle in Abbildung 3-22 beschalten. Aus diesem Schaltmuster kann die Grundschwingung  $u_{21}$  herausgefiltert werden, die identisch der Netzspannung  $U_1$  ist. [27]

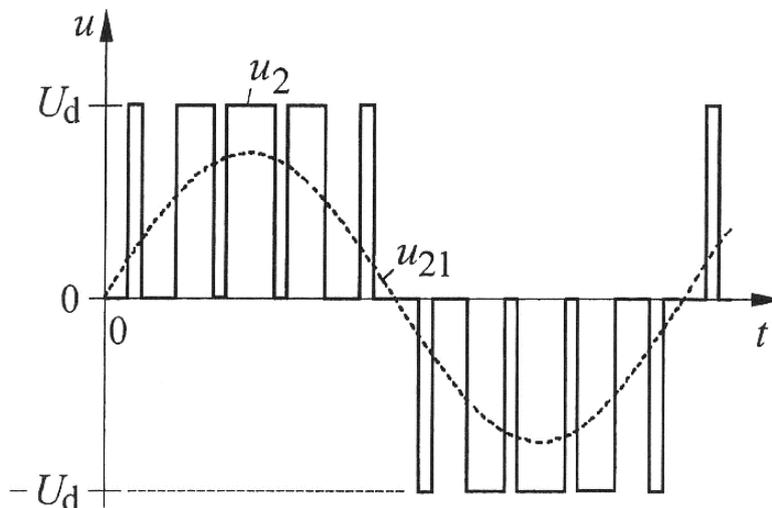


Abbildung 3-22: Spannungsverlauf des Wechselrichterausgangs [27]

Je nachdem ob im Netz oder der Quelle mehr Energie vorhanden ist, wird Energie aus oder in das Netz gespeist (bei Erzeuger). Dadurch ändert sich der Leistungsfluss bzw. der Stromfluss in der Schaltung. Daraus ergeben sich die Zeigerdiagramme wie in Abbildung 3-23 dargestellt. Aus diesem kann man die Phasenverschiebung  $\alpha$  zwischen der Netzspannung  $U_1$  und der Spannung durch den Wechselrichter  $U_{21}$  erkennen. Diese tritt auf Grund des Stromflusses aus dem bzw. in das elektrische Netz auf. [27]

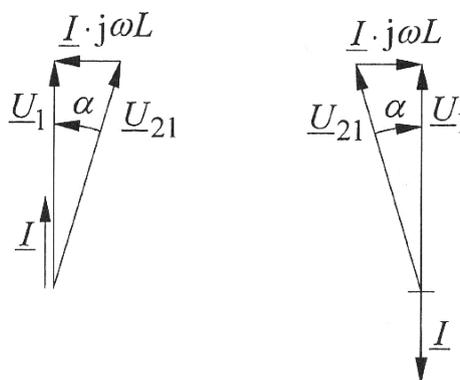
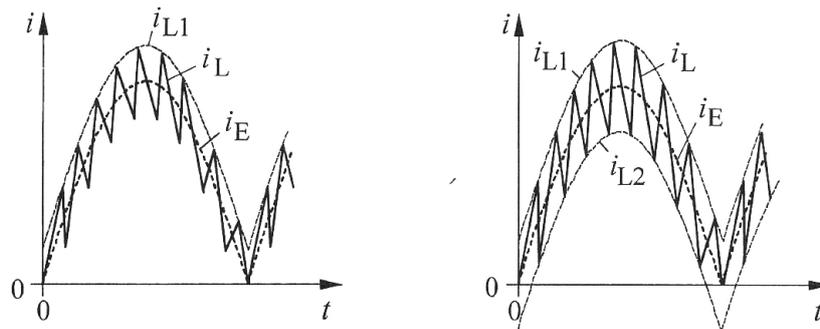


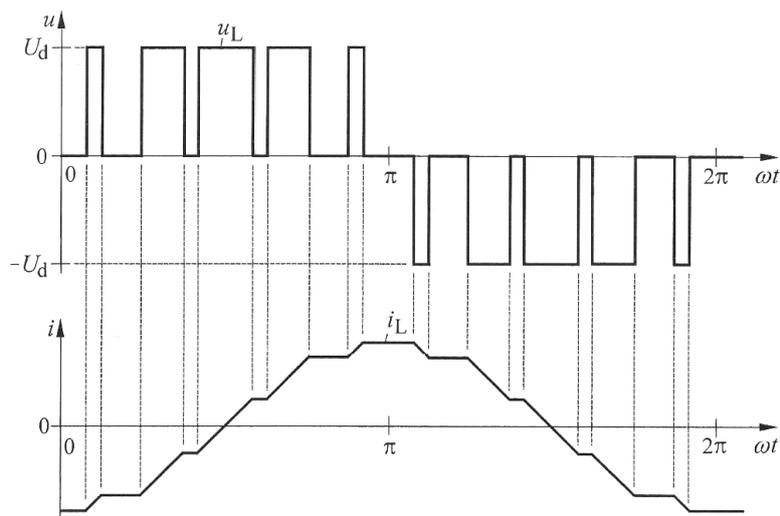
Abbildung 3-23: Leistungsentnahme (links); Leistungseinspeisung (rechts) [27]

Zum Ansteuern der Leistungshalbleiter können zwei unterschiedliche Verfahren angewendet werden. Das erste Verfahren vergleicht den Augenblickswert des Netzstromes mit einer von der Netzspannung abgeleiteten und in der Phase liegenden sinusförmigen Sollwertgröße. Dadurch variieren die Ein- und Ausschaltzeit des Leistungshalbleiters so, dass der betreffende Strom die gleiche Kurvenform annimmt wie der Sollwert. Für dieses Verfahren wird entweder die Pulsbreitensteuerung oder die Steuerung durch einen Zweipunktregler verwendet. [27]



**Abbildung 3-24: Pulsbreitensteuerung (links); Zweipunktregelung (rechts) [27]**

Das zweite Verfahren ist die sinusbewertete Pulsbreitensteuerung. Hierbei wird durch die Gleichspannung  $U_d$  eine Wechselspannung erzeugt die synchron zum Netz läuft. Bei diesem Verfahren muss der Schaltzeitpunkt so gewählt werden, dass der Netzstrom einen passenden Effektivwert aufweist. Dadurch muss bei diesem System eine Regelschaltung verwenden werden. [27]



**Abbildung 3-25: Sinusbewertete Pulsbreitensteuerung [27]**

Große Leistungen werden mittels eines Drehstromwechselrichters in das elektrische Netz eingespeist. Dadurch teilt sich die gesamte Leistung gleichmäßig auf alle drei Phasen auf, was eine höhere Leistung der Gesamtanlage zulässt. [27]

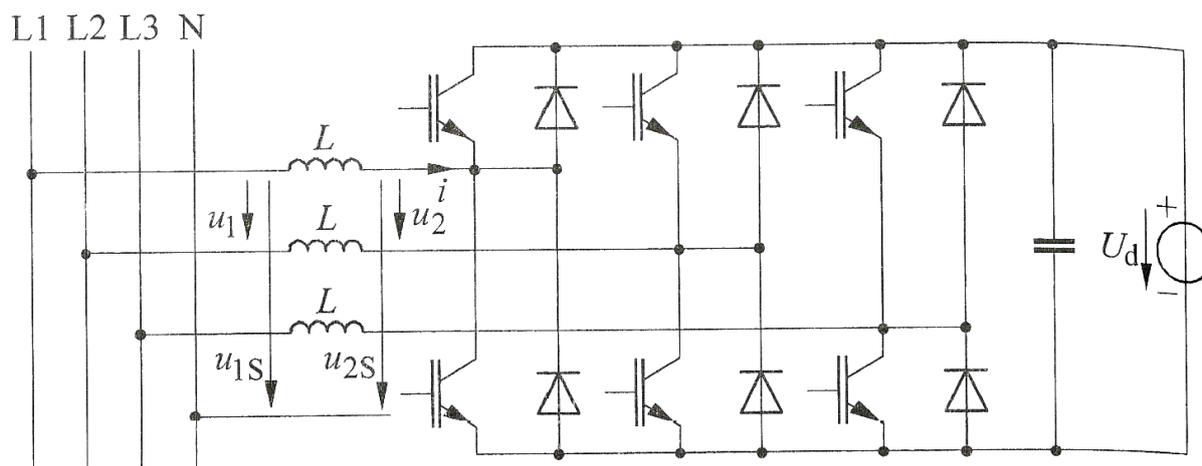


Abbildung 3-26: Selbstgeführter 3-phasiger Wechselrichter [27]

In Abbildung 3-27 sind die verschiedenen Möglichkeiten angegeben um eine SOFC Anlage in das elektrische System einzubinden.

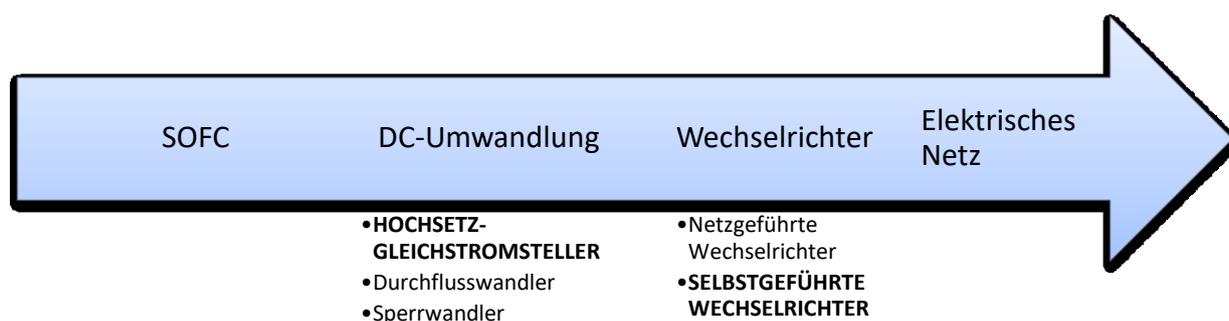


Abbildung 3-27: Einbindungsmöglichkeiten einer SOFC Anlage in das elektrische Netz

### 3.2.2 Betriebsarten

Unter den Betriebsarten versteht man den physischen Zustand der Anlage bezogen auf das elektrische Netz. Hierbei unterscheidet man zwischen Netzparallelbetrieb, Inselbetrieb und Notstrom-Inselbetrieb. Hauptsächlich werden der Netzparallelbetrieb und der Notstrom-Inselbetrieb für einen Haushalt realisiert. [32]

Der Netzparallelbetrieb ist der herkömmliche Betrieb einer Anlage, bei dem Energie parallel zum Netz erzeugt und dort eingespeist wird. Durch den Anschluss an das elektrische Netz, muss es zu keiner ausgeglichenen elektrischen Energiebilanz in der Anlage selbst kommen. Dieser Ausgleich der Energie erfolgt durch das elektrische Netz, wodurch die Anlage selbst mit der notwendigen Infrastruktur ausgestattet sein muss. Das bedeutet, dass das SOFC

System einen Anschluss an das elektrische Netz und an eine Wärmesenke/ein Wärmenetz besitzen muss. [32]

Reine Inselbetriebe werden dort eingesetzt, wo es keinen Sinn macht auf Grund der Abgelegtheit hohe Anschlusskosten zu zahlen, um am Netz teilzunehmen. Wichtig ist hierbei, dass die erzeugte Energie in einem Inselnetz auch wieder verbraucht wird. Dies wird oft mit Hilfe einer Batterie und eines thermischen Energiespeichers realisiert, damit die Energiebilanzen im Netz ausgeglichen sind. Auf Grund der einfachen Integration wird eine Batterie für den Ausgleich der elektrischen Energiebilanz verwendet. Die thermische Energie kann in einen Warmwasserboiler gespeichert werden, oder muss direkt über die Umgebung abgegeben werden. [32]

Der Notstrom-Inselbetrieb läuft simultan wie ein Netzparallelbetrieb ab. Durch einen externen Netzausfall kann man jedoch von einem Netzparallelbetrieb in einen Inselbetrieb umschalten. Dabei ist es notwendig eine Batterie und eine Wärmesenke in das System zu integrieren, um die Energiebilanz auszugleichen. [32]

### *3.2.2.1 Netzparallelbetrieb*

Beim Netzparallelbetrieb wird ein elektrischer Erzeuger bis zur maximalen Erzeugleistung betrieben. Falls durch den elektrischen Netzbetrieb der Betreiber mehr Energie benötigt als er selbst erzeugt, kann er diesen Mehrbedarf vom Netz beziehen. So können Lastspitzen vom Betreiber durch das Netz gedeckt werden. Solche Anlagen können jedoch nur betrieben werden, wenn ein elektrisches Netz vorhanden ist, da es nicht dafür ausgelegt ist nur den Eigenbedarf zu decken. Des Weiteren fehlt solchen Systemen auch die nötige Infrastruktur, um die eigene Energiebilanz auszugleichen. Durch eine Leistungsregelung der Erzeugung, kann ein Verbraucher ohne einen Energiespeicher oder ein elektrisches Netz nicht gedeckt werden. Eine solche Leistungsregelung ohne zeitlichen Verzug ist nicht zu realisieren. Um jedoch an das elektrische Netz angebunden zu werden, müssen die Spannungsform, die Frequenz, die Phasenlage und die Phasenfolge ident dem vorhanden elektrischen Netz sein. Dies wird mit vom Wechselrichter überprüft, wodurch ein zuschalten der Anlage ermöglicht wird. Jedoch müssen die vorher angeführten Kriterien nicht nur beim Synchronisationszeitpunkt vorhanden sein, sondern auch während des Betriebes, was über eine Überwachungsfunktion des Wechselrichters überprüft wird. [33, 34]

### *3.2.2.2 Inselbetrieb*

Im Inselbetrieb versorgt der Betreiber nur den Leistungsbedarf der Verbraucher im eigenen System. Das System muss zu jeder Zeit in der Lage sein, den Leistungsbedarf zu decken. Dies gilt auch bei Lastabwurf und Lastzuschaltung. Inselbetriebe werden heutzutage fast

ausschließlich in der Kombination von Photovoltaikanlagen mit einem Energiespeicher ausgeführt. Diese Anlagen sind aus mehreren Gründen für die Anwender interessant:

- Sinkende Vergütung der Eigenerzeugnisse
- Sinkende Preise der Speicher
- Hoher Preis des Netzanschlusses
- Innovatives Betriebsmodell
- Reduktion der Spitzen-Bezugsleistungen
- Erhöhung der Unabhängigkeit
- Bedürfnis den eigenen Strom zu nutzen

Solche Inselnetze können aber auch mit Hilfe einer SOFC Anlage gespeist werden, um dieselben Vorteile zu erlangen. [33, 35]

Jedoch muss auch im Inselbetrieb die Frequenz, die Spannung und die Phasenlage gehalten werden, um einen optimalen Betrieb zu ermöglichen und keine Schädigungen der elektrischen Geräte hervorzurufen. [34]

### *3.2.2.3 Notstrom-Inselbetrieb*

Notstrom-Inselbetriebe müssen eine spezielle Infrastruktur besitzen, um vom normalen Netzparallelbetrieb in den Inselbetrieb umzuschalten. Neben einer Batterie und einem Umschaltkonzept muss das System auch speziell dafür ausgelegt sein. Hierbei ist besonders wichtig, dass sowohl die elektrische als auch die thermische Energiebilanz gedeckt wird. Solche speziellen Anlagen entsprechen einiger Normen, die in einem solchen Betrieb eingehalten werden müssen. Dabei soll der Betriebszustand prinzipiell nur als Überbrückung eines Netzausfalls dienen. Das bedeutet, dass sobald der Fehler für den Netzausfall behoben wurde das System wieder an das Netz gekoppelt wird. Die Kopplung an das elektrische Netz soll schnellst möglich erfolgen, da der Notstrom-Inselbetrieb den Wechselrichter stärker belastet als im Netzparallelbetrieb. Diese stärkere Belastung ist die Folge einer unsymmetrischen Last am Wechselrichter, welche am Gerät selbst ausgeglichen werden muss und nicht wie üblich im Netz ausgeglichen wird. [33, 36]

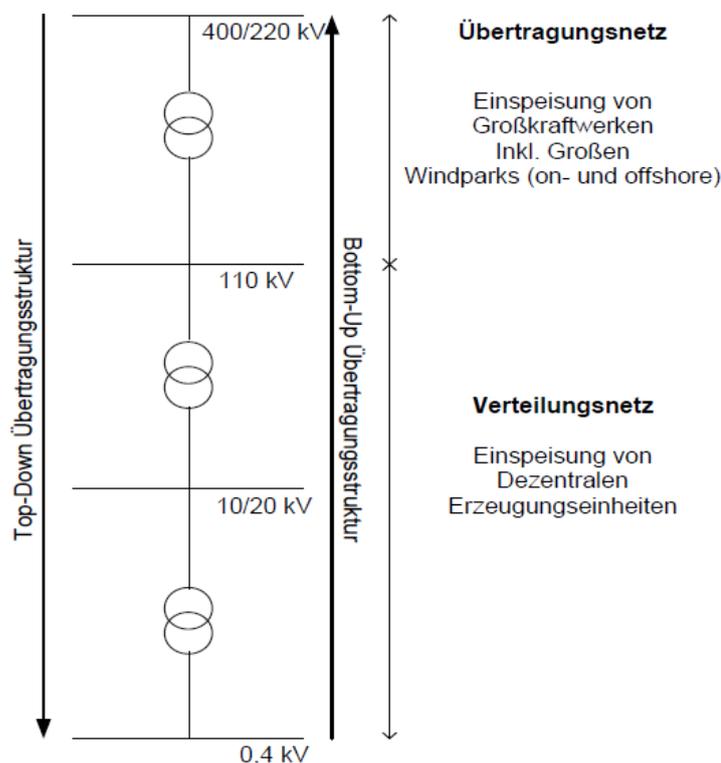
### **3.2.3 Anschlussbedingungen einer SOFC Anlage**

Um eine elektrische Erzeugungsanlage parallel zum Netz zu betreiben, gibt es spezielle Rahmenbedingungen. Die Anlage muss so konzipiert sein, dass die Sicherheit gegenüber Personen und den Geräten selbst, gewährleistet ist. Dies beinhaltet sowohl den Betrieb, als auch die allgemeine Netzanbindung der Anlage. [37, 38]

Das SOFC System muss dabei einige Kriterien erfüllen, bei dem vorrangig die Anschlussleistung ausschlaggebend ist. Durch die installierte Leistung kann man über eine Faustregel festlegen, in welche Netzebene die elektrische Energie eingespeist werden sollte. Die Faustregel lautet, dass die Anschlussleistung die dementsprechende Anschlussspannung bestimmt. Dadurch kommt es zu keiner Netzüberlastung und dementsprechend auch zu geringeren Verlusten durch die Übertragung.

$$\text{Anschlussleistung [MVA]} = \text{Anschlussspannung[kV]} \quad [39] \quad (3-41)$$

Durch die Formel (3-41) ergibt sich eine Mindestanschlussspannung die beim Netzanschluss erreicht werden muss. Dadurch speisen kleine Anlagen, wie ein Modul einer SOFC Anlage immer in das Niederspannungsnetz ein. Größere Einheiten speisen in höhere Netzebenen, wie in Abbildung 3-28 dargestellt, ein. [39]



**Abbildung 3-28: Netzebenen [20]**

Eine elektrische Netzeinspeisung kann von Synchronmaschinen, Asynchronmaschinen und Gleichstromquellen über einen Wechselrichter erfolgen. Für die elektrische Einspeisung gelten unterschiedliche Richtlinien, die je nach Anwendungsfall angewendet werden müssen.

Bei Anlagen die in Niederspannungsnetze einspeisen gelten die Richtlinien

- TOR D (Österreich) [37, 38]
- VDE-AR-N 4105 (Deutschland) [40]

Bei Einspeiser in das Mittelspannungsnetz gelten die Normen

- TOR D (Österreich) [37, 38]
- Technische Richtlinie Erzeugungsanlagen am Mittelspannungsnetz (Deutschland) [41, 42]

In diesen Normen sind wichtige Parameter geregelt die in den kommenden Kapiteln näher erläutert werden.

### 3.2.3.1 Spannung

Die Spannungshöhe und die Spannungsform dürfen nicht stark von der Spannung am Einspeisepunkt abweichen. Dieses Spannungsniveau wird benötigt, um keine unzulässigen Spannungswerte zu erzeugen. Die Spannung darf sich dabei maximal [37, 38]

$$\Delta u = +/ - 10 \% \quad (3-42)$$

von der Netzspannung unterscheiden. Die Spannung darf jedoch in Ausnahmefällen von diesem Grenzwert abweichen. Dies muss jedoch mit dem Netzbetreiber abgestimmt werden. Die Spannungshöhen für Nieder- und Mittelspannungsnetz sind in den entsprechenden Normen definiert, wo auch die genauen Grenzwerte verankert sind. [37]

### 3.2.3.2 Kurzschlussleistung

Die Kurzschlussleistung  $S_{kV}$  ist die Beurteilungsgrundlage der unterschiedlichen Netzurückwirkungen, die am Einspeisepunkt eingetragen werden. [37, 38]

Die Kurzschlussleistung betrachtet dabei immer die normalen Betriebsbedingungen, die die kleinste Kurzschlussleistung erzeugen. Diese Leistung ergibt sich dabei aus der Netzspannung  $U_V$ , sowie aus der Kurzschlussimpedanz  $Z_{kV}$  des Netzes am Einspeisepunkt. [37]

$$S_{kV} = \frac{U_V^2}{Z_{kV}} \quad (3-43)$$

### 3.2.3.3 Schaltbedingte Spannungsänderungen

Durch eine Laständerung wird eine Stromänderung bewirkt, was eine Spannungsänderung  $\Delta U$  am Einspeisepunkt bewirkt. Solche Spannungsänderungen können durch Zuschalten von Lasten, Motoren im Wechselbetrieb, Schweißmaschinen und andere Geräte entstehen.

Jedoch müssen solche Spannungsänderungen begrenzt werden, damit es zu keinen unzulässigen Spannungsänderungen und dadurch zu Ausfällen von anderen Geräten führt. [37]

### 3.2.3.4 Flicker

Der Flicker ist ein Eindruck der Unstetigkeit, der durch die zeitliche Änderung der Leuchtdichte dargestellt werden kann. Diese zeitlichen Änderungen werden durch die Spannungsänderungen, bzw. Laständerungen am Einspeisepunkt verursacht. [37, 38]

Dabei unterscheidet man zwischen einem Kurzzeit- und Langzeit-Flicker. Diese differenzieren sich auf Grund ihrer unterschiedlichen Messungsdauern und den dazugehörigen Grenzwerten. [37]

### 3.2.3.5 Unsymmetrie der Spannungen

Eine Unsymmetrie der Spannungen kann auf Grund einer ungleichmäßigen Belastung/Einspeisung der Außenleiter eines Drehstromsystems entstehen. Durch eine zu große Unsymmetrie kann es zu Fehlern im elektrischen Netz kommen. Dieser sogenannte Unsymmetriegrad  $k_U$  lässt sich über die Kurzschlussleistung  $S_{kV}$  und der Anschlussleistung  $S_A$  berechnen. [37]

$$k_U = \frac{S_A}{S_{kV}} \quad (3-44)$$

Dabei darf bei Verbrauchern kein Unsymmetriegrad größer als  $k_U = 0,7 \%$  entstehen.

### 3.2.3.6 Oberschwingungen

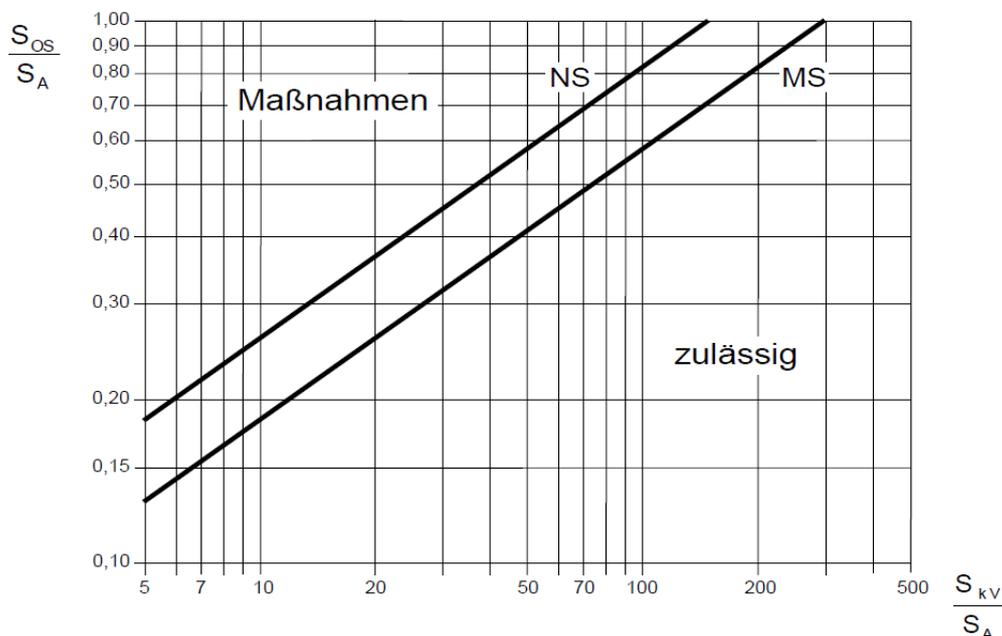
Oberschwingungen verursachen eine wiederkehrende Abweichung der Netzspannung von der ursprünglichen Sinusform. Dadurch entsteht eine Spannungsverzerrung die von der Grundschwingung abweicht und ein ganzzahliges Vielfaches dieser ist. Oberschwingungen werden zum wesentlichen Teil von Betriebsmitteln mit Leistungselektronik, Massengeräte mit Gleichstromversorgung und Betriebsmittel mit nichtlinearer Strom-Spannungs-Kennlinie erzeugt. [35, 37]

Bei einem zu hohen Oberschwingungsanteil der Netzspannung kann es zu einer starken Beeinträchtigung von elektrischen Betriebsmitteln kommen. Beurteilt wird das ganze durch die Verhältnisse der Oberschwingungsleistung  $S_{OS}$  zur Anschlussleistung  $S_A$  [37]

$$\frac{S_{OS}}{S_A} \quad (3-45)$$

und der Kurzschlussleistung  $S_{kV}$  zur Anschlussleistung  $S_A$

$$\frac{S_{kV}}{S_A} \quad (3-46)$$



**Abbildung 3-29: Oberschwingungsbeurteilung Nieder- (NS) und Mittelspannungsnetze (MS) [37]**

In der Abbildung 3-29 lässt sich ablesen, ob für den Erzeuger eine Maßnahme zu setzen ist, um die Oberwellen zu reduzieren oder sich dieser im zulässigen Bereich befindet.

### 3.2.3.7 Kommutierungseinbrüche

Durch das Betreiben eines netzgeführten Stromrichters kommt es immer wieder zu kurzen Einbrüchen der Netzspannung. Dies geschieht, da bei einer Kommutierung (Übergang von einem Stromventil auf das nächste) bis zur vollständigen Stromübernahme ein Kurzschluss zwischen den beiden Außenleitern auftritt. Dies kann mit Hilfe einer vorgeschalteten Drossel minimiert werden. Diese Abhilfe ist notwendig, um die geforderte Grenzwerte einzuhalten. [37]

### 3.2.3.8 Blindleistungskompensation

Bei Anlagen mit einem hohen induktiven Blindleistungsbedarf kann es dazu führen, dass die Spannung stark absinkt. Durch ein entsprechendes entgegenwirken mit einer Kompensationsanlage bzw. einer Blindleistungseinspeisung kann die Spannung angehoben werden. Gleichzeitig können solche Anlagen auch die Spannung absenken, um im gewünschten Spannungsbereich zu arbeiten. [37]

### 3.2.3.9 Statische Spannungshaltung

Da sich bei unterschiedlichen Lastflüssen die Spannungen verändern können, ist es eine Forderung des Netzbetreibers das Erzeugungsanlagen zur statischen Spannungshaltung beitragen. Dies kann mit Hilfe von unterschiedlichen Regelungen realisiert werden. Ziel der statischen Spannungshaltung ist es die Spannung im zulässigen Spannungsband zu halten. [41, 42]

### 3.2.3.10 Dynamische Netzstützung

Eine dynamische Netzunterstützung muss zurzeit nur für Erzeuger im Mittelspannungsnetz gegeben sein. Jedoch wird in Zukunft auch angedacht diese Unterstützung auf das Niederspannungsnetz auszuweiten. [43]

Unter einer dynamischen Netzstützung versteht man das Liefern von Energie bei einer Absenkung der elektrischen Spannung. Dabei gibt es jedoch Grenzen unter die diese Spannung nicht fallen darf. Die untere Grenze der Energielieferung wird durch den jeweiligen Typen der Erzeugungsanlage unterschieden. Hierbei unterscheidet man zwischen Synchronmaschinen und allen anderen möglichen Erzeugungsanlagen. Dabei werden zwei unterschiedliche Grenzlinien zum Verbleib am Netz angeführt (Abbildung 3-30). [43]

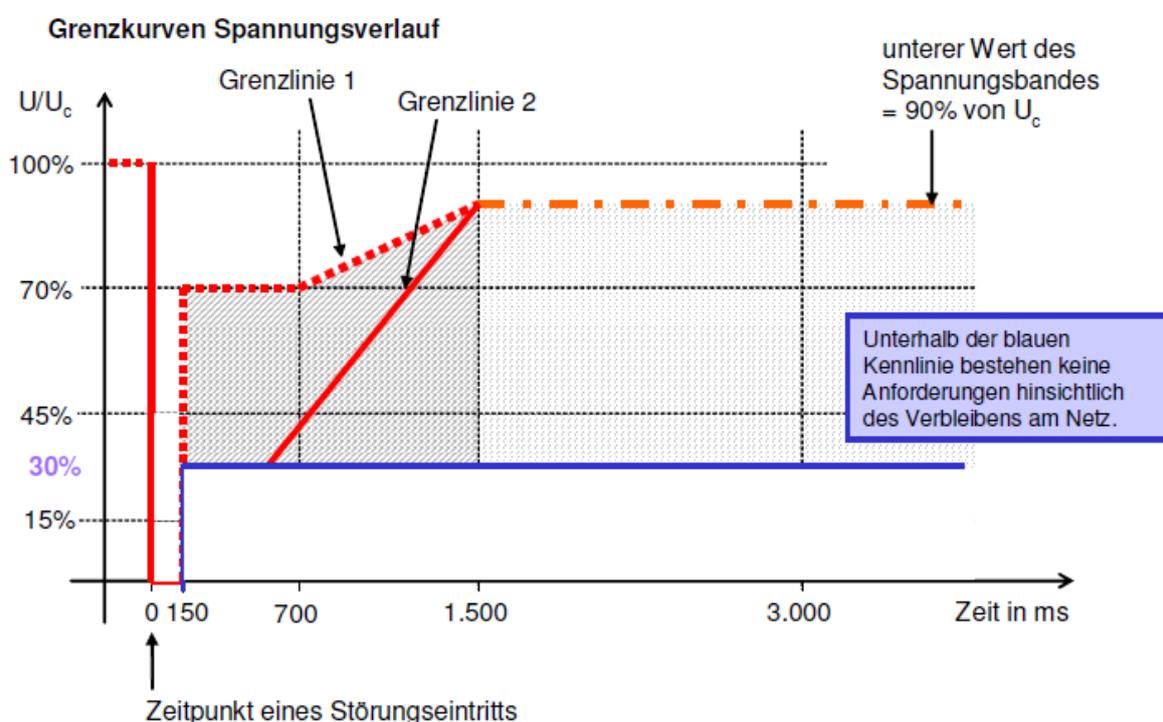


Abbildung 3-30: Dynamische Netzstützung [41]

Die Grenzlinie 1 gilt hierbei für die Netzstützung von Synchronmaschinen. Diese müssen im Fall einer Störung und den damit verbundenen Spannungseinbruch am Netz bleiben, wenn der Störungsverlauf oberhalb der Grenzlinie verläuft. Unterhalb der blauen Kennlinie in Abbildung 3-30 dürfen sich alle Erzeugungsanlagen ausnahmslos vom Netz trennen und müssen nicht zur dynamische Netzstützung beitragen. [43]

Abgesehen von Erzeugungsanlagen die mit einer Synchronmaschine arbeiten, müssen alle anderen Anlagen bei einem Spannungseinbruch zwischen Grenzlinie 1 und 2 den Fehler durchlaufen und zur Spannungswiederherstellung beitragen. Je nach Netzbetreiber ist es aber möglich die Grenzlinie 2 anzupassen. Des Weiteren ist es durchführbar unter Abstimmung mit dem Netzbetreiber sich kurzzeitig (KTE) vom Netz zu trennen. Voraussetzung hierfür ist jedoch, dass es möglich sein muss sich innerhalb von zwei Sekunden wieder am Netz zu resynchronisieren und wieder zur Netzstützung beizutragen. Eine sogenannte kurzzeitige Trennung (KTE) darf unterhalb der Grenzlinie 2 auf jeden Fall durchgeführt werden. [9, 37, 38, 41–44]

## **4 MODELLREALISIERUNG EINER SOFC ANLAGE FÜR DEN NETZPARALLELBETRIEB**

Eine SOFC Anlage kann auf verschiedene Arten in das elektrische Netz eingebunden werden. Da eine Brennstoffzelle Gleichspannung liefert, muss diese elektrische Leistung zuvor in Dreh- bzw. Wechselstrom umgewandelt werden, um in das Netz eingespeist werden zu können. Dabei ist jedoch ausschlaggebend in welcher Größe die Brennstoffzellenleistung vorgegeben wird. Prinzipiell ist es möglich die elektrische Leistung direkt mit einem Wechselrichter in das Netz einzubinden. Jedoch gibt eine Brennstoffzelle eine hohe Stromstärke und niedrige Spannung aus, wodurch oft die technischen Grenzen eines herkömmlichen Wechselrichters erreicht werden. Daher muss die elektrische Leistung zuvor in eine andere Spannungshöhe transformiert werden. Diese Transformation kann mit Hilfe von einem Gleichstromwandler/-umrichter realisiert werden, wodurch der Wechselrichter zusätzlich in ein optimales Spannungsfenster gehoben wird, in der er seinen höchsten Wirkungsgrad erreicht. Bei der Modellrealisierung wird eine höhere Einspeiseleistung verwendet, sodass dieser als Drehstrom-Wechselrichter ausgeführt werden muss. [37]

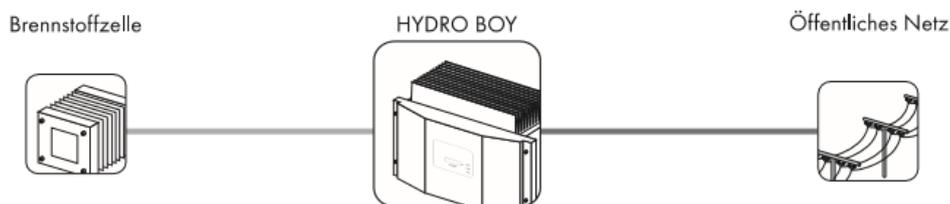
### **4.1 Direkter Netzanschluss**

Die SOFC Anlage kann grundsätzlich mit Hilfe eines Wechselrichters direkt an das elektrische Netz angeschlossen werden. Dabei ist zu beachten, dass ein nötiges Schutzkonzept für den Wechselrichter bei einem eventuellen Fehlverhalten vorgesehen ist. Ein sogenanntes ENS erkennt beispielsweise einen Netzausfall und kann die SOFC Anlage vom Netz schalten und dadurch einen Fehlerfall verhindern. Bei einem geeigneten Konzeptaufbau der Netzeinspeisung ist es möglich, die Anlage bei einem Netzausfall in einen Notstrom-Inselbetrieb umzuschalten. [32]

Ein direkter Netzanschluss ist jedoch nur möglich, wenn der Wechselrichter die nötigen Voraussetzungen für einen Betrieb am elektrischen Netz erfüllt. Der Wechselrichter bzw. ein externes ENS muss in der Lage sein sowohl die Spannung als auch die Frequenz des Netzes zu überwachen. Diese Überwachung ist notwendig, damit der Wechselrichter den Erzeuger synchron an das elektrische Netz schalten bzw. bei Bedarf wieder trennen kann.

