

**Fachhochschule Köln**

**Fachbereich Energietechnik  
Studiengang Elektrische Energietechnik**

**Masterarbeit**

**Optionen für eine Gleichstromversorgung  
in einem Wohnhaus**

Vorgelegt von      **Bernhard Scheeren**  
Matr.Nr.: 11088181

Referent:            **Prof. Dr.-Ing. E. Waffenschmidt**      (Fachhochschule Köln)  
Koreferent:        **Prof. Dr. J. T. N. Kimman**            (Zuyd Hogeschool, Heerlen)  
Datum:              **16.04.2014**

## Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere, die von mir vorgelegte Arbeit selbständig verfasst zu haben. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder nicht veröffentlichten Arbeiten anderer entnommen sind, habe ich als entnommen kenntlich gemacht. Sämtliche Quellen und Hilfsmittel, die ich für die Arbeit benutzt habe, sind angegeben. Die Arbeit hat mit gleichem Inhalt bzw. in wesentlichen Teilen noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen

Köln, den 16.04.2014

Nachname: Scheeren

Vorname: Bernhard

Matrikelnummer: 11088181

Unterschrift: \_\_\_\_\_

Inhaltsverzeichnis:

1. Einleitung.....	1
1.1 Hintergrundwissen .....	1
1.2 Stand der Wissenschaft und Technik.....	2
1.3 Ziel der Arbeit.....	4
1.4 Kapitelübersicht .....	6
2. Allgemeines zu den Konzepten .....	7
2.1 Wechselstromkonzept.....	9
2.2 Gleichstromkonzept mit konstanter Spannung.....	10
2.3 Gleichstromkonzept mit zentralen Wandlern .....	11
2.4 Gleichstromkonzept mit DC-Steckdosen.....	12
3. Erstellung des DC-Verbraucher-Lastprofils .....	13
4. Entscheidungskriterium "Elektrische Verluste" .....	19
4.1 Dezentrale Wandlerverluste.....	19
4.2 Leitungsverluste.....	20
4.3 Wechselstromkonzept.....	21
4.3.1 Lastprofil für das Wechselstromkonzept.....	21
4.3.2 Betrachtung der Verluste .....	25
4.4 Gleichstromkonzept mit konstanter Spannung.....	27
4.4.1 Lastprofil für das Gleichstromkonzept mit konstanter Spannung.....	27
4.4.2 Simulation des zentralen Wandlers.....	30
4.4.3 Betrachtung der Verluste bei 48 V <sub>DC</sub> .....	31
4.4.4 Betrachtung der Verluste bei 380 V <sub>DC</sub> .....	35
4.5 Gleichstromkonzept mit zentralen Wandlern .....	38
4.5.1 Lastprofile für das Gleichstromnetz mit zentralen Wandlern.....	38
4.5.2 Simulation der zentralen Wandler (9 V <sub>DC</sub> , 12V <sub>DC</sub> , 19V <sub>DC</sub> , 24V <sub>DC</sub> ) .....	40
4.5.3 Betrachtung der Verluste .....	41
4.6 Gleichstromkonzept mit DC-Steckdosen.....	46
4.6.1 Lastprofil für das DC-Steckdosen-Konzept.....	46
4.6.2 Betrachtung der Verluste .....	47
4.7 Vergleich der Konzepte .....	50

5. Entscheidungskriterium "Materialaufwand" .....	54
5.1 Materialaufwand für das AC-Konzept.....	55
5.2 Materialaufwand für das DC-Konzept.....	57
5.3 Materialaufwand im Vergleich .....	60
6. Fazit und Ausblick .....	61
Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen .....	66
Abkürzungsverzeichnis.....	67
Abbildungsverzeichnis.....	68
Tabellenverzeichnis .....	70
Literaturverzeichnis .....	71
Anhang.....	77

# 1. Einleitung

## 1.1 Hintergrundwissen

Ende des neunzehnten Jahrhunderts entfachte zwischen den beiden Erfindern Thomas Alva Edison und Nikola Tesla der sogenannte "war of current". In diesem Stromkrieg ging es um die Vormachtstellung der unterschiedlichen Systeme im Strommarkt. Edison steht hierbei für den Gleichstrom (DC) und Tesla für den Wechselstrom (AC). Beide versuchten Investoren und Einwohner der Großstädte von ihren jeweiligen Systemen zu überzeugen. Zeitweise wurde der Anschein erweckt, dass Edison diesen Krieg gewinnen würde, doch aufgrund der Vorteile von Wechselstrom bei der Übertragung, der Transformierung und der einfachen zentralen Erzeugung, hieß der Sieger am Ende Tesla. Deshalb wurde das Wechselstromnetz in den Folgejahren immer weiter ausgebaut [1, 2].

Heutzutage werden in Gebäuden genauso wie damals Wechselstromnetze installiert, jedoch gibt es immer mehr Verbraucher in unseren Haushalten und Büros, die Gleichspannung benötigen. Um diese zu erzeugen wird ein AC-DC-Wandler in den Geräten verbaut, der die Wechselspannung aus unserem Netz in Gleichstrom umwandelt. Jeder Verbraucher, der intern eine Elektronik besitzt, braucht Gleichspannung. Beispiele hierfür sind Fernseher, Laptop, Computer, Telefon oder Smartphone [2].

Somit stellt sich die Frage, ob es nicht möglich ist, diese Verbraucher direkt mit einem Gleichstrom zu versorgen. So könnten AC-DC-Wandler und folglich Ressourcen eingespart werden. Außerdem könnten mit Hilfe von zentralen Wandlern die Stand-by-Verluste verringert werden.

## 1.2 Stand der Wissenschaft und Technik

Unterschiedlichste Arbeiten und Projekte befassen sich mit dem Thema der Gleichstromübertragung in Gebäuden.

So werden beispielsweise in der Arbeit von Yasir Arafat und Mohammad Amin Verbraucher eines Wohnhauses mit einem  $48 V_{DC}$ -Netz simuliert [2]. Hierbei werden alle Verbraucher mit DC an einem DC-Netz betrieben und die damit wegfallenden Wandlerverluste, die bei AC auftreten würden, als Energieersparnis gesehen. Die höheren Leitungskosten und Leitungsverluste werden in dieser Arbeit mit in Betracht gezogen. Es stellte sich heraus, dass eine hohe Energieersparnis möglich ist. Diese Ergebnisse sind jedoch nicht repräsentativ, weil die zusätzlichen großen zentralen AC-DC-Wandler, die die  $48 V_{DC}$  erzeugen, mit ihren möglichen Verlusten und Kosten nicht mitberücksichtigt wurden. Zudem wird für alle Verbraucher eine Gleichspannung von  $48 V_{DC}$  angenommen, sodass keine weiteren DC-DC-Wandler, die zum Beispiel eine Ladespannung von  $5 V_{DC}$  für ein Smartphone bereitstellen, benötigt werden. Des Weiteren wird gesagt, dass die Stand-by-Verluste bei DC-Verbrauchern verschwindend gering sind. Deswegen werden diese auch vernachlässigt. Folglich wurden in der Arbeit von Arafat und Amin viele mögliche Verluste nicht berücksichtigt, wodurch sich ein progressives Ergebnis berechnen ließ.

In der Arbeit "DC House Modeling and System Design" [14] wurde der Gesamtwirkungsgrad eines DC-Beispielhauses mit dem Program "ETAP, Power Management System" berechnet. Hierbei wurden unterschiedliche Verbraucher mit einer konstanten Leistungsaufnahme und jeweils gleichem DC-DC-Wandlerwirkungsgrad angenommen. Das Ergebnis zeigt, dass ein Leiterquerschnitt von  $6 \text{ mm}^2$  und eine Spannung von  $48 V_{DC}$  den besten Gesamtwirkungsgrad erzielen. Dieser beläuft sich in dem erstellten Netz auf maximal 80 % [14].

Ein Nachteil dieser Arbeit ist ebenfalls die konstante Wirkungsgradbetrachtung der DC-DC-Wandler. So wurde bei 20 % Belastung der gleiche Wirkungsgrad wie bei Vollast angenommen. Ebenso wurde die Gleichspannung ( $48 V_{DC}$ ), wie schon in der vorherigen Arbeit, als gegeben angenommen. Somit bleiben die Verluste des zentralen Wandlers oder der PV- und Windkraftanlage unberücksichtigt.

Von der Chiang Mai Rajabhat University in Thailand wird bereits ein ähnliches Projekt betrieben. Hierbei wird mit Hilfe von Sonnenenergie ein kleines Musterdorf mit Bauernhof, Büro, Restaurant etc. betrieben. Die Solaranlage versorgt die Musterhäuser direkt mit Gleichspannung und überschüssige Energie wird in Batterien gespeichert. Scheint die Sonne nicht mehr, wird die gespeicherte Energie der Batterien genutzt, um die Häuser zu versorgen. Die relativ weiten Wege zwischen PV-Anlage und Verbraucher werden mit einer variierenden Gleichspannung (je nach Sonneneinstrahlung und Schaltung von 240 bis 290 V<sub>DC</sub>) überbrückt. Diese wird in den Häusern für die Verbraucher in 24 V<sub>DC</sub> umgewandelt. Da dieses Projekt noch nicht lange andauert, konnten bisher nur wenige Informationen ermittelt werden. Aussagen über den Sicherheits- und Wirkungsgradaspekt sind zu diesem Zeitpunkt noch nicht beurteilbar [15].

Die EMerge Alliance ist ein Zusammenschluss von staatlichen Behörden, Universitäten und Firmen, die Produkte entwickeln, um Gleichstromnetze in Bürogebäuden und Datenzentren einzurichten. Dabei steht die Reduzierung der häufigen AC-DC-Wandlung im Vordergrund. So wurde zum Beispiel ein Standard entwickelt, wodurch es möglich ist, Beleuchtungssysteme in Bürogebäuden mit 24 V<sub>DC</sub> zu betreiben. Dadurch werden die dezentralen AC-DC-Wandler auf lediglich einen großen zentralen Wandler reduziert. Für Datenzentren wiederum sind Standards von 380 V<sub>DC</sub> festgelegt, wodurch ebenfalls geringe Leitungsverluste und gute Wirkungsgrade bei den Verbrauchern erreicht werden [22].

Die EMerge Alliance ist ein sehr wirkungsvoller Zusammenschluss, der viele innovative Lösungen gefunden hat. Bei diesem Ansatz wurden bis jetzt lediglich Verbraucher (Beleuchtung, Bürogebäude, Serverräume) angeschlossen, die eine konstante Leistung benötigen, wodurch die Auslegung des AC-DC-Wandlers klar auf diesen Bereich definiert wird.

Die unterschiedlichen Arbeiten bzw. Projekte verdeutlichen, dass sie das Thema Gleichstromhaus auf eine jeweils eigene Weise behandelt haben. Aufgrund der vielen für DC-Netze sich positiv auswirkenden Annahmen scheint das DC-Netz hauptsächlich Vorteile aufzuweisen.

### 1.3 Ziel der Arbeit

Zwischen der niederländischen Stadt Heerlen und dem deutschen Aachen liegt der Gewerbepark Avantis. Dort wird das Projekt "De Wijk van Morgen" realisiert. Dieser "Bezirk von Morgen" umfasst verschiedene Bauprojekte der Zuyd Hogeschool in Heerlen und in Kooperation mit 60 Partnern werden zukunftsweisende Häuser geplant und realisiert. Bei diesen Bauvorhaben stehen Energieersparnis sowie Nachhaltigkeit im Vordergrund. Um dies zu erreichen, werden unterschiedlichste Technologien und Materialien bei der Errichtung, Dämmung und Ausrichtung des Hauses kombiniert [16].

In dieser Arbeit soll nun untersucht werden, ob es möglich und sinnvoll ist, eines dieser Häuser (das Haus "Knik naar de zon") mit einem Gleichstromnetz zu betreiben. Ein Schwerpunkt in dieser Arbeit soll auf die möglichen elektrischen Verluste gelegt werden. Diese Verluste können zum Beispiel bei einer zu geringen Gleichspannung und einem zu langen Leitungsweg sehr hoch ausfallen. Außerdem wird für die hier betrachteten DC-Konzepte, die mit einer konstanten Gleichspannung (z.B. 48 V<sub>DC</sub>) simuliert werden, nicht wie in den oben vorgestellten Arbeiten zum Beispiel eine PV-Anlage als gegeben angenommen, sondern sie muss mit Hilfe von zentralen Wandlern erzeugt werden. Dies führt zwangsläufig zu zusätzlichen elektrischen Wandlerverlusten. Eine Kopplung mit einer PV-Anlage ist bei dem geplanten Haus ("Knik naar de zon") möglich, jedoch soll die spätere Simulation auch für die Mehrheit der in Industrieländern installierten Häusern gelten, die keine PV-Anlage haben. Aus diesem Grund wird die PV-Anlage nicht mit in die Simulation einbezogen. Außerdem soll mit Hilfe von Lastprofilen und unterschiedlichen Wirkungsgraden (Stand-by- und Volllastbetrieb) ein möglichst realer Tagesablauf einer Musterfamilie (Vier-Personen-Haushalt) simuliert werden, um so eine gesicherte Aussage über die zeitlich aufgeschlüsselten elektrischen Verluste von einem Tag bzw. einem Jahr zu treffen.

Die simulierten Gleichspannungsmusterkonzepte werden anschließend mit einem normalen Wechselstromnetz hinsichtlich ihrer elektrischen Verluste (Wandler- und Leitungsverluste) gegenübergestellt. Außerdem soll eine Aussage über mögliche und zusätzliche Leitungskosten der untersuchten Konzepte getroffen werden.

Der zweite Schwerpunkt dieser Arbeit liegt bei der Betrachtung des Materialaufwandes für die benötigten Wandler in einem AC- und einem DC-Netz. Bei einem AC-Netz wird jeder Verbraucher, der DC benötigt, über sein eigenes Netzteil (AC-DC-Wandler) mit Spannung versorgt. Dies hat zur Folge, dass beim Austausch des Gerätes auch das Netzteil erneuert wird. Über einen größeren Zeitraum betrachtet, würde so eine Vielzahl an Netzteilen zusammenkommen, die noch funktionieren jedoch nicht mehr benötigt werden. Mit Hilfe eines DC-Konzeptes kann dieser ständige Austausch gestoppt werden, was wiederum eine Reihe von Vorteilen mit sich führt. Angefangen bei der Ressourceneinsparung sowie über mögliche Wirkungsgradsteigerungen bis hin zur einfachen Wiederverwertung der Wandler.

Um diese mögliche Materialeinsparung zu untersuchen, werden in dem Wohnzimmerplan des Hauses "Knik naar de zon" die dort installierten Verbraucher realitätsnah angeordnet. Anschließend soll für diesen Raum untersucht werden, wie viele AC-DC-Wandler in einem definierten Betrachtungszeitraum von 20 Jahren mit Hilfe von Gleichspannungsnetzen eingespart werden kann.

Daraus ergibt sich die Kernfrage dieser Arbeit: Können mit Hilfe eines DC-Netzes elektrische Verluste verringert und Material (Wandler) eingespart werden?

## 1.4 Kapitelübersicht

Die Masterarbeit ist in sechs Kapitel unterteilt. Nachfolgend soll eine kurze Übersicht über die Inhalte der jeweiligen Kapitel gegeben werden.

Kapitel 1: In der Einleitung wurden bereits verfasste Arbeiten kurz erläutert bzw. das Thema der vorliegenden Masterarbeit genauer beleuchtet. Außerdem wird das Ziel dieser Arbeit definiert und eine kurze Kapitelübersicht gegeben.

Kapitel 2: Im zweiten Kapitel wird ein Überblick über die zu betrachtenden Gleichstromkonzepte gegeben. Darüber hinaus werden die Randbedingungen der Simulation definiert.

Kapitel 3: Dieses Kapitel behandelt die Erstellung des DC-Verbraucher-Lastprofils. Mit Hilfe dieses Lastprofils wird in der späteren Simulation die für die Konzepte speziell benötigten eigenen Lastprofile erstellt.

Kapitel 4: Die in Kapitel 2 erstellten Konzepte sollen hier als Gesamtsystem auf ihre elektrischen Verluste untersucht werden. Abschließend werden die Ergebnisse miteinander verglichen, um eine Aussage über das Konzept mit den geringsten elektrischen Verlusten zu treffen.

Kapitel 5: Es wird die Frage diskutiert, wie viele AC-DC-Wandler mit Hilfe eines DC-Netzes über einen definierten Zeitraum eingespart werden können.

Kapitel 6: Das letzte Kapitel dieser Masterarbeit beinhaltet ein Fazit und Hinweise für zukünftige Aspekte, die für eine DC-Netz Realisierung noch zu betrachten sind.

## 2. Allgemeines zu den Konzepten

In diesem Kapitel werden die zu untersuchenden Netzkonzepte beschrieben. Das hier untersuchte Haus "Knik naar de zon" wird wie bereits in der Einleitung erwähnt im Gewerbepark Avantis installiert. Somit ist eine sehr gute Wechselstrominfrastruktur gegeben, welche auch genutzt werden soll. Aufgrund dessen werden nur die Kleinverbraucher, die für ihren Betrieb ausschließlich DC benötigen, wie zum Beispiel Fernseher, Computer, LED-Beleuchtung usw. mit Gleichspannung versorgt. Großverbraucher wie Elektroherd oder Trockner würden die Ströme und demzufolge auch die Leiterquerschnitte erheblich vergrößern und das ganze System unwirtschaftlich machen [3].

Um eine Aussage über die für die spätere Simulation wichtigen Leitungslängen zu treffen können, wird in den Plan des Wohnzimmers vom Haus "Knik naar de zon" die dort stehenden Verbraucher mit den erforderlichen Zuleitungen eingezeichnet (Abbildung 1). Die Anordnung der Möbel wurde dementsprechend sinnvoll gewählt. Insgesamt werden elf Leuchten verbaut, die den Raum ausreichend ausleuchten. An jeder Tür ist ein Taster platziert, mit dem es möglich ist, die Beleuchtung einzuschalten. An der linken Wand wird das Sideboard mit TV, SAT-Receiver und DVD-Player positioniert. Auf dem großen Esstisch wird zeitweise das Smartphone oder der Laptop bedient und gegebenenfalls geladen. An der oberen Wandseite wird die Telefonanlage mit einem Schnurlostelefon und WLAN-Router platziert. Die HiFi-Anlage befindet sich auf einem weiteren Tisch (untere Wand). Andere Verbraucher, die nicht in diesem Zimmer platziert werden, sondern in einem anderen Raum (Obergeschoss oder Keller), sind an der Seite der Abbildung aufgeführt und darüber hinaus wurde eine mögliche Leitungslänge angenommen. Demnach ergeben sich folgende Leitungslängen:

**Tabelle 1: Mögliche Leitungslängen "Knik naar de zon"**

	Länge [m]
Leitung rot	14
Leitung blau	9
Leitung grün	7,5
Leitung gelb	20
Leitung orange	18
<b>Durchschnittsleitungslänge</b>	<b>13,7</b>

Bei einem Masterprojekt der FH-Köln (2.3) wurde ebenfalls ein Haus konstruiert, das mit Gleichspannung versorgt werden soll. Hierbei wurde eine Durchschnittsleitungslänge von 16,5 m errechnet [3].

Um die folgenden Konzepte (Kapitel 2) besser miteinander vergleichen zu können, wird orientiert an den beiden Durchschnittsleitungslängen eine Leitungslänge von 15 m für die Simulationen der Leitungsverluste angenommen (Abbildung 2). Außerdem soll der angenommene Querschnitt der Kupferleitung 1,5 mm<sup>2</sup> betragen. Alle Konzepte werden mit den gleichen Verbrauchern belastet, die später in Kapitel 3 näher beschrieben werden. Da Sicherungen und Schalter für die Simulation von Leitungs- und Wandlerverlusten nicht relevant sind, werden diese aus Übersichtsgründen nicht mit in die Abbildungen integriert.

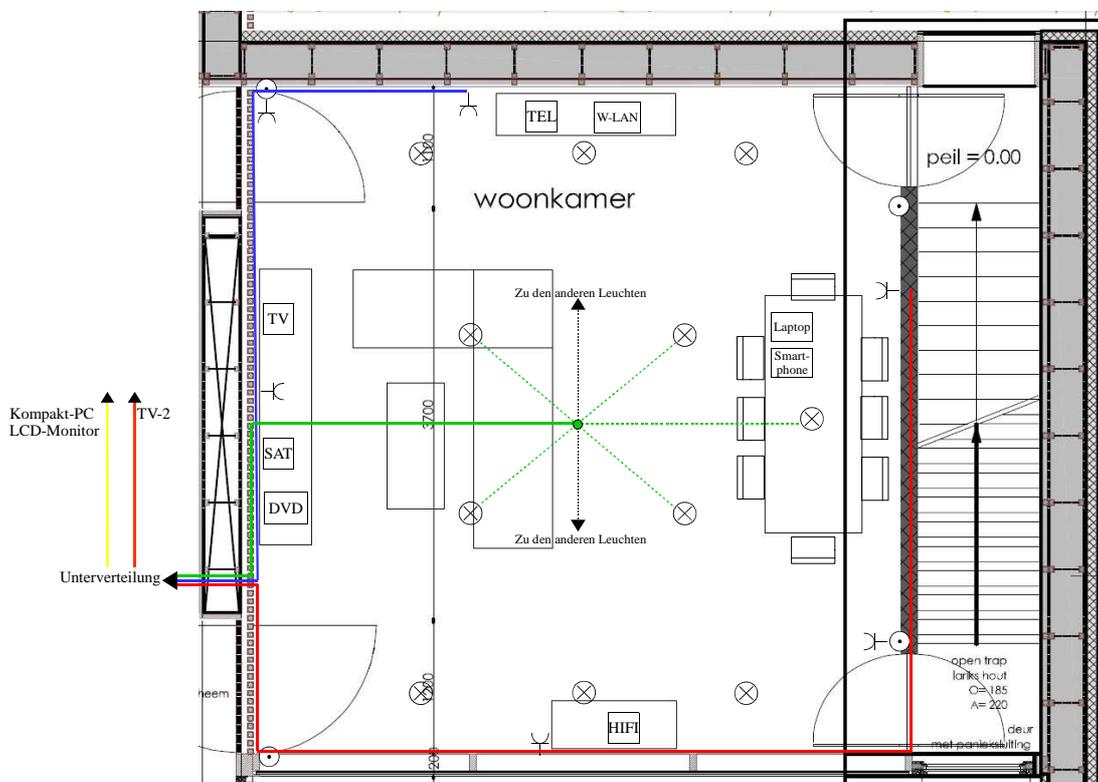


Abbildung 1: Wohnzimmerplan mit Leitungslängen und Verbraucher

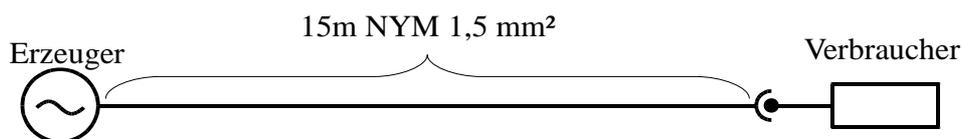


Abbildung 2: Beispiel Konzept

## 2.1 Wechselstromkonzept

Hierbei handelt es sich um das Konzept, welches sich nahezu in jedem Wohnhaus befindet. Der Wechselstrom wird, wie Abbildung 3 zu entnehmen ist, direkt zum Verbraucher transportiert. Jeder Verbraucher richtet intern oder mit einem externen Netzteil, ein sogenannter dezentraler Wandler, die vorhandene Wechselspannung in die von ihm benötigte Gleichspannung eigenständig um.

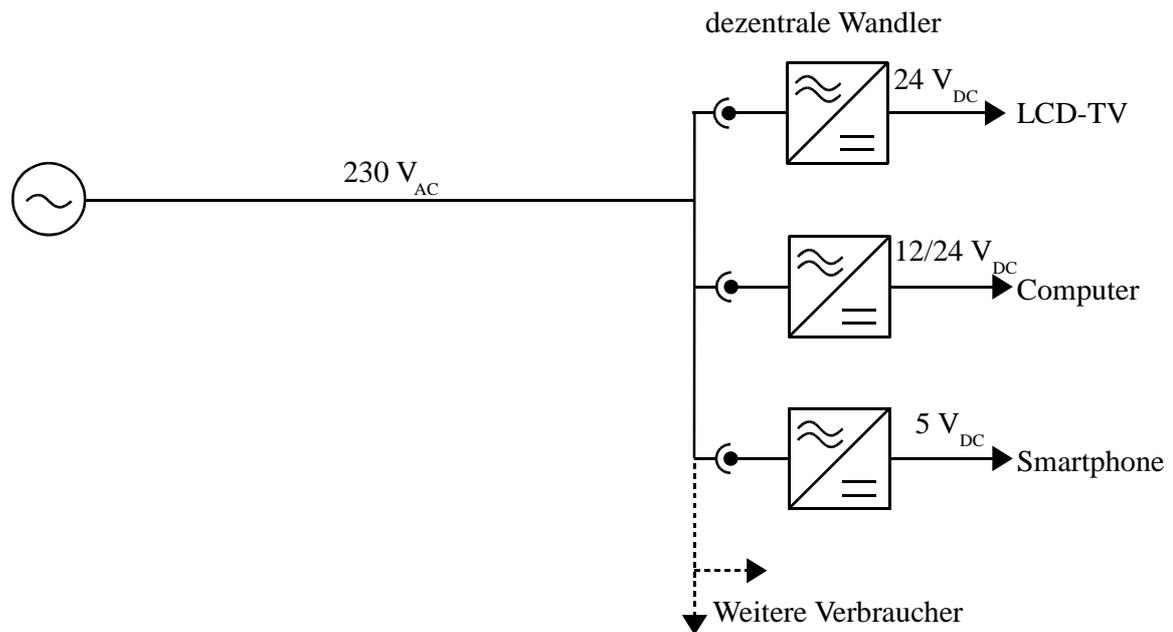


Abbildung 3: Darstellung eines Wechselstromnetzes

## 2.2 Gleichstromkonzept mit konstanter Spannung

Bei einem Gleichstromkonzept mit konstanter Gleichspannung wird diese zentral mit einem großen Wandler erzeugt und über die Leitungen direkt zum Verbraucher geführt. In den Geräten wird diese Spannung nochmals mit Hilfe kleiner DC-DC-Wandler (dezentrale Wandler) in die benötigte Spannungsebene gerichtet. In dieser Arbeit wird nicht davon ausgegangen, dass alle Verbraucher diese  $48\text{ V}_{\text{DC}}$  verwenden können. Somit benötigen die Verbraucher, wie Abbildung 4 zeigt, eigene kleine DC-DC-Wandler. Diese wandeln die  $48\text{ V}_{\text{DC}}$  Spannung in die benötigte Spannung um. Für dieses System sollen die konstanten Spannungen  $48\text{ V}_{\text{DC}}$  und  $380\text{ V}_{\text{DC}}$  simuliert werden. Es fällt auf, dass aufgrund des zentralen Wandlers und der zusätzlich benötigten dezentralen Wandler der Materialaufwand größer als bei einem gewöhnlichen AC-Netz ist.

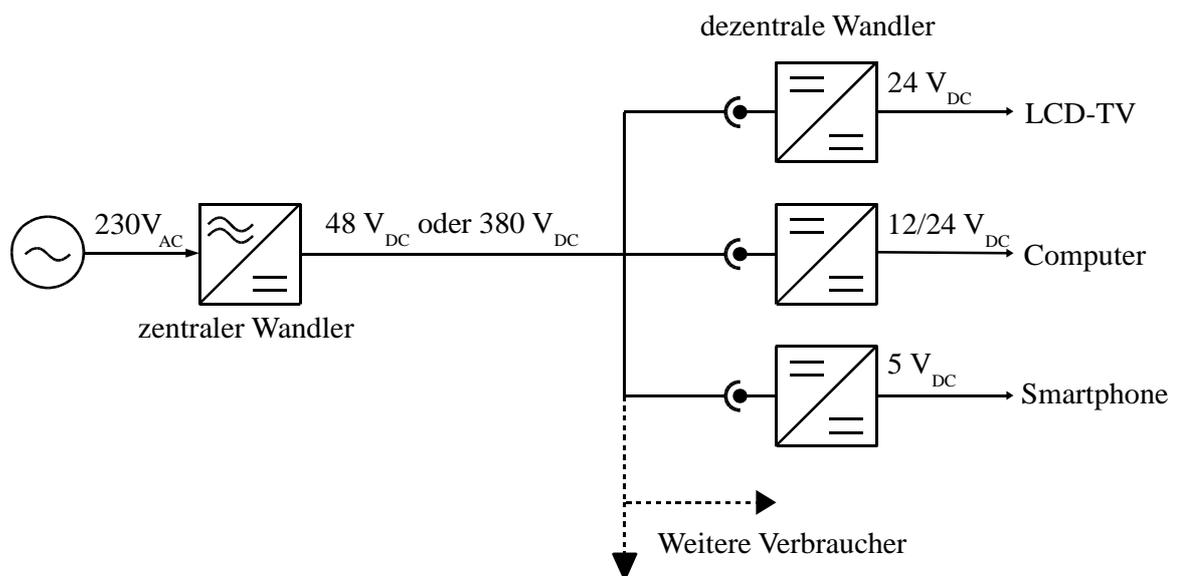


Abbildung 4: Gleichstromnetz mit konstanter Spannung

## 2.3 Gleichstromkonzept mit zentralen Wandlern

Hierbei handelt es sich um ein Projekt von Professor Waffenschmidt, seinem Kollegen Herr Böke (Philips Research, Eindhoven, Niederlande) und Studenten der FH-Köln, die im Rahmen von Forschungen und Projektarbeiten dieses Konzept entwickelt haben. Es wird der Versuch unternommen die vielen kleinen AC-DC-Wandler, die in einem Wohnhaus gebraucht werden (Abbildung 3), zentral in großen Wandlern zu sammeln (Abbildung 5). Dabei werden die für Gleichspannungsgeräte heutzutage gängigen Spannungen erzeugt, sodass nahezu jedes Gerät, welches ausschließlich Gleichspannung verwendet, betrieben werden kann. Von den zentralen Wandlern werden dann die im Haus verteilten einzelnen Geräte mit Hilfe von Gleichspannungssteckdosen, die die unterschiedlichen Spannungen bereitstellen, versorgt. Dies könnte eine enorme Ersparnis an AC-DC-Wandlern mit sich führen. Um Leitungslängen zu sparen, wird bei diesem Konzept ein gemeinsamer Rückleiter verwendet [3,4].

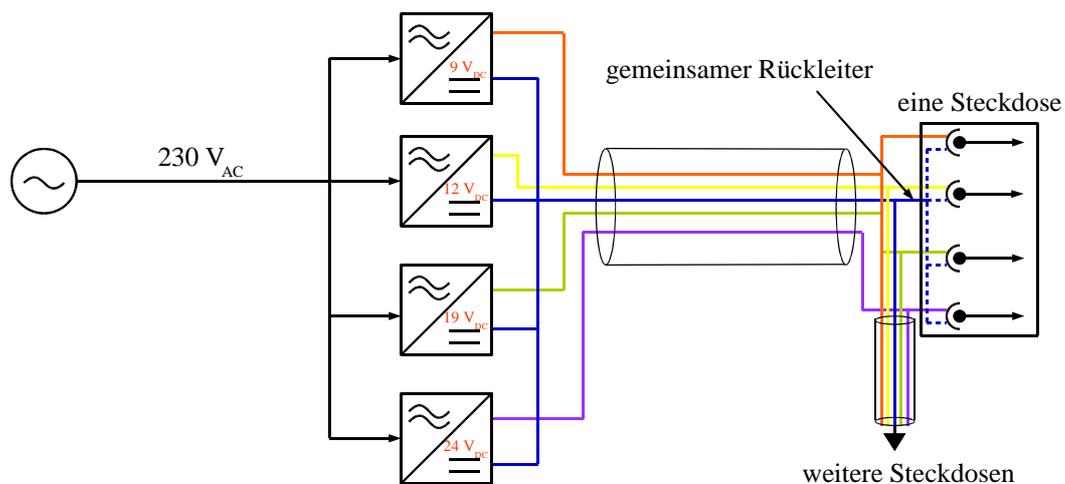


Abbildung 5: Gleichstromnetz mit zentralen Wandlern

## 2.4 Gleichstromkonzept mit DC-Steckdosen

In diesem Kontext gilt die Überlegung die dezentralen AC-DC-Wandler, die in den einzelnen Verbrauchern verbaut sind, in die Infrastruktur des Netzes zu integrieren. Dies hat zur Folge, dass in den Geräten weniger Material benötigt wird und je nach Verteilung der DC-Steckdosen mehrere Verbraucher über eine Steckdose versorgt werden können (Abbildung 6).

Die DC-Steckdosen werden über das normale 230V Wechselspannungsnetz mit Spannung versorgt und wandeln diese Spannung intern in Gleichspannung um. Aus diesem Grund wird für das Konzept kein eigenes DC-Netz benötigt, was wiederum auch eine Installationsersparnis mit sich bringt.

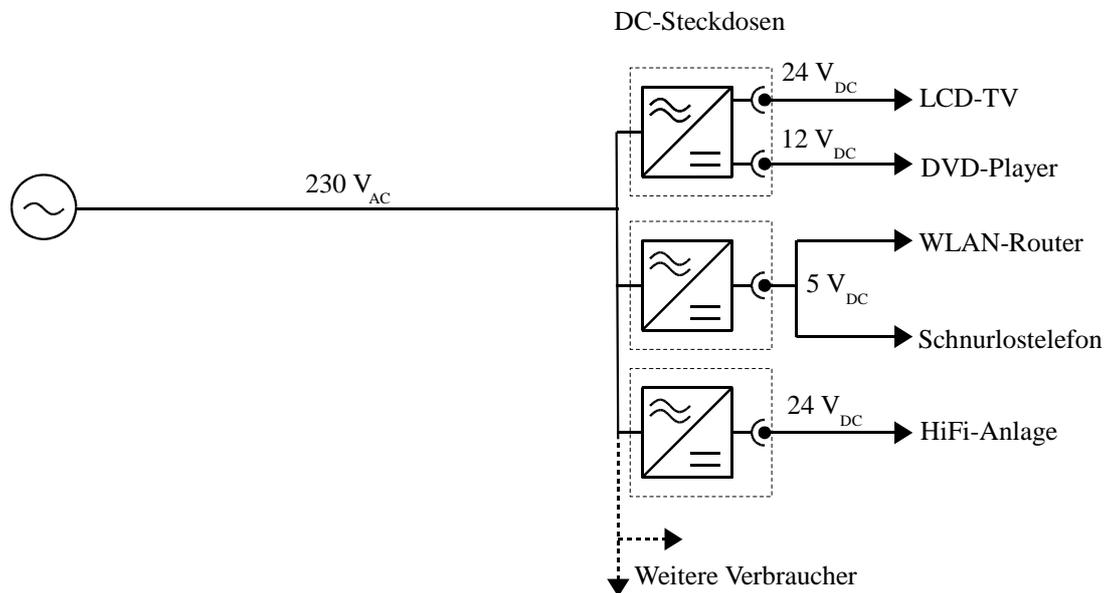


Abbildung 6: DC-Steckdosen-Konzept

### 3. Erstellung des DC-Verbraucher-Lastprofils

In Kapitel 3 soll nun das allgemeine DC-Verbraucher-Lastprofil eingeführt werden, welches später in Kapitel 4 für die unterschiedlichen Konzepte mit den dezentralen Wandlerverlusten weiter modifiziert wird.