Des Weiteren ist bei der Auswahl des Wechselrichters zu beachten, dass die Ausgangsparameter der SOFC Anlage kompatibel mit den DC-Eingangsdaten des Umrichters sind. Da diese Kompatibilität aufgrund der niedrigen Spannung und des hohen Stromes einer

SOFC Anlage schwer mit einem Standardwechselrichter zu realisieren ist, bietet es sich an, einen indirekten Netzanschluss der Anlage zu realisieren. [26]



**Abbildung 4-1: Direktes Netzeinspeisekonzept (SMA-Hydro Boy) [26]**

## 4.2 Indirekter Netzanschluss

Ein SOFC System kann über einen Wechselrichter elektrische Energie in das Netz liefern. Oft ist es jedoch nötig, zwischen dem Wechselrichter und der SOFC Anlage einen Gleichstromsteller/-umrichter zu schalten. Dieser Gleichstromsteller ist notwendig, da die SOFC Anlage eine unübliche Form an elektrischer Energie liefert. Die Brennstoffzellen liefern im Gegensatz zu herkömmlichen Erzeugungsanlagen einen sehr hohen Strom mit einer eher niedrigen Spannung. Viele Standardwechselrichter, die dafür entwickelt wurden, um PV-Anlagen in das elektrische Netz einzubinden, sind für diese Eingangsparameter standardgemäß nicht ausgelegt. Aus diesem Grund ist es notwendig die elektrische Gleichspannung anzuheben und den Strom gleichzeitig zu senken. Diese Umwandlung kann auf einfache Art durch einen Gleichstromsteller umgesetzt werden. Dieser kann so beschaltet werden, dass bei variabler Eingangsspannung eine konstante Spannung am Ausgang anliegt. Dadurch lässt sich die Spannung bezogen auf die Effizienz optimal auf den Eingang des Wechselrichters abstimmen. Durch Realisierung der indirekten Netzeinspeisung lassen sich zusätzlich hohe Kosten für einen maßangefertigten Wechselrichter abwenden. Des Weiteren ist eine Leistungsanpassung an eine bestimmte SOFC Anlage sehr einfach möglich, da lediglich das Eingangsmodul des Gleichstromstellers angepasst werden muss. Bei Bedarf lässt sich der Gleichstromsteller auch durch einen Gleichstromumrichter ersetzen, wodurch eine galvanische Trennung zwischen dem Ausgang des SOFC Systems und dem elektrischen Netz geschaffen wird. Durch eine galvanische Trennung können mehrere Einzelsysteme eine Isolationsmessung durchführen, ohne sich dabei gegenseitig zu beeinflussen. Dadurch kann es zu keiner Überlagerung der Isolationsmessung des Wechselrichters und der Brennstoffzelle kommen. Für den Einsatz eines Gleichstromumrichters entstehen jedoch höhere Verluste, die die Effizienz des Systems senken. Des Weiteren wird durch die Anwendung eines Transformators das Gewicht und Volumen der Schaltung deutlich erhöht. [20, 34]

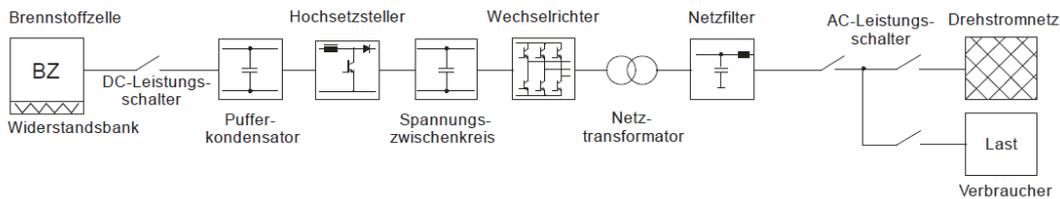


Abbildung 4-2: Indirektes Netzeinspeisekonzept [20]

### 4.2.1 Messaufbau indirekter Netzanschluss

Die Charakterisierung der benötigten Leistungselektronik soll anhand eines indirekten Netzanschlusses erfolgen. Dies ist vor allem auf Grund der fehlenden Verfügbarkeit eines passenden Wechselrichters geschuldet. Dem Wechselrichter wird ein Hochsetzsteller vorgeschaltet, welcher die niedrige Spannung in eine höhere umwandelt. Gleichzeitig wird der hohe Strom der Spannungsquelle auf ein niedrigeres Niveau gesenkt. Dadurch ist der Wechselrichter in der Lage die elektrische Leistung der Brennstoffzelle in das Netz einzuspeisen.

Auf Grund der niedrigen Spannung ist es nicht möglich einen Wechselrichter ohne einen Hochsetzsteller zu betreiben. Die meisten Wechselrichter arbeiten ab einer Spannung von ca. 150 V, wobei bei diesem Lastpunkt noch nicht die volle Leistung aufgenommen werden kann. Ein weiteres Problem ist, dass ein sehr hoher Strom im Volllastpunkt auftritt. Jedoch kann dieses Problem durch eine Überdimensionierung des Wechselrichters behoben werden, was aber aus wirtschaftlichen Betrachtungen wenig Sinn macht. Aus diesem Grund ist die Versuchsanlage mit einem Hochsetzsteller wie in Abbildung 4-4 aufgebaut.

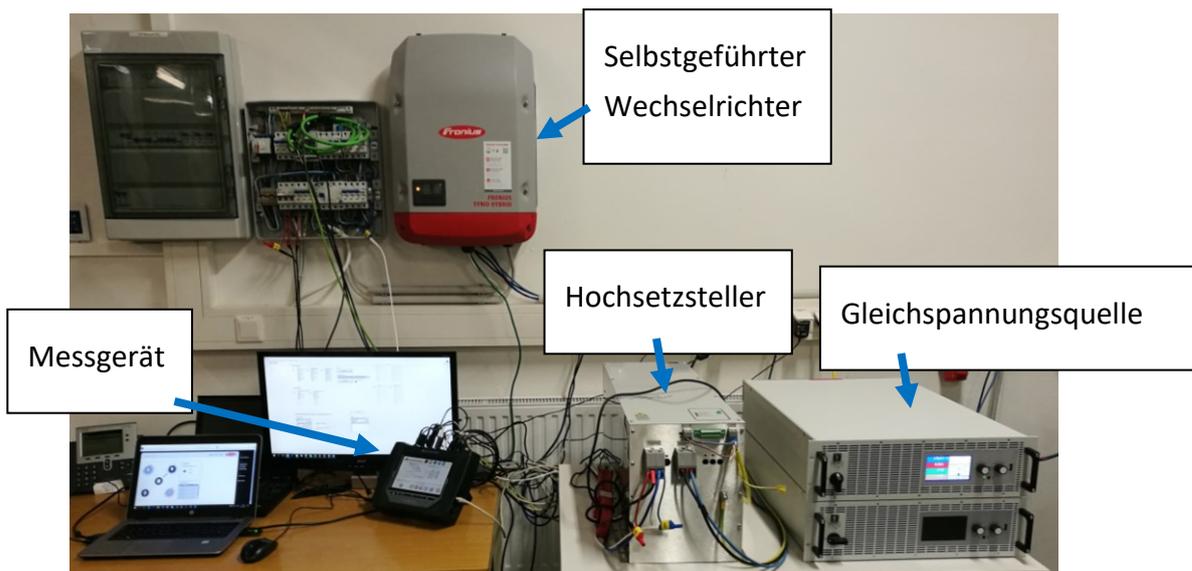


Abbildung 4-3: Versuchsanlage EVT

Um den Messaufbau zu realisieren, wurden folgende Komponenten wie in Abbildung 4-4 miteinander verschaltet.

- Gleichspannungsquelle
- Hochsetzsteller
- Selbstgeführter Wechselrichter
- Messgerät und zugehörige Stromzangen

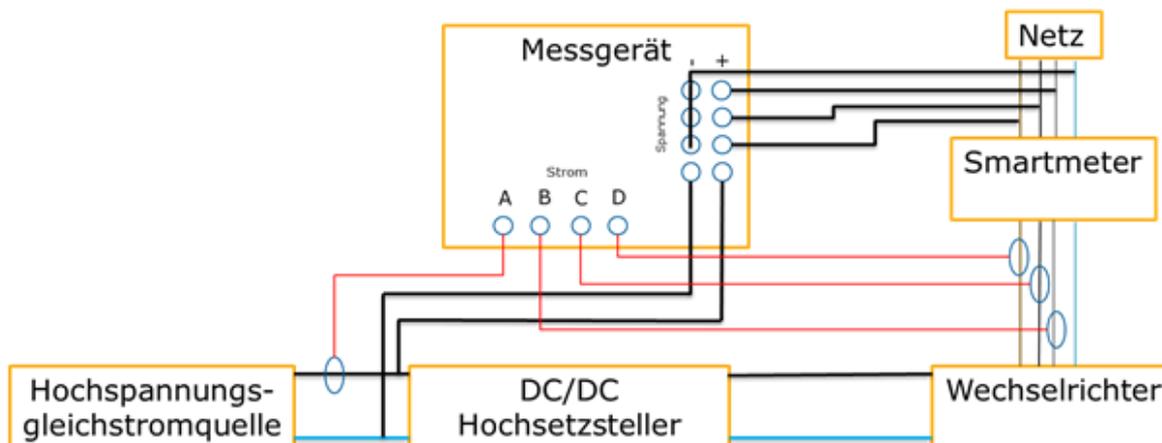


Abbildung 4-4: Messschaltung

### 4.2.1.1 Gleichspannungsquelle

Bei der Gleichspannungsquelle (PSI 9750-40 3U) handelt es sich um ein DC-Hochleistungs-Netzgerät der Firma Elektroautomatik. Diese Gleichspannungsquelle kann eine Leistung von bis zu 10kW ausgeben. Diese Leistung kann unter den Randbedingungen von einem Strom bis zu 40A und einer Spannung von bis zu 750 V ausgegeben werden. Des Weiteren ist es möglich der Quelle eine U/I Kennlinie vorzugeben, auf der sich die Ausgabeleistung bewegt. Jedoch muss diese Kennlinie entweder über den Strom, der Leistung oder einer externen Komponente begrenzt werden. Dadurch kann ein Verhalten einer SOFC Brennstoffzelle zu einem vorgegebenen Betriebspunkt simuliert werden. Des Weiteren ist es möglich der Quelle eine Datenreihe mit einem gewissen Zeitverlauf vorzugeben. Eine zusätzliche Funktionalität erhält das System durch eine externe Steuerung über LabView, die über einen Modbus eingelesen wird. [45]

### 4.2.1.2 Hochsetzsteller

Der Hochsetzsteller der Firma Kemmerich Elektromotoren GmbH & Co. KG ist ein Spannungswandler, der die Eingangsspannung von 120-220 V auf konstante 600 V hebt. Dieser Gleichstromsteller arbeitet hierbei bis zu einer Leistung von 10 kW, ist jedoch modular aufgebaut und dadurch erweiterbar. Durch die Umwandlung der elektrischen

Spannung vom Eingangsbereich bis zum Ausgang kommt es zu geringfügigen Wirkungsgradeinbußen. Der Wirkungsgrad des Hochsetzstellers kann hierbei ein Niveau von mehr als 97 % erreichen. [46]

### 4.2.1.3 Wechselrichter

Der verwendete selbstgeführte Wechselrichter ist ein Fronius Symo Hybrid 5.0-3-S, welcher die zusätzliche Möglichkeit besitzt eine Pufferbatterie anzuschließen. Jedoch wird darauf in diesen Versuchen verzichtet, da es für eine prinzipielle Charakterisierung nicht relevant ist. Der Wechselrichter wandelt die Eingangsgleichspannung in Drehstrom um, der in das elektrische Netz eingespeist wird. Die Eingangsspannung kommt direkt vom Hochsetzsteller weswegen eine für die Effizienz optimale konstante Spannung von 600 VDC zur Verfügung steht. Prinzipiell ist es jedoch möglich den Wechselrichter mit einer Spannung von 150-1000 V zu betreiben. Der Wechselrichter arbeitet erst ab einem höheren Spannungsbereich mit voller Leistung und ist zusätzlich durch den maximalen Eingangsstrom von 16 A begrenzt. Der Wechselrichter Symo Hybrid 5.0-3-S kann eine maximale Leistung von 5 kVA in das elektrische Netz liefern. Wird eine höhere Leistung am Eingang angelegt, regelt der Wechselrichter aus technischen Gründen ab und gibt den Leistungsüberschuss als Abwärme ab. Die momentane Leistung des Wechselrichters kann sowohl über ein integriertes Display, aber auch über die Solarweb-Seite abgerufen werden. Des Weiteren ist es möglich mittels Modbus einige Messwerte über LabView auszulesen. Der Wechselrichter lässt sich über den Modbus auch geringfügig steuern, sodass der Leistungsfaktor und die Einspeiseleistung geregelt werden können. [25, 47]

### 4.2.1.4 Messgerät und Stromzangen

Beim Messgerät handelt es sich um einen Leistungsanalysator (Mavowatt 240) der Firma Gossen Metrawatt. Durch dieses Messgerät ist es sowohl möglich eine Leistungsmessung bzw. eine Spannungsqualitätsprüfung durchzuführen. Das Gerät kann dabei über eine Ethernet-Schnittstelle mit einem Computer verbunden werden, um die Messergebnisse mit einer Auswertungssoftware zu analysieren. So lassen sich alle möglichen Konfigurationen der Leistungsmessung bzw. der Netzqualität definieren. Dafür besitzt das Messgerät je vier Eingänge für eine Spannungsmessung und vier Eingänge für Stromzangenmessungen. Dabei ist es möglich sowohl Gleichspannungen und -ströme als auch Wechselspannung und -ströme zu messen.

Dadurch kann das Messgerät sowohl die Eingangsseite als auch die Ausgangsseite des Messaufbaus analysieren. Dabei sind jedoch unterschiedliche Messzangen für die unterschiedlichen Stromarten zu verwenden. Zur Messung des Wechselstroms am Ausgang

werden sogenannte Rogowskispulen verwendet. Die Gleichstrommesszange am Eingang funktioniert hingegen mittels des Hall-Effekts, wodurch sowohl Gleich- als auch Wechselstrom gemessen werden kann. Um eine genaue Messung des Stromes und der Leistung zu garantieren, müssen die Stromzangen jedoch mit einem bekannten Realwert abgeglichen werden. Dadurch kann eine Abweichung festgestellt werden und die mit Hilfe einer geeigneten Kalibrierung behoben werden. An dieser Stelle ist es möglich die Nullpunktabweichung und Steigungsabweichung zu beheben, um dadurch die Messungsgenauigkeit stark zu erhöhen. [48, 49]

### **4.3 Inbetriebnahme der Leistungselektronik**

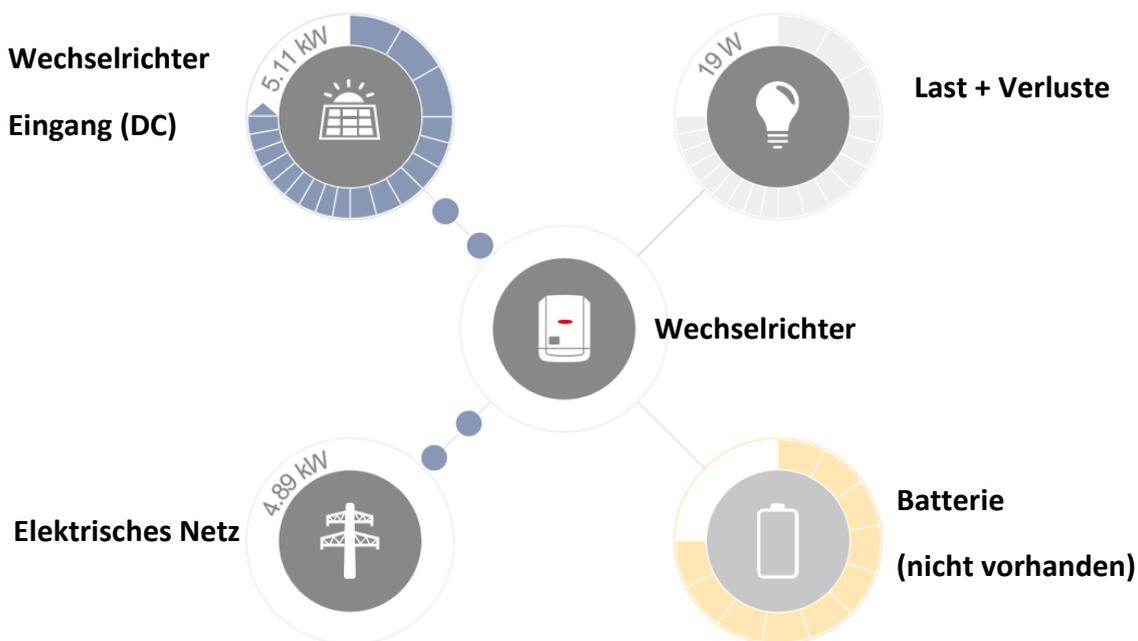
Für die Inbetriebnahme der Leistungselektronik müssen einige Punkte abgearbeitet werden. Am Anfang müssen die Geräte entsprechend Abbildung 4-4 miteinander verdrahtet werden, jedoch bei spannungsfreiem Zustand und sicherer Trennung vom elektrischen Netz. Nach der Verdrahtung werden das Netzgerät und der Lüfter des Hochsetzstellers mit dem elektrischen Netz verbunden. Dadurch wird das Gerät vorgeladen und geht in den betriebsbereiten Zustand über. Anschließend wird der Wechselrichter mit dem elektrischen Netz verbunden und schaltet dadurch in den Standby-Zustand. Nach Abschluss dieser Schritte wird die Hochspannungsquelle in Betrieb genommen. Nach dem Einlesen der SOFC-Kennlinie wird der Ausgang der Hochspannungsquelle freigegeben. Die Quelle liefert dabei eine elektrische Leistung, die über den Hochsetzsteller umgewandelt wird und an den Wechselrichter gelangt. Der Wechselrichter führt durch das Anlegen der Eingangsspannung einige Selbsttests, eine Isolationsprüfung und Vorladung der Kondensatoren durch und geht nach einer geringen Zeitdauer in Betrieb. Dabei liefert der Wechselrichter die elektrische Leistung die von der Quelle zur Verfügung gestellt wird, in das elektrische Netz. Der Wechselrichter begrenzt die Ausgabeleistung des kompletten Messaufbaus aufgrund der maximalen Komponentenausgabeleistung. Zusätzlich ist der Wechselrichter mit einem Modbus verbunden wodurch man die Ausgabeleistung und den Leistungsfaktor steuern kann. Durch eine Steuerung des Ausgangs wird die Eingangsleistung des Systems gedrosselt.

#### **4.3.1 Kommunikation**

Die Kommunikation mit der Leistungselektronik erfolgt ausschließlich über den Wechselrichter. Dieser verfügt über mehrere Schnittstellen die man zur Kommunikation nützt. Die wichtigsten Schnittstellen hierbei sind die zwei unterschiedlichen Modbus-Arten, bei dem es sich um einen RTU und einen TCP Modbus handelt. Diese Modbus-Arten sind mit einem offenen Kommunikationsprotokoll ausgestattet, dass dem Standard der SunSpec-Alliance beruht. Dabei kommuniziert der RTU Modbus mittels einer seriellen

I/O Schnittstelle des Wechselrichters mit den angeschlossenen Geräten wohingegen der TCP Modbus über eine Ethernet Schnittstelle eingebunden ist. [47]

Auf Grund der einfachen Einbindung wird im Versuchsaufbau eine Steuerung über die TCP Schnittstelle durchgeführt. Dabei kommuniziert der Wechselrichter mit der Online-Plattform von Fronius, dem sogenannten SolarWeb, wodurch die erzeugte Leistung und der Verbrauch aufgezeichnet werden. [50]



**Abbildung 4-5: Fronius Energieflussdiagramm**

Jedoch kann man über diese TCP Schnittstelle auch einen lokalen Modbus einrichten, mit dem man mehrere Messwerte auslesen, so wie den Wechselrichter durch entsprechende Voreinstellungen steuern kann. Die Auslese der aktuellen Messwerte über den Modbus ist notwendig, da im SolarWeb diese Werte nur in einem sehr großen Zeitintervall auslesbar sind, was für eine solche Messung nicht aussagekräftig ist. Die Steuerung des Wechselrichters, die im folgenden Kapitel 4.3.2 beschrieben ist, wird dafür verwendet, um die Steuerung der Wirk- und Blindleistung der Last zu realisieren. Zum Messwertauslese bzw. zur Steuerung des Wechselrichters muss eine gewisse Voreinstellung vorgenommen werden. Hierbei verbindet man sich mit einer Ethernet Schnittstelle mit dem Wechselrichter und greift über dessen IP-Adresse auf diese Einstellungen zu. Dort muss die Datenauslese über TCP aktiviert werden, um so ein Auslesen der aktuellen Leistung, des Stromes und der Spannung jederzeit über die vorgeschriebenen Register zu ermöglichen. Um die passenden Register aus dem Wechselrichter auszulesen, muss zuerst eine Verbindung zu diesem aufgebaut werden. Hierbei muss der TCP Modbus mit der passenden IP-Adresse und dem

dazugehörigen Gerät kommunizieren. Erst wenn eine problemlose Kommunikation zwischen dem Wechselrichter und dem Computer vorhanden ist, kann man über die von Fronius vorgegebenen Register, Messwerte auslesen. Wichtig ist dabei, dass die ausgegebenen Werte einem bestimmten Register zugeordnet sind. Die unterschiedlichen Register geben dabei auch unterschiedliche Dateiformate aus, was jedoch im Registerverzeichnis definiert ist. So ist es möglich das Hexadezimalzahlen aber auch Dezimalzahlen ausgegeben werden und diese zusätzlich mit einem Skalierungsfaktor behaftet sind. Das bedeutet, dass bei einer Ausgabe eines Wertes von 100 % ein Wert von 10000 ausgegeben wird, wodurch der Skalierungsfaktor -2 beträgt. Des Weiteren ist es möglich die ausgegebenen Werte in einem Logfile zu speichern. [47, 50]

### **4.3.2 Steuerung**

Eine Steuerung des Versuchsaufbaus ist prinzipiell über zwei unterschiedliche Geräte möglich. Hierbei unterscheidet man zwischen einer Steuerung über die Gleichspannungsquelle, die die Eingangsparameter reguliert bzw. durch den Wechselrichter, der die Ausgangsparameter beschränkt. Bei den durchgeführten Versuchen soll sowohl eine Steuerung der Eingangs wie auch der Ausgangsparameter erfolgen. Die Eingangsparameter sollen vor allem bei statischen Versuchen reguliert werden und die Ausgangsparameter bei den dynamischen Versuchen. Die Eingangsparameter lassen sich sehr einfach über das Eingabeprofil der Quelle verändern. Hierbei können sowohl Spannung, Strom und Leistung reguliert werden. Jedoch muss auf Grund der Steuerbarkeit immer ein begrenzender Faktor der Eingangsparameter gelten. Hauptsächlich wird in den nachstehenden Versuchen der Strom bzw. die Leistung begrenzt. Die Spannung ergibt sich hierbei durch eine davor in die Quelle eingelesene U/I Kennlinie. Dadurch ist eine eingangsseitige Steuerung sehr einfach zu realisieren.

Die Steuerung der Ausgangsparameter gestaltet sich diesbezüglich schwieriger, da ein herkömmlicher Wechselrichter kein Bedienpanel besitzt, wodurch einfache Komponenten begrenzt werden können. So muss der Wechselrichter über einen TCP Modbus gesteuert werden. Nach Erstellung der Kommunikation zwischen Wechselrichter und einem LabView Programm über TCP Modbus, müssen hierfür die passenden Register angesteuert werden. Die Information der passenden Register erhält man über den Wechselrichterhersteller. Dem Fronius Wechselrichter kann man sowohl eine Wirkleistung, eine Blindleistung oder einen Leistungsfaktor vorgeben. Durch Vorgabe von zwei dieser Faktoren ergibt sich automatisch der Dritte. Hierbei ist zu beachten, dass auch die Steuerfreigabe über ein Register des Modbus an den Wechselrichter gesendet werden muss. Auf diese Weise lassen sich sowohl einzelne Betriebspunkte, aber auch Lastprofile für den Wechselrichter vorgeben. So können

unter anderem Wirkleistungskennlinien bzw. Leistungsfaktorkennlinien in den Wechselrichter eingelesen werden. Durch eine entsprechende Programmierung wird diese anschließend durchlaufen und erfasst. Infolgedessen lässt sich das Verhalten des gesamten Konzeptes über den Wechselrichter testen. Das dafür benötigte Bedienelement des Wechselrichters ist in LabView realisiert und in Abbildung 4-6 dargestellt. Hierbei müssen neben der passenden IP Adresse auch die richtigen Register angesprochen werden, um den Wechselrichter entsprechend zu steuern. Dabei ist zu beachten, dass die Register nur mit definierten Wertebereich angesteuert werden können. Dadurch ergeben sich Register-Werte, die von den Realwerten abweichen.

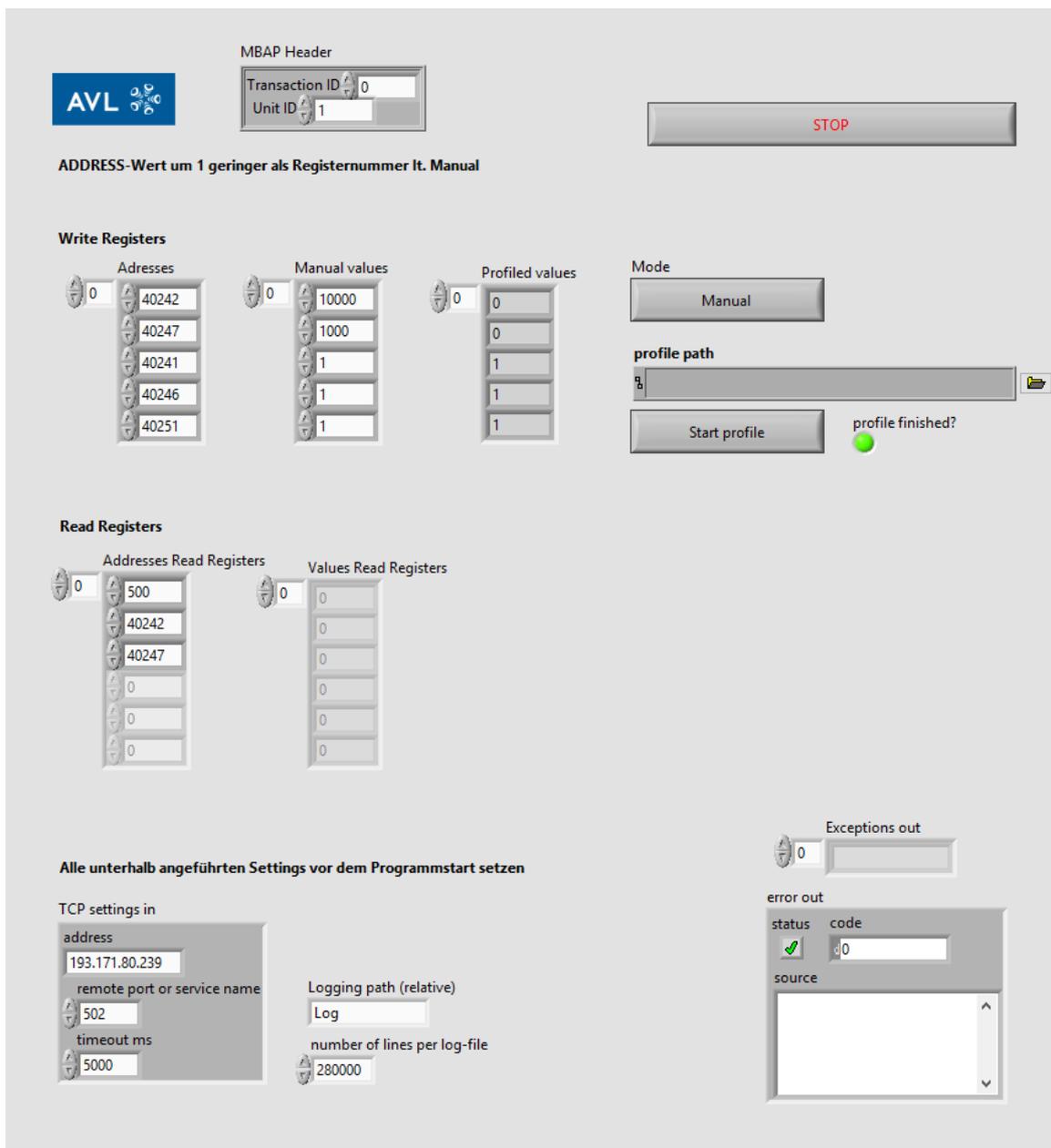


Abbildung 4-6: LabView-Bedienfeld

## 5 CHARAKTERISIERUNG DER LEISTUNGSELEKTRONIK

Die Leistungselektronik soll mit Hilfe einiger Realdaten getestet werden, um daraus eine typische Charakteristik abzuleiten. Dabei sollen möglichst alle Bedingungen simuliert werden, um dadurch auf verschiedene Parameter des Systems zu schließen. Vor allem sind das dynamische Verhalten und der daraus entstehende Wirkungsgrad ausschlaggebend für eine Charakterisierung des Gesamtsystems. Über diese beiden Parameter lässt sich das Einspeisesystem mit vergleichbaren Möglichkeiten beurteilen. Für die Charakterisierung ist es von Vorteil möglichst reale Kennlinien für solche Versuche vorzugeben, da dadurch das Verhalten der Anlage gut abbildbar ist.

### 5.1 Datengrundlage

Die Datengrundlage beruht aus Daten eines SOFC Systems und zweier Lastprofilmessung mehrere Verbraucher die über ein Jahr aufgezeichnet wurden. Daraus wurde eine Strom-Spannungskennlinie gebildet, die das Verhalten des SOFC Systems und deren Betrieb widerspiegelt. Die Lastprofile beruhen auf Haushalte, wodurch diese jeweils speziell für die Anwendung dieser Messung skaliert wurden. Dabei handelt es sich einerseits um eine reine Messung der Wirkleistung zu Minutenwerten und zum anderen um eine genaue Analyse von Einspeisern, bei den Sekundenwerte von Wirk- und Blindleistungen der jeweiligen Phase aufgezeichnet wurden. [51–53]

#### 5.1.1 SOFC Kennlinien

Bei der SOFC Kennlinie handelt sich um eine Interpolation mehrerer Lastpunkte, die den realen Verlauf einer U/I Kennlinie des SOFC Systems darstellt. Dabei wurden die Lastpunkte bei 0 %, 25 %, 50 %, 75 %, 100 % und 125 % angewendet, um einen Strom-Spannungsverlauf wie in Abbildung 5-1 zu erzeugen. Da dieses System mit keiner begrenzten Brennstoffzufuhr agiert, ergibt sich ein von der herkömmlichen Kennlinie abweichender Verlauf. Die Brennstoffzufuhr wird hierbei je nach Lastpunkt nachgeregelt, damit sich ein lineares Verhalten wie in Abbildung 5-1 einstellt. Durch die gesteuerte Brenngaszufuhr wird die Zelle kaum in den Aktivierungs- und Diffusionsbereich betrieben. [53, 54]

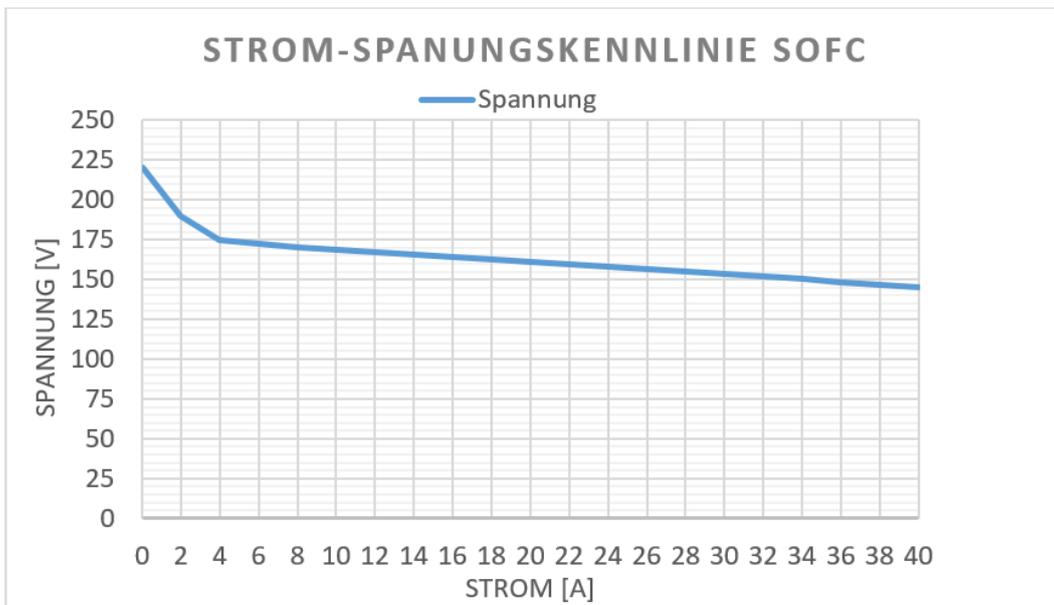


Abbildung 5-1: Diagramm SOFC U/I-Kennlinie [53]

Durch diese Strom-Spannungskennlinie ergibt sich ein dementsprechend dazugehöriger Leistungsverlauf, der durch einen steigenden Strom ansteigt. Diese Leistungskennlinie weicht kaum vom Verlauf aus der Literatur ab und ist in Abbildung 5-2 dargestellt.