Das Lastprofil gibt an, welche Energiemenge ein Haushalt über den Tag verteilt benötigt. In diesem Fall wurde ein Lastprofil vom Institut der ökologischen Wirtschaftsforschung verwendet [5]. Dabei handelt es sich um einen schematisierten Wochenablauf eines vier-Personen-Haushalts bei dem die Eltern berufstätig und die Kinder im schulpflichtigen Alter sind. Der Vorteil dieses Lastprofils besteht darin, dass es jeden einzelnen Verbraucher des vier-Personen-Haushalts separat mit seiner täglichen Leistungsaufnahme im Stand-by-Betrieb sowie bei seiner Nutzung auflistet. Betrachtet man zum Beispiel in Abbildung 7 das Bügeleisen (ID 2), so wird deutlich, dass es an einem Werktag (zwischen Montag und Freitag) zwei Stunden und am Wochenende samstags eine Stunde betrieben wird. Während dieser Nutzung hat es eine Leistungsaufnahme von 529 W. Dies bedeutet, dass es pro Woche 1,59 kWh des Gesamtenergieverbrauchs ausmacht. Da das Bügeleisen nach dem Gebrauch vom Netz getrennt wird, hat es keine Stand-by-Leistungsaufnahme und somit auch keine Stand-by-Verluste.

In der Studie wurden Standardwochen für Sommer, Winter und der Übergangszeit modelliert. Für diese Arbeit wurde die in Abbildung 7 gezeigte "Modellwoche des 4-Personen-Haushalts mit Durchschnittsverbräuchen im Sommer" gewählt [5].

Die aus Abbildung 7 resultierende aufgenommenen Leistungen der einzelnen AC- und DC-Verbraucher wird in Abbildung 8 über einen Tag gesehen dargestellt. Aus diesen zeitlich aufgeschlüsselten Daten lässt sich nun ein allgemeines Lastprofil für den vier-Personen-Haushalt erstellen, welches alle AC- sowie DC Verbraucher über einen Tag gesehen in Abbildung 9 dargestellt.

Tab. A.1: Modellwoche des 4-Personen-Haushalts bei Durchschnittsverbräuchen im Sommer

Modell:		4 Personen		Durchschnittsverbräuche		Sommer		Zur Vergleich: Summen des Standard-Lastprofils (CEBra)		Summen:		Verbrauch [kWh]					
Status Quo		Sommer		Sommer		Sommer		Sommer		Sommer		Sommer					
Sommer		Sommer		Sommer		Sommer		Sommer		Sommer		Sommer					
Leistungsaufnahme Ø		Sommer		Sommer		Sommer		Sommer		Sommer		Sommer					
ID <sup>1)</sup>	Nutz- ung <sup>2)</sup>	Gerät	Stand-by [W]	Nutzung [W]	Zyklus [kWh]	Start- Zeit	End- Zeit	Häufi- gkeit	Nutzung Mo-Fr	Nutzung Sa	Nutzung So	Mo-Fr (pro Tag)	Sa	So	Woche	Monat	
1	1	Beleuchtung	0	300	-	20:00	00:00	5	20:00	00:00	1	1	2000	1	2000	8,40	307,6
1b	0	Beleuchtung_2	0	300	-	20:00	22:00	1	20:00	21:00	1	0	2116	0	5290	1,59	6,90
2	1	Bügelbrett	0	529,0*	x	17:30	18:00	4	12:00	12:30	1	0,0988	0,1235	0,1235	0,74	3,22	
3	1	Dunstabzugshaube	0	247	-	20:30	22:30	5	20:30	22:30	1	0,0498	0,0498	0,0498	0,35	1,52	
4	1	DVD-Player	0,52	19,2	-	17:50	18:30	1	12:30	13:00	0	0,1799	0,0322	0,7707	1,70	7,40	
5	1	Elektroherd (ohne Kochfeld)	1,34	1109,2	x	17:00	19:00	5	17:00	19:00	1	0,5900	0,5900	0,5900	4,13	17,95	
6	1	Elektronische Kleingeräte	0	5	-	09:00	11:40	3	09:00	11:40	0	0,7692	1,2820	5,13	22,28		
7	1	Gefriertruhe	24,6*	480,7*	1,29	07:50	08:00	5	09:50	10:00	1	0,3333	0,3333	0,3333	2,33	10,14	
8	1	Geschirrspüler	0	2000	-	17:30	19:30	1	17:30	19:30	1	0,1222	0,1222	0,1222	0,86	3,72	
9	1	Haartrockner	3,3	24,8	-	07:20	07:30	5	09:20	09:30	1	0,2027	0,2027	0,2027	1,42	6,16	
10	1	Hifi	2	930	-	17:30	17:48	4	12:00	12:18	1	0,2629	0,3279	0,3279	1,97	8,56	
11	1	Kaffeemaschine	0,12	803	x	17:35	17:47	4	12:05	12:17	1	0,1314	0,1635	0,1635	0,98	4,28	
12	1	Kochfeld 1	0,12	1083,2	x	17:30	17:45	2	12:00	12:15	1	0,1188	0,2925	0,0030	0,89	3,86	
13	1	Kochfeld 2	0,12	1158,19	x	13:00	13:05	5	13:00	13:05	2	0,2193	0,3727	0,3727	1,81	7,97	
14	1	Kochfeld 3	2,25	1914,3	-	19:00	22:00	5	19:00	22:00	1	0,3075	0,3075	0,3075	2,15	9,35	
15	1	Kombi-Mikrowelle (alt)	3,5	78	-	19:30	23:00	5	19:30	23:00	1	0,6401	0,6401	0,6401	4,48	19,47	
16	1	Kompakt PC	26,7	17,5*	0,64	19:30	22:30	5	19:30	22:30	1	0,4200	0,4200	0,4200	2,94	12,78	
17	1	Kühl-Gefrier-Kombination	17,5*	102	0,42	20:00	23:00	5	20:00	23:00	1	0,3165	0,3165	0,3165	2,22	9,63	
18	1	Kühlschrank (alt)	0,5	102	-	19:00	22:00	5	19:00	22:00	1	0,0928	0,0928	0,0928	0,65	2,82	
19	1	LCD-TV1	0,96	24,2	-	20:30	23:30	5	20:30	23:30	1	0,1447	0,1447	0,1447	1,01	4,40	
20	1	LCD-TV2	1,19	39,9	-	07:00	23:00	5	07:00	23:00	1	0,3168	0,3168	0,3168	2,22	9,64	
21	1	LCD-Monitor	0	19,8	-	19:30	23:00	5	19:30	23:00	1	0,1357	0,1357	0,1357	0,95	4,19	
22	1	Notbojok	4,5	12,4	-	17:30	18:05	2	14:30	15:05	0	0,0504	0,0504	0,0504	0,35	1,53	
23	1	Pumpe	2,1	17,2	-	09:30	09:45	1	09:30	09:45	1	0,2175	0,2175	0,2175	1,52	6,62	
24	1	Sat-Kabel-Empfänger	0	870	-	20:00	21:31	1	12:00	13:31	0	0,6013	2,9201	0,0215	5,95	25,85	
25	1	Schnurtelefon	0,9	1912,0*	2,9	18:00	19:57	2	10:00	11:57	1	0,4707	1,0795	1,0795	4,51	19,61	
26	1	Schnurlostelefon	2,7	523,1*	1,02	07:20	07:25	5	07:20	07:25	1	0,1877	0,1877	0,1877	1,31	5,71	
27	1	Straubsauger	0	225,2	-	18:20	18:25	5	18:20	18:25	1	0,1822	0,1822	0,1822	1,28	5,54	
28	1	Toaster	0	17,2	-	12:00	13:31	1	09:00	09:57	1	0,4707	1,0795	1,0795	4,51	19,61	
29	1	Trockner	0,9	1912,0*	2,9	07:20	07:25	5	07:20	07:25	1	0,1877	0,1877	0,1877	1,31	5,71	
30	1	Waschmaschine	0	225,2	-	18:20	18:25	5	18:20	18:25	1	0,1822	0,1822	0,1822	1,28	5,54	
31	1	Wasserkocher	0	225,2	-	18:20	18:25	5	18:20	18:25	1	0,1822	0,1822	0,1822	1,28	5,54	
31b	1	W-Lan	0	225,2	-	18:20	18:25	5	18:20	18:25	1	0,1822	0,1822	0,1822	1,28	5,54	
32	1	W-Lan	0	225,2	-	18:20	18:25	5	18:20	18:25	1	0,1822	0,1822	0,1822	1,28	5,54	
33	0		0	0	-												

Erläuterungen: Anpassungen in den Modell-Varianten sind farbig hinterlegt; <sup>1)</sup> Eine farbig hinterlegte ID weist auf individuelle Geräte-Lastprofile hin; <sup>2)</sup> 1: Gerät in Benutzung, 0: Gerät nicht in Benutzung; \*): Durchschnittswert über die Dauer des Lastprofils für eine Nutzung oder einen Tag

Abbildung 7: Verbraucher für einen 4-Personen-Haushalts für den Sommer [5]

### Verbraucherleistung über den Tag verteilt

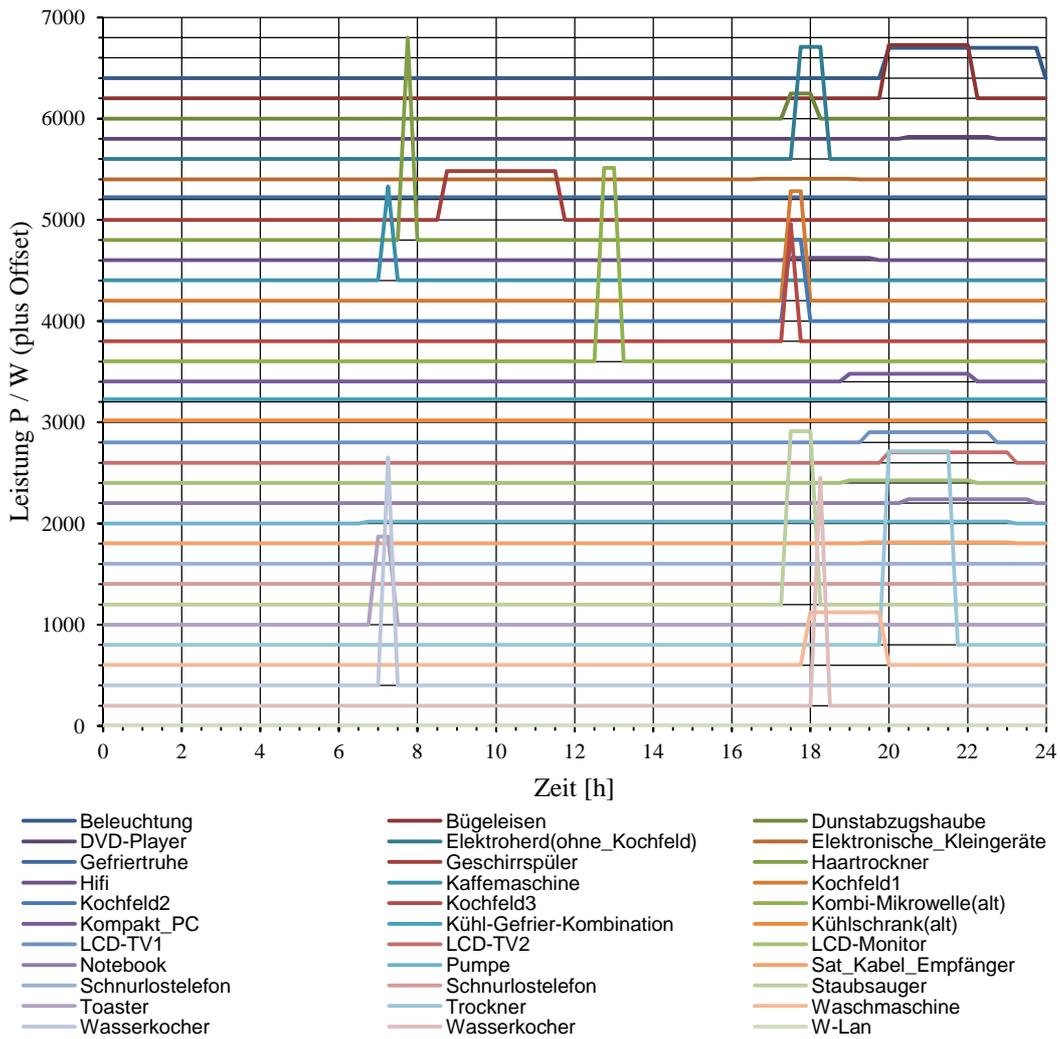


Abbildung 8: Alle Verbraucherleistung über den Tag

### Summe aller Verbraucherleistungen

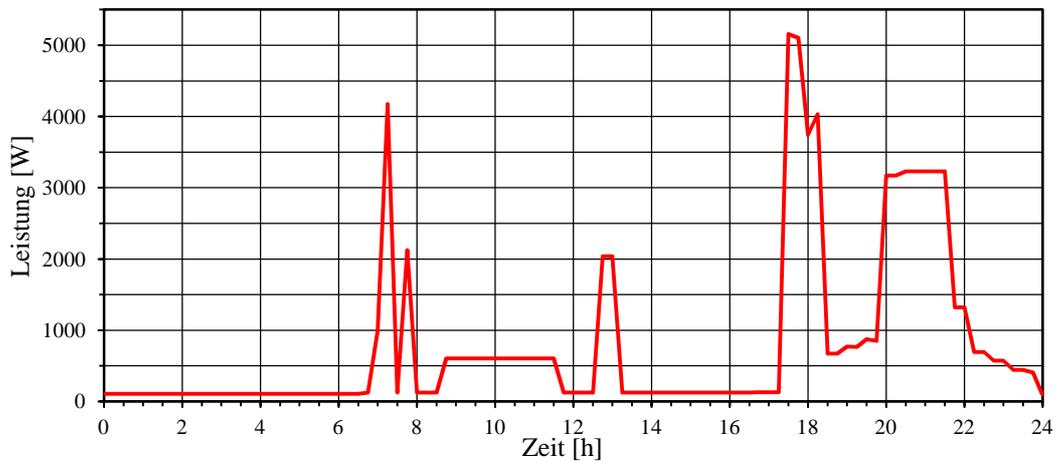
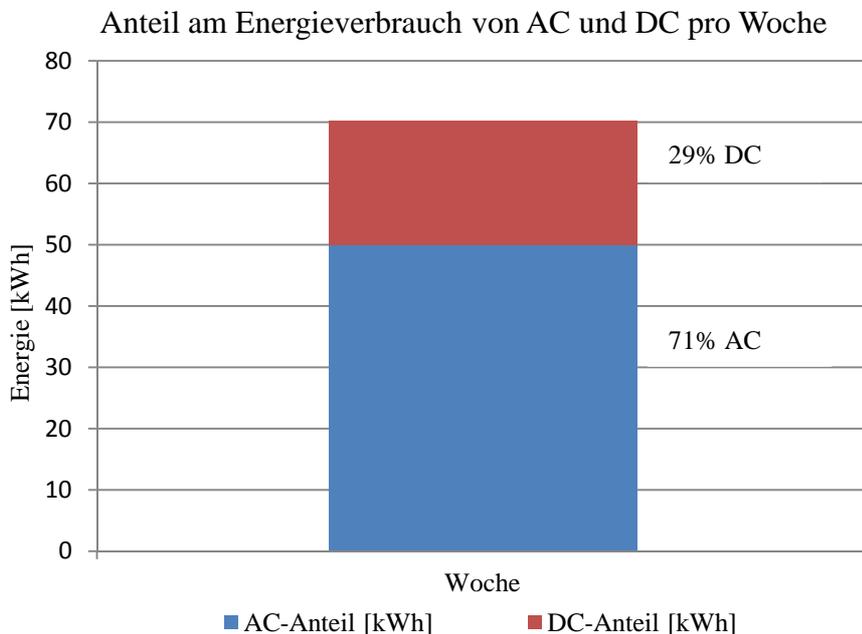


Abbildung 9: Lastprofil aus der Summe aller Verbraucherleistungen (AC und DC)

Die in Abbildung 7 aufgelisteten Verbraucher wurden daraufhin untersucht, ob sie reine AC-, Misch- (DC und AC) oder reine DC- Verbraucher sind. Wie in Kapitel 2 beschrieben, sollen lediglich die reinen DC-Verbraucher mit einem DC-Netz versorgt werden, da sonst die zu übertragene Leistung zu groß werden würde [3]. Folgende Verbraucher erfüllen dieses Kriterium:

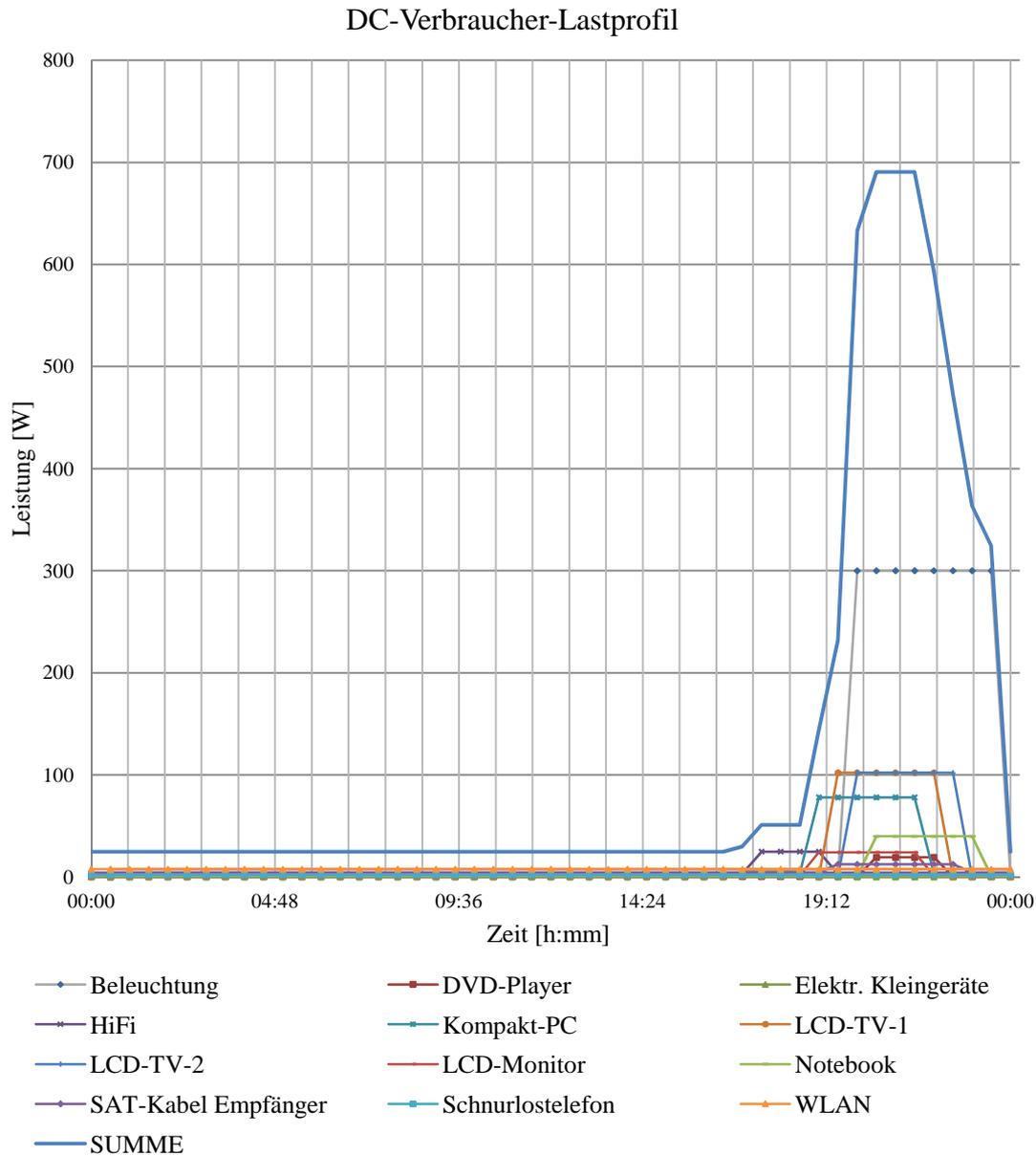
- |  |                       |
|--|-----------------------|
| - Beleuchtung                          | - LCD-TV 2            |
| - DVD-Player                           | - LCD-Monitor         |
| - elektrische Kleingeräte (Smartphone) | - Notebook            |
| - HiFi-Anlage                          | - SAT-Kabel Empfänger |
| - Kompakt PC                           | - Schnurlostelefon    |
| -LCD-TV 1                              | - WLAN Router         |

Alle anderen Verbraucher des Musterhauses sind keine reinen DC-Verbraucher oder haben eine zu hohe Leistungsaufnahme. Betrachtet man diese AC- und DC-Aufteilung in Abbildung 10 wird deutlich, dass der DC-Anteil in dem Musterhaus pro Woche rund 29 % (20,32 kWh) und der AC-Anteil wiederum 71 % (49,93 kWh) des Gesamtwochenverbrauches ausmacht.



**Abbildung 10: Anteil am Energieverbrauch von AC und DC pro Woche**

Für diese Arbeit sind die 29 % DC-Anteil des wöchentlichen Energiebedarfs von zentraler Bedeutung. Deshalb wird daraus unter Berücksichtigung der aufgeschlüsselten Leistungsdaten aus Abbildung 7 das DC-Verbraucher-Lastprofil erstellt.



**Abbildung 11: Lastprofil der DC-Verbraucher**

Abbildung 11 gibt das DC-Verbraucher-Lastprofil der ausgewählten DC-Verbraucher ( $P_{\text{Verbraucher}}$ ) über einen Zeitraum von 24 Stunden wieder (Anhang 1.1). Es kann also abgeleitet werden, dass der Großteil der DC-Verbraucher in den Abendstunden eingeschaltet ist. Dies ist darauf zurückzuführen, dass viele Verbraucher im Unterhaltungsbereich sowie in der Beleuchtung angesiedelt sind, sodass diese

meistens erst gegen Abend verwendet bzw. eingeschaltet werden. Zwischen 0:00 Uhr und 16:00 Uhr herrscht demnach eine konstante Leistungsaufnahme von  $P_{\min} = 24,66 \text{ W}$ . In dieser Zeit sind fast alle der hier betrachteten Geräte im Stand-by-Betrieb und verbrauchen nur wenig Energie. Ab 16:00 Uhr werden immer mehr Geräte eingeschaltet bis sich von 20:30 Uhr bis 21:30 Uhr eine maximale Leistungsaufnahme von  $P_{\max} = 690,69 \text{ W}$  einstellt. Danach nimmt der Verbrauch immer weiter ab, sodass er gegen 0:00 Uhr wieder bei  $P_{\min} = 24,66 \text{ W}$  liegt.

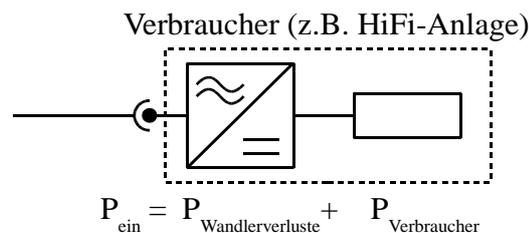
## 4. Entscheidungskriterium "Elektrische Verluste"

Die in Kapitel 2 erstellten Konzepte sollen hier als Gesamtsystem auf ihre elektrischen Verluste untersucht werden. Dabei wird das erstellte DC-Verbraucher-Lastprofil (Abbildung 11) für die unterschiedlichen Konzepte mit den dort auftretenden dezentralen Wandlerverlusten erweitert. Anschließend werden mit Hilfe dieser Lastprofile für die einzelnen Fälle die auftretenden Verluste auf der Leitung ermittelt. Bei den Konzepten 2.2 und 2.3 werden zusätzlich die zentralen Wandlerverluste simuliert und zu den bereits berechneten Verlusten addiert.

Abschließend werden die Ergebnisse miteinander verglichen, um eine Aussage über das Konzept mit den geringsten elektrischen Verlusten zu treffen.

### 4.1 Dezentrale Wandlerverluste

Wie zuvor bereits erwähnt, haben die Verbraucher bei den Konzepten 2.1 und 2.2 alle einen eigenen AC-DC- bzw. DC-DC-Wandler. Dieser richtet die je nach Konzept anliegende Spannung ( $230\text{ V}_{AC}$ ,  $48\text{ V}_{DC}$  oder  $380\text{ V}_{DC}$ ) in die vom Verbraucher benötigte Gleichspannung vor Ort um. Bei der Wandlung entstehen Wandlerverluste ( $P_{\text{Wandlerverluste}}$ ), die zu den Verbraucherleistungen ( $P_{\text{Verbraucher}}$ ) addiert werden (Abbildung 12). Die daraus resultierende Gesamtleistung ( $P_{\text{ein}}$ ) ist die des gesamten Verbrauchers.



**Abbildung 12: Verdeutlichung eines Verbrauchers**

Um die Wandlerverluste zu bestimmen, werden für die unterschiedlichen Verbraucher Wirkungsgrade angenommen. Daraus lässt sich mit den folgenden Formeln und der Verbraucherleistungen aus Abbildung 7 für den Stand-by- und Vollastbetrieb die Wandlerverluste ( $P_{\text{Wandlerverluste}}$ ) berechnen:

$$P_{\text{ein}} = P_{\text{Wandlerverluste}} + P_{\text{Verbraucher}} \quad (\text{GL.1})$$

$$\eta = \left( \frac{P_{\text{Verbraucher}}}{P_{\text{ein}}} \right) = \left[ \frac{P_{\text{Verbraucher}}}{(P_{\text{Wandlerverluste}} + P_{\text{Verbraucher}})} \right] \quad (\text{GL.2})$$

$$P_{\text{Wandlerverluste}} = \frac{P_{\text{Verbraucher}}}{\eta} - P_{\text{Verbraucher}} \quad (\text{GL.3})$$

Mit Hilfe dieser Berechnung und den später ermittelten Wirkungsgrade, lässt sich aus dem DC-Verbraucher-Lastprofil (Abbildung 11) das auf die unterschiedlichen Simulationen zugeschnittene eigene Lastprofil erstellen und so die Leitungsverluste bzw. zentralen Wandlerverluste berechnen. Dieses zugeschnittene Lastprofil wird in den folgenden Unterpunkten für jedes Konzept einzeln erstellt.

## 4.2 Leitungsverluste

Die Spannungsverluste ( $U_V$ ) auf der Leitung werden für die einzelnen Konzepte auf der stets 15 m langen Leitung und mit 1,5 mm<sup>2</sup> Querschnittsfläche wie folgt berechnet [6]:

$$U_V = \frac{2 * l * \left( \frac{P_{\text{ein(ges)}}}{U} \right)}{\kappa * A} \quad (\text{GL.4 [6]})$$

Daraus lässt sich die Verlustleistung ( $P_V$ ) bestimmen:

$$P_V = \left( \frac{P_{\text{Verbraucher(ges)}} + P_{\text{Wandlerverluste(ges)}}}{U} \right) * U_V \quad (\text{GL.5 [6]})$$

Die Verlustleistung gibt an, wie viel Leistung auf einer Leitung verloren geht. Für die einzelnen Konzepte wird diese mit Hilfe der erstellten Lastprofile über einen gesamten Tag ermittelt. Je nach Konzept variieren die Spannung ( $U$ ) und die Gesamtleistung der Verbraucher ( $P_{\text{ein(ges)}}$ ). Die spezifische Leitfähigkeit der Kupferleitung wird mit  $\kappa = 56 \frac{\text{m}}{\Omega * \text{mm}^2}$  angenommen [6]. Mit Hilfe der ermittelten Spannungsverluste lässt sich zusätzlich eine Aussage über die Spannungsfälle auf der Leitung treffen. Nach der "DIN 18015-1 Abschnitt 4.3.1 (6)" darf in Deutschland bei Verbraucheranlagen ein Spannungsfall von maximal  $\Delta u = 3 \%$  entstehen [7]. Außerdem darf die hier verwendete Leitung mit dem Querschnitt von 1,5 mm<sup>2</sup> je nach Art der Verlegung mit maximal ~19 A belastet werden. Größere Ströme würden die Leitung überlasten und zu irreparablen Leitungsschäden führen. Dies wird in der

DIN VDE 0298-4/2003 näher behandelt [8]. Die temperaturabhängige Widerstandsveränderung des Kupfers wird in den Simulationen vernachlässigt.

In den folgenden Unterpunkten wird lediglich die Zeit zwischen 14:24 Uhr und 00:00 Uhr dargestellt, da außerhalb dieses Zeitfensters, wie bei den im Kapitel 3 erstelltem DC-Verbraucher-Lastprofil zu erkennen ist, eine konstante Leistungsaufnahme vorliegt. Um eine gute Übersicht zu bewahren, sind alle berechneten Werte zu den einzelnen Unterpunkten im Anhang unter Abschnitt 2 zu finden.

## 4.3 Wechselstromkonzept

### 4.3.1 Lastprofil für das Wechselstromkonzept

Es ist kaum möglich von den hier betrachteten Geräten den genauen Wirkungsgrad zu bestimmen. Betrachtet man zum Beispiel einen Laptop, so hat dieser je nach Gebrauch einen anderen Wirkungsgrad. Wird beispielsweise ein Spiel mit hoher Grafikanforderung gespielt, so ist der Wirkungsgrad anders als beim Surfen im Internet. Aufgrund von sich permanent ändernden Leistungsaufnahmen im Nutzbetrieb, verändert sich somit auch ständig der Wirkungsgrad.

Das AC-DC-Netzteil der Firma PHIHONG weist bei einer Ausgangsleistung von 120 W (12 V<sub>DC</sub> oder 24 V<sub>DC</sub>) einen Wirkungsgrad von 87-90 % auf [23]. Ein weiteres AC-DC-Netzteil der Firma HN-POWER hat bei einer Ausgangsleistung von maximal 60 W und einstellbarer Ausgangsspannung einen Wirkungsgrad von mindestens 87 % [3]. Bei Computernetzteilen wurde die 80+ Regelung eingeführt. Diese besagt, dass ein Netzteil bei 20 %, 50 % und 100 % Ausgangsleistung ständig einen Wirkungsgrad größer als 80 % erreichen soll. Das hier ausgewählte Netzteil der Firma ANTEC hat teilweise einen Wirkungsgrad von 92 % [24]. Es wird deutlich, dass heutzutage Wirkungsgrade bei AC-DC-Wandlern von mindestens 90 % bei Vollast möglich sind. Eben deshalb wird für die simulierten Wandler bei Nutzlast ein Wirkungsgrad von mindestens 90 % angenommen.

Für den Stand-by-Betrieb wird der Wirkungsgrad bei den internen Wandlern der hier verwendeten Verbraucher mit ca. 75 % angenommen [25].

Folgende Wirkungsgradannahmen wurden für den AC-Fall im Stand-by- und Volllastbetrieb getroffen:

**Tabelle 2: Wirkungsgrad Annahmen AC-Fall**

Gerät	Stand-by [%]	Volllast [%]
Beleuchtung	0	91
DVD-Player	75	90
Elektr. Kleingeräte	0	92
HiFi-Anlage	80	90
Kompakt-PC	75	90
LCD-TV	75	90
LCD-Monitor	75	90
Notebook	77	90
SAT-Kabel-Empfänger	78	91
Schnurlostelefon	92	--
WLAN-Router	91	--

Gemäß Abbildung 7 haben das Schnurlostelefon und der WLAN-Router nur einen Stand-by-Betrieb. Dies ist darauf zurückzuführen, dass diese Verbraucher durchgehend eingeschaltet sind. Demzufolge brauchen diese nur einen Stand-by- und keinen Volllast-Wirkungsgrad.

Die Wirkungsgrade werden, wie in Abschnitt 4.1 erläutert, mit den einzelnen Verbrauchern für den Stand-by- und Volllast-Betrieb verrechnet. Als Beispiel wird hier der DVD-Player gewählt. Dieser hat laut Tabelle 2 im Stand-by-Betrieb einen Wirkungsgrad von  $\eta = 75 \%$ . Dabei hat dieser eine Leistungsaufnahme von  $P_{\text{Verbraucher}} = 0,52 \text{ W}$  (siehe Abbildung 7). Daraus folgt, dass zu der  $P_{\text{Verbraucher}}$  Leistung Wandlerverluste von  $P_{\text{Wandlerverluste}} = 0,17 \text{ W}$  addiert werden müssen. Die nachfolgende Rechnung erläutert dies:

$$P_{\text{ein (Stand-by)}} = \left( \frac{0,52 \text{ W}}{0,75} \right)$$

$$P_{\text{ein (Stand-by)}} = 0,69 \text{ W}$$

$$P_{\text{Wandlerverluste (Stand-by)}} = P_{\text{ein (Stand-by)}} - P_{\text{Verbraucher (Stand-by)}}$$

$$P_{\text{Wandlerverluste (Stand-by)}} = 0,69 \text{ W} - 0,52 \text{ W} = 0,17 \text{ W}$$

Die gleiche Berechnung kann auch für den Volllastbetrieb durchgeführt werden:

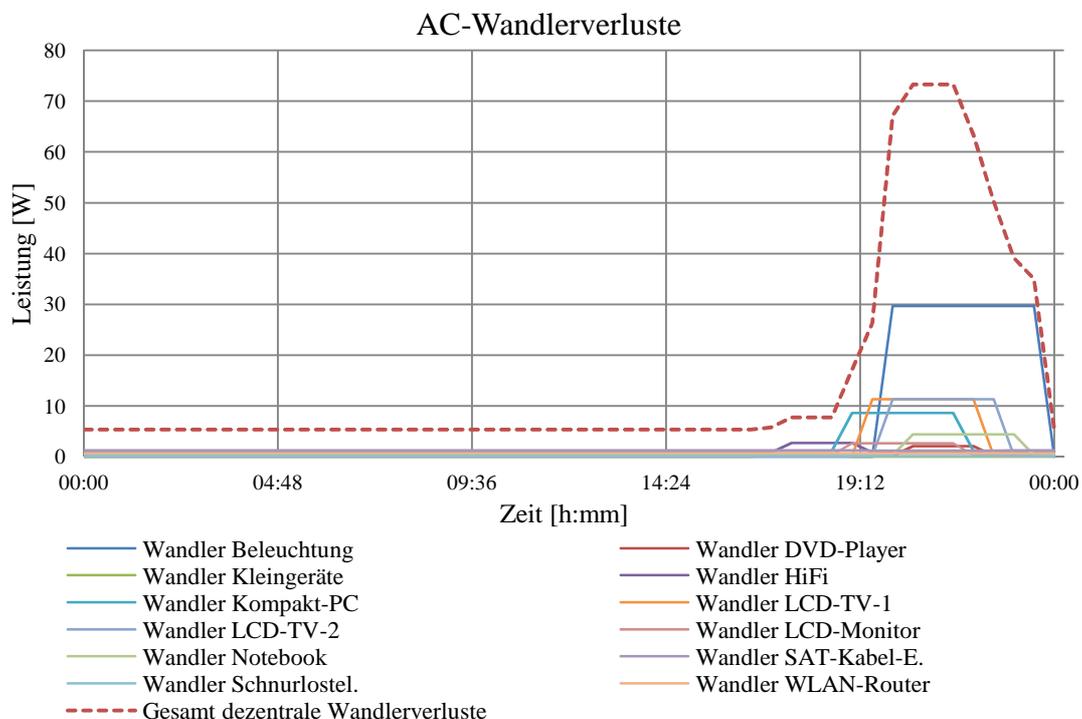
$$P_{\text{ein (Volllast)}} = \left( \frac{19,2 \text{ W}}{0,90} \right)$$

$$P_{\text{ein (Volllast)}} = 21,33 \text{ W}$$

$$P_{\text{Wandlerverluste (Volllast)}} = 21,33 \text{ W} - 19,2 \text{ W} = 2,13 \text{ W}$$

Ebenfalls auf alle anderen Verbraucher lässt sich diese Beispielberechnung übertragen. Im Anhang unter 2.1.1 werden alle Ergebnisse aufgeführt.

Abbildung 13 stellen die zusätzlichen Wandlerverluste für die unterschiedlichen Verbraucher dar. Je nach Wandlerwirkungsgrad und aufgenommenener Leistung der Verbraucher variieren diese. Die gesamten Wandlerverluste (Addition der einzelnen Verbraucher) werden in Abbildung 13 mit der dunkel rot gestrichelten Kurve dargestellt. Dieser Kurve ist zu entnehmen, dass im Stand-by-Zeitraum konstant eine Leistung von  $P_{\text{Gesamt dezentrale Wandlerverluste (min)}} = 5,38 \text{ W}$  in den Wandlern als Verluste anfallen. Diese Verluste steigen im Nutzbetrieb für die elf Verbraucher auf maximal  $P_{\text{Gesamt dezentrale Wandlerverluste (max)}} = 73,24 \text{ W}$  an.



**Abbildung 13: AC-Wandlerverluste**

Um das endgültige AC>Lastprofil zu erstellen, werden die Gesamtwandlerverluste aus Abbildung 13 mit den allgemeinen DC-Verbraucher>Lastprofil-Werten aus Abbildung 11 addiert. In Abbildung 14 wird diese Addition in der rot gestrichelten Kurve dargestellt. Dieses wird bei der folgenden Simulation der Leitungsverluste als Grundlage verwendet.

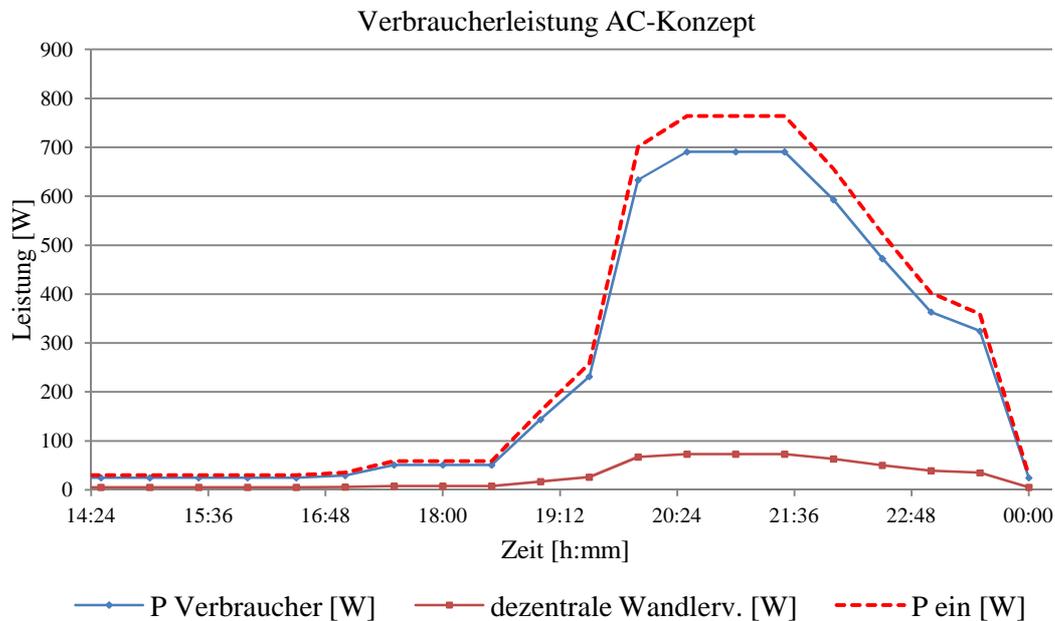


Abbildung 14: Lastprofil AC-Konzept

Über das AC>Lastprofil kann abschließend die Aussage getroffen werden, dass für die in dieser Arbeit betrachteten Verbraucher eine Gesamtenergie von  $E_{\text{Gesamt}} = 3,3 \text{ kWh}$  pro Tag benötigt wird. Darin enthalten sind  $0,37 \text{ kWh}$  Wandlerverluste, dies macht wiederum  $11 \%$  der gesamten zugeführten Energie aus.

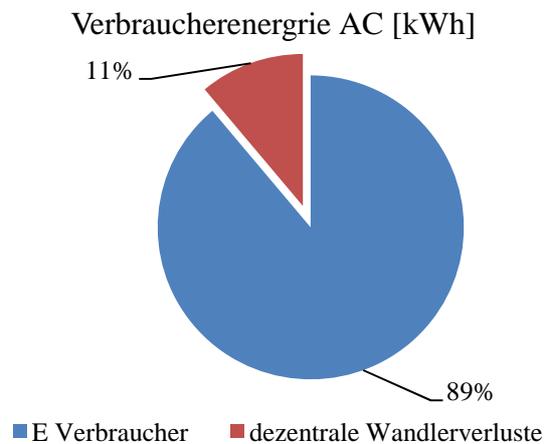


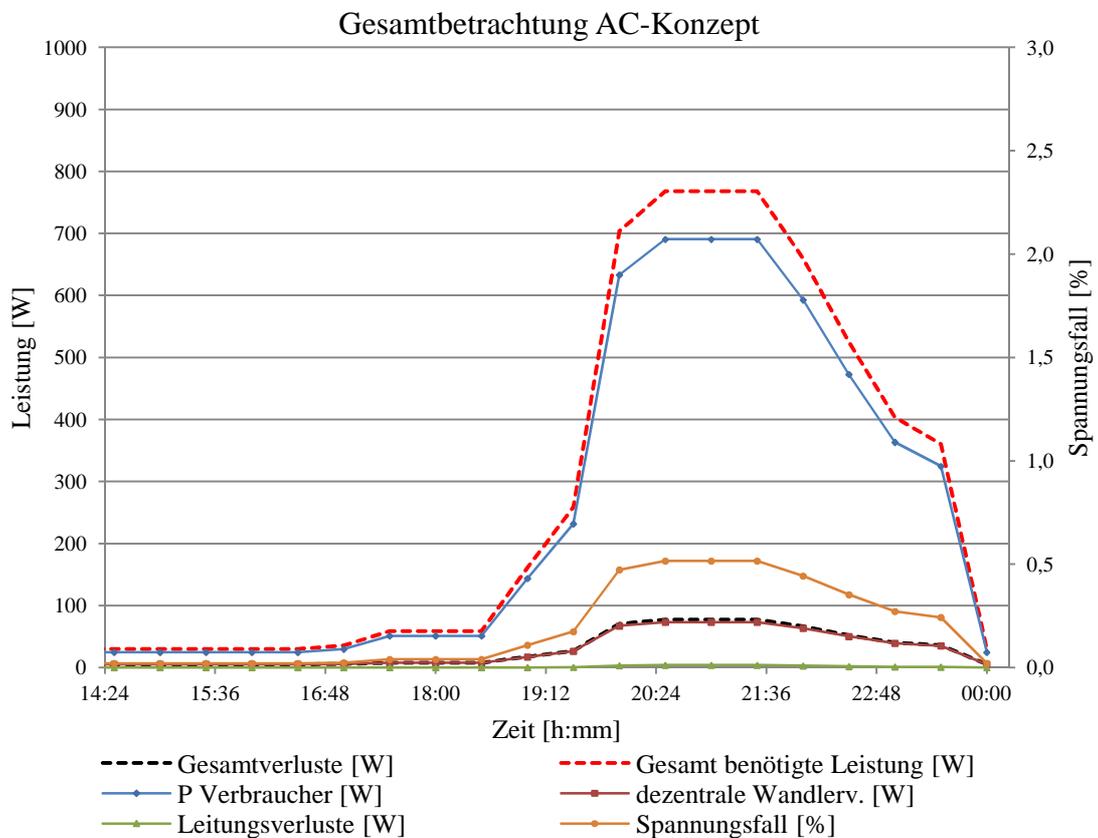
Abbildung 15: Prozentuale Energiemengen für das AC>Lastprofil

### 4.3.2 Betrachtung der Verluste

Mit Hilfe der Formeln aus Abschnitt 4.2 können nun die Leitungsverluste für das AC-Konzept berechnet werden. Diese sind im Anhang unter 2.1.2 hinterlegt und werden in Abbildung 16 veranschaulicht. Es wird deutlich, dass nahezu keine Leitungsverluste (grüne Linie) mehr zu den dezentralen Wandlerverlusten (dunkelrote Linie) hinzukommen. Dies ist auf die hohe Wechselspannung von  $U = 230 \text{ V}$  und die nahezu verlustlose Wechselstromübertragung (bei 15 m Leitungslänge) zurückzuführen. Die Gesamt benötigte Leistung (rot gestrichelte Linie) setzt sich aus den Gesamtverlusten (schwarz gestrichelt) und der Leistung der Verbraucher (blaue Linie) zusammen.

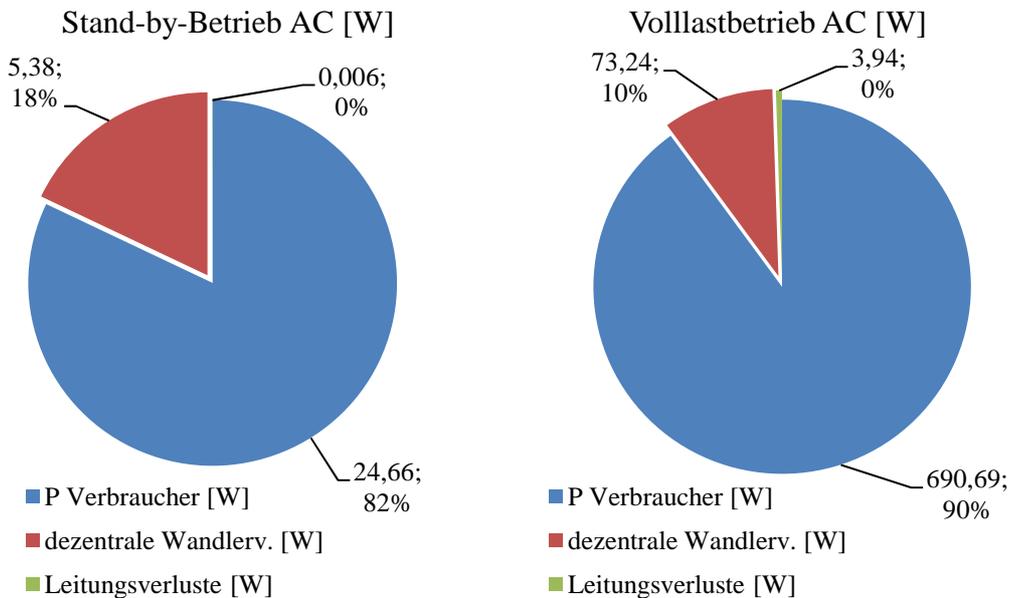
Außerdem kann festgehalten werden, dass der Spannungsfall auf der Leitung (orange Linie mit vertikaler Sekundärachse) über den gesamten Tag gesehen nie mehr als  $\Delta u = 0,52 \%$  beträgt und die Strombelastung im Maximalfall bloß  $I_{\max} = 3,4 \text{ A}$  erreicht.

Daraus ist zu folgern, dass das hier betrachtete Wechselstromnetz stets in den Normen liegt und somit auch in der Praxis realisierbar ist.



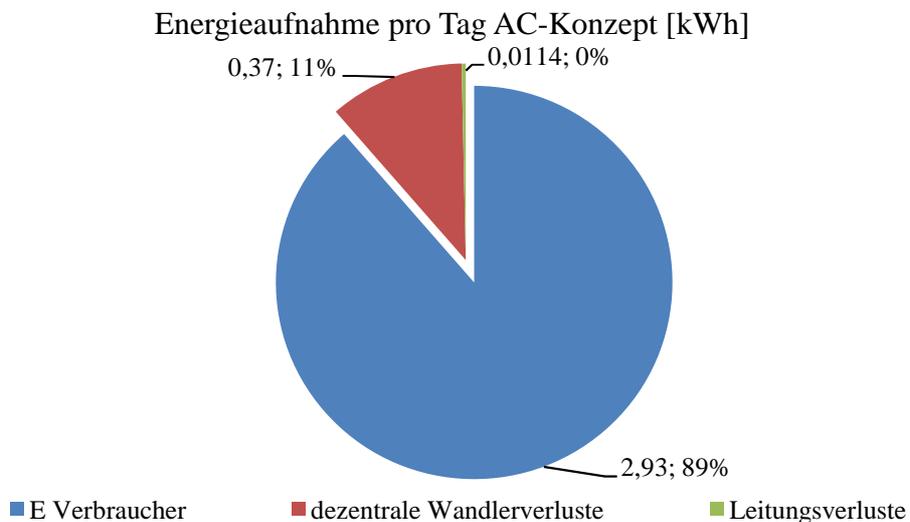
**Abbildung 16: Gesamtbetrachtung AC-Konzept**

Folglich werden die Zustände "Stand-by-Betrieb" (14:00 Uhr) und den "maximaler Volllastbetrieb" (20:30 Uhr) genauer betrachtet. Wie in den vorangegangenen Ausführungen beschrieben, sind die Leitungsverluste im Stand-by- sowie im Volllastbetrieb so klein, dass sie bei einem prozentualen Kreisdiagramm, wie beispielsweise in Abbildung 17, kaum zu erkennen sind.



**Abbildung 17: Minimaler und maximaler Zustand beim AC-Konzept**

Auch im Energiekreisdiagramm (Abb. 18), welches die Energieaufnahme über einen ganzen Tag darstellt, sind die Leitungsverluste mit 0 % (0,0114 kWh) beziffert. Insgesamt wird für den Betrieb der Verbraucher inklusive ihrer Leitungs- und Wandlerverluste eine Energie von  $E_{ges} = 3,305$  kWh pro Tag benötigt.



### Abbildung 18: Energieaufnahme pro Tag AC-Konzept

Das Wechselstromkonzept kann mit einer handelsüblichen NYM 3\*1,5 mm<sup>2</sup> Leitung installiert werden. Die Kosten für eine solche Leitung belaufen sich bei einem 50 m Ring auf 0,88 €/m [9].

$$\text{Leitungskosten} = 0,88 \frac{\text{€}}{\text{m}} * 15 \text{ m} = 13,20 \text{ €}$$

Somit würde bei diesem Konzept ein Leitungsmaterialwert von 13,20 € verbaut werden.