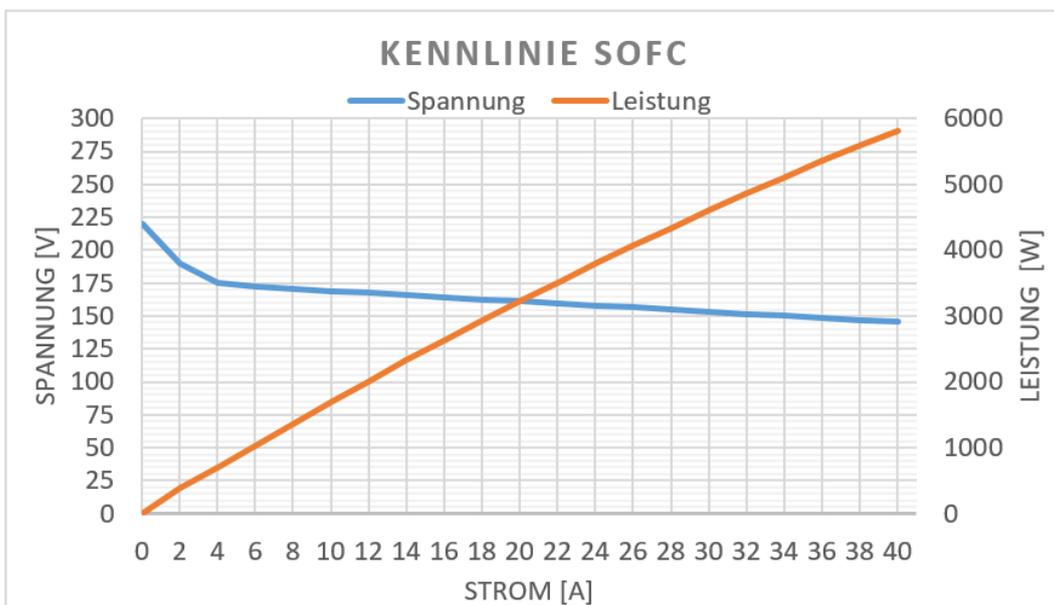


Abbildung 5-2: Diagramm SOFC Kennlinie [53]

Die Kennlinien aus der Literatur werden durch die Massenströme (Brennstoff und Luft) begrenzt und besitzen einen Leistungsverlauf, wie in Abbildung 5-3 dargestellt. Bei dieser Kennlinie sind sowohl die planare bzw. auch die turbuläre Bauweise aufgetragen, wodurch sich leicht die Vorteile einer planaren Baustruktur (HPD – High power density)

herauskristallisiert. Diese lässt sich viel kompakter aufbauen, wodurch der Innenwiderstand der planaren Zelle geringer gegenüber der turbularen Bauweise ist.

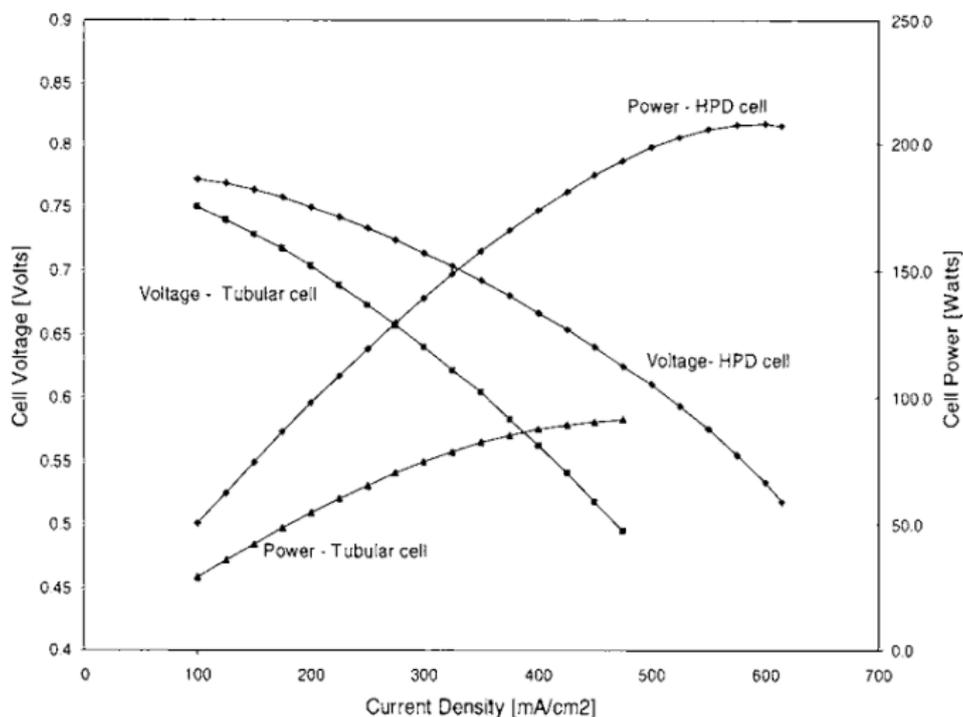


Abbildung 5-3: SOFC Kennlinie mit begrenzten Brennstoff (Planare und turbuläre Bauweise) [8]

### 5.1.2 Lastprofile

Aus den zwei unterschiedlichen Datenquellen wurde jeweils ein für die Charakterisierung notwendiges Lastprofil gebildet. Ein Lastprofil wurde aus repräsentativen elektrischen Lastprofilen von Einfamilienhäusern herangezogen, wodurch eine reale Abbildung des täglichen Verbrauchs von elektrischer Energie gebildet wird. Um auf das definierte Leistungsniveau der Brennstoffzelle zu kommen, wurden fünf unterschiedliche Haushalte miteinander summiert. Dabei ist es ausschlaggebend nicht alle vorhandenen Haushalte zu mitteln und hoch zu skalieren, da diese Profile einen üblichen Lastverlauf eines elektrischen Netzes entspricht. Durch die Summe von fünf einzelnen Lastprofilen, kann ein Lastverlauf eines Mehrfamilienhauses erstellt werden, der durch die Brennstoffzelle abgedeckt werden soll. Dadurch ergibt sich ein wöchentlicher Leistungsbedarf wie in Abbildung 5-4 dargestellt. Bei dieser Abbildung ist sowohl der reale Verlauf in blau, als auch ein nach oben begrenzter Verlauf in orange abgebildet. Die Begrenzung des Lastverlaufs nach oben ist notwendig, da das SOFC-System einen 5kW Wechselrichter verwendet, der keine höhere Leistung liefern kann. Zusätzlich kann auch das SOFC-System nicht jede einzelne Leistungsspitze kompensieren, wodurch eine Kompensation dieser Spitzen vom elektrischen Netz übernommen werden muss. [51]

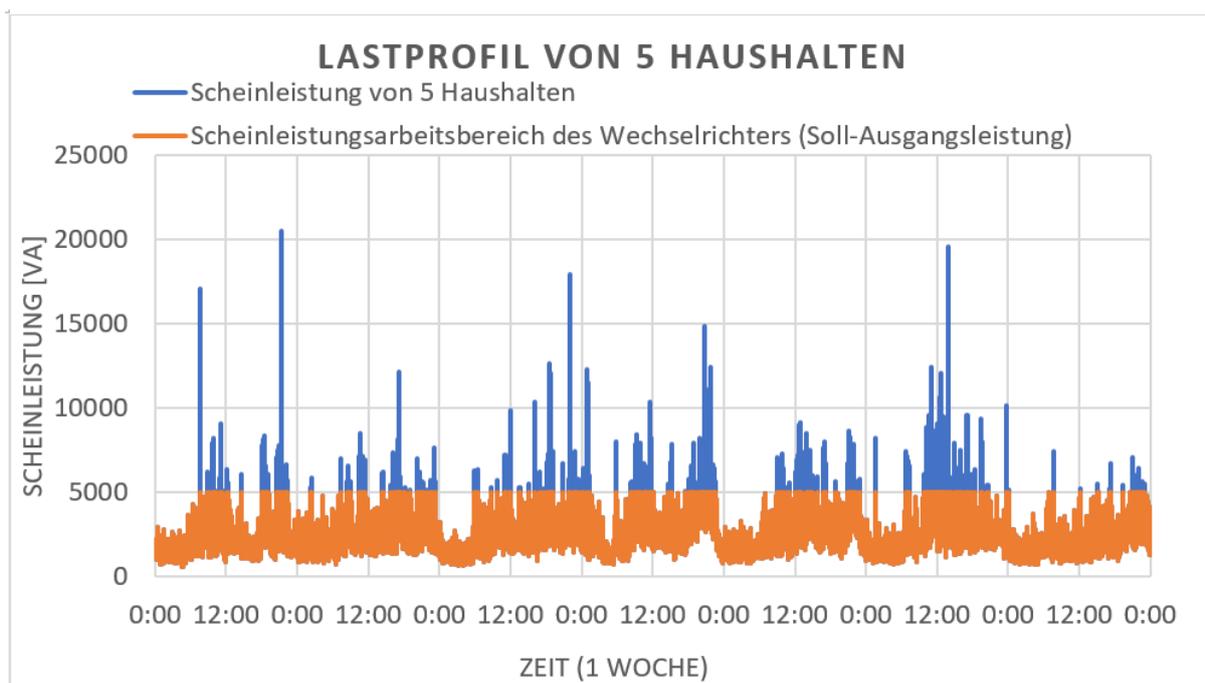


Abbildung 5-4: Elektrisches Lastprofil über eine Woche/August [51]

Für die Untersuchung des Wechselrichters wurde dieser Verlauf auf drei Tage gekürzt, was eine ausreichende Aussagekraft über das System ermöglicht. Des Weiteren wird der Wechselrichter bei diesem Lastprofil sekundlich mit neuen Sollwerten beaufschlagt. Dabei wird jeweils ein Wirkleistungswert und ein Leistungsfaktor für den Wechselrichter vorgegeben. Dadurch entsteht ein dynamisches Lastprofil wie in Abbildung 5-5 dargestellt, dass für die Tests eines dynamischen Lastwechsels verwendet wird.

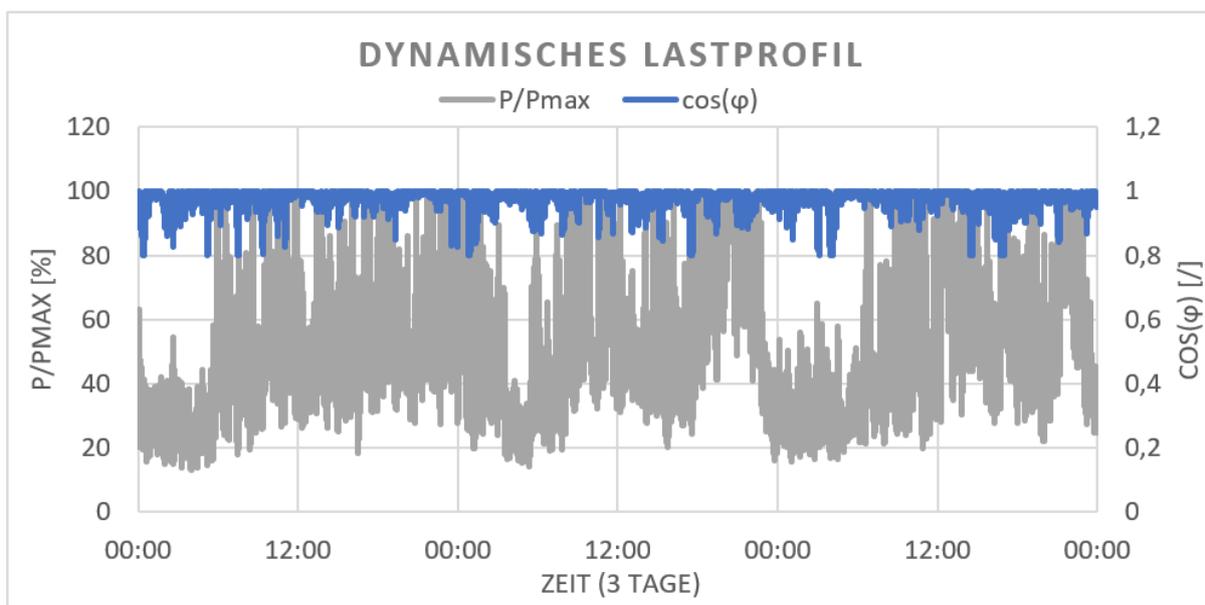
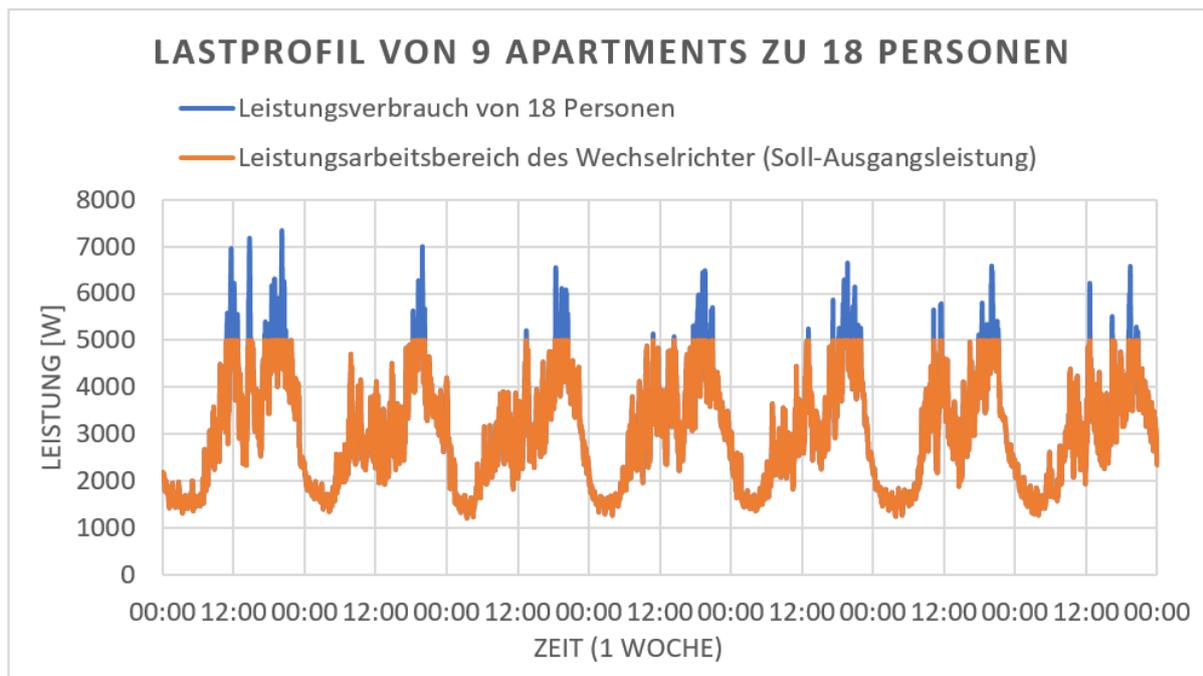


Abbildung 5-5: Dynamisches Lastprofil über 3 Tage/August [51]

Die zweite Datenquelle stammt von einer Lastuntersuchung wobei 40 Apartments mit insgesamt 81 Personen in einem Zeitintervall von einer Minute gemessen wurden. Dadurch ergibt sich ein stark dem Netz angepasster Leistungsverlauf. Durch eine geeignete Skalierung auf 9 Apartments zu 18 Personen erhält man einen Leistungsverlauf wie in Abbildung 5-6 dargestellt. Dieser Verlauf wurde ebenfalls auf Grund des Wechselrichters und des SOFC-Systems auf 5 kW begrenzt. Bei diesem Leistungsverlauf handelt es sich jedoch um eine reine Wirkleistungsmessung bei einem konstanten Leistungsfaktor,  $\cos(\varphi) = 1$ .



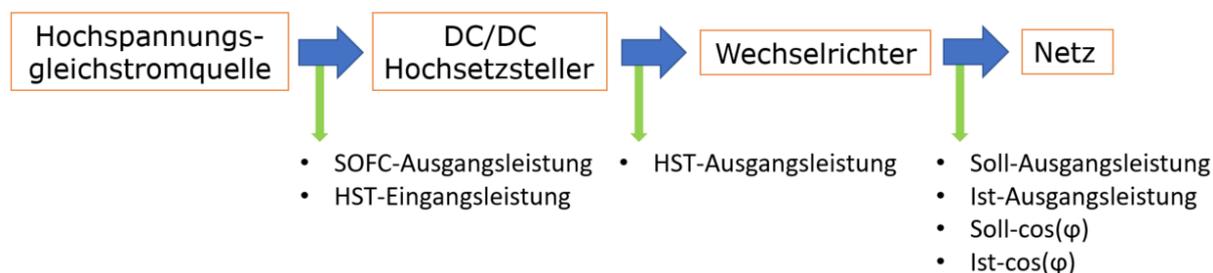
**Abbildung 5-6: Lastprofil über eine Woche/September [52]**

Um die Charakteristik besser beschreiben zu können, wird dieses Profil für einen weiteren Test des dynamischen Lastwechsels verwendet. Dadurch kann man auch einfach den Einfluss des Leistungsfaktors auf den Wechselrichter erkennen. Zusätzlich kann sich der Wechselrichter auf eine längere konstante Leistung einstellen, was zu genaueren Messergebnissen führt.

## 5.2 Charakteristik

Die Charakterisierung der elektrischen Netzeinbindung eines SOFC Systems erfolgt über unterschiedliche Versuche, die hierfür ausgewertet werden. Diese Versuche werden anhand des Versuchsaufbaus wie in Abbildung 4-4 durchgeführt. Dabei gibt die Hochspannungsgleichstromquelle die Kennlinie der realen Brennstoffzelle vor, nach der das ganze Einspeisesystem geregelt werden soll. So ist ein möglichst reales Verhalten der Quelle zu simulieren, um die Charakterisierung des gesamten Systems anhand einiger Tests zu

bestimmen. In diesem Versuchsaufbau ist es sowohl möglich das gesamte System durch die Quelle als auch durch den Wechselrichter zu steuern. Durch eine Steuerung der Quelle kann eine Regelung der Brennstoffgaszufuhr simuliert werden, wodurch eine Variation der Eingangsparameter ermöglicht wird. Bei einer Regelung durch den Wechselrichter wird die Ausgangsleistung gesteuert, was im Realfall ein Eingriff durch den Netzbetreiber ist. Der Netzbetreiber kann dadurch eine Leistungsreduzierung vorgeben, auf die das Gesamtsystem reagieren muss. Auf Grund dieser dynamischen Änderungen kann man gut die Nachführbarkeit des elektrischen Teils des Systems ermitteln, wodurch eine Eignung auf eine starke Regelbarkeit abgeleitet wird, was besonders für Regelenenergiebereitstellung interessant ist. Durch diese Charakteristik lässt sich auf die Laständerungsgeschwindigkeit und die Schnellstartfähigkeit der Anlage schließen. Über all diesen Versuchen steht jedoch die Ermittlung des Wirkungsgrades der einzelnen Komponenten, als auch des Gesamtsystems. Die Ermittlung der Effizienz soll sowohl statisch wie auch dynamisch durch die Programmierung einer Lastkennlinie am Wechselrichter ermittelt werden. Hierbei werden die Wirkungsgrade zu charakteristischen Punkten der Last vermessen. Dabei werden die Messungen an bestimmten Messstellen der Schaltung ermittelt (Abbildung 5-7).



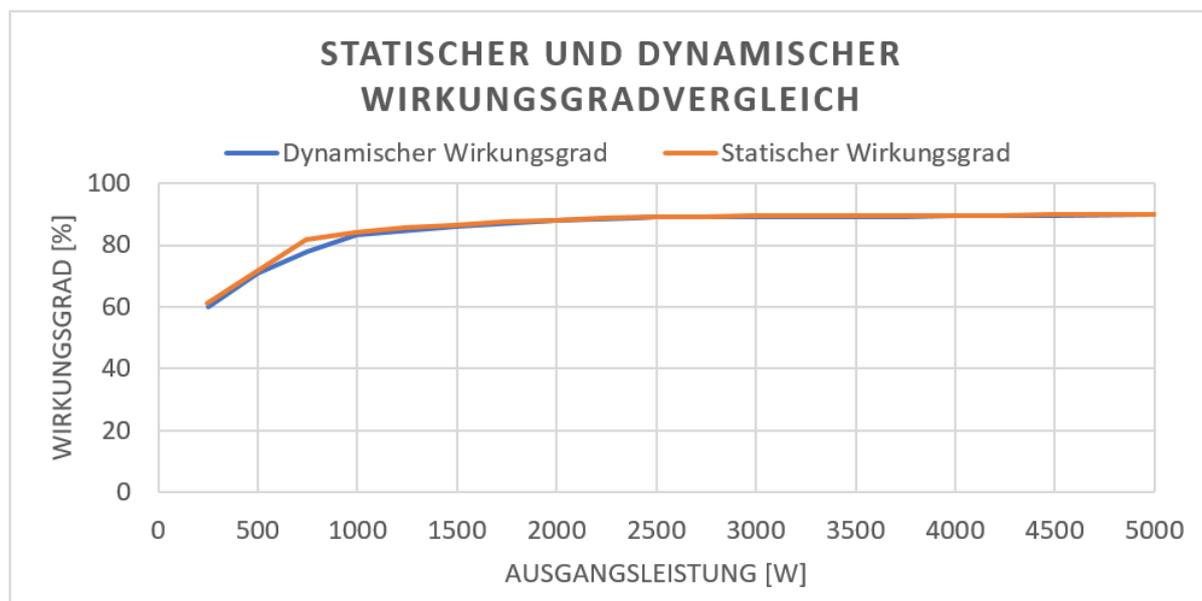
**Abbildung 5-7: Blockschaftbild der charakteristischen Messpunkte**

Durch diese starken Schwankungen der Leistungen entstehen auch eine stark abweichende Sinusform des Stromes. Infolgedessen wird auf Grund dieser Kennlinien ebenso die Spannungs- bzw. Stromqualität der Anlage ermittelt und überprüft.

### 5.2.1 Wirkungsgrad

Das SOFC System wird je nach Anforderung vom Netz oder vom Betreiber bei einem bestimmten Lastpunkt betrieben. Dabei ergeben sich je nach gewähltem Betriebspunkt unterschiedliche Wirkungsgrade, die sich auf das Gesamtsystem auswirken. Dabei wird der Wirkungsgrad durch die Verluste im Hochsetzsteller und dem Wechselrichter definiert, die sich je nach Lastpunkt verändern. Betrachtet man die Verluste auf die einzelnen Komponenten bezogen, entstehen je nach Eingangsspannung und Eingangsleistung unterschiedlich hohe Verluste. Des Weiteren ist es entscheidend, ob man eine statische oder

dynamische Wirkungsgradermittlung anwendet, da das System kleinere Abweichungen auf Grund der Lastwechselgeschwindigkeit hervorrufen kann. Dabei ist wesentlich, dass bei einer statischen Messung, die Eingabeparameter eine gewisse Zeit im konstanten Betriebszustand verweilen. Bei einer dynamischen Messung wird der Wert in einem viel kürzeren Zeitintervall gemessen, wodurch sich minimale Abweichungen zwischen den beiden Wirkungsgraden ergeben. Für die reale Anwendung ist jedoch der dynamische Wirkungsgrad der aussagekräftigere Referenzwert (Abbildung 5-8).



**Abbildung 5-8: Statischer und dynamischer Wirkungsgrad des Gesamtsystems ohne HST-Lüfter**

In der Abbildung 5-8 ist deutlich zu erkennen, dass der Wirkungsgrad von der Höhe der Eingangs-, bzw. Ausgangsleistung abhängig ist. Diese Abhängigkeit ist noch deutlicher in der dynamischen Wirkungsgradermittlung (Abbildung 5-9) veranschaulicht. Hierbei ist zu erkennen, dass sich je nach Lastpunkt der Gesamtwirkungsgrad der Anlage mitverändert. Je höher der Leistungswert des Lastpunkts, umso höher ist der Gesamtwirkungsgrad des Systems. Der höhere Wirkungsgrad ergibt sich aus dem Anstieg der Einzelwirkungsgrade des Hochsetzstellers und des Wechselrichters. Da der Hochsetzsteller auf 10 kW und der Wechselrichter auf 5 kW ausgelegt sind, nehmen die Verluste mit zunehmender Leistung relativ zu ihrer Nennleistung ab (Abbildung 5-9).

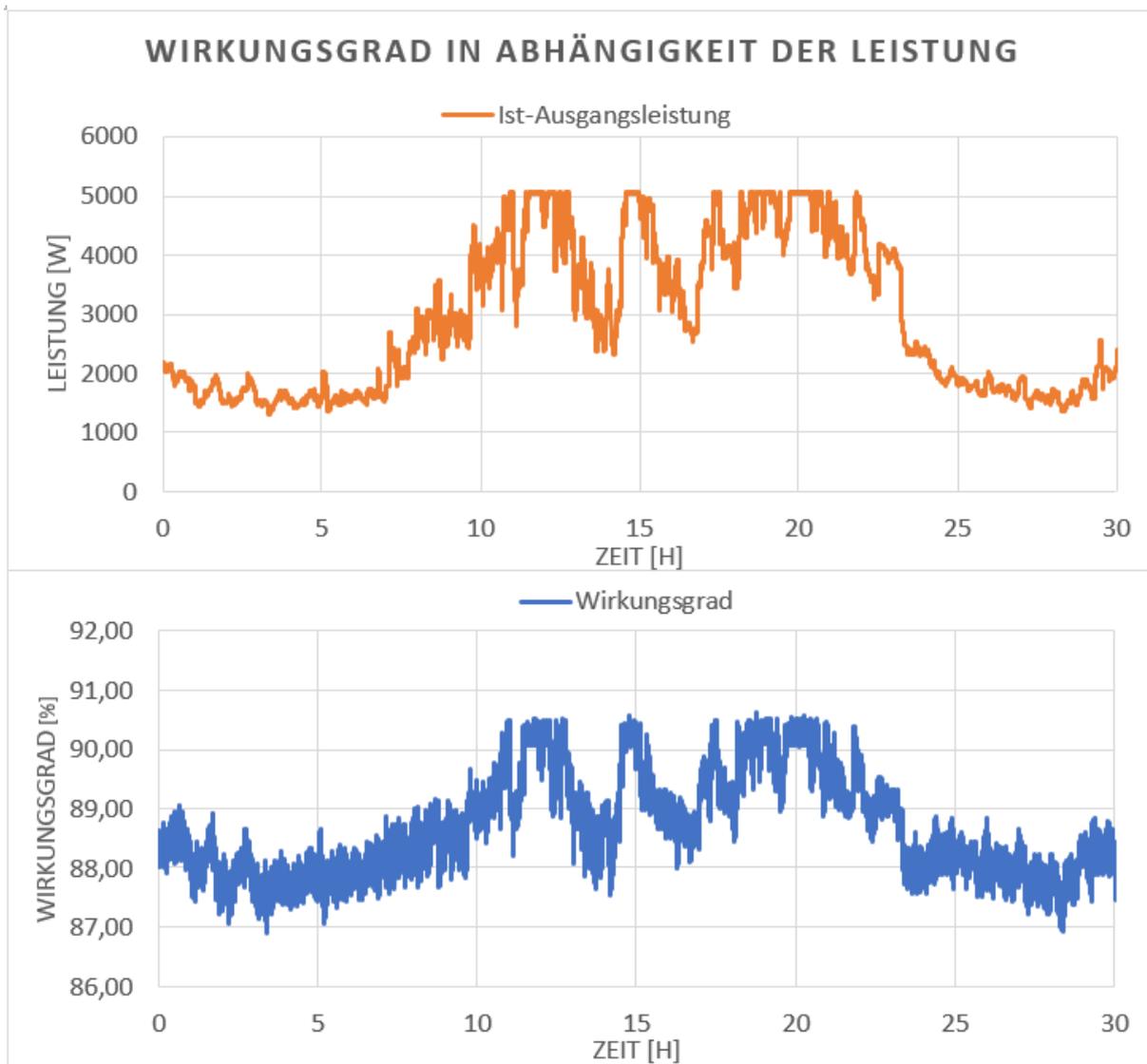


Abbildung 5-9: Wirkungsgradabhängigkeit der Leistung des gesamten Einspeisesystems

Um einen besseren Zusammenhang der Ausgangsleistung und des dazugehörigen Wirkungsgrades zu erhalten, werden diese einzeln aufgeschlüsselt. Dadurch ergeben sich folgende einzelnen Wirkungsgrade wie in Tabelle 5-1 dargestellt. Bei dieser Effizienzbestimmung wurde jedoch der Lüfter des Hochsetzstellers vernachlässigt. Dieser wird beim Betrieb des Hochsetzstellers eingeschaltet, um die Arbeitstemperatur im optimalen Betriebsfenster zu halten. Der Lüfter des Hochsetzstellers benötigt bei vollem Betrieb eine Leistung von 70 W, wodurch sich der Gesamtwirkungsgrad der Anlage im Vollastbetrieb um 1,5 % verringert. Diese Leistung wird jedoch nicht in die weiteren Betrachtungen miteinbezogen, da ein Vollastbetrieb des Lüfters nicht unbedingt notwendig ist. Der Lüfter kann im Einsatzfall mittels einer Drehzahlregelung ausgestattet werden, wodurch Leistung eingespart werden kann.

*Tabelle 5-1: Einzel und Gesamtwirkungsgrade der Spannungsumwandlung*

Leistung [W]			Strom [A]			Spannung [V]		Wirkungsgrad [%]		
HST- Eingang	HST- Ausgang	WR- Ausgang	HST- Eingang	HST- Ausgang	WR- Ausgang	HST- Eingang	HST	WR	Gesamt	Gesamt mit HST-Lüfter
5590	5266	5036	38,2	8,8	7,3	146,5	94,2	95,6	90,1	88,8
4990	4686	4486	33,2	7,8	6,5	150,5	93,9	95,7	89,9	88,5
4460	4169	3987	29,0	6,9	5,8	153,8	93,5	95,6	89,4	87,8
3900	3648	3488	24,8	6,1	5,1	157,1	93,5	95,6	89,4	87,6
3340	3124	2990	20,8	5,2	4,3	160,3	93,5	95,7	89,5	87,4
2790	2608	2491	17,1	4,3	3,6	163,3	93,5	95,5	89,3	86,8
2260	2091	1992	13,6	3,5	2,9	166,0	92,5	95,3	88,1	85,0
1725	1569	1492	10,2	2,6	2,2	168,7	90,9	95,1	86,5	82,4
1180	1054	994	6,9	1,8	1,4	171,4	89,3	94,3	84,2	78,3
650	489	450	3,7	0,8	0,7	176,9	75,2	92,5	69,5	58,5

Wie in der Tabelle 5-1 zu erkennen ist, verursachen sowohl der Hochsetzsteller als auch der Wechselrichter signifikante Verluste. Besonders in Teillastbereichen sinkt die Effizienz des SOFC Systems stark ab. Diese Verluste können jedoch durch eine weitere Anpassung der Auslegung noch geringfügig reduziert werden. Durch eine optimale Anpassung der Eingangsspannung zur Ausgangsspannung ist eine Wirkungsgradsteigerung beim Hochsetzsteller möglich. Der Eingangsspannungsbereich liegt derzeit bei einer Spannung von 0 bis 400 V, wodurch die Betriebsspannung vom höchsten Punkt dieses Bereiches stark abweicht. Senkt man diesen Bereich weiter und definiert die Spannung nahe dem höchsten Eingangsspannungspunkt, ist es möglich den Wirkungsgrad geringfügig zu steigern. Des Weiteren wäre es möglich den Wirkungsgrad des Hochsetzstellers zu erhöhen, in dem man die Differenz zwischen der Eingangsspannung und der Ausgangsspannung weiter verringert. Da die Ausgangsspannung der Brennstoffzelle vorgegeben ist, wäre es möglich die Ausgangsspannung des Hochsetzstellers weiter zu senken, was jedoch einen Einfluss auf den Wirkungsgrad des Wechselrichters mit sich bringt. Die Wirkungsgradsteigerung des Hochsetzstellers durch eine kleinere Differenz zwischen Eingangsspannung und Ausgangsspannung ist in Tabelle 5-2 dargestellt. In diesem Fall wurde die Eingangsspannung erhöht, da die Ausgangsspannung des Hochsetzstellers in dieser Konfiguration eine Fixspannung von 600 VDC ist.

**Tabelle 5-2: Wirkungsgradabhängigkeit durch Variation der Eingangsspannung bei Pmax 5kW**

<b>HST-Eingangsspannung [V]</b>	<b>146,8</b>	<b>220</b>	<b>300</b>	<b>400</b>
HST-Eingangsstrom [A]	38,2	25,1	18,2	13,5
HST-Ausgangsspannung [V]	600	600	600	600
HST-Ausgangsstrom [A]	8,8	8,8	8,8	8,8
WR-Ausgangsspannung L1 [V]	230	230	230	230
WR-Ausgangsstrom I1 [A]	7,3	7,3	7,3	7,3
Gesamtwirkungsgrad [%]	90,1	91,6	92,5	93,9
HST-Wirkungsgrad [%]	94,2	95,9	96,9	98,3
WR-Wirkungsgrad [%]	95,6	95,5	95,5	95,5

Durch eine Steigerung der Eingangsspannung ergibt sich ein höherer Wirkungsgrad des Hochsetzstellers, wodurch der Herstellerwirkungsgrad von mehr als 97 % erreicht wird. Daraus kann man ableiten, dass eine geeignete Anpassung der Spannungen eine Steigerung des Hochsetzstellerwirkungsgrads zur Folge hat, was in Tabelle 5-3 dargestellt ist.

**Tabelle 5-3: Hochsetzstellerwirkungsgradverlauf**

Leistung [W]	Wirkungsgrad [%]			
	HST 146V	HST 220V	HST 300V	HST 400V
Soll-Ausgang				
5000	94,6	95,9	96,9	98,3
4500	94,6	95,9	97,0	97,6
4000	94,2	95,4	97,0	97,2
3500	93,4	95,3	97,0	97,1
3000	93,5	95,0	96,6	97,0
2500	93,6	95,0	95,3	96,7
2000	93,0	94,6	94,6	95,9
1500	92,4	93,5	94,4	94,6
1000	89,5	89,5	90,7	92,2
500	83,8	84,6	84,6	88,9

Durch den Einsatz eines Hochsetzstellers verringert sich jedoch der Wirkungsgrad des Wechselrichters geringfügig, was aufgrund der vielen Schaltvorgänge hervorgerufen wird. Um diese Auswirkungen zu beurteilen, wurde der Wechselrichter zu Vergleichszwecken mit der Gleichstromquelle bei verschiedenen Spannungen, als auch mit dem Hochsetzsteller vermessen. Dadurch ergibt sich eine Wirkungsgradverminderung wie in Tabelle 5-4 dargestellt, die durch eine geeignete elektrische Filterung verbessert werden kann.

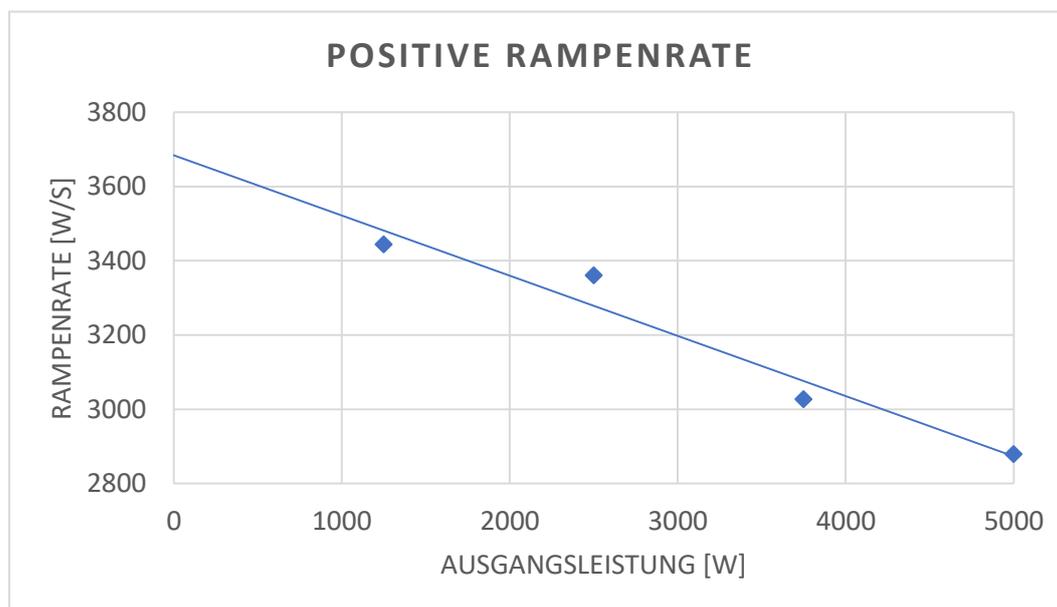
**Tabelle 5-4: Wechselrichterwirkungsgrad**

Leistung [W]	Wirkungsgrad [%]				
	WR laut Datenblatt (595V)	WR (595V)	WR (500V)	WR (400V)	WR mit HST (600V)
Soll-Ausgang					
5000	97,9	98,0	96,8	96,5	95,6
4500	97,9	98,0	96,9	96,5	95,7
4000	98,0	97,9	96,8	96,4	95,6
3500	98,0	97,9	96,7	96,4	95,6
3000	98,0	97,8	96,9	96,4	95,7
2500	98,0	97,7	96,7	96,4	95,5
2000	97,9	97,5	96,2	95,7	95,3
1500	97,9	97,1	95,9	95,0	95,1
1000	97,6	96,2	94,6	93,1	94,3
500	96,2	93,0	92,3	90,6	92,5

## 5.2.2 Schnellstart

Beim Schnellstart muss man zwischen den zwei unterschiedlichen Betriebsstarts „Kaltstart“ bei ausgeschaltetem Wechselrichter und „Warmstart“ unterscheiden. Im Warmstart befindet sich der Wechselrichter im Gegensatz zum „Kaltstart“ bereits am elektrischen Netz, ist mit diesem synchronisiert und hat den Selbsttest (Isolationsprüfung) abgeschlossen. Dadurch ergeben sich unterschiedliche Startzeiten der beiden Fälle, die durch gewisse Normen vorgegeben sind.

Beim Warmstart benötigt der Wechselrichter einen Leerlaufstrom von ca. 0,7 A bei der Brennstoffzellenleerlaufspannung. In diesem Zustand ist der Wechselrichter schneller einsatzbereit und kann je nach Lastpunkt in einem sehr schnellen Zeitraum Lastsprünge machen. Dieser Zeitraum der für die Lastsprünge entscheidend ist, ergibt sich aus den sogenannten Rampenraten. Diese Rampenraten sind aber in positive (Leistungszunahme) und negative (Leistungsabnahme) zu unterscheiden. Die positiven Rampenraten wurden von der Leerlaufleistung auf verschiedene Lastpunkte ermittelt, wodurch sich ein gemitteltes Verhalten wie in Abbildung 5-10 ergibt. Hierbei ist zu erkennen, dass ein Lastwechsel zwischen einzelnen Lastpunkten schneller durchgeführt werden kann.



**Abbildung 5-10: Positive Rampenrate des Wechselrichters bei Warmstart**

Das Einspeisesystem der SOFC Anlage verhält sich jedoch bei der Leistungszunahme und der Leistungsabnahme unterschiedlich. Die negative Rampenrate wurde ermittelt, in dem man die Anlage auf einer bestimmten Leistung betrieben hat und diese auf die Leerlaufleistung gesenkt hat. Dadurch ergibt sich ein Verhalten wie in Abbildung 5-11 dargestellt. Bei einer

kleineren Laständerung die nicht auf die Leerlaufleistung zurücksinkt, ergibt sich dadurch eine schnellere Rampenrate.

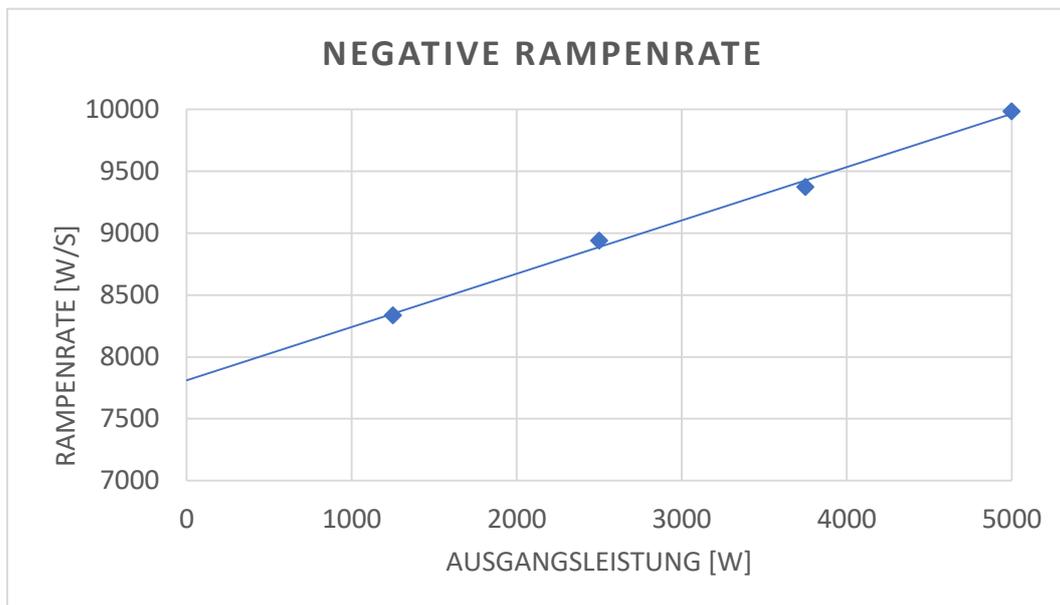


Abbildung 5-11: Negative Rampenrate des Wechselrichters

Durch die unterschiedlichen Rampenraten ergibt sich so ein bestimmter Zeitraum zur Lastpunktveränderung. Diese Änderungszeit hat jedoch noch eine weitere Komponente, die sogenannte Reaktionszeit. Der Wechselrichter benötigt eine gewisse Zeit bis er die Eingabe der Steuerung empfängt und verarbeiten kann. Diese Reaktionszeit unterscheidet sich bei den unterschiedlichen Rampenraten jedoch nicht voneinander und liegt bei ca. 2-3 Sekunden. Dadurch ergibt sich eine gesamte Änderungszeit von bis zu 5 Sekunden. Bei einer Lastpunktänderung vom Leerlaufpunkt zum Volllastpunkt ergibt sich dadurch ein Verhalten wie in Abbildung 5-12, dass anhand des Phasenstromes I3 dargestellt ist.

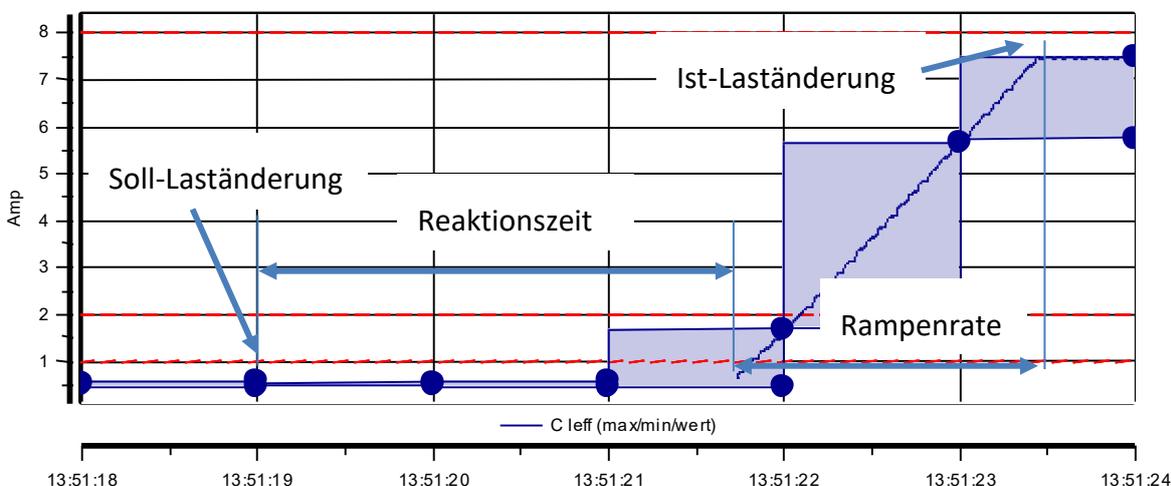
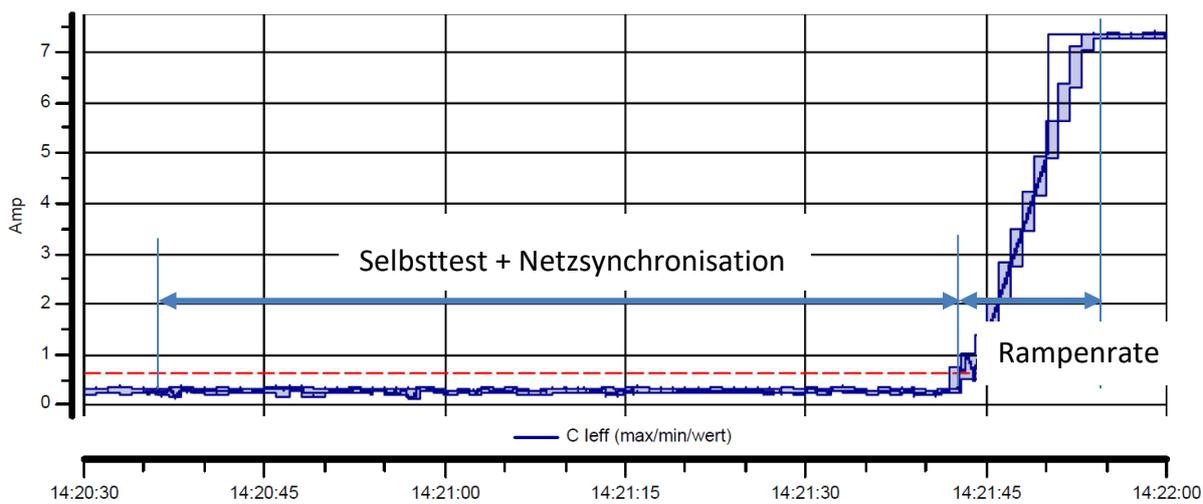


Abbildung 5-12: Warmstart der SOFC Anlage

Der Kaltstart des Systems benötigt eine längere Zeit bis die Anlage einsatzfähig ist. Beim Kaltstart führt der Wechselrichter einige Selbsttests wie zum Beispiel eine Isolationsprüfung durch und muss sich anschließend mit dem elektrischen Netz synchronisieren. Des Weiteren werden für den Wechselrichter und den Hochsetzsteller Kondensatoren vorgeladen, die einen Strom von 0,3 A bei Brennstoffzellenleerlaufspannung aufnehmen. Infolgedessen ist die Reaktionszeit des Wechselrichters bei einem solchen Betrieb zu vernachlässigen, da der Wechselrichter das Lastpunktsignal bereits bei der Netzsynchronisation zugeführt bekommt. Dadurch ergibt sich ein Startverhalten wie in Abbildung 5-13 abgebildet.



**Abbildung 5-13: Kaltstart der SOFC Anlage**

Durch diesen Startvorgang ist zu erkennen, dass vor allem die Gesamtzeit für den Lastwechsel viel länger ist als bei einem Warmstart. Diese Zeit erhöht sich jedoch nicht nur auf Grund des Selbsttests und der Netzsynchronisation, sondern auch durch die geänderte positive Rampenrate. Die Rampenrate wird durch diesen Startvorgang gegenüber einem Warmstart vermindert, wobei die negative Rampenrate hingegen identisch bleibt. Dadurch ist zu erkennen, dass das Gesamtsystem nicht ab dem ersten Moment so regelbar ist, wie im Leerlaufbetrieb (Abbildung 5-14). Diese Verminderung der Rampenrate ist vom Netzbetreiber vorgeschrieben und kann daher nicht abgeändert werden. Des Weiteren ist im Gegensatz zum Warmstart die Zeit für den Selbsttest und die Netzsynchronisierung sehr variabel und dadurch nur ungefähr vorherzusagen. Die Zeiten für den Selbsttest und der Netzsynchronisation variieren dabei zwischen 50 und 80 Sekunden und sind von der Leistung unabhängig.

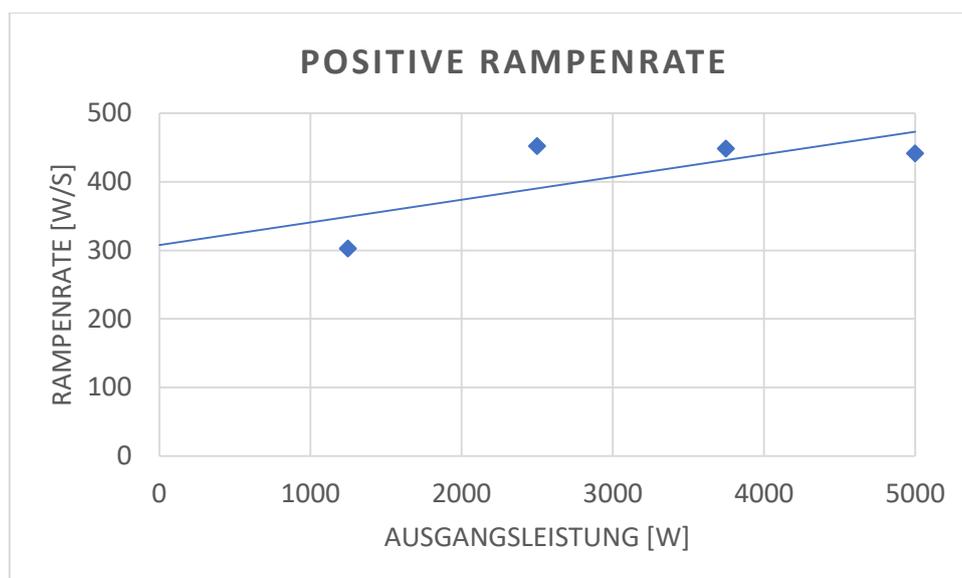


Abbildung 5-14: Positive Rampenrate des Wechselrichters bei Kaltstart

In Tabelle 5-5 werden die Unterschiede zwischen Kaltstart und Warmstart gegenübergestellt.

Tabelle 5-5: Schnellstartvergleich

	Warmstart	Kaltstart
Ausgangszustand	Netzsynchrosiert Spannung liegt an Keine Ausgabeleistung Strombedarf = 0,7 A	Nicht Netzsynchrosiert Spannung liegt nicht an Keine Ausgabeleistung Strombedarf = 0,0 A
Wechselrichter in Betrieb nehmen	Wechselrichter Leistungsvorgabewert geben	Spannung anlegen Wechselrichter Leistungsvorgabewert geben Strombedarf = 0,3 A
Selbsttest / Netzsynchrosierung	-	50-80 Sekunden
Reaktionszeit	2-3 Sekunden	-
Rampenrate (positiv 100%)	2900 W/s	450 W/s

### 5.2.3 Dynamischer Lastwechsel

Bei den Tests des dynamischen Lastwechsels wurde die Ausgangsleistung des Wechselrichters über die LabView-Oberfläche vorgegeben. Dabei wurden sowohl die zeitliche Verzögerung, die Leistungsänderung sowie die Leistungsabweichung erfasst. Die Leistungsabweichung wird jedoch im Kapitel 5.2.4 näher behandelt. Beim Wechselrichter stellte sich, wie bereits im Kapitel 5.2.2 eine Reaktionsgeschwindigkeit von 2-3 Sekunden ein. Auf Grund der kleineren Leistungssprünge der Lastprofile agiert der Wechselrichter mit dem Hochsetzsteller sehr rasch auf die Leistungsänderung und erreicht dadurch innerhalb von 1 Sekunde den Ist-Wert der Steuerung. Durch diese exakte Steuerung lässt sich die SOFC Anlage für sehr dynamische Lastprofile anwenden, jedoch nicht für eine Echtzeitsteuerung (Abbildung 5-15).

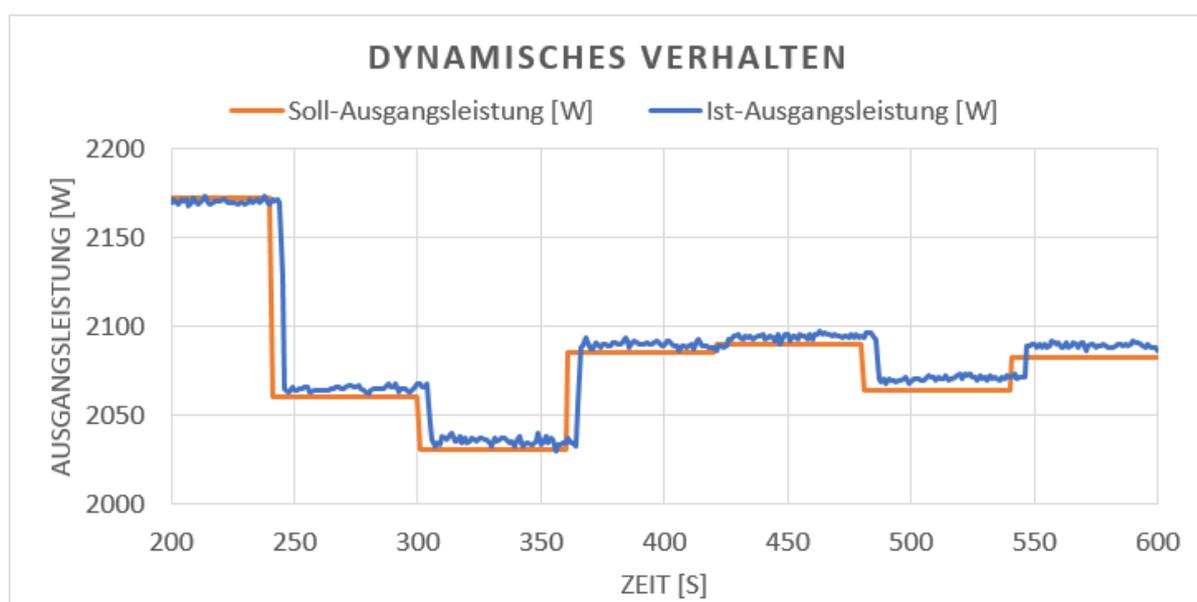


Abbildung 5-15: Dynamische Lastwechsel Soll-Ist-Vergleich

### 5.2.4 Selbstgeführter Betrieb

Im selbstgeführten Betrieb wird von der SOFC Anlage nur so viel Leistung in das elektrische Netz eingespeist, wie der Betreiber der Anlage zulässt. Dieser Betrieb liefert daher über längere Zeit eine konstante Leistung, wodurch es zu keiner stetigen Änderung der Leistung und des Leistungsfaktors kommt. Anhand dieses Betriebes soll vor allem eine Abweichung vom Soll zum Ist-Wert, wodurch die zeitliche Verzögerung nicht mitbrachtet wird, dargestellt werden. Der Soll-Wert wird über den Wechselrichter durch ein Lastprofil vorgegeben, wobei der Leistungsfaktor konstant gehalten wird. Der Ist-Wert hingegen wird aus den Messungen des vorgegebenen Lastprofils ermittelt.

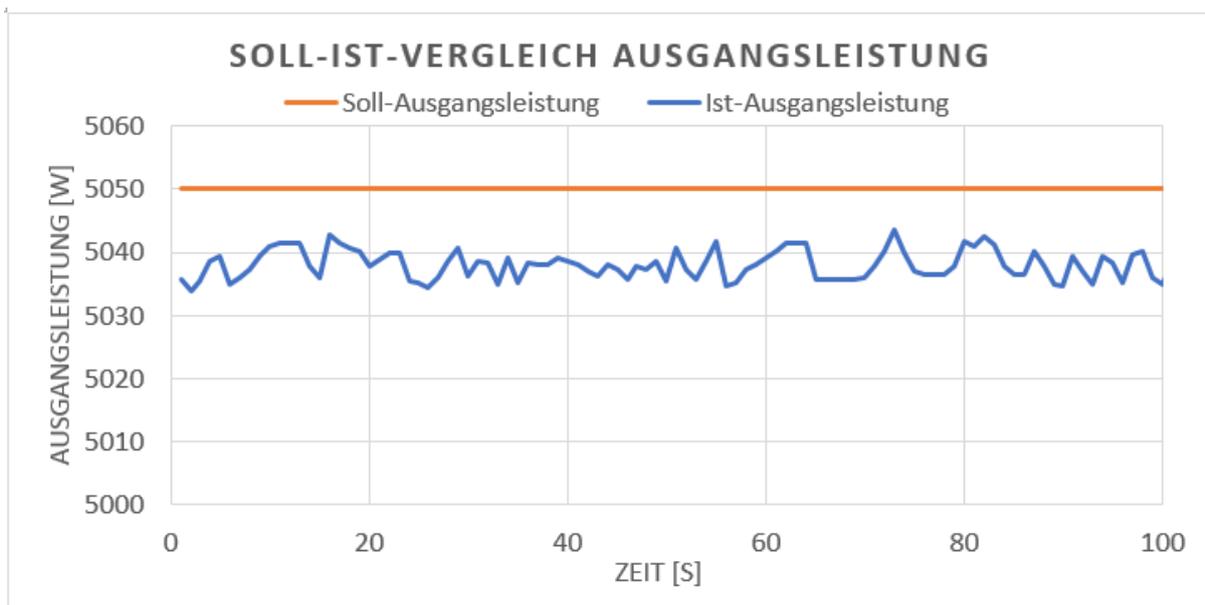


Abbildung 5-16: Soll-Ist-Vergleich Ausgangsleistung

Hierbei ist zu erkennen, dass kaum Abweichungen vom Sollwert entstehen. Dieses Verhalten lässt sich nicht nur wie hier dargestellt im hohen Leistungsbereich feststellen, sondern auch im niedrigen Leistungsbereich, was in Abbildung 5-17 zu erkennen ist. Hierbei wurde die Leistung von 5000 W in Sprüngen von 500 W reduziert und die Abweichung ermittelt.

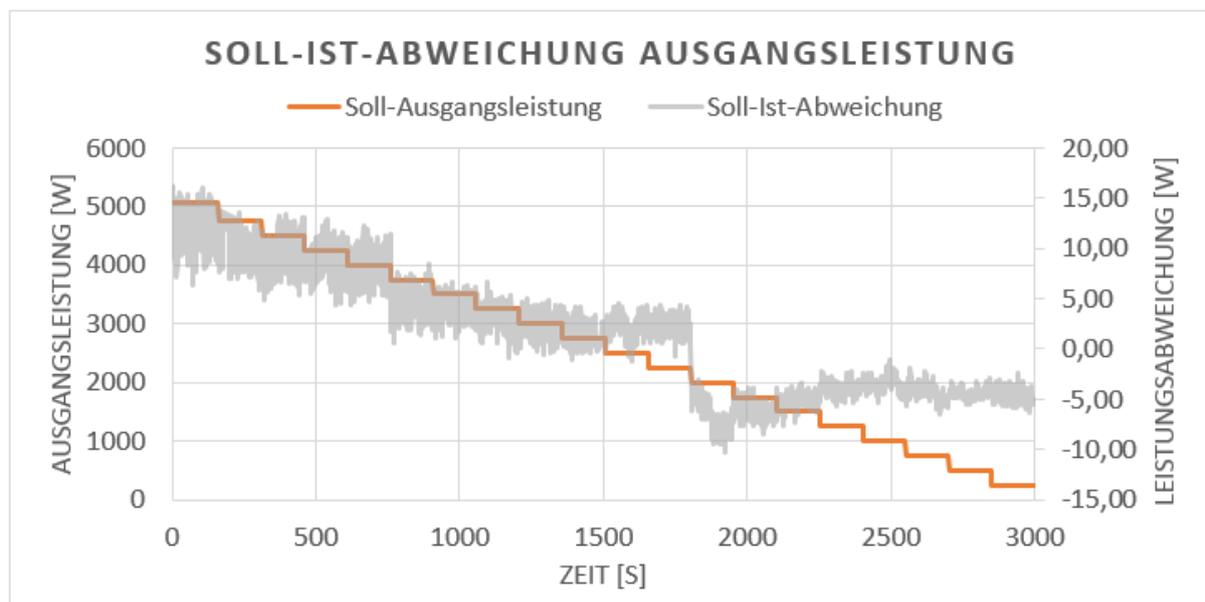


Abbildung 5-17: Sollleistung und Soll-Ist-Abweichung bei  $\cos(\varphi) = 1$

Die Abweichung des Leistungsfaktors lässt sich durch die Steuerung des Wechselrichters über die LabView-Oberfläche ermitteln. Durch die Variation des Leistungsfaktors bei konstanter Leistung lässt sich folgender Verlauf ermitteln (Abbildung 5-18).

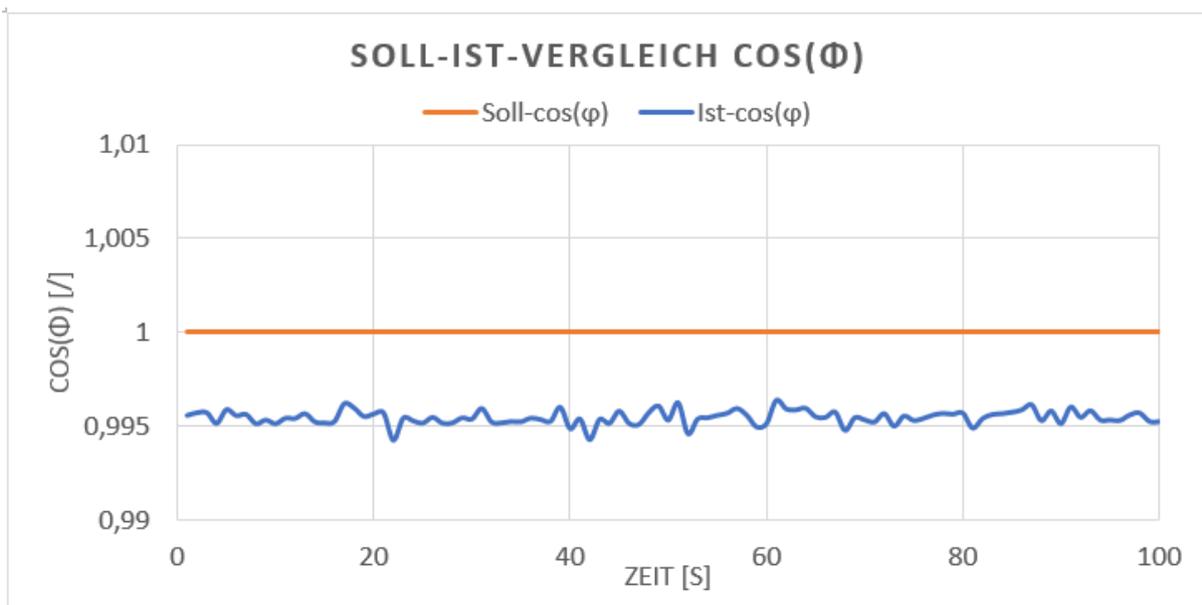


Abbildung 5-18: Soll-Ist-Vergleich  $\cos(\varphi)$  bei  $P_{max}$  5 kW

Bei einer Änderung des Leistungsfaktors über die Zeit verändert sich die Soll-Ist-Abweichung wie in Abbildung 5-19 dargestellt. Jedoch ist die Abweichung bei einem Leistungsfaktor von 1 als Offset zu betrachten, da die Anlage am elektrischen Netz angeschlossen ist, welches bereits einen bestimmten Leistungsfaktor angenommen hat.

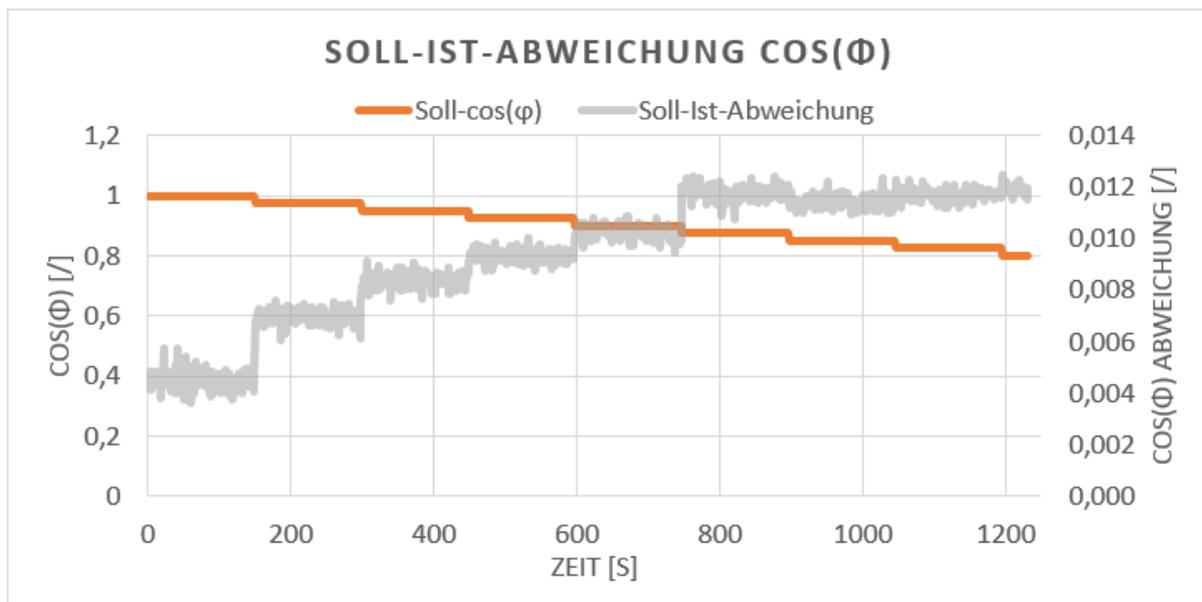
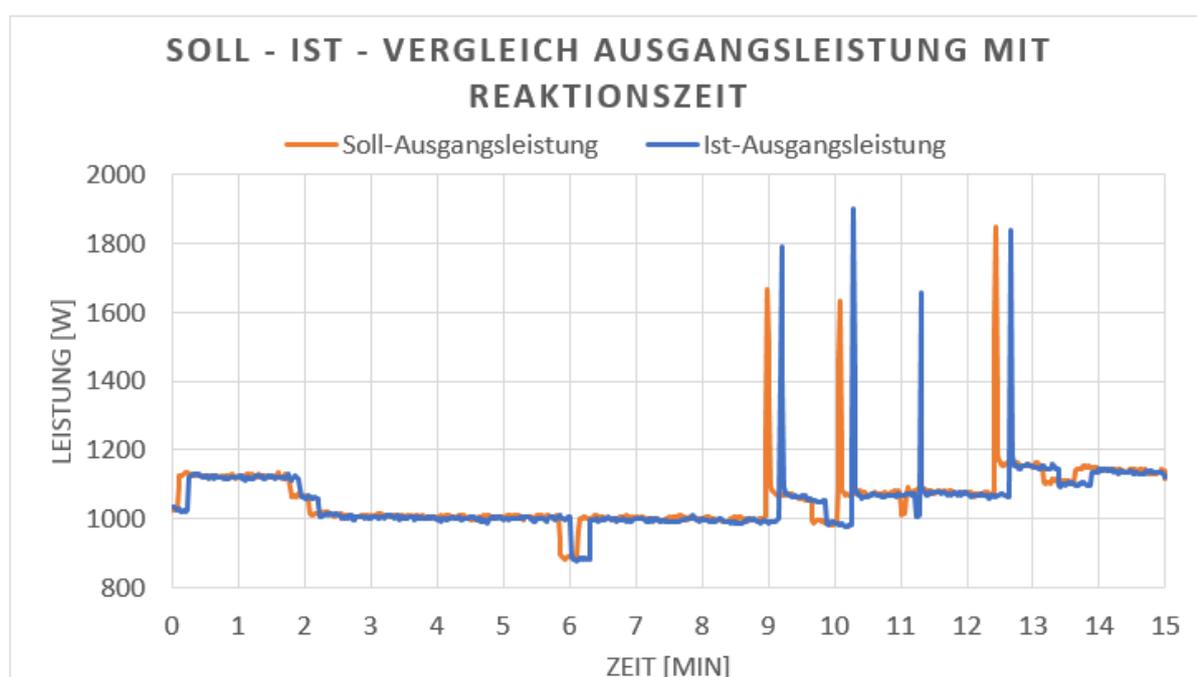


Abbildung 5-19: Soll-cos(φ) und Abweichung bei  $P_{max}$  5 kW

### 5.2.5 Lastgeführter Betrieb

Im lastgeführten Betrieb wird dem Wechselrichter ein vom Netz vorgegebenes Lastprofil aufgeprägt, wodurch die prinzipielle Funktion dieses Betriebs geprüft werden sollte. Das Lastprofil wird dabei so modelliert, dass sich sowohl Leistungsfaktor als auch die Wirkleistung des Profils in Sekundenabständen ändern. Jedoch musste das Lastprofil so bearbeitet werden, dass der Intervallschritt um ca. 400 ms verkürzt wird, da der Wechselrichter einen zusätzlichen zeitlichen Offset verursacht und sich die Zeitreihe dadurch verändert. Des Weiteren ist auch die Reaktionszeit des Wechselrichters zu beachten, die eine Echtzeitsteuerung des Systems verhindert, wodurch sich ein Leistungsverlauf für Soll- und Ist- Ausgangsleistung wie in Abbildung 5-20 ergibt.



**Abbildung 5-20: Leistungsverlauf im lastgeführten Betrieb**

In dieser Abbildung wurde ein 15 min-Leistungsblock abgebildet, wobei zu erkennen ist, dass die Leistung dem Sollwert prinzipiell folgt, jedoch um eine gewisse Zeit hinterherhinkend. Dadurch ergibt sich eine gewisse Abweichung, die je nach Lastfall stärker bzw. schwächer vom Sollwert abweicht. Durch diese Abweichung kommt es zu einer Verzerrung der gewünschten Energie in diesem 15 min Berechnungsblock. In diesem Intervall ergeben sich Abweichungen wie diese in Abbildung 5-21 in dargestellt sind.