## 4.4 Gleichstromkonzept mit konstanter Spannung

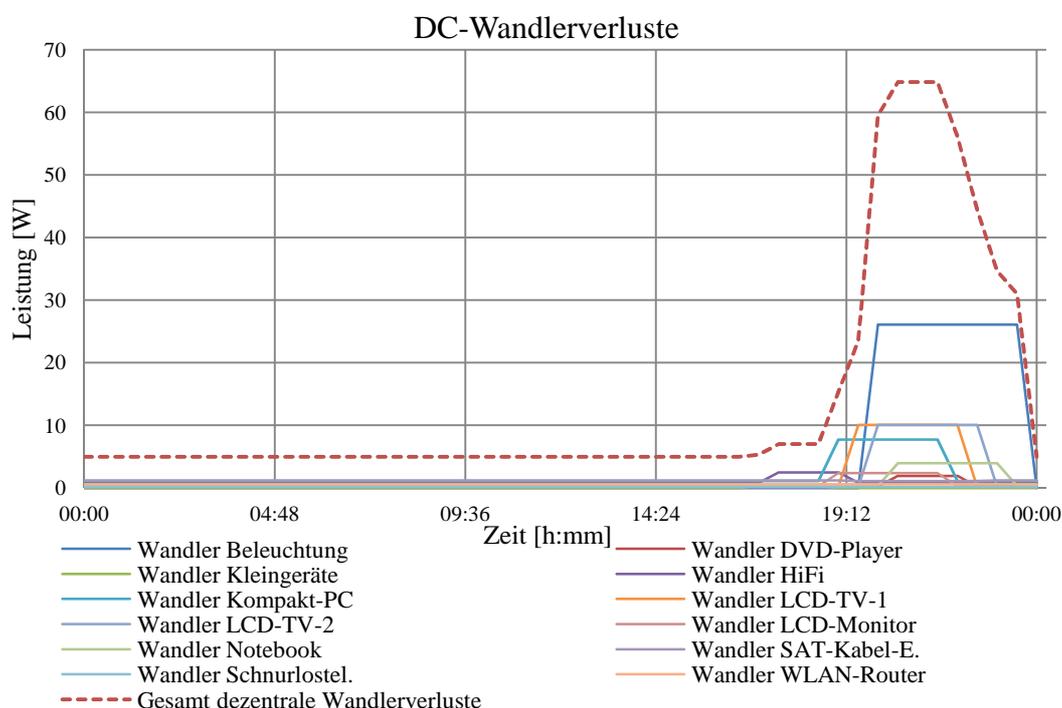
### 4.4.1 Lastprofil für das Gleichstromkonzept mit konstanter Spannung

Unter der vorgegebenen Annahme, dass DC-DC-Wandler geringfügig bessere Wirkungsgrade aufweisen, wird dieser um 1 % besser als bei AC-DC-Wandlern angenommen. Somit ergeben sich für die DC-Konzepte folgende Stand-by- und Vollastwirkungsgrade für die Wandler:

**Tabelle 3: Wirkungsgrad Annahmen DC-Fall**

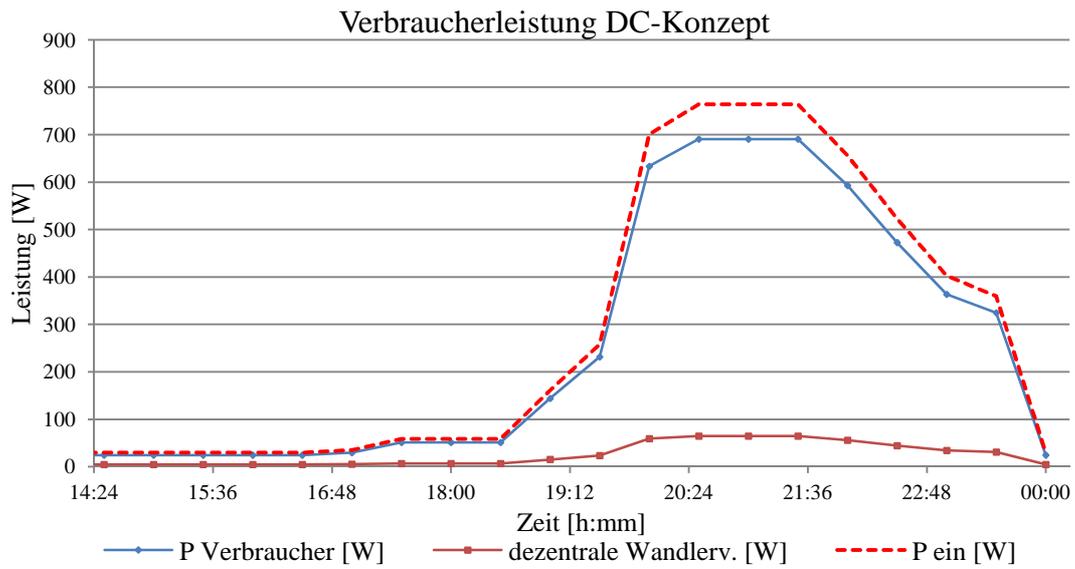
Gerät	Stand-by [%]	Vollast [%]
Beleuchtung	0	92
DVD-Player	76	91
Elektr. Kleingeräte	0	93
HiFi-Anlage	81	91
Kompakt-PC	76	91
LCD-TV	76	91
LCD-Monitor	76	91
Notebook	78	91
SAT-Kabel-Empfänger	79	92
Schnurlostelefon	93	--
WLAN-Router	92	--

Die Leistungen werden erneut mit den Formeln GL.1, GL.2 und GL.3 berechnet. Die Ergebnisse sind im Anhang unter 2.2.1 aufgeführt. Aufgrund der leicht verbesserten Wirkungsgrade sind die Wandlerverluste etwas geringer als im AC-Fall. Abbildung 19 gibt die über einen gesamten Tagesablauf auftretenden Wandlerverluste für den DC-Fall der einzelnen Verbraucher wieder. Die Summe der Wandlerverluste wird als Gesamtwandlerverluste mit der dunkel rot gestrichelten Linie dargestellt. Beim DC-Fall liegen somit die Wandlerverluste im Stand-by-Betrieb bei konstant  $P_{\text{Gesamt dezentrale Wandlerverluste (min)}} = 4,96 \text{ W}$ . Im Volllastbetrieb steigen diese auf maximal  $P_{\text{Gesamt dezentrale Wandlerverluste (max)}} = 64,83 \text{ W}$  an.



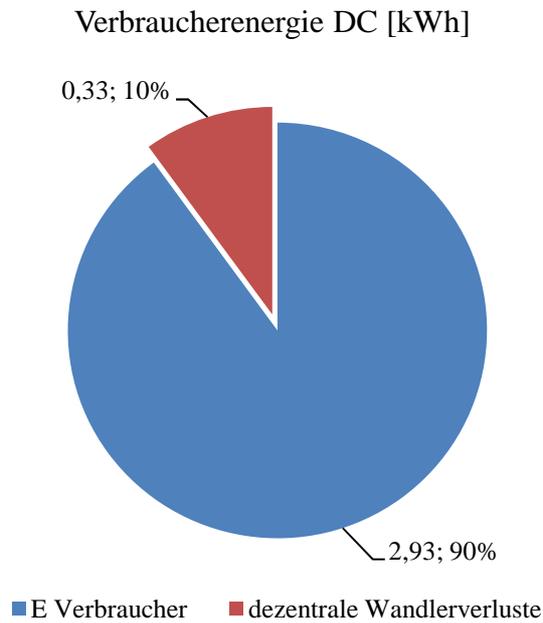
**Abbildung 19: DC-Wandlerverluste**

Um das endgültige DC-Lastprofil zu erstellen, werden auch hier die Gesamtwandlerverluste aus Abbildung 19 mit den allgemeinen DC-Lastprofil-Werten ( $P_{\text{Verbraucher}}$ ) aus Abbildung 11, wie beim AC-Konzept, addiert. In Abbildung 20 wird diese Addition aus Wandlerverlusten und Lastprofil in der rot gestrichelten Kurve dargestellt. Diese wird bei der folgenden Simulation der Leitungsverluste als Grundlage verwendet.



**Abbildung 20: Lastprofil DC-Konzept**

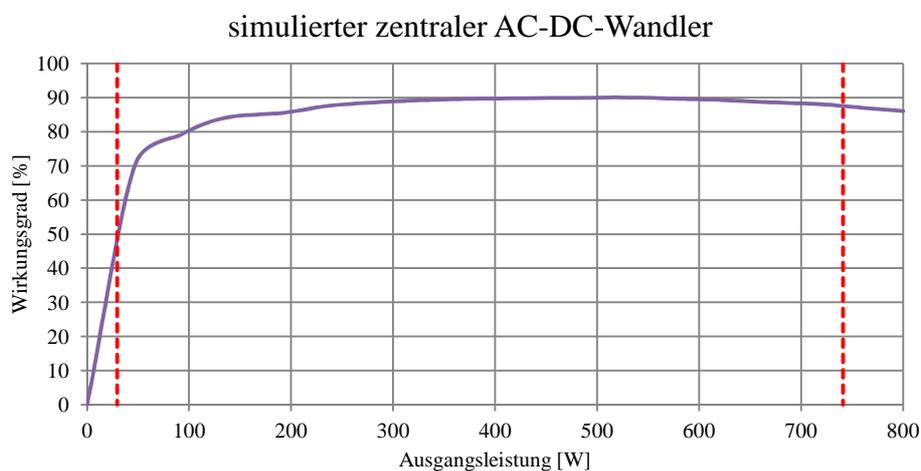
Pro Tag bedeutet das eine elektrische Energie von  $E_{\text{Gesamt}} = 3,26 \text{ kWh}$ . Hier sind erneut kleine dezentrale Wandlerverluste von  $0,33 \text{ kWh}$  enthalten, welche 10 % der Gesamtenergie ausmachen.



**Abbildung 21: Prozentuale Energiemenge für das DC-Lastprofil**

#### 4.4.2 Simulation des zentralen Wandlers

Wie dem DC-Lastprofil unter 4.4.1 zu entnehmen ist, müssen bei diesem Konzept Leistungen zwischen  $P_{(\min)} = 29,62 \text{ W}$  und  $P_{(\max)} = 755,52 \text{ W}$  über die 15 m lange Kupferleitung übertragen werden. Dies ist für den benötigten zentralen Wandler ein sehr breites Leistungsspektrum und mit einem stets guten Wirkungsgrad nur schwer zu realisieren. Die Recherchen haben ergeben, dass es wenige Informationen über Wirkungsgrade in Teillastbereichen von Wandlern gibt. Es wird von Herstellern häufig nur der beste Wirkungsgrad angegeben, indem der Wandler dann auch betrieben werden soll [26, 27, 28]. Da der hier verwendete Wandler aber in einem sehr großen Leistungsbereich betrieben werden soll, wurde ein eigener zentraler AC-DC-Wandler für diesen Bereich simuliert. Abbildung 22 zeigt den erstellten Wirkungsgradverlauf bezogen auf die Ausgangsleistung des simulierten Wandlers. Besonders auffällig ist, dass dieser bei der hier minimal zu übertragenden Leistung von  $P_{(\min)} = 29,62 \text{ W}$  (entspricht 4 % der Gesamtleistung) mit einem sehr schlechten Wirkungsgrad von  $\sim 50 \%$  betrieben wird. Aus dem DC-Lastprofil (Abbildung 19) wird deutlich, dass diese Leistung rund 16 Stunden am Tag benötigt wird. Dies hat zur Folge, dass zusätzlich sehr hohe zentrale Wandlerverluste zu den bereits bestehenden dezentralen Wandlerverlusten addiert werden müssen.

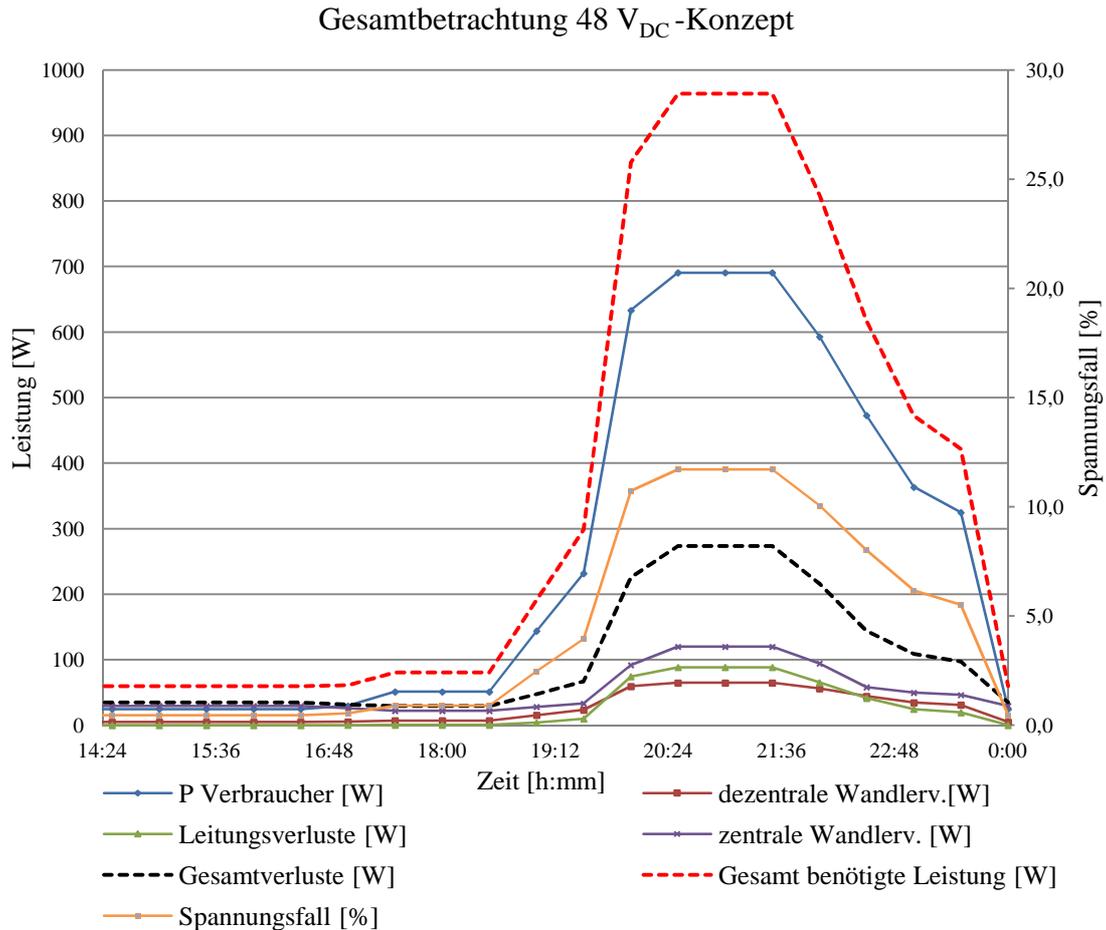


**Abbildung 22: Leistungsbereich des simulierten zentralen AC-DC-Wandlers**

In den folgenden Unterkapiteln werden für das DC-Konzept die Leitungs- und zentralen Wandlerverluste für die Spannungen  $48 \text{ V}_{\text{DC}}$  und  $380 \text{ V}_{\text{DC}}$  berechnet und zu den bereits bestimmten Verlusten (dezentrale Wandlerverluste) addiert.

#### 4.4.3 Betrachtung der Verluste bei 48 V<sub>DC</sub>

Mit Hilfe der Formeln GL.4 und GL.5 werden im aktuellen Unterpunkt die Leitungsverluste für das 48 V<sub>DC</sub>-Konzept berechnet. Es entstehen Leitungsverluste von  $P_{V(\min)} = 0,136 \text{ W}$  zu den Zeiten, in denen fast alle Geräte im Stand-by-Betrieb laufen, bis hin zu  $P_{V(\max)} = 88,48 \text{ W}$  im Volllastbetrieb. Alle Werte können im Anhang unter 2.2.2 eingesehen werden.

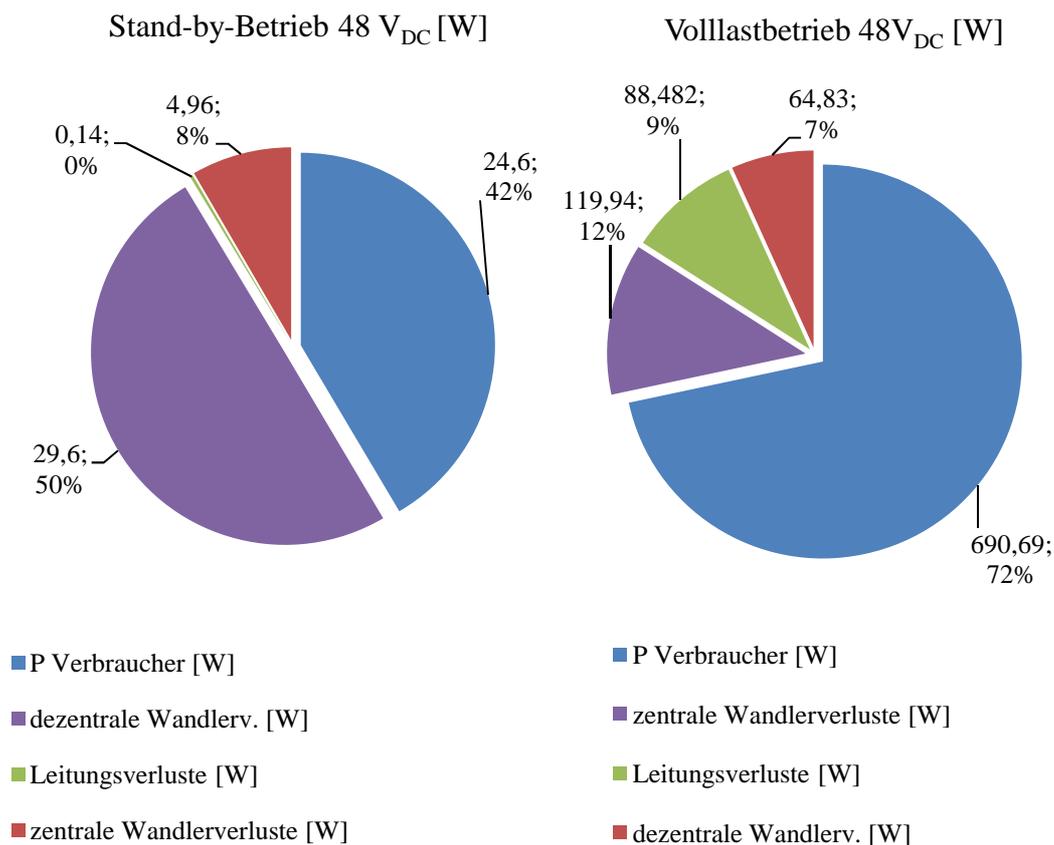


**Abbildung 23: Gesamt Betrachtung 48 V<sub>DC</sub>-Konzept**

Abbildung 23 verdeutlicht, dass beim 48 V<sub>DC</sub>-Konzept im Gegensatz zum AC-Konzept erheblich höhere Verluste auftreten. Es wird offensichtlich, dass zu Spitzenzeiten (20:30 Uhr) für die Verwendung der angeschlossenen Verbraucher  $P_{\text{Verbraucher}} = 690,69 \text{ W}$  (blaue Linie) eine Leistung von  $P_{\text{Gesamt benötigte Leistung}} = 963,9 \text{ W}$  benötigt wird um diese zu betreiben. Die Differenz ergibt sich aus den Verlusten  $P_{\text{Gesamtverluste}} = 273,3 \text{ W}$ , die im zentralen Wandler, im dezentralen Wandler und auf der Leitung verloren gehen.