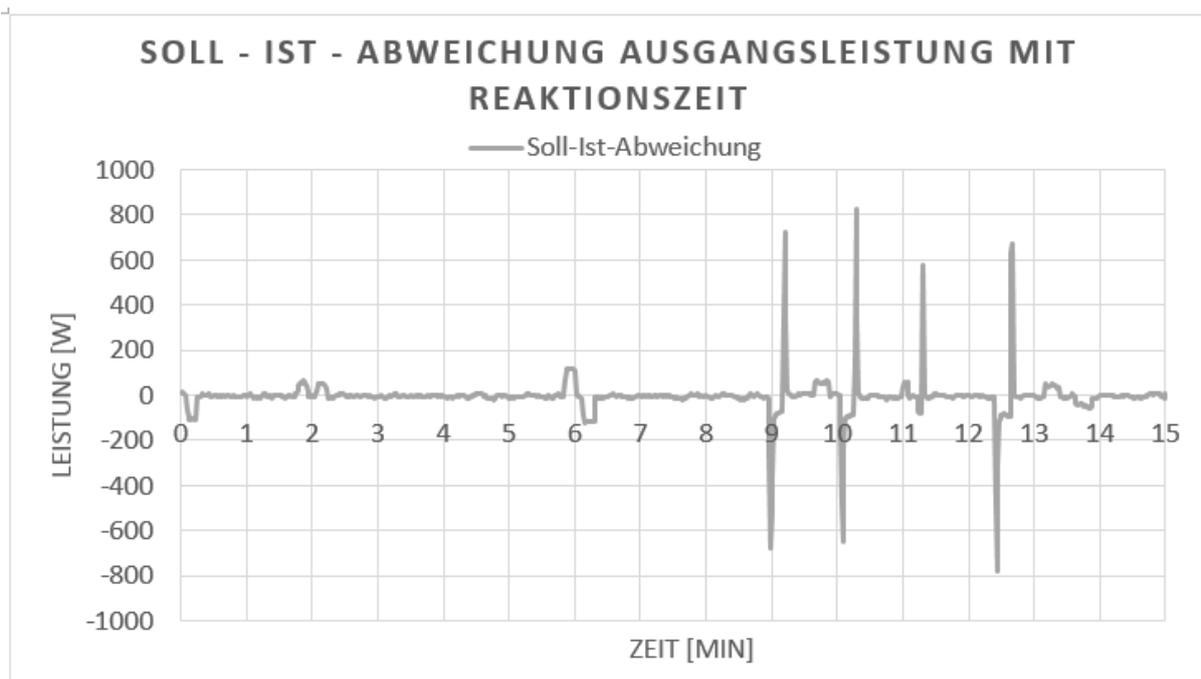


Abbildung 5-21: Soll-Ist-Abweichung Ausgangsleistung im lastgeführten Betrieb

Betrachtet man solche Zeitblöcke über eine längere Zeit ergeben sich je nach Tageszeit unterschiedliche Energieabweichungen, die durch eine Ausgleichs- bzw. Regelenergie kompensiert werden müssen (Abbildung 5-22).

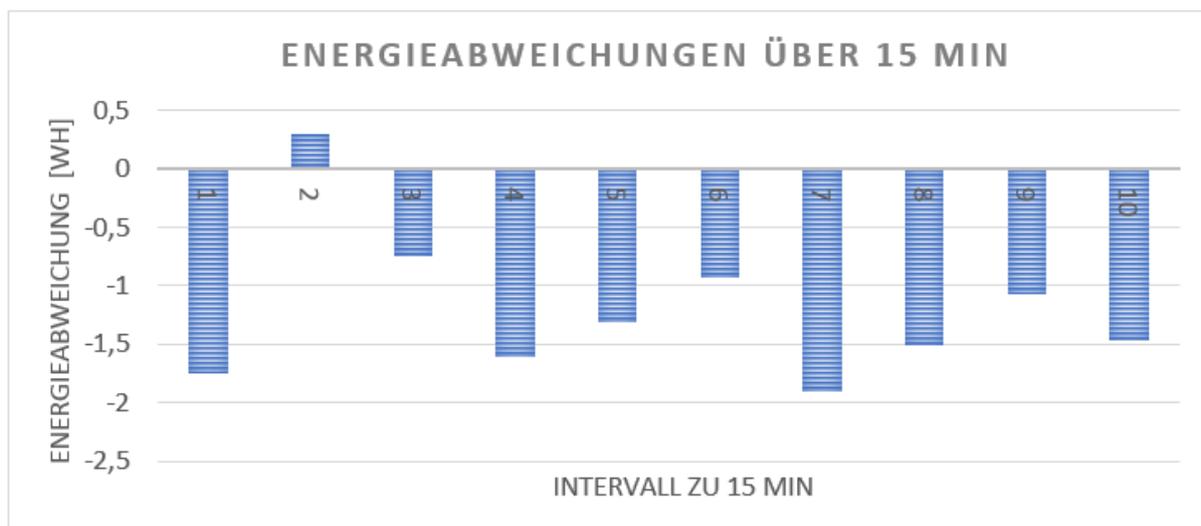


Abbildung 5-22: Energieabweichung im 15 min Intervall im lastgeführten Betrieb

Bei der Betrachtung des Leistungsfaktors auf deren dynamische Eigenschaften ergeben sich gegenüber der Ausgangsleistung größere Abweichungen. Diese Abweichungen entstehen teilweise durch den Leistungsfaktor der bereits durch das elektrische Netz verursacht wird und aufgrund von Messungenauigkeiten. Dadurch ergibt sich ein Leistungsfaktorverlauf wie in Abbildung 5-23 dargestellt.

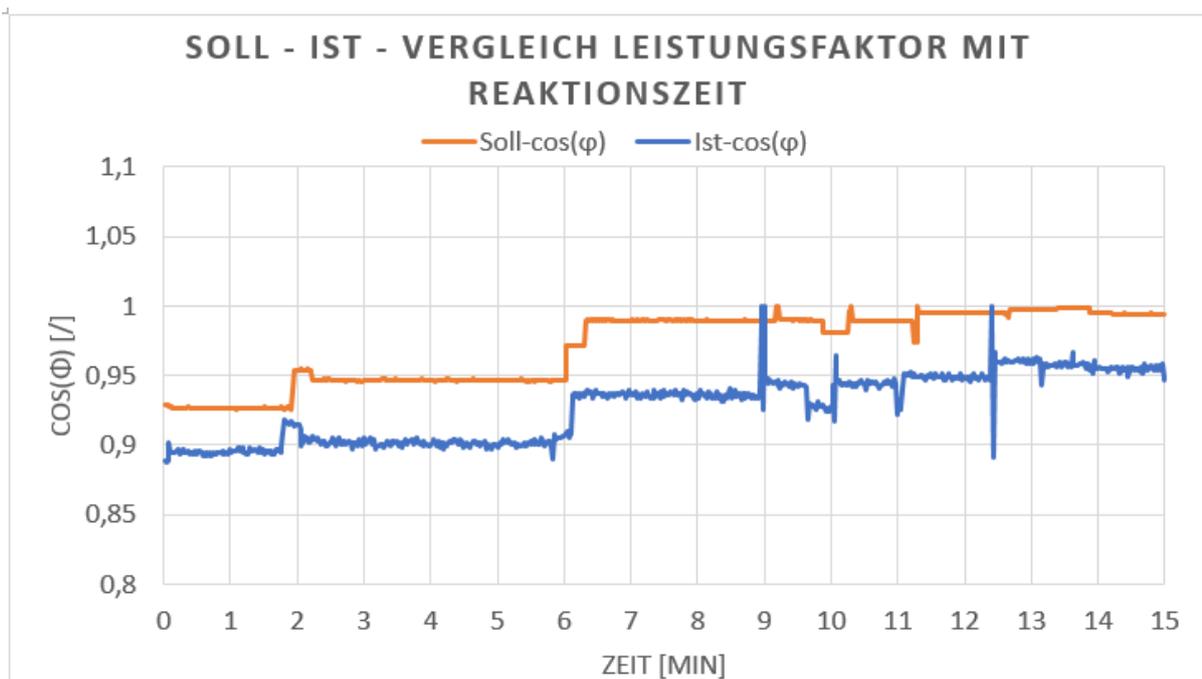


Abbildung 5-23: Leistungsfaktorverlauf im lastgeführten Betrieb

Hierbei ist zu erkennen, dass der Leistungsfaktor dem Sollwert prinzipiell folgen kann, jedoch von den genauen Werten abweicht. Durch eine gleichzeitige Steuerung der elektrischen Leistung ist auch eine weitere Abweichung vom Sollwert zu erklären. Bei einer reinen Steuerung des Leistungsfaktors ergibt sich eine minimalere Abweichung wie in Abbildung 5-18 zu erkennen. Im dynamischen Fall hingegen ergibt sich eine Abweichung wie in Abbildung 5-24 dargestellt.

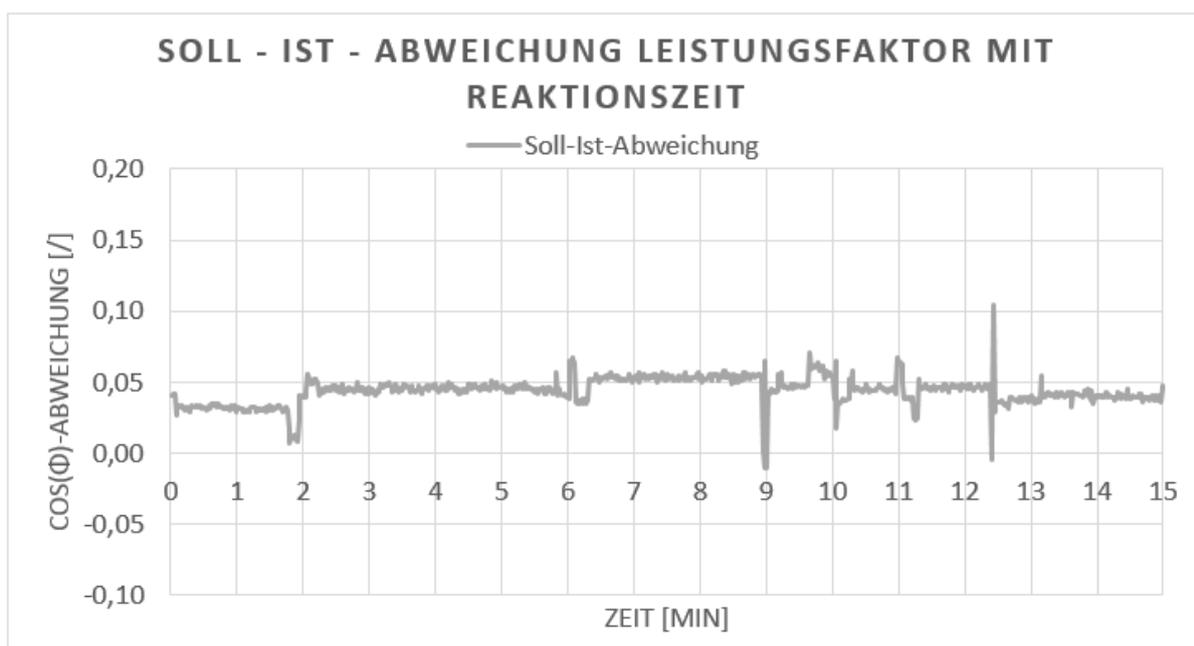
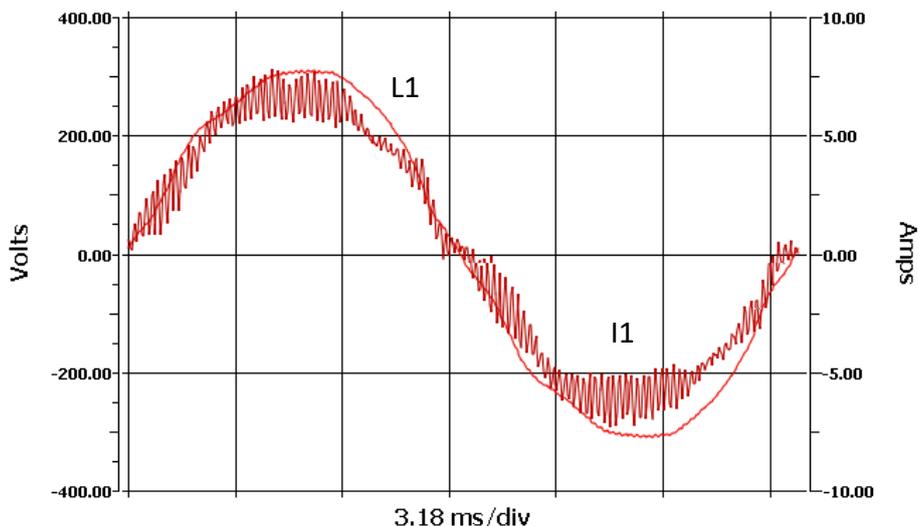


Abbildung 5-24: Soll-Ist-Abweichung Leistungsfaktor im lastgeführten Betrieb

### 5.2.6 Strom-Spannungsqualität

Die Strom-Spannungsqualität des Gesamtsystems wurde an der Versuchsschaltung in Abbildung 4-4 gemessen. Hierbei wurde das System mit unterschiedlichen Lastpunkten betrieben, bei einer konstant bleibenden UI-Kennlinie des SOFC Systems. Die Lastpunkte wurden durch Ansteuern des Wechselrichters geregelt, wobei sowohl der Wirkleistungswert als auch der Leistungsfaktor abgeändert wurden. Daraus war ein Verhalten der Ausgangsparameter, wie in Abbildung 5-25 dargestellt, zu erkennen.



**Abbildung 5-25: Strom-Spannungsverlauf bei 65 % Ausgangsleistung und Leistungsfaktor von 1**

Aus dieser Darstellung ist der Einfluss des Wechselrichters auf den Stromverlauf deutlich zu erkennen. Auf Grund der vielen Schaltvorgänge im Hochsetzsteller und im Wechselrichter, um die Grundwelle der elektrischen Spannung nachzustellen, bildet sich ein Stromverlauf wie in Abbildung 5-25 mit sehr vielen Stromspitzen. Dabei handelt es sich im Volllastpunkt um Abweichungen durch die 9. bzw. 15. Oberwelle, die für eine elektrische Einspeisung ein Problem darstellen. Die Spannung hingegen entspricht der Netzspannung und weicht dadurch kaum von der Sinusform ab. Des Weiteren ist zu erkennen, dass diese Schaltspitzen im absoluten Bereich gleich groß bleiben. Dies kann man sehr einfach an einem geringeren Lastpunkt nachvollziehen (Abbildung 5-26). Diese Schaltspitzen können durch ein geeignetes Filterelement am Eingang des Hochsetzstellers kompensiert werden. Hierbei ist auch wichtig, dass diese Schaltspitzen keinen Einfluss auf die Brennstoffzelle besitzen. Als passives Filterelement wäre es möglich eine geeignete Kapazität als Pufferkondensator wie in Abbildung 4-2 beim indirekten Einspeisekonzept am Eingang zu verschalten.

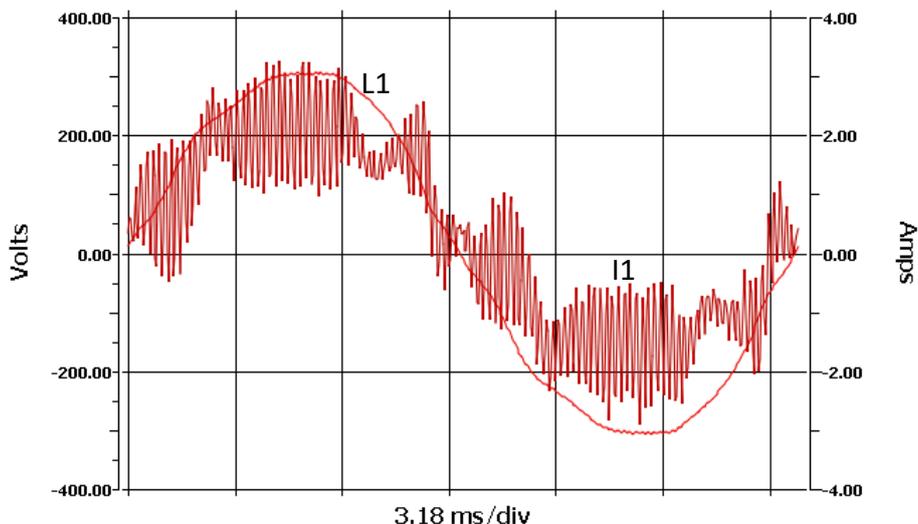


Abbildung 5-26: Strom-Spannungsverlauf bei 20 % Ausgangsleistung und Leistungsfaktor von 1

In Abbildung 5-26 ist zu erkennen, dass die Stromspitzen relativ zum Gesamtstrom stark zunehmen. Durch diese Stromspitzen, die auf elektronische Schaltvorgänge hinweisen, verringert sich der Wirkungsgrad sowohl im Teillast- als auch im Volllastbereich. Die Schaltverluste wirken sich jedoch im Teillastbereich der Schaltung verstärkt aus.

Bei der Betrachtung der Strom- und Spannungsqualität kann man auch die Oberschwingungen und den Flickerfaktor heranziehen. Bei den Oberschwingungen des Wechselrichters ergeben sich daher folgende Anteile wie in Abbildung 5-27 dargestellt.

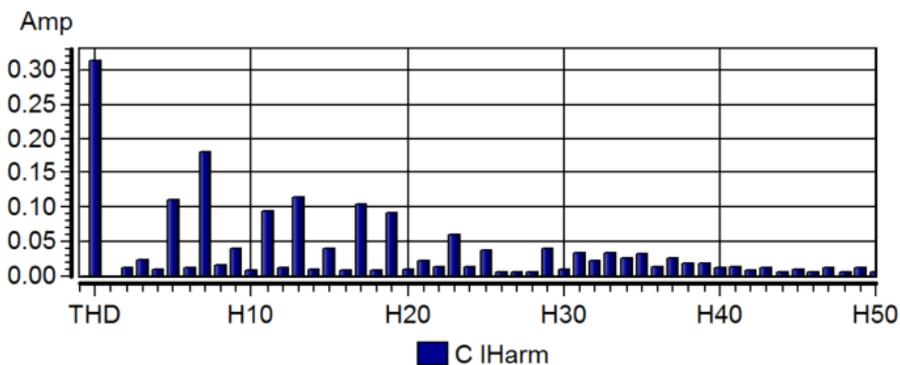


Abbildung 5-27: Stromoberschwingungsanteile Wechselrichterausgang Phase L3

Hierbei ist zu erkennen, dass vor allem die ungeraden Oberschwingungsanteile einen großen Anteil beitragen. Diese Anteile können jedoch stark voneinander variieren und besitzen auch unterschiedliche Grenzwerte, die für das Netz zulässig sind. THD wie in Abbildung 5-27 steht dabei für den gesamten Anteil aller Oberwellen die in das Netz gespeist werden. Hierbei sind vor allem die 9. und die 15. Oberwelle am Ausgang des Wechselrichters problematisch.

In Abbildung 5-28 ist der Flickerfaktor einer Phase der Versuchsanlage zu erkennen. Dieser darf den Faktor 1 nicht überschreiten. Durch einen niedrigen Flickerfaktor kommt es zu keiner visuellen Wahrnehmung elektrischer Spannungsschwankungen.

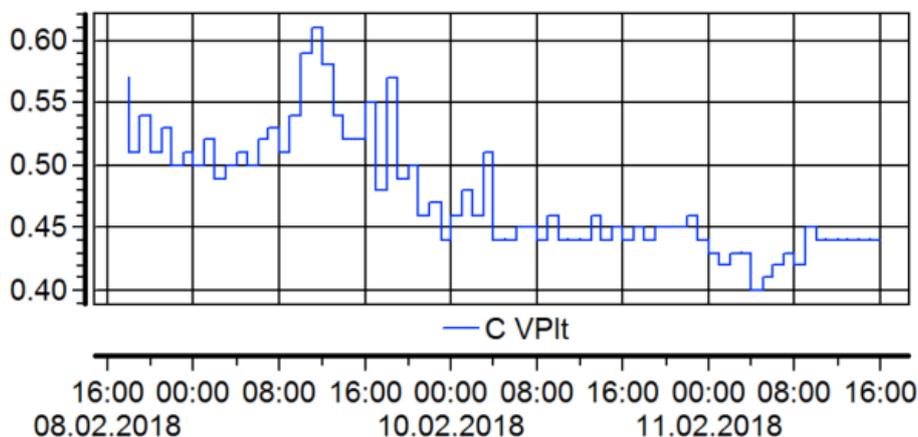


Abbildung 5-28: Flickerverlauf Wechselrichterausgang Phase L3

Am Eingang des gesamten Einspeisekonzepts liegt die Ausgangsspannung des SOFC Systems an. Diese Spannung hat je nach deren Betriebspunkt eine unterschiedliche Höhe und einen dazugehörigen konstanten Strom. Auf Grund der Funktion des Hochsetzstellers, wird dieser Stromverlauf jedoch für die Schaltung selbst beeinflusst. Da die elektrische Spule des Hochsetzstellers abwechselnd geladen und entladen wird, bildet sich ein Stromverlauf wie in Abbildung 5-29. Beim Laden der Spule reduziert sich der Stromfluss im Hochsetzsteller, wobei dieser beim Entladen auf ungefähr die doppelte Höhe des Eingangsstromes ansteigt, was eine höhere Ausgangsspannung bewirkt (siehe Kapitel 3.2.1.1). Durch das Laden und Entladen des Kondensators kommt es zu kleineren Schwankungen der Eingangsspannung.

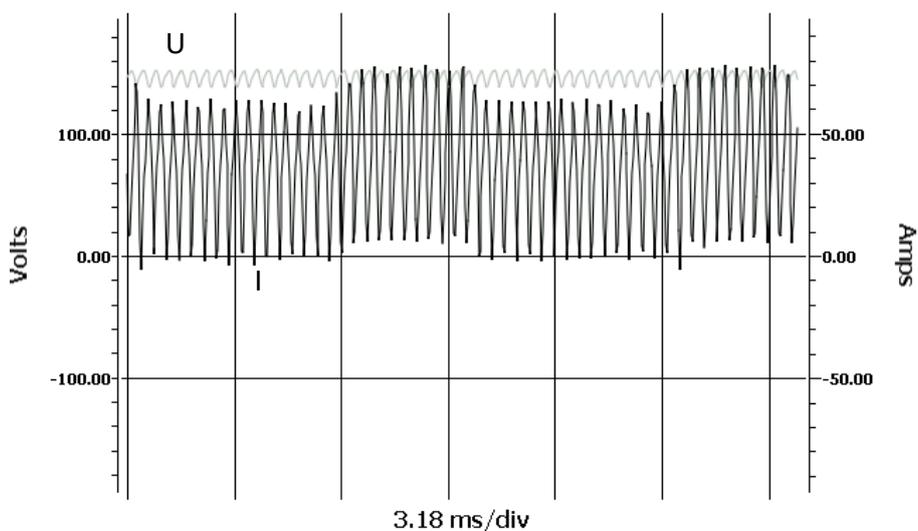


Abbildung 5-29: Strom- und Spannungsverlauf am Eingang des Hochsetzstellers bei Pmax 5 kW

### 5.2.7 Blindleistungsverhalten

Das Netzeinspeisesystem lässt sich anhand der geforderten Blindleistung steuern. Dabei kann dem Wechselrichter eine bestimmte Leistungsfaktoreingabe vorgegeben werden. Diese Leistungsfaktorvorgabe muss aber in Abstimmung mit dem Netzbetreiber einhergehen. Durch diese Steuerung ist es möglich nicht nur reine Wirkleistung zu erzeugen, sondern auch einen gewissen Anteil an Blindleistung. Der Wechselrichter lässt seine Blindleistung von 0,8 induktiv bis zu einem Faktor von 0,8 kapazitiv ändern. Dadurch kann man sowohl die Spannungshöhe als auch die Blindleistungsbereitstellung steuern. Durch eine elektrische Einspeisung kann es vorkommen, dass auf Grund der erzeugten Leistung, eine Spannungsbandverletzung auftritt. Durch eine geeignete Menge an Blindleistung kann diese Spannungshöhe reduziert bzw. angehoben werden. Dadurch kommt es zu keinen Über- und Unterspannungen im elektrischen Netz. Um eine elektrische Blindleistung zu erzeugen, wird der Phasenwinkel zwischen dem Strom und der Spannung geändert. Eilt der elektrische Strom der Spannung vor, wird kapazitive Blindleistung in das elektrische Netz eingespeist was in Abbildung 5-30 zu erkennen ist. Durch diese kapazitive Blindleistung die an das elektrische Netz eingespeist wird, wird die Höhe der Spannung angehoben.

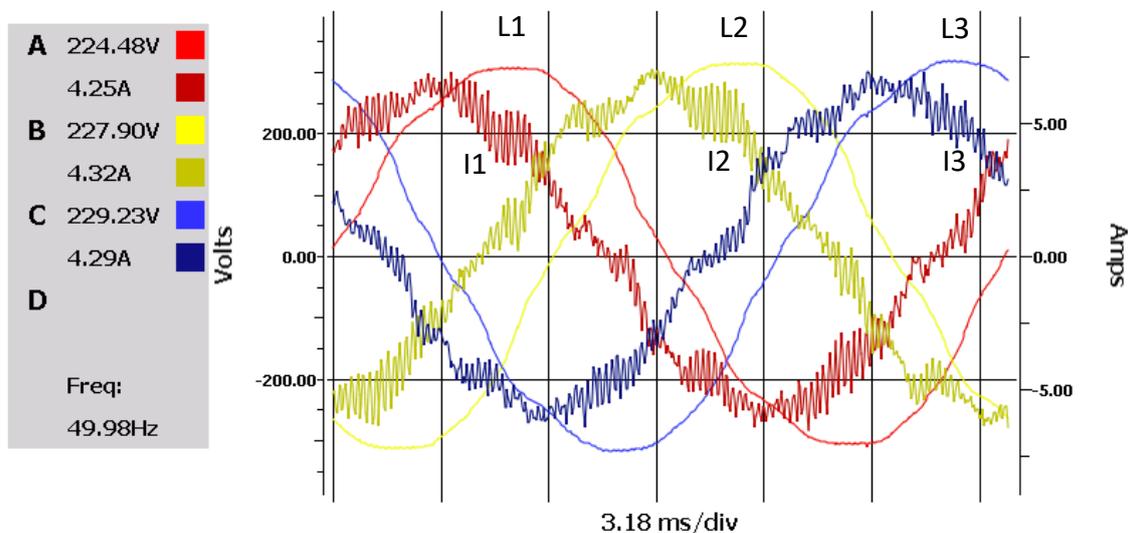


Abbildung 5-30: U/I-Verlauf des Wechselrichterausgangs bei  $\cos(\varphi)$  0,8 kapazitiv bei  $P/P_{max}$  50 %

## 6 SYSTEMAUSLEGUNG EINES SOFC SYSTEMS

Das SOFC System besteht aus mehreren unterschiedlichen Komponenten die aufeinander abgestimmt werden müssen, um ein funktionierendes Gesamtsystem zu gewährleisten. Dabei ist es wichtig alle Bauteile so zu integrieren, damit keine technischen Einschränkungen im Betrieb oder im Fehlerfall auftreten. Hierbei ist vor allem wesentlich, die nötige Energie für einen sicheren Betrieb bereitzustellen. Des Weiteren soll das Konzept so ausgelegt werden, damit die größtmögliche Menge an Energie in das elektrische Netz geliefert wird und dadurch minimale Verluste auftreten. Eine wichtige Rolle für diese Betrachtung spielen dabei die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen und die Komplexität des Gesamtsystems.

### 6.1 Ausgangslage

Die SOFC Anlage ist ein System, dass aus unterschiedlichen Komponenten wie in Kapitel 3.1.2 erklärt, aufgebaut ist. Die dort erwähnten Komponenten dienen zum Betrieb der Brennstoffzelle. Es werden jedoch noch weitere Bauteile benötigt um elektrische Energie in das Netz einzuspeisen. Einige Komponenten die zum Betrieb der SOFC benötigt werden, müssen mit elektrischer Energie versorgt werden. Diese Komponenten sind relevant um ein funktionierendes Gesamtsystem zu gewährleisten und werden als Peripheriegeräte bezeichnet.

Das System muss dabei so ausgelegt sein, dass eine Brennstoffaufbereitung (Reformierung) für das SOFC System jederzeit möglich ist. Um einen solchen Reformer betreiben zu können, ist es wichtig die nötigen Massenströme und Energie an die SOFC Anlage zu liefern. Dies geschieht bei dem SOFC System mittels zweier Gebläse, die die nötigen Massenströme und Betriebsdrücke erzeugen. Diese Gebläse werden jeweils von sehr hochfrequenten Umrichtern angetrieben, da die Antriebe eine sehr hohe Drehzahl benötigen. Die Gebläse können dabei eine Drehzahl von ca. 80.000 U/min erreichen, um den nötigen Massenstrom bzw. die Betriebsdrücke zu erzeugen. [55, 56]

Des Weiteren benötigt die Anlage eine niedrige Spannungsebene, mit der eine Steuerung und Regelung des Systems gewährleistet wird. Dies ist vor allem für die Steuerung der Ventile, die die Massenströme regulieren, notwendig, um die Anlage in einem gewissen Betriebspunkt zu halten. Für diese Ventilsteuerung wird nur sehr wenig Leistung benötigt, die aber dauerhaft für den Betrieb der Brennstoffzelle vorhanden sein muss. [54, 56]

Abgesehen von den sogenannten Peripheriegeräten muss an der Ausgangsseite der Brennstoffzelle die elektrische Energie so umgewandelt werden, dass diese in das elektrische Netz eingespeist werden kann. Die Ausgangsleistung der Brennstoffzelle wird direkt im

Anschluss in einen Hochsetzsteller geführt, in der die elektrische Energie das erste Mal umgewandelt wird. Durch den Einsatz dieses Wandlers bildet sich im System eine neue Spannungsebene, die ein Optimierungspotential für die interne Versorgung der Peripheriegeräte bildet. Durch diese zusätzliche Spannungsebene ergibt sich eine weitere Option, die internen Verbraucher mit dieser Spannungsebene zu versorgen.

Im Anschluss des Hochsetzstellers wird die elektrische Energie in eine für das Netz passende Spannungsform umgewandelt. Dies geschieht anhand eines handelsüblichen selbstgeführten Netzwechselrichters, wie er bei Photovoltaikanlagen verwendet wird. Der Wechselrichter besitzt die Möglichkeit einen Speicher anzuschließen, der für gewisse Betriebspunkte relevant sein kann. Durch die einzelnen Komponenten bilden sich unterschiedliche Möglichkeiten, das System miteinander zu konfigurieren.

Um einen Gesamtüberblick der Peripheriegeräte zu erhalten, werden diese in Kapitel 6.2 näher beschrieben. [55, 56]

## **6.2 Peripheriegeräte**

Die Peripheriegeräte sind notwendig, um einen Betrieb der SOFC Anlage zu gewährleisten. Vor allem das Gebläse für die Luftzufuhr und das Rezirkulationsgebläse spielen hierbei eine entscheidende Rolle, damit die Anlage betrieben werden kann. Des Weiteren müssen einige Bauteile mit elektrischen Steuersignalen versorgt werden, die durch einen regelbaren Gleichrichter, mit einer Spannung von 5 V bzw. 12 V erzeugt werden. [56]

### **6.2.1 Gebläse**

Die beiden Gebläse in der SOFC Anlage werden mit je einem bürstenlosen Gleichstrommotor angetrieben, die über einen Umrichter gesteuert werden, um dadurch eine sehr hohe Drehzahl zu erreichen. Um die elektrische Energie möglichst effizient zu nutzen und einen hohen Betriebsdruck zu erzeugen, wurden die Gebläse eigens für ihre Anwendung aerodynamisch optimiert und für deren Arbeitspunkt ausgelegt. Der Unterschied zwischen den beiden Gebläsen liegt im aerodynamischen Teil, da beide Motoren in unterschiedlichen Drehzahlbereichen betrieben werden. Durch die unterschiedlichen Drehzahlen erreichen beide Gebläse auch unterschiedliche Druckverhältnisse. Das Rezirkulationsgebläse wird dabei mit einer höheren Drehzahl betrieben, um den Druck für den Reformationsprozess anzuheben. Des Weiteren treten bei diesem Gebläse auch höhere Temperaturen auf, da ein Teil des Abgasstroms über diesen Antrieb zurückgeführt wird. Das Luftgebläse wird dagegen geringer belastet, wodurch die Anforderungen geringer ausfallen. [55]

Der dabei eingesetzte bürstenlose Gleichstrommotor bringt bei dieser Anwendung einige Vorteile mit sich. Da dieser Antrieb nicht wie herkömmliche Gleichstrommotoren Bürsten besitzt, entsteht im Betrieb auch kein Bürstenfeuer, was bei solchen Gasströmen absolut unerwünscht wäre. Des Weiteren sind solche Motoren sehr einfach und gut regelbar und besitzen zusätzlich einen hohen Wirkungsgrad.[57]

### 6.2.1.1 Umrichter

Die zwei Gebläse werden jeweils über einen separaten Umrichter angetrieben. Diese Umrichter sind jedoch besonders für diese Anwendung ausgeführt und müssen eine Schaltfrequenz von mehr als 120.000 Hz erreichen können. Dies ist notwendig, da das Schaltverhalten des Umrichters einen Einfluss auf die hohe Drehzahl des Motors hat. Ein zusätzliches Kriterium spielt dabei die Versorgung des Umrichters, der mit 230 V Wechselspannung versorgt wird. Diese Spannungsebene wurde gewählt, da es eine große Anzahl an Reglern für diesen Spannungsbereich gibt.

Um den Zusammenhang zwischen der Drehzahl eines Antriebs (mit fixer Polpaarzahl  $p$ ) und der Ausgabefrequenz des Umrichters  $f$  näher zu erläutern, ist folgende Gleichung anzuwenden. [55, 58]

$$n = \frac{f}{p} \quad (6-1)$$

Da herkömmliche Frequenzumrichter eine niedrigere Ausgangsfrequenz besitzen, spielt in diesem Fall der Umrichter eine zentrale Rolle bei der Auslegung des Antriebes. Daher gibt es kaum alternative Umrichter für diese Anwendung, da die Ausgabefrequenz und dadurch die Nenndrehzahl des Gebläses nicht erreicht werden können. Infolgedessen ergibt sich nur ein schmales Angebot an Umrichter die für diese Gebläse eingesetzt werden können. [58–60]

Durch die hohe Frequenz werden solche Motoren bereits im Feldschwäcbereich betrieben, wodurch bei steigender Drehzahl ein vermindertes Drehmoment auftritt. Trotz dieser Umstände muss der Motor das nötige Antriebsmoment für das Gebläse weiterhin liefern. Dadurch, dass das Gebläse im Feldschwäcbereich (Abbildung 6-1) betrieben wird, erfolgt ab einer gewissen Drehzahl keine weitere Leistungsaufnahme des Gebläses. Infolgedessen kann man annehmen, dass die Gebläseleistung für gewisse Leistungspunkte des SOFC System konstant gehalten wird, was vor allem für das Rezirkulationsgebläse, das mit sehr hoher Drehzahl betrieben wird, gilt. [58–60]

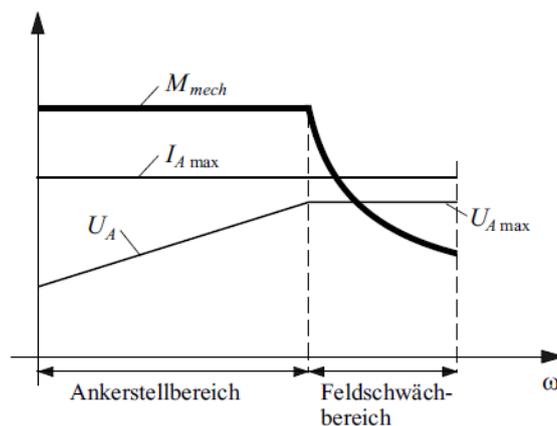


Abbildung 6-1: Feldschwächbereich eines Gleichstrommotors [57]

## 6.2.2 Elektrische Versorgung

Die elektrische Versorgung des SOFC Systems ist dafür notwendig, um die Steuersignale an die unterschiedlichen Ventile und Module zu senden. Dabei handelt sich lediglich um elektrische Energie die zu Kommunikations- und Steuerzwecken benötigt wird. Diese elektrische Energie wird über einen Gleichrichter auf eine Spannung von 5 VDC bis maximal 12 VDC geregelt. Dadurch kann man digitale und analoge Signale an die Komponenten der SOFC Anlage senden. [56]

## 6.3 Konzepte

Die Gesamtanlage soll möglichst effizient und sicher in das elektrische Netz eingebunden werden. Durch die vielen Komponenten der SOFC Anlage ergeben sich unterschiedliche Konzepte wie das System an das Netz angeschlossen werden kann. Ein zentraler Punkt hierbei ist die Versorgung der unterschiedlichen Peripheriegeräte. Diese sollen möglichst effizient und mit geringem Aufwand in das Gesamtkonzept eingebunden werden. [25]

Des Weiteren sollte die Möglichkeit eines Netzausfalls mit in Betracht gezogen werden, was zu weiteren Kriterien führt. Dadurch kann es vorkommen, dass das Brennstoffzellensystem seine Leistung in sehr kurzer Zeit von Vollast auf Leerlauf reduzieren muss und alle Geräte ausfallen. Dieser Ausfall würde zu einer Schädigung der Zelle führen und ist deshalb in jedem Fall zu verhindern. Das SOFC System soll bei einem Netzzusammenbruch kontrolliert in den Leerlauf geführt werden. Dabei ist zu beachten, dass man das Anschlusskonzept für einen reinen Netzparallelbetrieb aber auch für einen Notstrom-Inselbetrieb auslegen kann. Von einem dauerhaften Inselbetrieb wird jedoch abgeraten, da eine starke Belastung des Wechselrichters hervorgerufen wird, da stets Leistungsunsymmetrien im Netz auftreten. Stattdessen sollte das Konzept so aufgebaut sein, dass bei einem zwischenzeitlichen Zusammenbruch des Netzes, ein Notstrom-Inselbetrieb gestartet wird. Dieser Inselbetrieb

wird jedoch mit einer leichten Verzögerung gestartet, wodurch keine unterbrechungsfreie Stromversorgung des eigenen elektrischen Netzes gewährleistet wird. [25]

### **6.3.1 Netzparallelbetrieb**

Die Konzepte für den Netzparallelbetrieb sind so aufgebaut, dass das System bei einem Netzausfall von diesem getrennt wird und sich die SOFC Anlage abschaltet. Dies ist notwendig, da die produzierte Energie der SOFC Anlage mit den internen Verbrauchern, schwer auszugleichen ist. Um eine ausgeglichene Energiebilanz zu schaffen, wird eine Batterie benötigt, die wiederum einen Inselbetrieb erlaubt. Der Netzparallelbetrieb ist jener Betrieb, in der sich die Anlage zum größten Teil ihrer Betriebszeit befindet. Dabei ist jedoch zu unterscheiden mit welcher Strategie die Anlage betrieben wird.

Eine Strategie kann es sein, die Anlage dauerhaft mit ihrer Maximalleistung zu betreiben. Dabei wird die überschüssige Energie der Anlage in das elektrische Netz gespeist. Diese Strategie macht vor allem bei der Anwendung eines SOFC Kraftwerks Sinn. Zusätzlich muss man jedoch auch die anfallende Wärme in ein Wärmenetz oder einen thermischen Speicher leiten, um hohe Gesamtwirkungsgrade zu erzielen.

Die SOFC Anlage kann jedoch auch sehr einfach gesteuert betrieben werden. Hierbei wird die Anlage so geregelt, dass diese nur den Eigenbedarf an elektrischer Energie deckt. Jedoch kann es hierbei dazu führen, dass die SOFC Anlage bei einem niedrigen Lastpunkt zusätzlich beheizt werden muss, um ihre Betriebstemperatur zu halten.

Die dabei entwickelten Konzepte beschränken sich auf eine Wechselrichterauslegung von 5 kW bzw. 6 kW Wechselrichtern. Dabei werden diese Konzepte im Volllastbetrieb der SOFC Brennstoffzelle miteinander verglichen und deren Sinnhaftigkeit und deren idealer Anwendungsfall gegenübergestellt. Für diese Konzeptbeurteilung werden die einzelnen Wirkungsgrade der Komponenten aus ihren Datenblättern herangezogen. Dadurch lässt sich eine gewisse Abweichung zum realen Verhalten, wie bereits im Kapitel 5 vermessen, aufweisen. Jedoch kann man aus diesen Konzepten sehr gute Erkenntnisse beziehen, die auf die Realdaten schließen lassen.

#### *6.3.1.1 5 kW Wechselrichter*

In der Abbildung 6-2 ist das 5 kW Wechselrichterschema dargestellt, wobei die Leistungen im Volllastzustand aufgetragen sind. Die SOFC Brennstoffzelle liefert eine Leistung die über einen Lasttrennschalter zu dem DC/DC Wandler transportiert wird. Hier wird die elektrische Leistung der Brennstoffzelle von einer niedrigen Eingangsspannung durch den Hochsetzsteller angehoben und der Ausgangsstrom gegenüber dem Brennstoffzellenstrom

gesenkt. Anschließend wird die Energie über einen Trennschalter zum Wechselrichter geleitet, der die elektrische Gleichspannung in einen entsprechenden Drehstrom umwandelt. Jedoch transformiert der Wechselrichter in diesem Fall nur maximal 5 kW elektrische Leistung um, wodurch bei einer höheren Eingangsleistung einige Verluste am Wechselrichter entstehen. Diese dabei entstehenden Verluste werden über einen Lüfter als Wärme abgegeben. Die nutzbare Energie wird über einen Smartmeter netzsynchron in das elektrische Netz eingespeist. Da, die SOFC Anlage jedoch selbst elektrische Leistung für ihren Betrieb benötigt, entnehmen die Peripheriegeräte Energie aus dem elektrischen Netz. Die zwei Frequenzumrichter beziehen elektrische Energie, um das Luftgebläse und das Rezirkulationsgebläse zu betreiben. Zusätzlich wird weitere elektrische Energie benötigt, um alle nötigen Ventile der SOFC Anlage zu steuern.

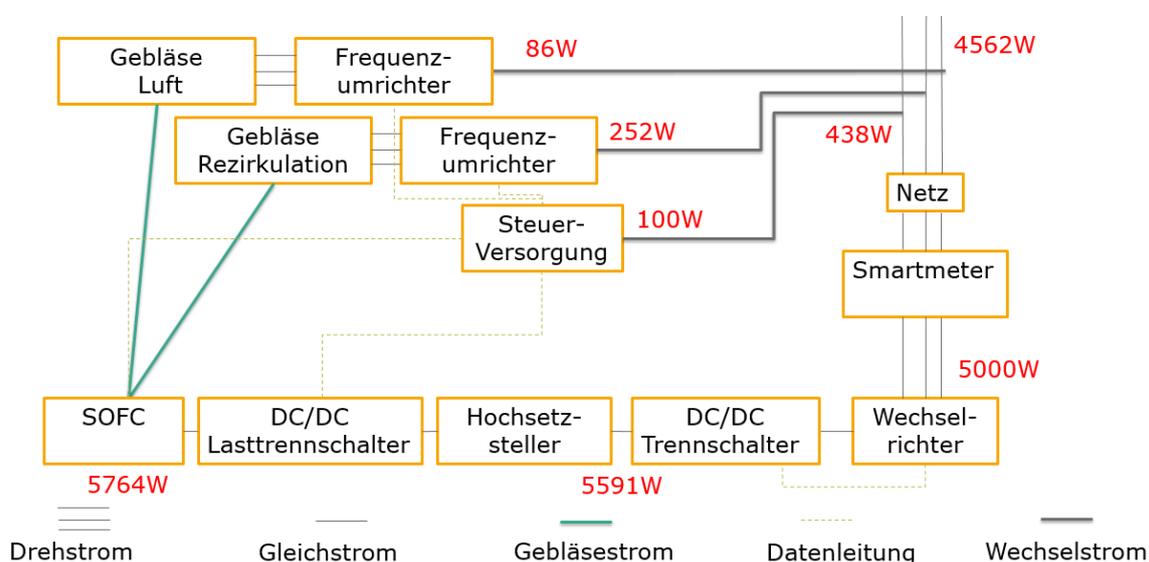


Abbildung 6-2: Netzparallelbetrieb 5kW Wechselrichter [53, 54, 59, 61]

In Abbildung 6-3 werden die auftretenden Verluste der SOFC Anlage in einem Sankey-Diagramm für das angewendete Konzept in Abbildung 6-2 dargestellt. Daraus ergibt sich, dass vor allem große Verluste am Wechselrichter selbst anfallen, da dieser für eine solche Eingangsleistung unterdimensioniert ist. Die angegebenen Verluste über Abgas und Wärmeverluste werden in den Konzepten als konstant angenommen und basieren auf realen Versuchswerten. Die angeführte Nutzwärme bezieht sich dabei auf eine 65 °C Wärmeauskopplung. [61]

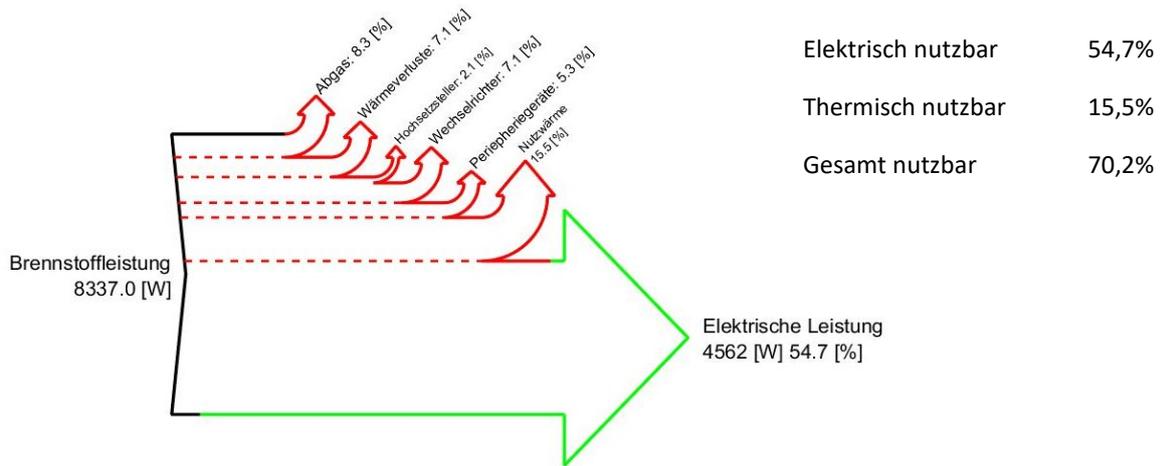


Abbildung 6-3: Sankey-Diagramm 5 kW Wechselrichter [53, 54, 59, 61]

### 6.3.1.2 6 kW Wechselrichter

Das Konzept eines Wechselrichters mit einer maximalen Ausgabeleistung von 6 kW ist in Abbildung 6-4 dargestellt. Dabei wird die Energie im Prinzip gleich wie bei dem Konzept des 5 kW Wechselrichters umgewandelt. Jedoch kann dieser Wechselrichter eine größere Leistung in das elektrische Netz liefern. Dadurch werden die Verluste am Wechselrichter erheblich reduziert und der Wirkungsgrad des gesamten Konzeptes wird angehoben. Durch dieses Schema wird auf jeden Fall gewährleistet, dass mehr als 5 kW Leistung für den Betreiber zugänglich sind.

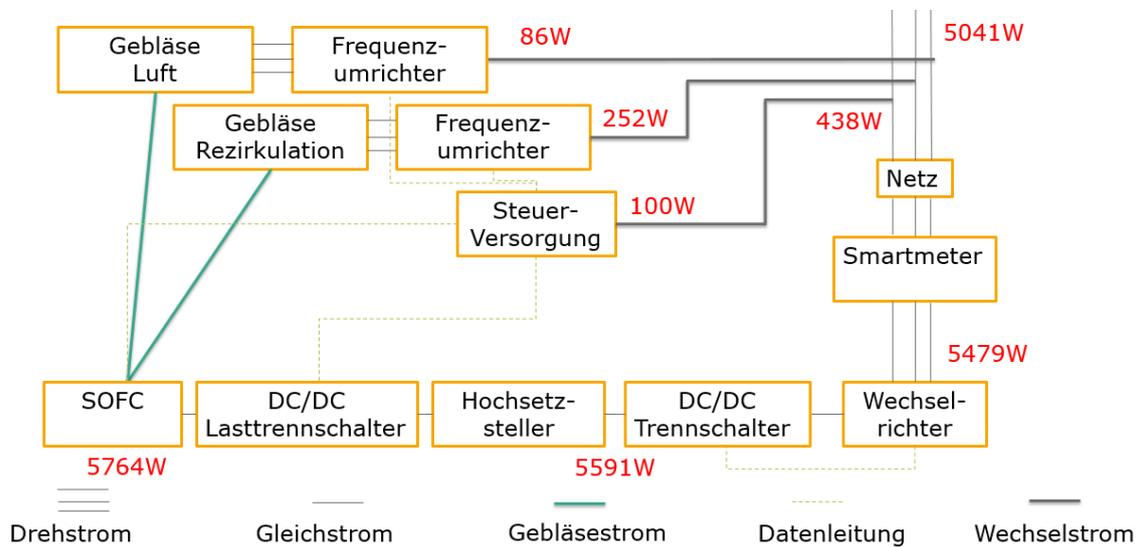


Abbildung 6-4: Netzparallelbetrieb 6 kW Wechselrichter [53, 54, 59–61]

In Abbildung 6-5 sind alle Verluste in einem Sankey-Diagramm für eine 6 kW Wechselrichteranlage (Abbildung 6-4) dargestellt. Hierbei erhöht sich die Ausgabeleistung gegenüber dem 5 kW Konzept um ca. 10 % bei einer geringfügigen Kostenerhöhung.

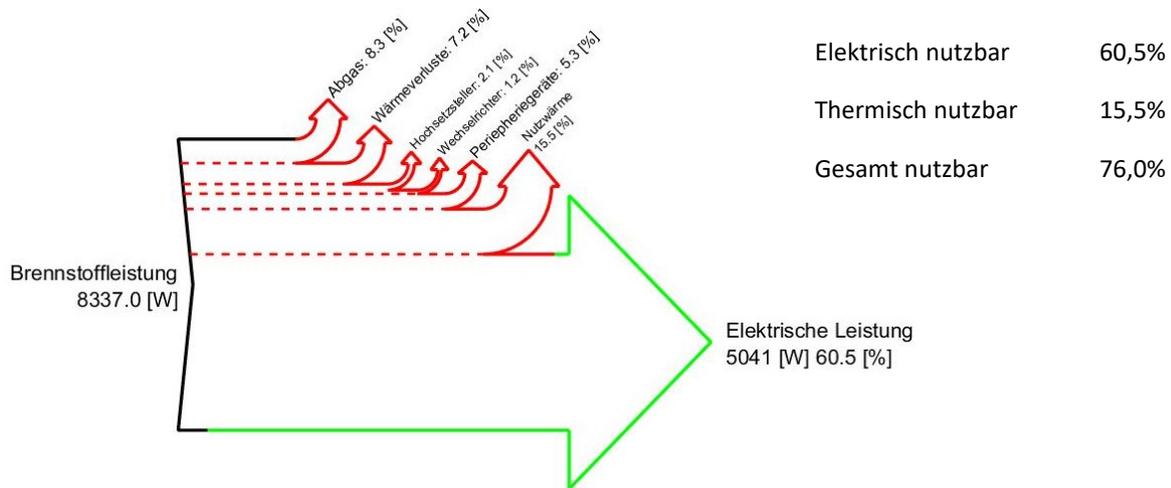


Abbildung 6-5: Sankey-Diagramm 6 kW Wechselrichter [53, 54, 59–61]

### 6.3.1.3 6 kW Wechselrichter mit DC-BUS

Das Konzept mit einem DC-BUS und einem 6 kW Wechselrichters ist ähnlich den vorigen Wechselrichterkonzepten aufgebaut. Durch den Einsatz eines 6 kW Wechselrichters und einer internen Versorgung der Gebläse, lässt sich die Ausgangsleistung weiter erhöhen. Jedoch besitzt dieses Konzept den Nachteil der verstärkten Komplexität, auf Grund der internen Vermaschung, was zusätzlich zu höheren Kosten führt.

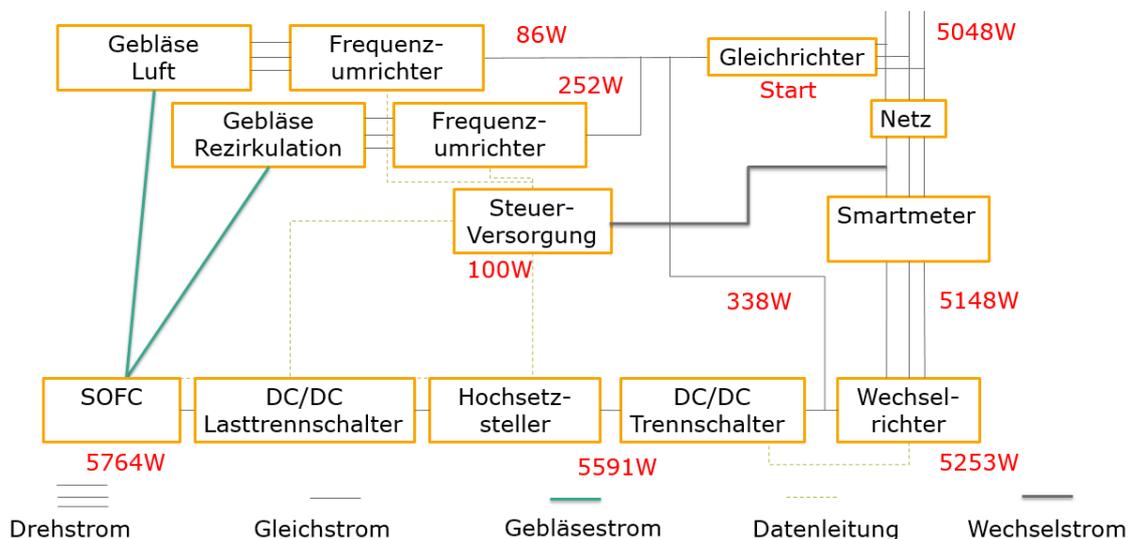


Abbildung 6-6: Netzparallelbetrieb 6 kW Wechselrichter mit DC-BUS [53, 54, 60, 61]

In Abbildung 6-7 werden alle Verluste des 6 kW Schema mit DC-BUS in einem Sankey-Diagramm für das Konzept in Abbildung 6-6 dargestellt. Man erhält hierbei ein Wirkungsgradmaximum für ein Netzparallelbetriebskonzept. Jedoch ist von diesem Konzept auf Grund der Komplexität und der geringfügigen Gewinnung an Leistung abzuraten.

Zusätzlich entstehen durch die Nutzung der 600 V Ebene höhere Kosten für das Gebläse und den dafür eingesetzten Umrichter.

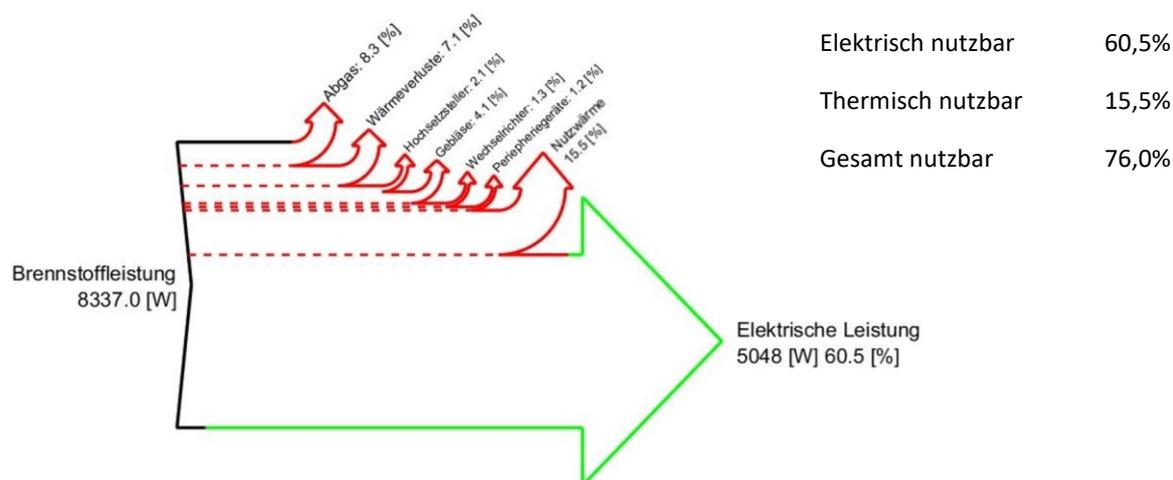


Abbildung 6-7: Sankey-Diagramm 6 kW Wechselrichter mit DC-BUS [53, 54, 60, 61]

### 6.3.2 Notstrom-Inselbetrieb

Die Konzepte für den Notstrom-Inselbetrieb sind alle so ausgelegt, dass diese mit einer Batterie ausgestattet sind und die Möglichkeit besitzen, vom reinen Netzbetrieb in den Inselbetrieb umzuschalten. Diese Konzepte sind jedoch nicht dafür ausgelegt, um als unterbrechungsfreie Stromversorgung zu agieren, da sich die Anlage kurz abschaltet und nach einigen Überprüfungen wieder in den Inselbetrieb startet. Dabei ist es jedoch essentiell die Verbraucherzweige aufzuteilen, und nur die nötigsten Verbraucher am Inselsystem zu lassen. Dadurch wird garantiert, dass die Anlage ausreichend Energie liefert, um die essentiellen Anwendungen möglichst lange aufrecht zu erhalten.

Im Notstrom-Inselbetrieb werden ebenso wie im Netzparallelbetrieb ausschließlich die Vollastpunkte betrachtet, da es auf Grund der Batterie schwierig ist, geeignete Erkenntnisse aus Teillastpunkten zu beziehen. Diese können die Betrachtung je nach Ladestrategie leicht verfälschen, weshalb ausschließlich die Wirkungsgrade des Volllastpunktes von den Datenblättern der einzelnen Komponenten herangezogen wurden. Bei realer Vermessung können dadurch kleinere Abweichungen von den Datenblättern entstehen, die aber für die Konzepte vernachlässigbar sind.

#### 6.3.2.1 5 kW Wechselrichter mit Batterie

Die Konzepte des Notstrom-Inselbetriebes sind wie in Abbildung 6-8 aufgebaut. Das SOFC Stack erzeugt elektrische Gleichstromleistung mit einer niedrigen Spannung und einem hohen Strom. Diese Leistung gelangt über den Lasttrennschalter an den Hochsetzsteller, wo

die Spannung angehoben und das Stromniveau gesenkt wird. Die Spannung wird dabei auf ein für den Wechselrichter optimales Niveau hochgesetzt. Die Energie wird danach über den Trennschalter an den Eingang des Wechselrichters geleitet, wodurch dieser den Gleichstrom in einen Drehstrom umwandelt. Die Leistung die in das elektrische Netz eingespeist wird, wird teilweise von den internen Verbrauchern selbst benötigt. Diese Verbraucher beinhalten die Umrichter der Gebläse, sowie die Versorgungssignale der Steuerung. Die nutzbare Energie wird über das Smartmeter in das Netz bzw. bei Bedarfsfall im Inselbetrieb in eine Batterie die am Wechselrichter gekoppelt ist, gespeist.

Bei einem Netzausfall würde in diesem Fall das elektrische Netz von der eigentlichen Anlage getrennt werden. Anschließend würde das System selbst nach einer anfänglichen Überprüfung des Isolationswiderstandes den Betrieb wiederaufbauen. Jedoch würde nur der Verbraucherteil für den Notbetrieb mit Energie versorgt werden und die anderen Verbraucher unversorgt bleiben. Um die Energiebilanz für dieses Konzept zu bilanzieren, ist es notwendig eine Batterie im System zu laden bzw. zu entladen. Jedoch sollte der Notstrom-Inselbetrieb nicht von Dauer sein, da eine asymmetrische Belastung den Wechselrichter stärker beansprucht, wie der herkömmliche Betrieb.

Im Netzparallelbetrieb hat dieses Konzept nur bedingt Anwendungsfälle, da dieses System oft geregelt und im Teillastbereich betrieben werden müsste. Im Volllastbetrieb hat ein solches Konzept auf Grund der geringen Ausgangsleistung keine vernünftige Anwendung, da eine Entladung der Batterie praktisch nicht stattfindet.

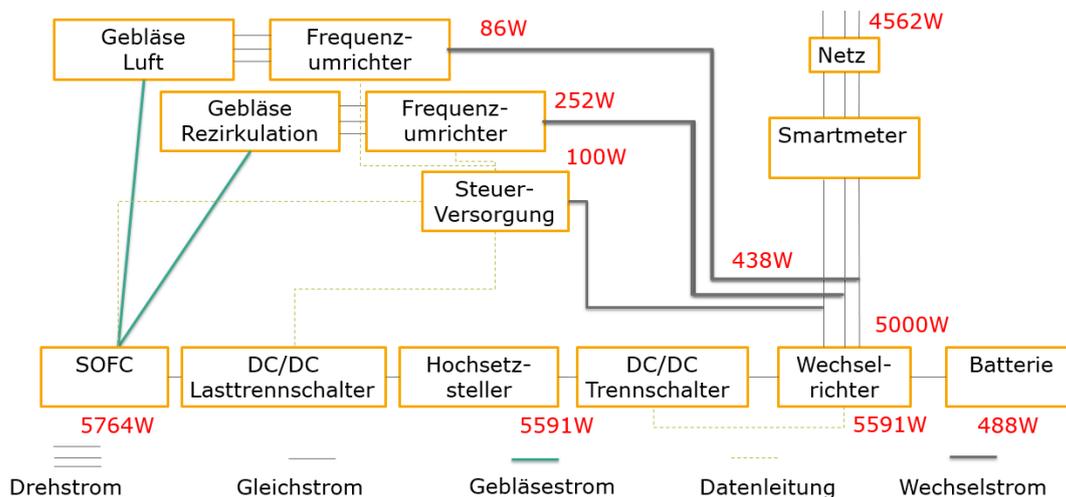


Abbildung 6-8: Notstrom-Inselbetrieb 5 kW Wechselrichter [25, 32, 53, 54, 59–61]

In Abbildung 6-9 werden alle Verluste des Konzeptes, das in Abbildung 6-8 dargestellt ist, in einem Sankey-Diagramm mit einem Energiespeicher dargestellt. Jedoch zeigt dieses Sankey-Diagramm nur einen Volllastbetrieb, der die absolut umgewandelte Leistung stark

verzerrt. Dadurch wird die Energie die in die Batterie gespeichert wird nur statisch betrachte, da diese im Vollastbetrieb nicht entladen werden kann.

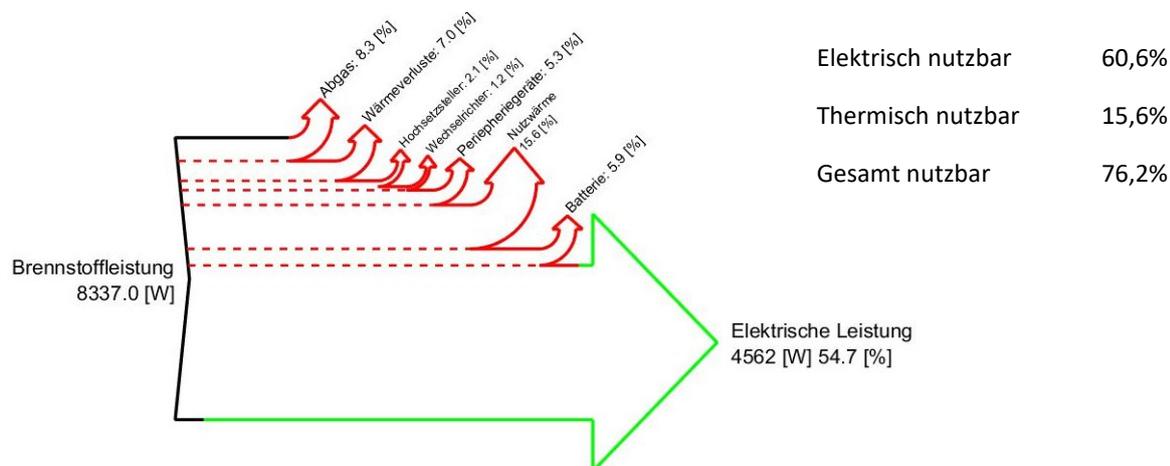


Abbildung 6-9: Sankey-Diagramm 5 kW Wechselrichter mit Batterie [25, 32, 53, 54, 59–62]

### 6.3.2.2 5 kW Wechselrichter mit DC-BUS

Das in Abbildung 6-10 dargestellte Konzept zeigt eine verzweigte Realisierung einer 5 kW Wechselrichteranlage. Hierbei ist das System bis nach dem Trennschalter, exakt gleich aufgebaut wie das herkömmliche 5 kW Schema. Danach wird jedoch ein DC-BUS verwendet, um einen Teil der überschüssigen Energie die am Wechselrichter verloren ginge, in den Zwischenkreis der Gebläseumrichter einzuspeisen. Durch eine passende Spannungsauslegung des Hochsetzstellers ist eine problemlose Kopplung mit dem Umrichter möglich. Jedoch verkompliziert sich dadurch die Gebläseansteuerung, da es durch eine solche Auslegung zu einer Spannungsanhebung im Zwischenkreis kommt, wodurch die Umrichter und die Gebläse neu konzipiert werden müssen. Durch eine solche Gebläsesteuerung entsteht zusätzlich ein teureres Umrichterkonzept, um die gleiche Ausgangsfrequenz zu leisten. [51]

Durch die Leistungsabzweigung in diesem Konzept würde weniger Energie am 5 kW Wechselrichter verloren gehen. Das Konzept benötigt jedoch einen zusätzlichen Gleichrichter, der beim Betriebsstart der SOFC Anlage, die Gebläse mit elektrischer Leistung versorgt. Der Gleichrichter würde die Gebläse vom Stillstand weg antreiben und so das SOFC System durch die Gebläse auf Betriebstemperatur bringen. Zusätzlich besitzt dieses Konzept einen Energiespeicher, der überschüssige Energie speichert und im Teillastbetrieb aus der Batterie entnimmt. [60]

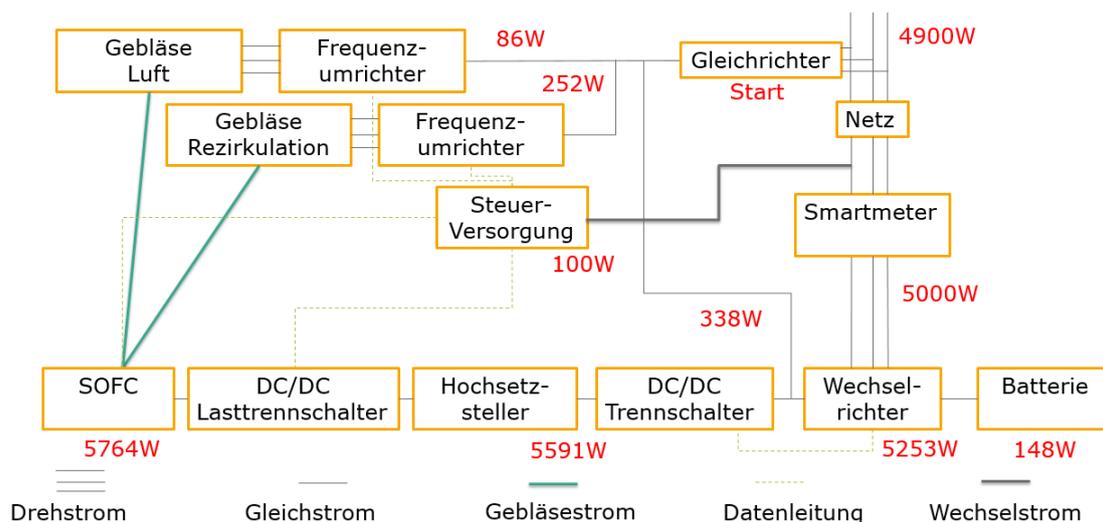


Abbildung 6-10: Notstrom-Inselbetrieb 5 kW Wechselrichter mit DC-BUS [53, 54, 59–61]

In Abbildung 6-11 werden alle Verluste des verzweigten 5 kW Wechselrichterkonzepts (Abbildung 6-10) in einem Sankey-Diagramm dargestellt. Durch dieses Konzept, erlangt man eine deutliche Leistungs- bzw. Wirkungsgradsteigerung, gegenüber dem reinen 5 kW Konzept. Des Weiteren besteht die Möglichkeit die Steuerversorgung aus dem Zwischenkreis zu entnehmen, wodurch eine Lieferung von 5 kW elektrisch möglich ist. In diesem Konzept lässt sich bei Bedarf aus Kostengründen auf den Batteriespeicher verzichten.