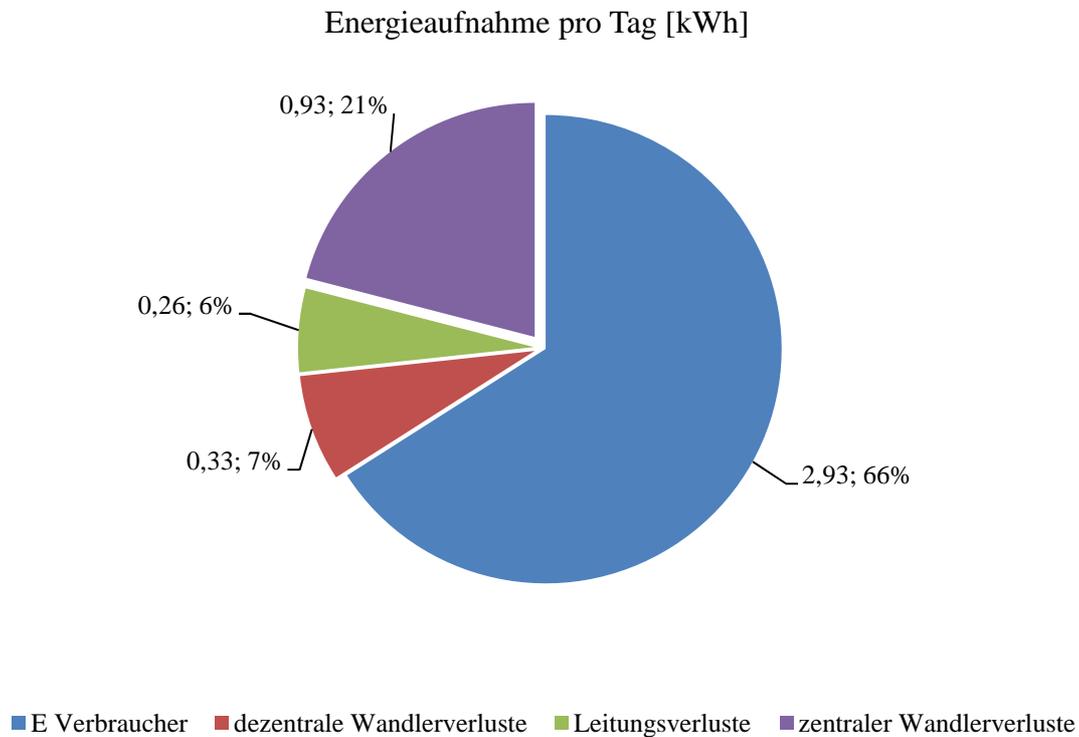
Aufgrund der kleinen Gleichspannung von  $48 \text{ V}_{\text{DC}}$ , die in diesem Konzept angenommen wird, treten zu Volllastzeiten auf der  $1,5 \text{ mm}^2$  dicken Leitung Spannungsfälle (orange Linie) von bis zu  $\Delta u = 11,71 \%$  auf. Dadurch wird am Ende der Leitung eine Spannungsminderung von ca.  $5 \text{ V}$  verursacht.

Nachfolgend werden nochmals die Zustände "Stand-by-Betrieb" (14:00 Uhr) und "maximaler Volllastbetrieb" (20:30 Uhr) mit Hilfe der Abbildung 24 veranschaulicht. Vergleicht man diese Werte mit denen des AC-Konzeptes, so wird deutlich, dass hier die wirklich genutzte Leistung (blau) erheblich kleiner ist als in Abbildung 17. Es sind beispielsweise lediglich  $42 \%$  im Stand-by-Betrieb, die in den Verbrauchern genutzt werden. Die restlichen  $58 \%$  fallen als Verluste auf der Leitung, dem dezentralen Wandler und vor allem im zentralen Wandler an. Bei Volllast sind es wiederum  $72 \%$  der Leistung, die in den Verbrauchern genutzt wird, was aber immer noch deutlich weniger als die erreichten  $90\%$  beim AC-Konzept ist.



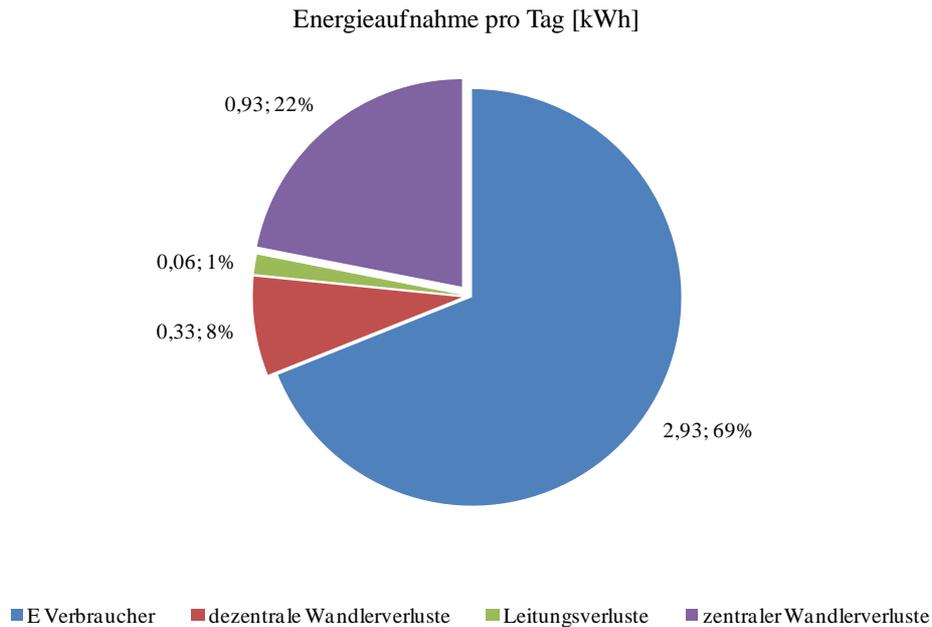
**Abbildung 24: Minimaler und maximaler Zustand beim  $48 \text{ V}_{\text{DC}}$ -Konzept**

Wird das Konzept wie in Abbildung 25 über einen ganzen Tag hinweg betrachtet und die dafür benötigte Energiemenge dargestellt, fällt auch an dieser Stelle erneut auf, dass bei diesem Konzept lediglich 66 % der täglichen Energieaufnahme genutzt werden. Insgesamt wird pro Tag eine Energiemenge von  $E_{\text{ges}} = 4,44 \text{ kWh}$  aufgenommen.



**Abbildung 25: Energieaufnahme pro Tag beim 48 V<sub>DC</sub>-Konzept**

Wie anfangs beschrieben, darf das 48 VDC-Konzept aufgrund eines viel zu hohen Spannungsfalls auf der Leitung nicht mit einer 1,5 mm<sup>2</sup> Leitung installiert werden. Der Leitungsquerschnitt wird deshalb so verändert, dass der Spannungsfall ( $\Delta u$ ) unter der vorgeschriebenen 3 %-Grenze liegt. Es zeigt sich, dass ein Leitungsquerschnitt von  $A = 6 \text{ mm}^2$  nötig ist, um dies zu erreichen. Mit dem optimierten Leitungsquerschnitt sinken natürlich auch die Leitungsverluste (Anhang 2.2.3), weshalb in Abbildung 26 nochmals die Tagesenergieaufnahme dargestellt wird.



**Abbildung 26: Energieaufnahme pro Tag beim 48 V<sub>DC</sub>-Konzept mit optimiertem Leitungsquerschnitt**

Durch die optimierte Leitung ist für einen Tag eine Energiemenge von  $E_{\text{ges}} = 4,25 \text{ kWh}$  nötig, um die Verbraucher zu betreiben.

Wie beim AC-Konzept werden abschließend die Leitungskosten berechnet. Die Kosten für eine  $3 \times 6 \text{ mm}^2$  NYM Leitung belaufen sich bei einem 50 m Ring auf  $4,25 \text{ €/m}$  [10]. Da es die hier benötigte  $2 \times 6 \text{ mm}^2$  Leitung in dieser Form nicht zu kaufen gibt, wird der Preis pro Ader ausgerechnet und für eine zweiadrige Leitung angenommen.

$$\text{Leitungskosten} = \frac{4,25 \frac{\text{€}}{\text{m}}}{3 \text{ Adern}} * 2 \text{ Adern} * 15 \text{ m}$$

$$\text{Leitungskosten} = 42,50 \text{ €}$$

#### 4.4.4 Betrachtung der Verluste bei 380 V<sub>DC</sub>

Aufgrund der hohen Gleichspannung sind die Leitungsverluste bei diesem Konzept verschwindend gering. Wie in Abbildung 27 ersichtlich wird, tauchen diese (grüne Linie) fast gar nicht im Diagramm auf. Hier fallen, ähnlich wie beim 48 V<sub>DC</sub>-Konzept, die hohen Verluste des simulierten zentralen Wandlers (lila Linie) ins Gewicht, der aufgrund seines schlechten Wirkungsgrades bei minimaler Last sehr hohe Eigenverluste aufweist (Anhang 2.2.4).

Gesamtbetrachtung 380 V<sub>DC</sub>-Konzept

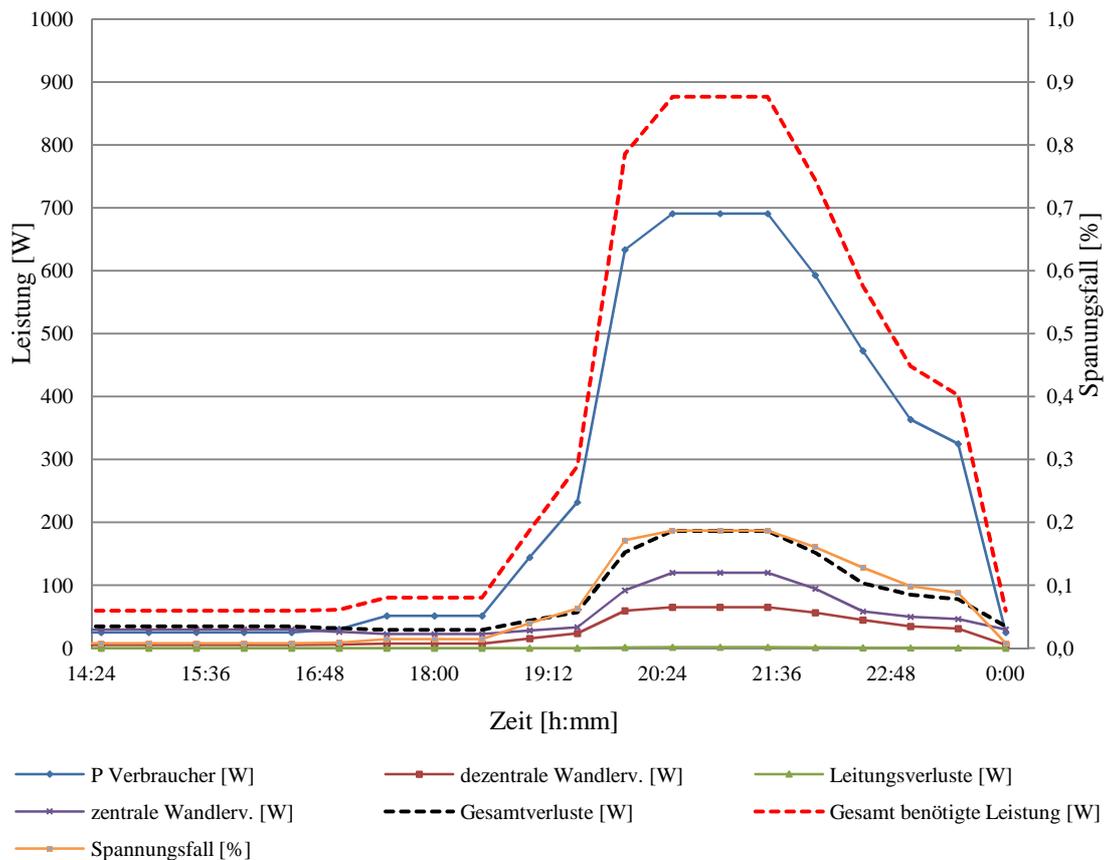
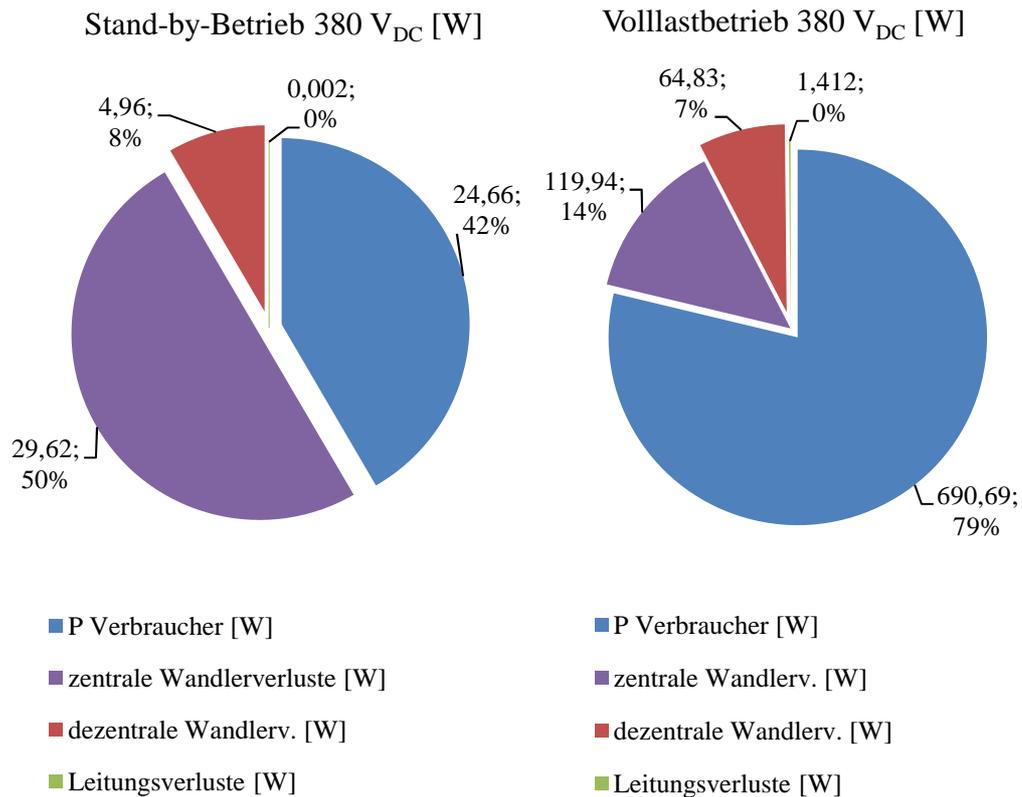


Abbildung 27: Gesamtbetrachtung 380 V<sub>DC</sub>-Konzept

Bei der fortwährend gleich angenommenen Verbraucherleistung (blaue Linie) von  $P_{\text{Verbraucher}} = 690,69 \text{ W}$  fallen bei diesem Konzept zur Spitzenzeit (20:30 Uhr) Verluste von  $P_{\text{Gesamtverluste}} = 186,18 \text{ W}$  an.