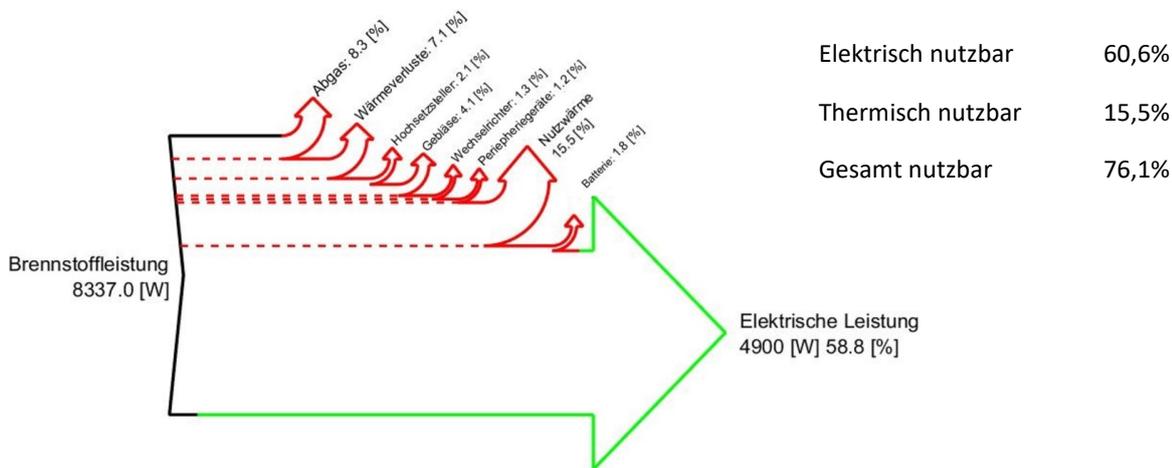


Abbildung 6-11: Sankey-Diagramm 5 kW Wechselrichter mit Batterie und DC-BUS [53, 54, 59–61]

### 6.3.2.3 6 kW Wechselrichter mit Batterie

Das Konzept ist identisch dem 5 kW Wechselrichtersystem aufgebaut, jedoch mit einem zusätzlichen Energiespeicher. Dadurch besitzt dieses System den Vorteil, dass auch das SOFC Stack in Vollast betrieben werden kann und dadurch keine Leistung in die Batterie gespeist werden muss. Die gesamte erzeugte Leistung kann in das Netz geliefert werden und im Bedarfsfall auch gespeichert werden. Dadurch weist dieses System eine größere Flexibilität

auf, als jenes des 5 kW Wechselrichters. So kann im Bedarfsfall eine maximale Leistung von 6 kW geliefert werden, in dem die Batterie entleert wird. Dadurch kann das System sowohl in Voll- bzw. Teillast mit sehr geringen Verlusten optimal betrieben werden. Dieses Konzept bringt jedoch auf Grund des Einsatzes einer Batterie höhere Kosten mit sich.

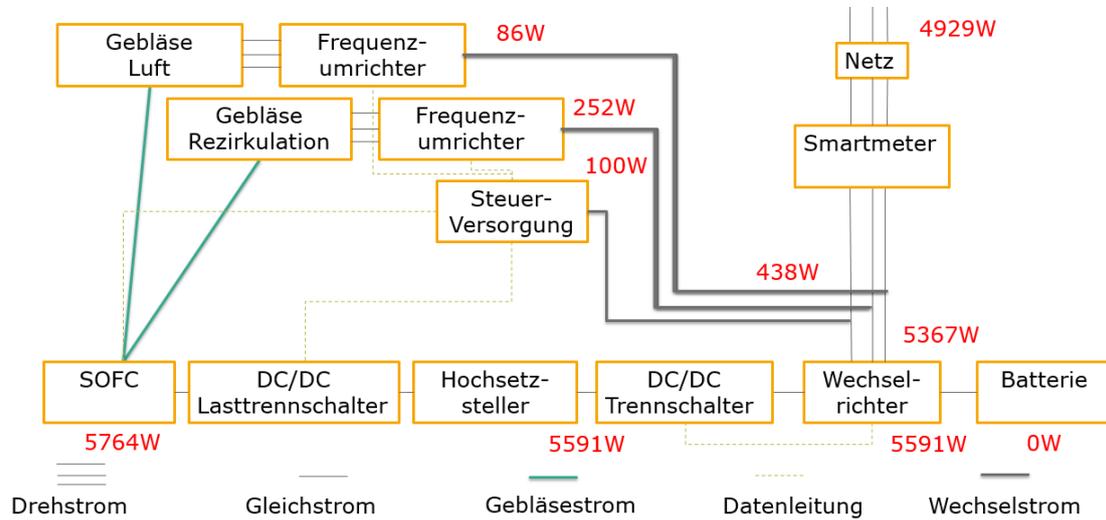


Abbildung 6-12: Notstrom-Inselbetrieb 6 kW Wechselrichter [53, 54, 59, 61–63]

In Abbildung 6-13 werden alle Verluste in einem Sankey-Diagramm für das Konzept in Abbildung 6-12 dargestellt. Jedoch wird in diesem Diagramm darauf verzichtet, Energie in die Batterie einzuspeisen, sondern liefert die ganze Leistung in das elektrische Netz.

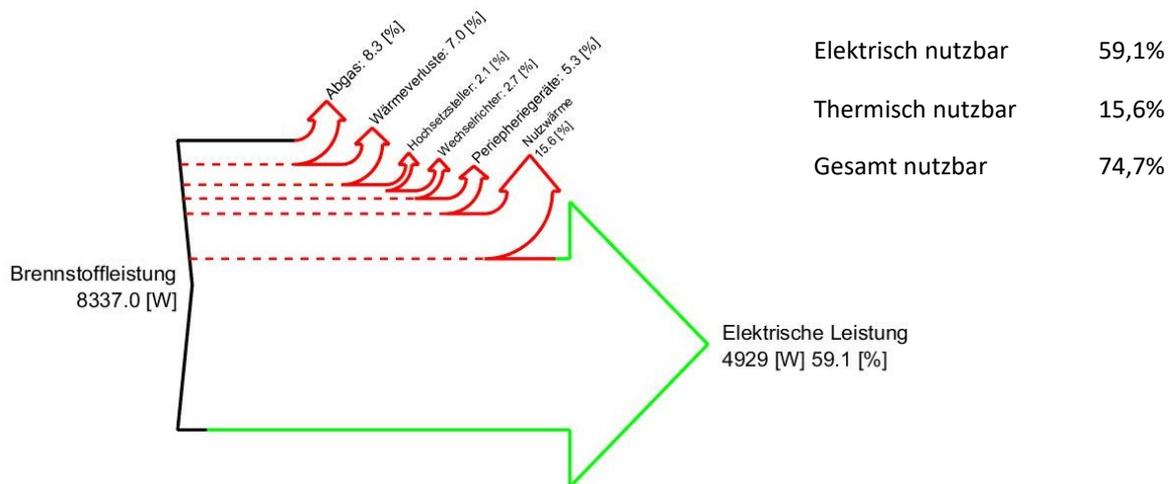


Abbildung 6-13: Sankey-Diagramm 6 kW Wechselrichter mit Batterie [53, 54, 59, 61–63]

### 6.3.3 Konzeptvergleich

Die Ergebnisse der einzelnen Konzepte sind als Überblick in Tabelle 6-1 dargestellt.

*Tabelle 6-1: Konzeptvergleich*

Wechselrichter Bezeichnung	Typ	Leistung in das elek. Netz	Leistung in die Batterie	Leistung gesamt	Betriebsart
System mit Batterie					
Kostal	6 kW	4929 W	0 W	4929 W	Voll- und Teillast möglich
Fronius Symo Hybrid	5 kW	4562 W	488 W	5050 W	Teillast erforderlich
System ohne Batterie					
Fronius Hybrid	6 kW	5041 W	-	5041 W	Voll- und Teillast möglich
Fronius Hybrid	5 kW	4562 W	-	4562 W	Voll- und Teillast möglich
System mit DC-BUS-System					
Fronius Hybrid	6 kW	5048 W	-	5048 W	Voll- und Teillast möglich
Fronius Symo Hybrid	5 kW	4900 W	148 W	5048 W	Teillast erforderlich

Die Konzepte die in Tabelle 6-1 dargestellt sind, sind je nach Anwendungsfall unterschiedlich zu betrachten. Grundsätzlich kann man sagen, dass die Systeme mit einem DC-BUS einen besseren Wirkungsgrad gegenüber den anderen Konzepten besitzen, diese jedoch auf Grund der Komplexität nicht bevorzugt werden. Des Weiteren ist der Leistungsgewinn durch diese komplexen Konzepte überschaubar, da die Wechselrichter selbst bereits einen sehr hohen Wirkungsgrad besitzen und dadurch kaum ein Leistungszuwachs erzielt werden kann. Weiters ist auf Grund dieser Schaltung ein Gebläseumrichter zu verwenden, der ein externes Netzteil benötigt, wodurch es erst möglich ist die Spannung nach dem Hochsetzsteller in den Zwischenkreis zurückzuspeisen. Bei normalem Netzbetrieb ergibt sich dadurch kein wesentlicher Vorteil gegenüber den anderen Konzepten. Des Weiteren muss die Zwischenkreisspannung des Gebläseumrichters erhöht werden, was prinzipiell möglich ist, aber Einfluss auf die Gebläsemotoren hat. Dadurch müssen die Motoren auf eine höhere Spannung ausgelegt werden, was höhere Kosten verursacht. Aus diesen Gründen und dem weiteren zusätzlichen Regelaufwand ist von einem solchen Konzept mit DC-BUS abzuraten.

Es wäre möglich noch andere Konzepte mit einem DC-BUS zu betrachten, die aber auf Grund der Komplexität nicht angeführt wurden.

Betrachtet man die übrigen vier Konzepte, erhält man je zwei Konzepte für den reinen Netzparallelbetrieb und zwei für den Notstrom-Inselbetrieb. Im Vergleich der beiden Konzepte für den reinen Netzparallelbetrieb, weist die Fronius Hybrid Ausführung mit einer Ausgabelleistung von 6 kW deutliche Vorteile gegenüber dem 5 kW Modell auf. Da das Gesamtkonzept auf eine bereits bestehende Brennstoffzelle ausgelegt ist, können keine Änderungen an der Eingangsleistung in den Hochsetzsteller vorgenommen werden. Aus diesem Grund würden sich beim 5 kW Wechselrichter große Verluste ergeben, da die Ausgangsleistung zu klein dimensioniert wäre. Auf diese Weise würde die überschüssige Leistung die vom Hochsetzsteller geliefert wird, als Wärme abgeführt werden. Da es sich bei der Eingangsspannung in den Wechselrichter um eine Gleichspannung in einer Höhe von 600 V handelt, kann man diese auch nicht direkt für den Betrieb von Peripheriegeräten verwenden. Dadurch müssen sämtliche Peripheriegeräte vom elektrischen Netz gespeist werden, was die abgegebene Leistung des gesamten SOFC Systems verringert. Durch diese Beschränkung geht ein großer Teil an Leistung bereits am Eingang des Wechselrichters verloren. Eine Möglichkeit diese elektrische Energie zu nutzen, wäre diese über einen dafür ausgelegten Heizwiderstand als thermische Nutzwärme zu nutzen [64]. Dadurch würde sich die thermische Nutzenergie der SOFC Anlage erhöhen.

Das wesentlich effizientere Konzept würde bei einem Konzept ohne Batterie der 6 kW Wechselrichter darstellen. Dieser wandelt die elektrische Leistung mit einem sehr hohen Wirkungsgrad um und liefert diese ohne zusätzliche Verluste in das elektrische Netz. Dabei können die Peripheriegeräte direkt am Netz gespeist werden und es ist zusätzlich garantiert, dass mehr als 5 kW in das elektrische Netz eingespeist werden.

Betrachtet man nun die Konzepte die für einen Notstrom-Inselbetrieb geeignet sind, werden grundsätzlich immer Batterien für solche Konzepte benötigt. Dadurch ergibt sich eine höhere Investitionsanforderung gegenüber Konfigurationen mit reinem Netzparallelbetrieb. Jedoch ergibt sich daraus der Vorteil, dass die Anlage auch bei Netzausfällen weiter betrieben werden kann. Dies ist möglich, da die Peripheriegeräte über die integrierte Batterie betrieben werden und so auch gewisse Verbraucher versorgt werden können. Nach einer gewissen Anlaufzeit wird die Energie dieser Geräte jedoch wieder von der Brennstoffzelle selbst übernommen. Zusätzlich lässt sich auch eine Lastregelung sehr einfach realisieren, die bei Bedarf Energie in die Batterie einspeist bzw. bezieht. Dadurch ist eine nahezu komplette Eigendeckung der elektrischen Energie möglich. Bei diesem Notstrom-Inselbetrieb arbeitet die Anlage jedoch hauptsächlich im Netzparallelbetrieb, da auf Grund der stärkeren

Belastung im Inselbetrieb, nicht die komplette Betriebszeit in diesem verbracht werden darf [32]. Im Prinzip unterscheidet man bei diesen Konzepten wie bereits im Netzparallelbetrieb zwischen einer 5kW und einer 6 kW Anlage. Grundsätzlich arbeiten die beiden Anlagen nach dem gleichen Konzept, jedoch ergibt sich auf Grund der unterschiedlichen Hersteller eine geringfügige Wirkungsgradabweichung. Aus diesem Grund entstehen unterschiedliche Leistungen die die beiden Wechselrichter maximal in das elektrische Netz liefern können, wobei das 5 kW Konzept durch die Ausgangsleistung des Wechselrichters begrenzt ist. Dadurch bilden sich Einschränkungen bezüglich des Betriebspunktes der Brennstoffzelle, wodurch bei einem dauerhaft Betrieb Energie in die Batterie eingespeist, bzw. bei einer vollen Batterie elektrische Energie in Abwärme umgewandelt wird. Infolgedessen sollte das 5 kW Konzept eher im Teillastbetrieb betrieben werden, um bei Bedarf die Batterie zu entladen.

Bei der Ausführung des 6 kW Wechselrichters ergibt sich keine technische Einschränkung bezüglich der Betriebspunkte. Das System kann dauerhaft im Volllastpunkt betrieben werden und bei einer Überdeckung des Eigenverbrauchs, die überschüssige Energie in die Batterie speichern. Diese kann bei Bedarf einer höheren Leistung als die maximale Brennstoffzellenleistung abgerufen werden. Dadurch lässt sich das System besonders gut regeln und kann so auch gewisse Energiespitzen abfangen bzw. bereitstellen. So lässt sich die Erzeugerleistung unabhängig vom Lastprofil steuern und im Volllastpunkt betreiben. Prinzipiell haben sowohl das 5 kW bzw. das 6 kW Schema ihren Anwendungsbereich im Volllast- bzw. Teillastbereich, jedoch besitzt die 6 kW Anlage gegenüber der 5 kW Anlage den Vorteil mehr Leistung in das Netz zu liefern, bzw. den Betriebspunkt frei zu wählen.

Dadurch ergeben sich für die unterschiedlichen Anwendungen einsetzbare Konzepte, die ihre Berechtigung besitzen. Aus ökonomischer Sicht ist für das beschriebene Einsatzszenario jedoch die 6 kW Wechselrichterlösung ohne Speicher zu bevorzugen, da diese für eine herkömmliche Netzeinpeisung völlig ausreichend ist. Die Konzepte mit Batterien können für spezielle Anwendungen und in einem Notstrom-Inselbetrieb eingesetzt werden. Diese Konzepte müssen aber auf das gegebene Leistungsprofil abgestimmt werden, um eine optimale Abstimmung zu erlangen.

## 6.4 Umschaltung der Betriebszustände

Eine Aufrechterhaltung der eigenen Energieerzeugung bei einem Netzausfall kann mittels eines Inselbetriebes durchgeführt werden. Hierbei ist es wichtig die SOFC Anlage vom elektrischen Netz zu entkoppeln, um ein Inselnetz aufzubauen. Das Inselnetz muss die Energie die es erzeugt auch selbst wieder verbrauchen. Um dies zu realisieren muss die Energieerzeugung stark geregelt werden, was in der Realität schwer umzusetzen ist. Abhilfe schafft man sich hierbei durch den Einsatz einer Batterie als Pufferspeicher. Häufig werden Batterien eingesetzt, um zusätzlich eine unsymmetrische Belastung auszugleichen, wobei es jedoch zu keiner kompletten asymmetrischen Belastung im Netz kommen darf.

Um eine netzparallelbetriebene Anlage vom Netzbetrieb in den Inselbetrieb umzuschalten, ist es notwendig die Anlage bereits dementsprechend zu planen, was einen Einfluss auf die elektrische Verschaltung der Anlage hat. Zusätzlich benötigt eine solche Anlage einen Energiespeicher, um den Verbrauch und die Erzeugung auszugleichen.

Das Wechselrichtersystem kann im elektrischen Netzbetrieb stärker belastet werden als im Inselbetrieb. Da zu jeder Zeit ausreichend elektrische Leistung geliefert werden muss, sollte man die Verbraucher im Notstrom-Inselbetrieb in verschiedene Energiezweige aufteilen. Die Auftrennung sollte dabei nach Versorgungsprioritäten erfolgen, wobei elektrische Verbraucher die dringend für den Betrieb benötigt werden, versorgt werden sollen. Die Verbraucher die im Bedarfsfall verzichtbar sind, sollen auf einen normalen Lastzweig verschalten werden, die im Notstrom-Inselbetrieb nicht versorgt werden.

Um eine solche Trennung durchzuführen sind mehrere Umschaltschütze notwendig. Zusätzlich wird in manchen Ländern auch noch eine externe ENS zur Netzausfallerkennung vorgeschrieben, die in diese Schaltung eingegliedert werden muss. Prinzipiell sind solche Notstrom-Inselbetriebsanlagen je nach Ländervorschrift, auf Grund der unterschiedlichen Netzstrukturen und deren Normen zu installieren. In Österreich ist eine Inselbetriebsanlage wie in Abbildung 6-14 mit einem externen ENS aufzubauen. [32]

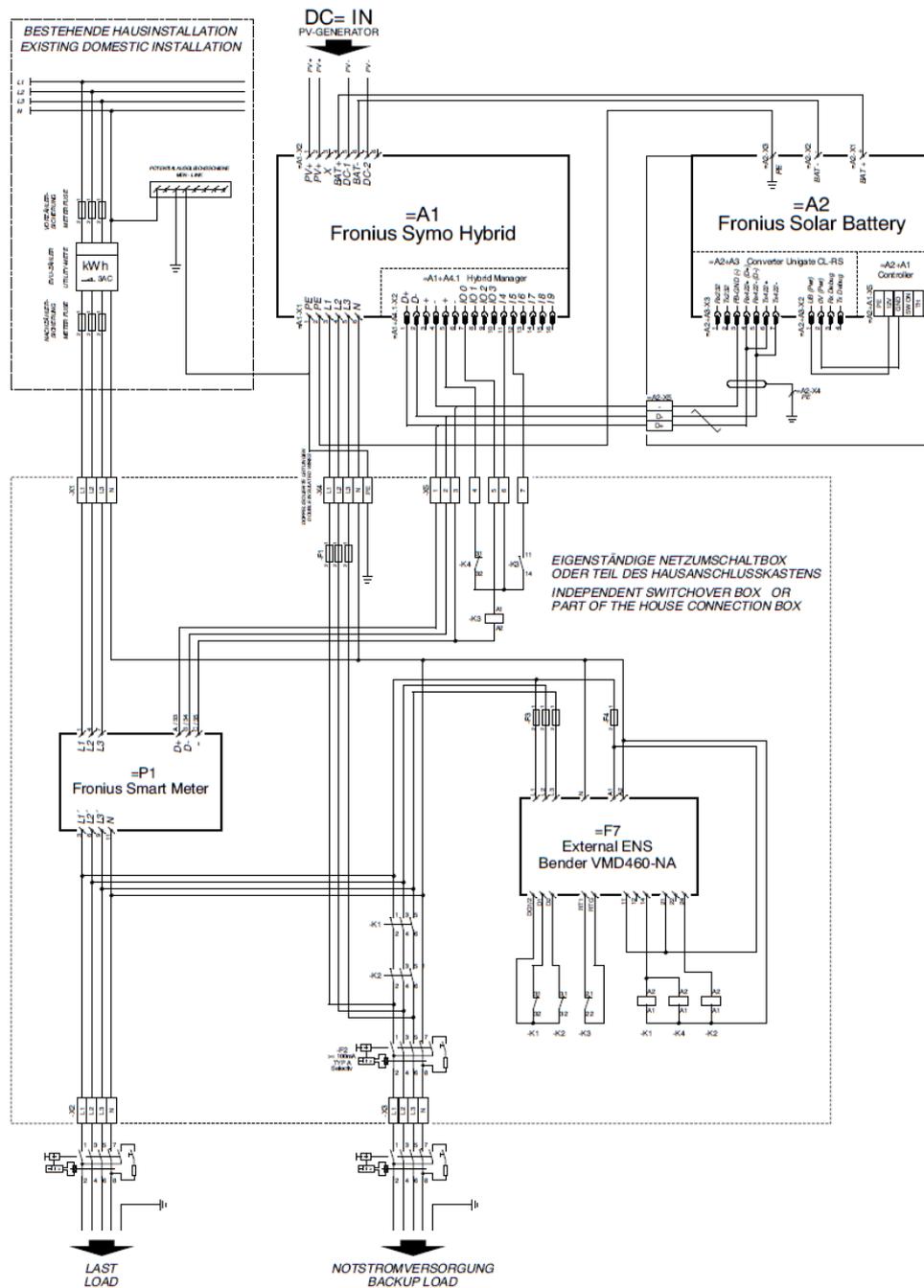


Abbildung 6-14: Inselbetrieb Installation Österreich [32]

Allgemein sind solche Inselbetriebsanlagen nur als Notstrom-Inselbetriebe zu betreiben. Die Hersteller vom Wechselrichter geben aus technischen Restriktionen vor, dass sich die Anlage nur zu einem gewissen Teil seiner Betriebszeit im Inselbetrieb befinden darf. Der österreichische Hersteller Fronius schreibt deren Wechselrichtern vor, dass diese maximal 15 % ihrer Gesamtbetriebszeit, beziehungsweise nicht mehr als 1500 h im Inselbetrieb verharren dürfen. Bei einer Überschreitung dieser Vorgabewerte kann durch eine starke technische Beanspruchung, eine Schädigung der Anlage stattfinden. [32]

## 7 ZUSAMMENFASSUNG & AUSBLICK

Die elektrische Netzeinspeisung kann mittels des indirekten Konzeptes realisiert werden, was anhand dieser Masterarbeit ausreichend untersucht und getestet wurde. Dieses indirekte Einspeisekonzept besteht aus der Verschaltung eines Hochsetzstellers und eines Wechselrichters. Um den Wirkungsgrad der elektrischen Einspeisung zu optimieren gibt es unterschiedliche Möglichkeiten. Die Effizienz der elektrischen Netzeinspeisung einer SOFC Anlage setzt sich dabei aus den beiden Komponenten, Hochsetzsteller und Wechselrichter zusammen. Die Wirkungsgrade des Hochsetzstellers sowie auch des Wechselrichters sind jedoch prinzipiell von den beiden Parametern, der Eingangsspannung und der Eingangsleistung, abhängig. (siehe Kapitel 5.2.1)

Die Effizienz des Hochsetzstellers ist durch die Restriktion der SOFC Parameter zu betrachten, sodass dieser einen Wirkungsgrad von ca. 94 % erreicht. Dieser Wirkungsgrad bricht jedoch bei niedrigeren Leistungen bezogen auf seine Nennleistung stark ein. Der DC/DC Wandler muss deshalb je nach Brennstoffzellenparameter optimal für diese ausgelegt sein. Bei dieser Konfiguration handelt es sich um eine herstellereigenspezifische Anfertigung, wodurch das Gerät modular aufgebaut wurde. Bei einer genauen Anpassung des Eingangsspannungsbereichs, wäre es möglich den Wirkungsgrad noch geringfügig zu steigern. Eine komplette Kompensation der Verluste ist jedoch nicht möglich, da eine Wirkungsgradsteigerung auch mit der Spannungsdifferenz zusammenhängt. Ist der Spannungsunterschied zwischen Eingang und Ausgang des Hochsetzstellers sehr klein, erhöht sich der Wirkungsgrad des Hochsetzstellers. So kann durch Herabsetzen der Ausgangsspannung auf 400 V ein Wirkungsgrad von mehr als 98 % erreicht werden, was jedoch wieder negativen Einfluss auf die Effizienz des Wechselrichters hat.

Prinzipiell kann durch den Einsatz eines Hochsetzstellers der Wirkungsgrad des Wechselrichters laut Datenblatt nicht erreicht werden. Dies geschieht auf Grund der Oberwellen die durch den Hochsetzsteller erzeugt werden. So wäre es theoretisch möglich, dass der Wirkungsgrad des Hochsetzstellers durch eine Spannungsanpassung von 94 % auf 98 % angehoben wird. Gleichzeitig würde dies jedoch ein Absinken des Wechselrichterwirkungsgrad von theoretischen 98 % auf 96,5 % bewirken. Durch diese Adaption würde der Gesamtwirkungsgrad der Anlage auf 92 % steigen, der zusätzlich durch eine Filterung der Oberwellen, am Hochsetzstellereingang weiter erhöht werden kann.

Eine kleinere Einschränkung des Einspeisesystems stellt auch die Dynamik dar. Das System hinkt bei diesem Einspeisemodell der Realzeit hinterher. Durch Vorgabe des Sollwertes über die LabView Oberfläche muss das Programm die Werte über einen TCP Modbus an den

Wechselrichter senden. Anschließend verarbeitet der Wechselrichter diesen Sollwert und wird bei diesem Lastpunkt betrieben. Für die Verarbeitung des Sollwert-Signales benötigt der Wechselrichter jedoch eine Zeitspanne von 2-3 s. Anschließend verarbeitet der Wechselrichter das Signal sehr schnell und kann große Lastsprünge innerhalb von einer Sekunde (siehe Kapitel 5.2.2) liefern.

Des Weiteren darf bei Einsatz eines Wechselrichters und eines Hochsetzstellers der Flickerfaktor oder der Anteil an Oberschwingungen nicht zu hoch sein, um in das Netz einspeisen zu können. Das angewendete Konzept erzeugt zum aktuellen Zeitpunkt einen zu großen Anteil an Oberschwingungen die in das elektrische Netz eingetragen werden. Eine mögliche Abhilfe wäre ein geeignetes Filterelement (z.B. eine Kapazität) am Eingang des Hochsetzstellers zu verwenden, um diese Netzstörungen zu minimieren.

Diese Eigenschaften sind prinzipiell auf die jetzige indirekte Einspeisung anzuwenden. In naher Zukunft sollte jedoch eine Bestrebung darin liegen, den Hochsetzsteller in den Wechselrichter zu integrieren und dabei eine kompaktere und kostengünstigere Einspeisungsmöglichkeit zu schaffen, die speziell auf die Eigenschaften der SOFC abgestimmt sind.

Auch die Einbindung der einzelnen Peripheriegeräte hat großen Einfluss auf die Eigenschaften des Gesamtkonzepts. Der Wirkungsgrad kann zum Beispiel durch das frühere Abzweigen der internen Versorgungsleistung gesteigert werden. Jedoch müssen diese Geräte mit den geeigneten Parametern der elektrischen Leistung ausgestattet werden. Dabei spielt neben der Spannungsform, auch die Spannungshöhe eine entscheidende Rolle, sodass die Funktion der Geräte aufrechterhalten bleibt. Anhand dieser unterschiedlichen Möglichkeiten lassen sich Konzepte für einen Netzparallelbetrieb wie auch für einen Inselbetrieb aufbauen. Dabei ist jedoch entscheidend, dass eine geeignete Konfiguration für den jeweiligen Betriebsmodus ausgeführt wird. Prinzipiell ist ein Einspeisekonzept mit 6 kW ohne Batterie zu bevorzugen, da es die geringsten Kosten verursacht und das System selbst kaum Bedarf hat in einen Notstrom-Inselbetrieb über zu gehen.

## 8 DISKUSSION

In diesem Kapitel werden einige Punkte bezüglich der Versuche besprochen, die die ermittelten Ergebnisse verzerren oder durch gewisse Annahmen vereinfacht wurden.

### 8.1 Annahmen

Bei den durchgeführten Versuchen der Charakterisierung der Leistungselektronik wurde ausschließlich die Spannungs- und Leistungskennlinie einer neuen Brennstoffzelle herangezogen. Hierbei wurde der Degradationsgrad der Brennstoffzelle vernachlässigt, der ein Absinken der elektrischen Spannung verursacht und dadurch zu unterschiedlichen Messergebnissen führen würde. Bei den dargestellten Versuchen wurde ausschließlich der Volllastpunkt einer nicht degradierten Brennstoffzelle herangezogen und auf die Komponentenfunktion getestet, die bestanden wurde.

Des Weiteren wurden die Messungen bei einer sehr kühlen Umgebung (18 °C) durchgeführt, wodurch die Temperaturabhängigkeit der einzelnen Komponenten auf Grund der ausreichenden Kühlung nicht ermittelt werden konnte. So wurde eine Annahme getroffen, dass die Komponenten temperaturunabhängig sind, was bis zu einer Temperatur von 40 °C der Realität entspricht. [25, 62] Bei einer Überschreitung dieser Temperatur kommt es jedoch sowohl beim Hochsetzsteller als auch beim Wechselrichter zu Leistungseinbußen.

Bei der Konzepterstellung wurden ausschließlich die Herstellerwirkungsgrade zur Berechnung der Konzepte herangezogen, welche aber von den gemessenen Messwerten abweichen, jedoch eine aufschlussreiche Tendenz ergaben.

### 8.2 Verzerrungen

Eine Verzerrung der einzelnen Messergebnisse ist möglich, da das elektrische Einspeisekonzept ausschließlich durch eine elektrische Spannungsquelle anstatt einer Brennstoffzelle simuliert wurde. Durch den Einsatz einer realen Zelle kann auf Grund des Temperaturverhaltens, der Brennstoffzusammensetzung und Bauteilalterung ein entsprechend anderes Verhalten auftreten.

Des Weiteren kann eine Abweichung auf Grund der elektrischen Messgenauigkeit auftreten. Die elektrische Messung wurde vor ihrer Verwendung kalibriert, wies jedoch noch immer kleinere Abweichungen zum Sollwert auf, da es sich um eine nichtlineare Abweichung handelte. Die lineare Abweichung und die Offsetabweichung wurden vor der Versuchsdurchführung behoben. Die Abweichungen können auch auf Grund der stark verzerrten Strom- und Spannungswerte des Systems hervorgerufen werden.

## 9 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] TÖPLER J. UND LEHMANN J.: *Wasserstoff und Brennstoffzelle : Technologien und Marktperspektiven*. Berlin : Springer Vieweg, 2014 (SpringerLink)
- [2] ROSENKRANZ A.: *Die Brennstoffzelle: Eine stromerzeugende Heizung*. URL <https://heizung.de/brennstoffzelle/> – Überprüfungsdatum 2018-03-09
- [3] DROSTE-FRANKE B.: *Brennstoffzellen und virtuelle Kraftwerke : Energie-, umwelt- und technologiepolitische Aspekte einer effizienten Hausenergieversorgung*. Berlin u.a. : Springer, 2009 (Ethics of science and technology assessment 36)
- [4] OERZEL D. UND FLEISCHER T.: *TA-Projekt "Brennstoffzellen-Technologie" : Endbericht*. URL <https://www.tab-beim-bundestag.de/de/pdf/publikationen/berichte/TAB-Arbeitsbericht-ab067.pdf> – Überprüfungsdatum 2018-01-24
- [5] WURSTER R. ZERTA M. ALBRECHT U.: *Band 5 der Schriftenreihe Wasserstoff und Brennstoffzellen : Stationäre Brennstoffzellen-Anwendungen*. URL [https://www.h2bz-hessen.de/mm/mm001/Stationre\\_BZ-Anwendungen\\_WEB.pdf](https://www.h2bz-hessen.de/mm/mm001/Stationre_BZ-Anwendungen_WEB.pdf) – Überprüfungsdatum 2018-01-10
- [6] KURZWEIL P.: *Brennstoffzellentechnik : Grundlagen, Komponenten, Systeme, Anwendungen*. 2., überarb. u. aktualisierte Aufl. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2013
- [7] PIOCH P., AIGL T. UND JÖRISSEN L.: *Brennstoffzellen-Grundlagen Aufbau und Funktion : Basisseminar Brennstoffzellen- und Wasserstofftechnologie*. URL [http://www.bba-bw.de/files/vortrag\\_bz-grundlagen-wbzu.pdf](http://www.bba-bw.de/files/vortrag_bz-grundlagen-wbzu.pdf)
- [8] SINGHAL S. AND KENDALL K. (Hrsg.): *High temperature solid oxide fuel cells : Fundamentals, design and applications*. Oxford : Elsevier, 2003
- [9] VIRGINA TECH: *Solid Oxide Fuel Cell Diagram*. URL <http://newenergyandfuel.com/http://newenergyandfuel.com/2009/05/29/now-a-self-healing-seal-for-fuel-cells/solide-oxide-fuel-cell-diagram/> – Überprüfungsdatum 2017-11-27
- [10] FORSCHUNGSZENTRUM JÜLICH GMBH: *Wie funktioniert eine Brennstoffzelle?* URL <http://www.fz-juelich.de/portal/DE/Forschung/EnergieUmwelt/Brennstoffzellen/aufbau.html?nn=1424020>. – Aktualisierungsdatum: 2013-12-05 – Überprüfungsdatum 2017-11-27
- [11] SOUKUP N.: *Dynamische Simulation eines stationären SOFC-Systems*. Graz, Technische Universität Graz, Institut für Wärmetechnik. Diplomarbeit. 03/2017

- [12] WEIBENSTEINER S.: *Optimization of the anode circuit of a stationary 5 kW SOFC-fuel cell system with focus on reforming*. Wien, University of Applied Sciences Technikum.  
Master Thesis. 2016-12-12 – Überprüfungsdatum 2018-01-24
- [13] EICHLSEDER H. UND KLELL M.: *Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik : Erzeugung, Speicherung, Anwendung ; mit 24 Tabellen*. 1. Aufl. Wiesbaden : Vieweg + Teubner, 2008 (ATZ/MTZ-Fachbuch)
- [14] HAUTH M.: *Prozessschema SOFC-Anlage*. Email. 2017-10-01. Prikoschnig P. (Adressat)
- [15] VAILLANT DEUTSCHLAND GMBH: *ecoPower 20.0 : Kraft-Wärme-Kopplung*. URL  
<https://www.vaillant.de/downloads-1/prospekte-2/prospekt-ecopower-200-258493.pdf>  
– Überprüfungsdatum 2017-11-15
- [16] BIGALKE U., ARMBRUSTER A., LUKAS F., KRIEGER O., SCHUCH C. UND KUNDE J.: *dena-GEBÄUDEREPORT Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand*.  
Berlin, 11/2016 (8162)
- [17] FUJI N2TELLIGENCE GMBH: *TRIGENERATION : Das Brennstoffzellensystem für zuverlässige und effiziente Energieversorgung mit Strom, Wärme und Klimakälte*. URL  
[http://www.n2telligence.com/documents/n2telligence\\_trigeneration\\_de.pdf](http://www.n2telligence.com/documents/n2telligence_trigeneration_de.pdf) –  
Überprüfungsdatum 2017-11-14
- [18] STRAUß K.: *Kraftwerkstechnik : Zur Nutzung fossiler, nuklearer und regenerativer Energiequellen*. 5., völlig aktual. u. erg. Aufl. Berlin u.a. : Springer, 2006
- [19] GHEZEL-AYAGH H.: *Advances in SOFC Development at FuelCell Energy : Ultra-Clean, Efficient, Reliable Power*. URL  
<https://www.netl.doe.gov/File%20Library/events/2013/seca/Ghezal-Ayagh-14th-Annual-SECA-Workshop---FCE-Team-Presentati.pdf> – Überprüfungsdatum 2017-11-16
- [20] TCHONLA E.: *SOFC-Brennstoffzellen-Kraftwerke für die dezentrale elektrische Energieversorgung*. UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG (Hrsg.). Erlangen : Universität Erlangen-Nürnberg, 2012
- [21] ASUE ARBEITSGEMEINSCHAFT FÜR SPARSAMEN UND UMWELTFREUNDLICHEN ENERGIEVERBRAUCH E.V.: *Mikro-KWK : Motoren, Turbinen und Brennstoffzellen*. URL [https://www.bhkw-infozentrum.de/download/mikro\\_kwk.pdf](https://www.bhkw-infozentrum.de/download/mikro_kwk.pdf) – Überprüfungsdatum 2017-12-07
- [22] KUKUK J.: *KWKK – Strom, Wärme und Kälte aus einer Anlage : Trends, Entwicklungen und Praxisbeispiele aus der Gaswärmepumpentechnik*. URL  
[http://asue.de/sites/default/files/asue/themen/blockheizkraftwerke/index/asue\\_as\\_kwk\\_strom\\_waerme\\_kaelte\\_aus\\_einer\\_anlage\\_01.pdf](http://asue.de/sites/default/files/asue/themen/blockheizkraftwerke/index/asue_as_kwk_strom_waerme_kaelte_aus_einer_anlage_01.pdf) – Überprüfungsdatum 2017-12-04

- [23] REDAKTION BHKW-INFOTHEK: *Einbindung eines BHKW*. URL <https://www.bhkw-infothek.de/bhkw-informationen/technische-grundlagen/einbindung-eines-bhkw/> –  
Überprüfungsdatum 2017-12-04
- [24] SCHWAB A.: *Elektroenergiesysteme : Erzeugung, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie*. 5. Aufl. 2017, 2017
- [25] FRONIUS INTERNATIONAL GMBH: *Fronius Energy Package : Bedienungsanleitung*.  
Netzgekoppelter Wechselrichter. Wels, 17.08.2017 (VI-T1S 2016-06 DE)
- [26] SMA SOLAR TECHNOLOGY AG: *Brennstoffzellen-Wechselrichter HYDRO BOY 1124 / 1324 :  
Technische Beschreibung*. URL <http://files.sma.de/dl/8187/HB1124-TDE093421.pdf> –  
Überprüfungsdatum 2017-11-21
- [27] HAGMANN G.: *Leistungselektronik : Grundlagen und Anwendungen in der elektrischen  
Antriebstechnik ; Mit 209 Abbildungen, Aufgaben und Lösungen*. 5., durchges. u. korr.  
Aufl. Wiesbelsheim : Aula-Verl., 2015
- [28] MARENBACH R., NELLES D. UND TUTTAS C.: *Elektrische Energietechnik : Grundlagen,  
Energieversorgung, Antriebe und Leistungselektronik*. Wiesbaden, s.l. : Springer  
Fachmedien Wiesbaden, 2013
- [29] SCHLIENZ U.: *Schaltnetzteile und ihre Peripherie : Dimensionierung, Einsatz, EMV*. 3.,  
aktualisierte u. erw. Aufl. Wiesbaden : Vieweg, 2007 (Vieweg Praxiswissen)
- [30] JENNI F. UND WÜEST D.: *Steuerverfahren für selbstgeführte Stromrichter*. Zürich : Vdf-  
Hochschulverl. an der ETH Zürich, 1995
- [31] SAHAN B.: *Wechselrichtersysteme mit Stromzwischenkreis zur Netzanbindung von  
Photovoltaik-Generatoren*. Zugl.: Kassel, Univ., Diss., 2010. Kassel : Kassel Univ. Press,  
2010 (Elektrische Energiesysteme 1)
- [32] FRONIUS INTERNATIONAL GMBH: *Beispiele Notstrom-Umschaltung Fronius Energy Package :  
Installationsanleitung Netzgekoppelter Wechselrichter DE*
- [33] MWM: *Aufbau von Energieanlagen mit Gasmotor-Antrieb : Planungs- und  
Montagehinweise*. VI-T1S 2017-06 DE. Mannheim, Juni 2017 (02999407)
- [34] BERLING F.: *Optimierter Brennstoffzellen-Wechselrichter für den Netz- und Inselbetrieb*.  
Dortmund, Technischen Universität Dortmund, Elektrotechnik und Informationstechnik.  
Dissertation. 2008-06-26

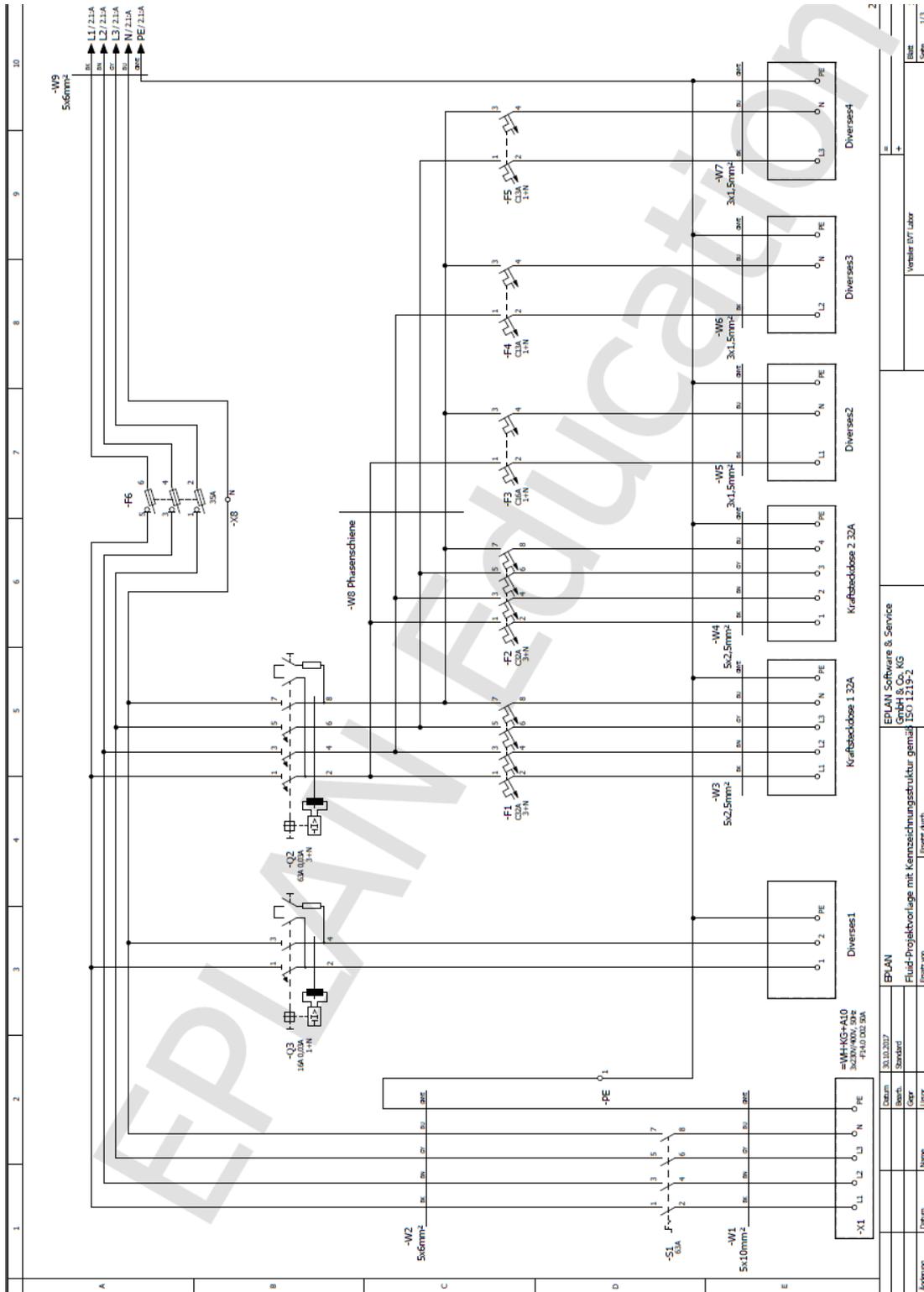
- [35] SWISSOLAR: *PV-Anlagen mit Batterien*. URL  
[http://www.swissolar.ch/fileadmin/user\\_upload/161219\\_Merkblatt\\_pv\\_speicher\\_def.pdf](http://www.swissolar.ch/fileadmin/user_upload/161219_Merkblatt_pv_speicher_def.pdf) – Überprüfungsdatum 2017-11-22
- [36] STAUDACHER D.: *Wechselrichter Fronius Symo Hybrid 5.0-3-S*. Email. 2017-09-26.  
(Adressat)
- [37] TOR D2. 2016-07-01. *Technische und organisatorische Regeln für Betreiber und Benutzer von Netzen Teil D: Besondere technische Regeln; Hauptabschnitt D2: Richtlinie zur Beurteilung von Netzurückwirkungen*
- [38] TOR D4. 2016-07-01. *Technische und organisatorische Regeln für Betreiber und Benutzer von Netzen Teil D :Besondere technische Regeln; Hauptabschnitt D4: Parallelbetrieb von Erzeugungsanlagen mit Verteilernetzen*
- [39] FICKERT L.: *Das elektrische Energiesystem im Spannungsfeld zwischen Technik und Markt*. URL  
[https://www.tugraz.at/fileadmin/user\\_upload/Events/Eninnov2014/files/pr/PR\\_Fickert.pdf](https://www.tugraz.at/fileadmin/user_upload/Events/Eninnov2014/files/pr/PR_Fickert.pdf)
- [40] Anwendungsregel VDE-AR-N 4105. 08/2011. *Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz Technische Mindestanforderungen für Anschluss und Parallelbetrieb von Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz*
- [41] BDEW. Juni 2008. *Technische Richtlinie Erzeugungsanlagen am Mittelspannungsnetz Richtlinie für Anschluss und Parallelbetrieb von Erzeugungsanlagen am Mittelspannungsnetz*
- [42] BDEW. 2013-01-01. *Regelungen und Übergangsfristen für bestimmte Anforderungen in Ergänzung zur technischen Richtlinie: Erzeugungsanlagen am Mittelspannungsnetz - Richtlinie für Anschluss und Parallelbetrieb von Erzeugungsanlagen am Mittelspannungsnetz*
- [43] VDE: *Erzeugungsanlagen sollen Netz bei kurzzeitigen Spannungseinbrüchen stützen : Neue VDE/FNN-Studie untersucht erstmals wie sich Anlagen in der Niederspannung im Fehlerfall verhalten f Studie basiert auf Simulationsmodell mit 12.500 modellierten Niederspannungsnetzen und rund 950 Modellen von Erzeugungsanlagen*. Frankfurt am Main, 07.01.2015. URL  
<https://www.vde.com/resource/blob/851828/45874b2bb333922de27824c1056212a3/erzeugungsanlagen-sollen-netz-bei-kurzzeitigen-sp-download-pressemitteilungpdf-d4213e8688-data.pdf> – Überprüfungsdatum 2018-01-04

- [44] ISSUE 5. 2017-03-21. *THE GRID CODE*
- [45] EA-ELEKTRO-AUTOMATIK GMBH & Co. KG: *Betriebsanleitung PSI 9000 3U DC-Hochleistungs-Netzgerät*. URL  
[http://shop.elektroautomatik.de/shop/dos2/Web/Datenblaetter/datasheet\\_psi9000\\_3\\_u.pdf](http://shop.elektroautomatik.de/shop/dos2/Web/Datenblaetter/datasheet_psi9000_3_u.pdf) – Überprüfungsdatum 2017-12-07
- [46] KEMMERICH ELEKTROMOTOREN GMBH U. Co. KG: *Betriebsanleitung Hochsetzsteller HST*
- [47] FRONIUS INTERNATIONAL GMBH: *Fronius Datamanager Modbus TCP & RTU : Anlagenüberwachung*. URL  
<https://www.fronius.com/~/downloads/Solar%20Energy/Operating%20Instructions/42%2C0410%2C2049.pdf>. – Aktualisierungsdatum: 2017-05-10 – Überprüfungsdatum 2017-12-07
- [48] GOSSEN METRAWATT: *MAVOWATT 230, 240, 270 & 270-400 Netzstöranalysatoren*
- [49] LERCH R.: *Elektrische Messtechnik : Analoge, digitale und computergestützte Verfahren*. 7., aktualisierte Auflage. Berlin, Heidelberg : Springer Vieweg, 2016
- [50] SUNSPEC: *SE\_EI\_Modbus\_Sunspec\_Maps\_State\_Codes\_Events : Inverter\_Register\_Map\_Float\_v1.0\_with\_SYMOHYBRID\_MODEL\_124*. URL  
[http://www.fronius.com/~/downloads/Solar%20Energy/Operating%20Instructions/SE\\_EI\\_Modbus\\_Sunspec\\_Maps\\_State\\_Codes\\_Events.zip](http://www.fronius.com/~/downloads/Solar%20Energy/Operating%20Instructions/SE_EI_Modbus_Sunspec_Maps_State_Codes_Events.zip) – Überprüfungsdatum 2018-01-10
- [51] TJADEN T. ; BERGNER J. ; WENIGER J. ; QUASCHNING V.: *Repräsentative elektrische Lastprofile für Wohngebäude in Deutschland auf 1-sekündiger Datenbasis*. 2015
- [52] HESCHL C, TERKOVICS T., PEINSIPP M. UND ZACH F.: *SOFC-Abwärmenutzung für Gebäude und Industrie. Projektbericht im Rahmen des Programms Stadt der Zukunft im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie*.
- [53] WEISSENSTEINER S.: *U/I-Kennlinie - SOFC*. Mündlich. 2017-10-27. Prikoschnig P. (Adressat)
- [54] WEISSENSTEINER S.: *Leistungsaufnahme Gebläse SOFC*. Mündlich. 2017-10-20. Prikoschnig P. (Adressat)
- [55] SOUKUP N.: *Gebläse-SOFC*. Email. 2017-10-16. Prikoschnig P. (Adressat)
- [56] ALCELAY X.: *Flow-Diagram: Rezirkulationsgebläse – SOFC20*. Remscheid, 30.07.2012
- [57] ISERMANN R.: *Mechatronische Systeme : Grundlagen*. Berlin Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2008
- [58] FISCHER R.: *Elektrische Maschinen*. 16., aktualisierte Aufl. München : Hanser, 2013

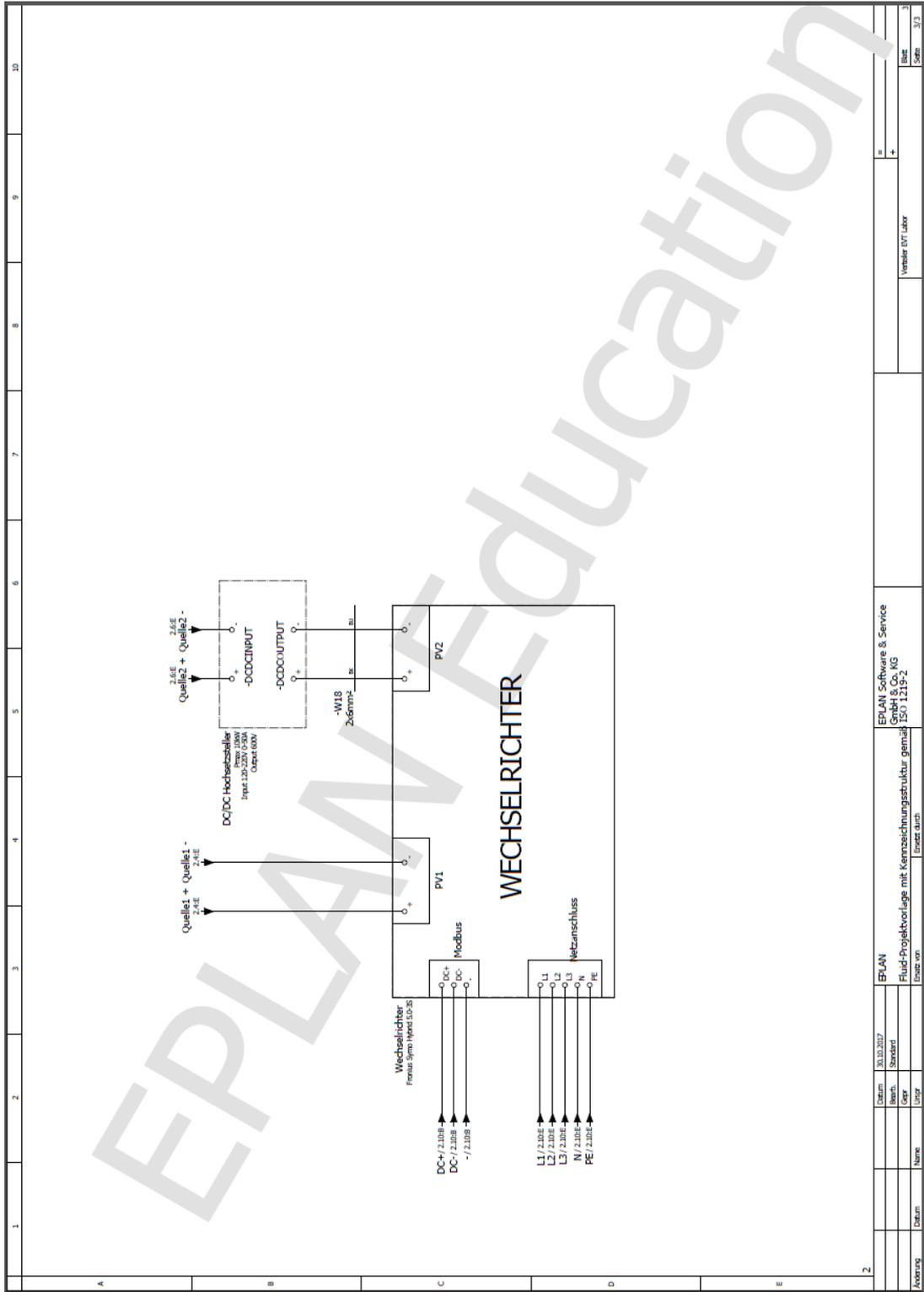
- [59] SIEB & MEYER AG: *Antriebssystem SD2S Hardwarebeschreibung*. –  
Aktualisierungsdatum: 2017-11-20
- [60] SIEB & MEYER AG: *Antriebssystem SD2 Hardwarebeschreibung Antriebsverstärker SD2,  
Leistungsnetzteil PS2* – Überprüfungsdatum 2017-11-20
- [61] HAUTH M.: *Energiebilanz SOFC*. Email. 2017-11-03. Philipp P. (Adressat)
- [62] KEMMERICH ELEKTROMOTOREN GMBH U. Co. KG: *Produktdatenblatt Produkttyp  
Hochsetzsteller Modul HST/RSU*. Gummersbach, 11/2015 (V1.1)
- [63] KOSTAL INDUSTRIE ELEKTRIK GMBH: *Datenblatt PIKO BA System : Intelligent verbinden*. URL  
<http://www.kostal-solar-electric.com/de-DE/Download/PIKO%20Speichersystem> –  
Überprüfungsdatum 2017-11-27
- [64] LEIFERT T. UND BYSTRY K.: *Überbrückung eines Netzausfalls bei einer  
Brennstoffzellenanlage*. Sieb & Meyer Aktiengesellschaft. Anmeldenr. 08002434.2.  
28.03.2012. Veröffentlichungsnr. EP 1 968 142 B1
- [65] WOIDICH R.: *DC/DC Wandler - Sperrwandler*. Email. 2017-10-11. Prikoschnig P. (Adressat)

# 10 ANHANG

## VERTEILERPLAN VERSUCHSAUFBAU

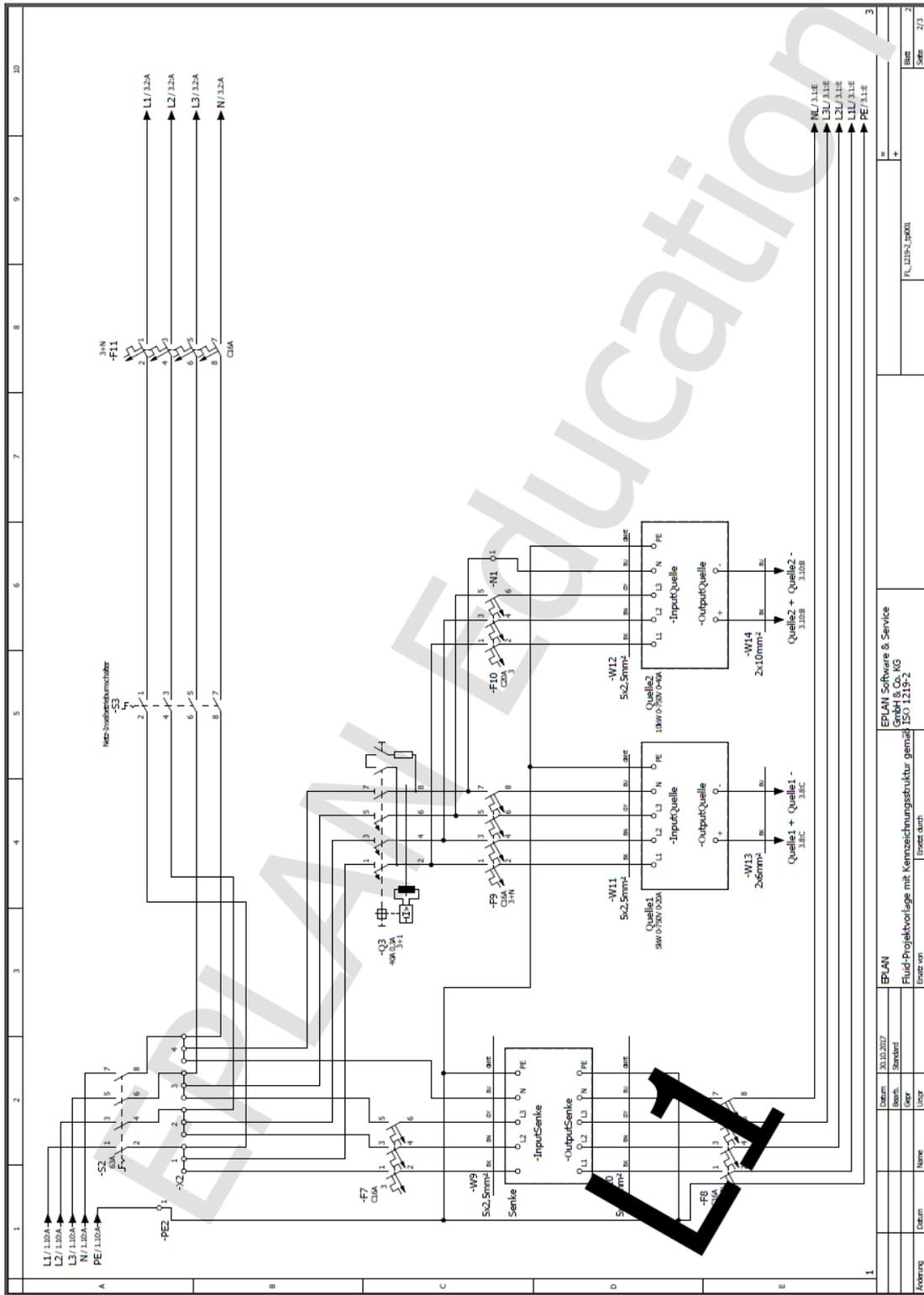






2		EPLAN		EPLAN Software & Service GmbH & Co. KG		=	
30.10.2017		Fluid-Projektvorlage mit Kennzeichnungsstruktur gemäß ISO 1219-2		Veränder DT Labor		=	
Stand		Einzel durch				Blatt	
Name		Einzel durch				Seite	
Datum						3	
Umriss							

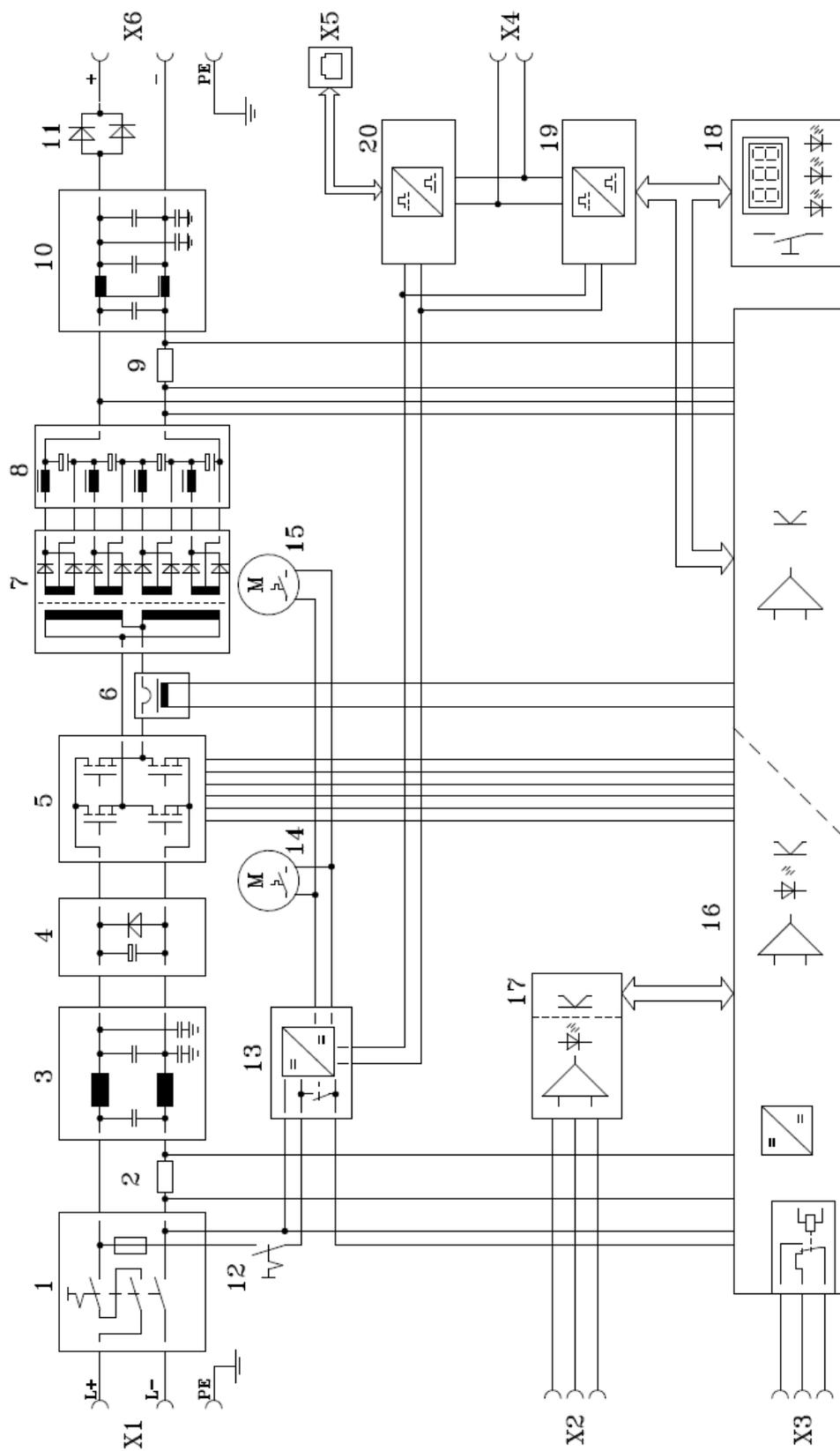




1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<p>EP-3phasenstromschalter</p> <p>3-pN -F11</p> <p>1 2 3 4 5 6 7 8 L1 / 32A L2 / 32A L3 / 32A N / 32A CIMA</p> <p>3-pN -F10</p> <p>1 2 3 4 5 6 7 8 L1 L2 L3 N CIMA</p> <p>3-pN -F9</p> <p>1 2 3 4 5 6 7 8 L1 L2 L3 N CIMA</p> <p>3-pN -F7</p> <p>1 2 3 4 5 6 7 8 L1 L2 L3 N CIMA</p> <p>3-pN -S2</p> <p>1 2 3 4 5 6 7 8 L1 / 10A L2 / 10A L3 / 10A N / 10A PE / 10A</p> <p>3-pN -W14</p> <p>1 2 3 4 5 6 7 8 L1 L2 L3 N CIMA</p> <p>3-pN -W13</p> <p>1 2 3 4 5 6 7 8 L1 L2 L3 N CIMA</p> <p>3-pN -W11</p> <p>1 2 3 4 5 6 7 8 L1 L2 L3 N CIMA</p> <p>3-pN -W9</p> <p>1 2 3 4 5 6 7 8 L1 L2 L3 N CIMA</p> <p>3-pN -M10</p> <p>1 2 3 4 5 6 7 8 L1 L2 L3 N CIMA</p> <p>3-pN -PE2</p> <p>1 2 3 4 5 6 7 8 L1 L2 L3 N PE</p>									
<p>PL 1215-2_1000</p>									
<p>EP-PLAN Software &amp; Service GmbH &amp; Co. KG Fluid-Projektorlage mit Kennzeichnungsstruktur gemäß IEC 1215-2</p>									
<p>EP-PLAN Datum: 20.10.2017</p>									
<p>Bezeichnung: Standard</p>									
<p>Umfang: Einzelplan</p>									
<p>Name: Einzelplan</p>									
<p>Arbeitskreis: Datum: Name: Umfang: Blatt: 27</p>									



# VERLUSTRECHNUNG EINES DURCHFLUSSWANDLER



Der DC/DC Wandler ist mit einer galvanischen Trennung ausgeführt wie beim oben angeführten Blockschaltbild. Dadurch können die statischen Verluste des DC/DC Wandler, ohne Berücksichtigung der noch offenen dynamischen Verluste ermittelt werden.

### 5.-Endstufe

MOS-FET R-DS-on je  $0,07\Omega$  bei 25K x 1,8 =  $0,126\Omega$  -DS-on bei 100K

5x MOS-FET parallel =  $0,126\Omega / 5 = 0,0252\Omega$

Bei einem angenommenen DC-Eingangsstrom von  $I = 58A \times 1,3 = 75A$  Stromwert der Endstufe

$0,0252\Omega \times 75A = 1,89V$  Spannungsverlust  $1,89V \times 75A = 141W$  Verluste

Da eine Vollbrücke eingesetzt werden muss liegen immer 2x MOS-FET zu je 5x parallel wiederum in Reihe

Somit  $141W \times 2 = 282 W$  Verluste in der Endstufe als statische Verluste.

### 7.-Leistungsübertrager

DC-Nennleistung 8,1kW ca. **35W** Verluste angenommen = ca. 99,6 %

Die Sekundärdioden müssen wegen der hohen DC-Ausgangsspannung 4x Satz Dioden in Reihe geschalt werden, um die Sperrspannung der Dioden von je 1kV nicht zu überschreiten. Dabei fällt je Diode eine Spannung von ca. 1,8V ab bei 100K.

Daraus ergibt sich am DC-Ausgang =  $13,5A \times 1,3 = 17,6A$  Strombelastung der Dioden,  $1,8V \times 17,6A = 31,6W$

4x Diode in Reihe =  $4 \times 31,6W = 126W$  Verlustleistung der Dioden.

### 8.-Sekundär Drossel

4x Drossel in Reihe je Drossel angenommen ca. 8W Verluste

$4 \times 8W = 32W$  Verluste der Drosseln

### 11.-Entkoppeldiode

Spannungsverluste der Diode  $1,95V \times 13,5A = 26W$  Verluste der Entkoppeldiode

Zusammengefasst:

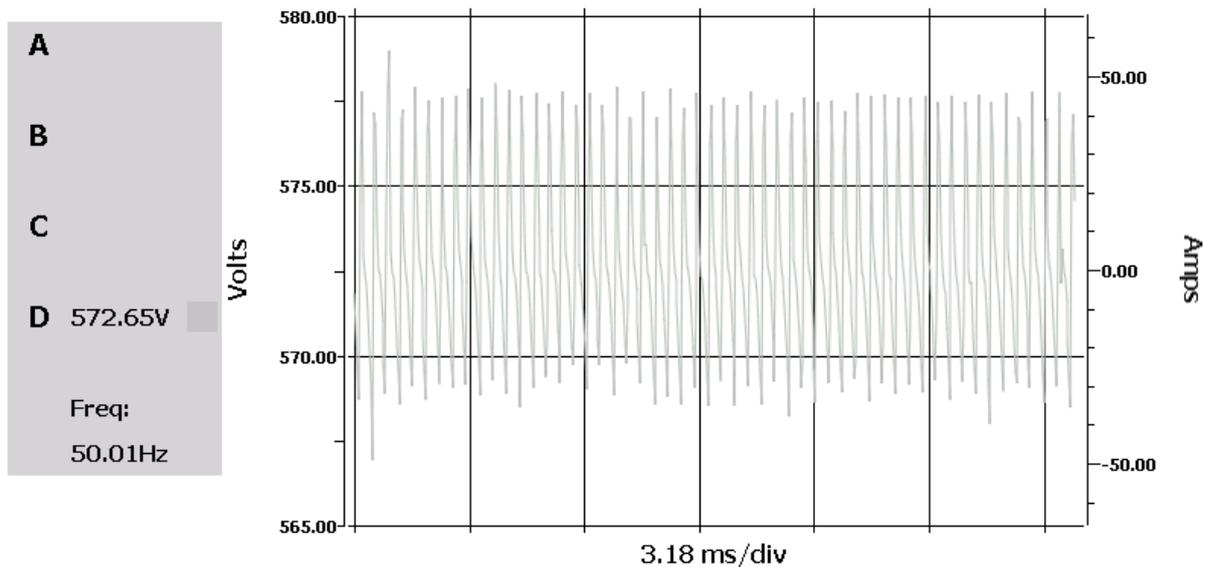
Endstufe	ca. 282W
Trafo	ca. 35W
Sek-Dioden	ca. 126W
Sek-Drosseln	ca. 32W
Entk-Dioden	ca. 26W

Gesamt ca. **501W** nur statische Verluste somit würde sich ein Wirkungsgrad von ca. 94 % ergeben, dieser Wert ist nur rechnerisch und noch ohne dynamische Verluste.

In der Praxis ergeben sich jedoch statischen Verluste von 600-650W. Die dynamischen Verluste können noch einmal um ca. 100-180W betragen.

Dadurch ist der Praxiswert mit ca. 650W und der dynamische Wert von ca. 180W vorgegeben, was einen Wirkungsgrad des gesamten Systems von 90-91 % ergibt. [65]

## SPANNUNGSVERHALTEN AM HOCHSETZSTELLERAUSGANG



## STROMVERHALTEN AM HOCHSETZSTELLERAUSGANG