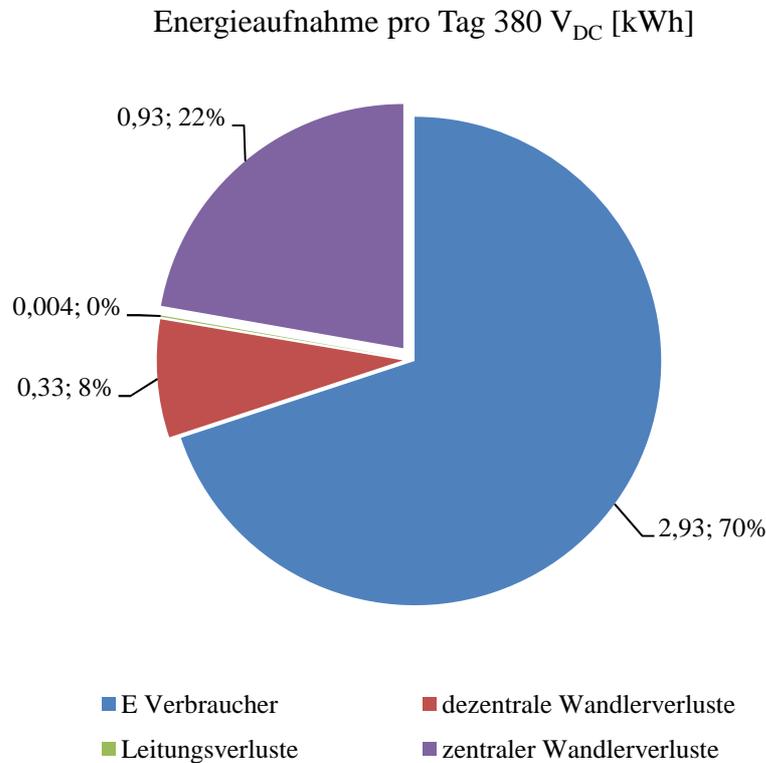
Der Spannungsfall auf der Leitung (orange Linie) liegt bei maximal  $\Delta u = 0,18 \%$ . Somit lässt sich das Konzept aus technischer Sicht mit der simulierten  $1,5 \text{ mm}^2$  Leitung verwirklichen.

Die Zustände "Stand-by-Betrieb" (14:00 Uhr) und "maximaler Volllastbetrieb" (20:30 Uhr) werden auch an diesem Kontext in Abbildung 28 dargestellt. Es wird ersichtlich, dass hier im Stand-by-Betrieb vom Verbraucher nur lediglich 42 % der Leistung genutzt werden. Die restlichen 58 % gehen im zentralen und dezentralen Wandler verloren. Im Volllastbetrieb verringern sich die Verluste auf insgesamt 21 %, was im Vergleich zum AC-Konzept immer noch erheblich mehr ist.



**Abbildung 28: Minimaler und maximaler Zustand beim 380 V<sub>DC</sub>-Konzept**

Abbildung 29 gibt die über den Tag benötigte Energiemenge für das hier simulierte 380 V<sub>DC</sub>-Konzept wieder. Insgesamt wird pro Tag eine Energie von  $E_{\text{ges}} = 4,19 \text{ kWh}$  verbraucht. Davon sind 70 % Nutzenergie, die von den Verbrauchern für den Betrieb benötigt werden. Die restlichen 30 % sind Verluste.



**Abbildung 29: Energieaufnahme pro Tag beim 380 V<sub>DC</sub>-Konzept**

Das Konzept kann aufgrund des kleinen Spannungsfalls mit einer handelsüblichen 1,5 mm<sup>2</sup> NYM Leitung installiert werden. Da es im Fachmarkt keine 2x1,5 mm<sup>2</sup> zu kaufen gibt, wurden die Preise von der dreiadrigen Leitung auf zwei Adern heruntergerechnet.

$$\text{Leitungskosten} = \frac{0,878 \frac{\text{€}}{\text{m}}}{3 \text{ Adern}} * 2 \text{ Adern} * 15 \text{ m}$$

$$\text{Leitungskosten} = 8,78 \text{ €}$$

Auf Sicherheitsbedenken einer 380 V<sub>DC</sub>-Leitung soll zu diesem Zeitpunkt noch nicht eingegangen werden.

## 4.5 Gleichstromkonzept mit zentralen Wandlern

### 4.5.1 Lastprofile für das Gleichstromnetz mit zentralen Wandlern

Wie bereits in Abschnitt 2.3 beschrieben, werden bei diesem System keine zusätzlichen AC-DC- oder DC-DC-Wandler mehr in den Geräten benötigt, da die Verbraucher von zentralen AC-DC-Wandlern mit Gleichspannung versorgt werden. Die Verluste ( $P_{\text{Wandlerverluste}}$ ) fallen somit nicht mehr in den Geräten, sondern zentral in den großen AC-DC-Wandlern an. Demzufolge muss bei diesem Konzept lediglich die reine Leistung ( $P_{\text{Verbraucher}}$ ) über die Leitungen zu den Verbrauchern transportiert werden. Wie sich aus den vorherigen Berechnungen ergeben hat, bedeutet dies, dass 10 % weniger Energie über die Leitung transportiert werden muss.

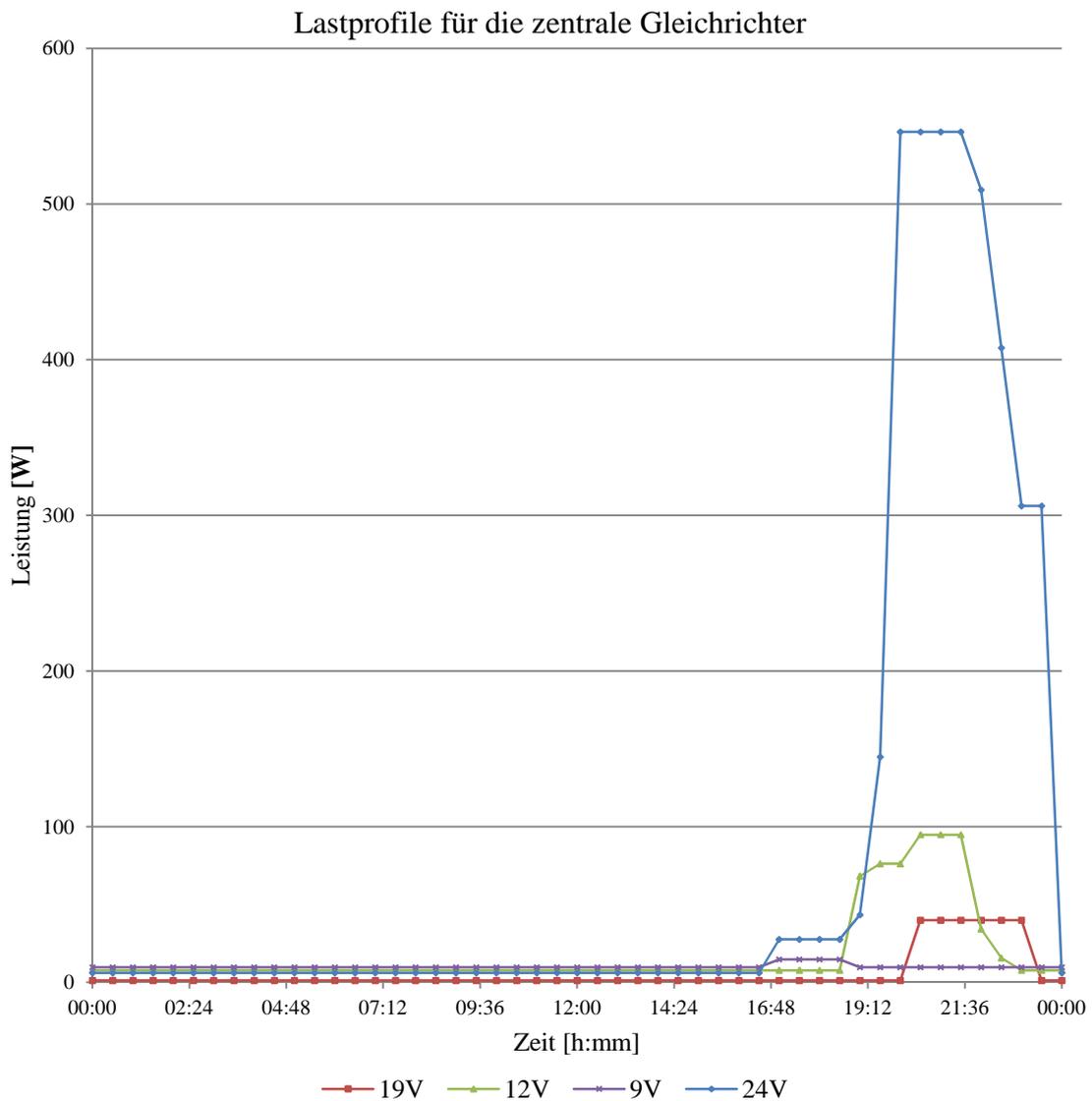
Es ist darauf zu achten, dass die zentralen Gleichrichter (9 V<sub>DC</sub>, 12 V<sub>DC</sub>, 19 V<sub>DC</sub>, 24 V<sub>DC</sub>) alle mit unterschiedlich vielen Verbrauchern belastet werden. Die hier verwendeten Verbraucher sind in Tabelle 4 auf die unterschiedlichen Wandler und Spannungen aufgeteilt.

**Tabelle 4: Einteilung der Verbraucher in die unterschiedlichen Spannungen**

24V <sub>DC</sub>	19V <sub>DC</sub>	12V <sub>DC</sub>	9V <sub>DC</sub>
HiFi-Anlage			
LCD-TV-1			
LCD-TV-2			
Kompakt-PC/2			
	Notebook		
		Kompakt- PC/2	
		LCD-Monitor	
		SAT-Kabel-Empfänger	
		DVD-Player	
			Schnurlostelefon
			WLAN-Router
			Elektr. Kleingeräte

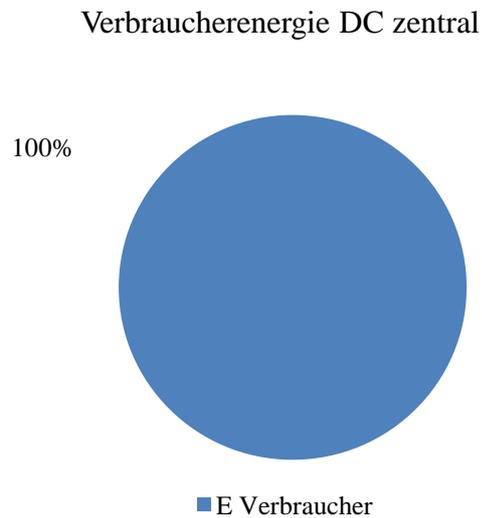
Da ein Kompakt-PC die Spannungen 24 V<sub>DC</sub> und 12 V<sub>DC</sub> benötigt, wird die Leistung auf diese Spannungen aufgeteilt. Für die anderen Verbraucher wird angenommen, dass diese nur eine Spannung benötigen.

Mit diesen Annahmen und den zeitlich aufgeschlüsselten Daten aus Abbildung 7 lässt sich nun für jeden zentralen Wandler ein Lastprofil erstellen. Es ergeben sich vier verschiedene Profile (Anhang 2.3.1), die im folgenden Unterpunkt zur Berechnung der Leitungs- und zentralen Gleichrichterverluste jeder Spannungsebene verwendet werden können. Addiert man die einzelnen Lastprofile, ergäbe sich das allgemeine DC-Verbraucher-Lastprofil aus Abbildung 11.



**Abbildung 30: Einzellastprofile der jeweiligen zentralen Wandler**

Für das DC-Zentral-Lastprofil kann abschließend gesagt werden, dass aufgrund der hier überflüssigen dezentralen Wandler eine Gesamtenergie von  $E_{\text{Gesamt}} = 2,93 \text{ kWh}$  pro Tag für die Verbraucher benötigt wird (Abbildung 31). Für die Arbeit bedeutet dies eine 100% Verwendung der zu übertragenden Leistung im Verbraucher.

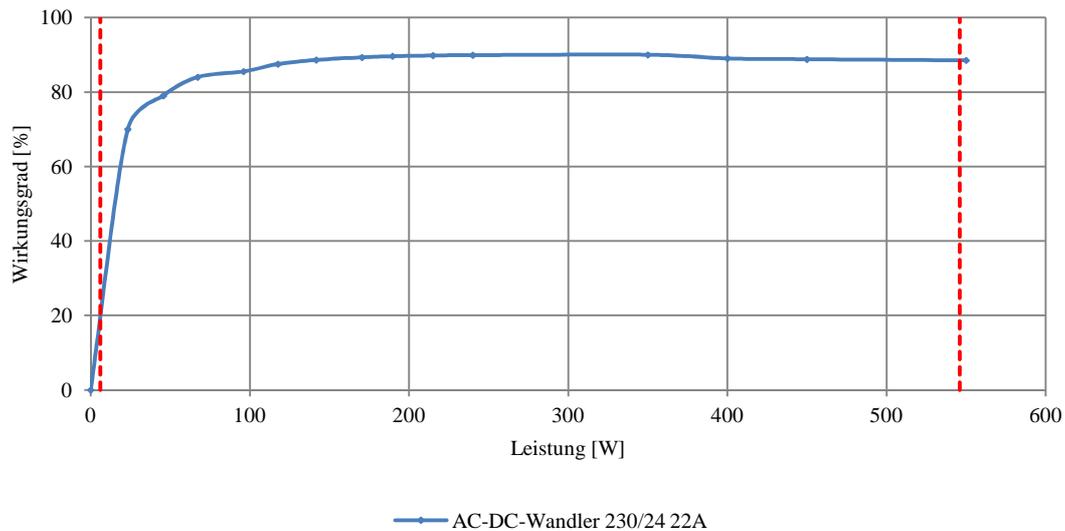


**Abbildung 31** Prozentuale Energiemenge für das DC-Zentral-Konzept

#### 4.5.2 Simulation der zentralen Wandler ( $9 V_{\text{DC}}$ , $12V_{\text{DC}}$ , $19V_{\text{DC}}$ , $24V_{\text{DC}}$ )

Genau wie bei den DC-Konzepten mit konstanter Gleichspannung sind wieder Annahmen über Wirkungsgrade der zentralen AC-DC-Wandler zu treffen, da es kaum möglich ist, Wandler mit den hier benötigten Leistungen und den zusätzlichen Angaben über deren Wirkungsgrade in Teil- bzw. Volllastbetrieb zu finden. Die simulierten Wandler für die Spannungsebenen  $9 V_{\text{DC}}$  und  $12 V_{\text{DC}}$  sind im Anhang unter 2.3.2 zu finden. Die Abbildung 32 zeigt den simulierten Wirkungsgradverlauf des  $24 V_{\text{DC}}$ -Wandlers. Dieser wird laut dem Lastprofil (Abbildung 30) mit einer Leistung von  $P_{(\text{min})} = 6,05 \text{ W}$  bis  $P_{(\text{max})} = 546 \text{ W}$  belastet. Somit muss auch hier wieder ein Wandler mit einem sehr großen Leistungsbereich verbaut werden. Da  $P_{\text{min}}$  nur 1,1 % der maximalen Leistung des hier simulierten Wandlers ausmacht, liegt der Wirkungsgrad bei schlechten 25 %. Um die Simulation fortzuführen, wird eine Funktion des Wandlers auch bei derart kleinen Leistungen vorausgesetzt.

## 24V AC-DC-Wandler



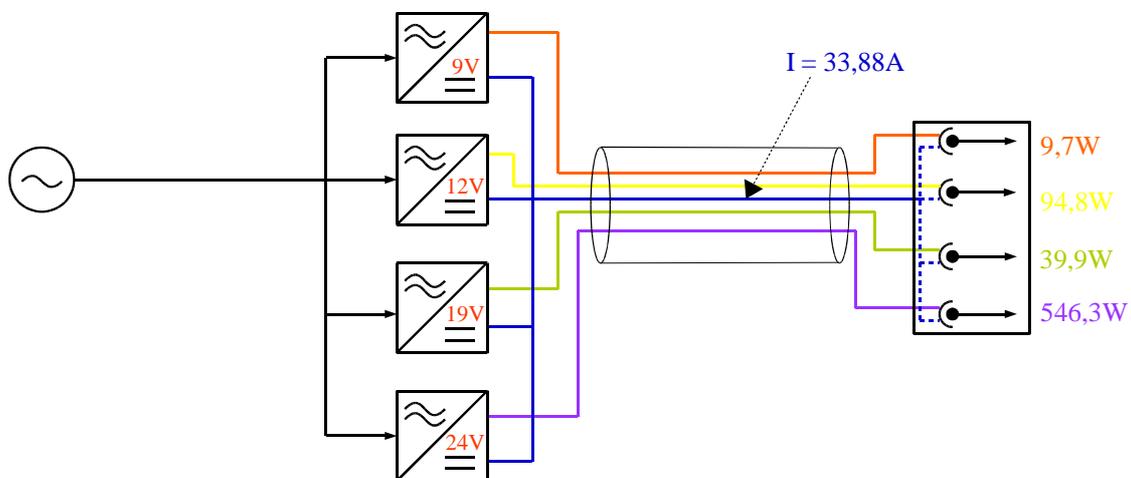
**Abbildung 32: Leistungsbereich des zentralen 24 V<sub>DC</sub> AC-DC-Wandlers**

Bei den übrigen zentralen Wandlern wird aufgrund der kleineren Leistungsbereiche über den gesamten Tag immer ein Wirkungsgrad von mehr als 77 % erreicht.

Für den Wandler der Spannungsebene 19 V<sub>DC</sub> wurde kein Wirkungsgradverlauf simuliert, da dieser lediglich mit einem Verbraucher (Laptop) belastet wird. Hierzu wurden die Werte aus Tabelle 2 für den Stand-by- und Vollastbetrieb angenommen.

### 4.5.3 Betrachtung der Verluste

In Abbildung 33 wird erneut das hier behandelte Konzept dargestellt. Zusätzlich sind darin die Leistungen im Vollastbetrieb (20:30 Uhr) eingetragen, um die hier auftretenden Probleme näher zu beschreiben.



**Abbildung 33: Konzept zentrale Wandler im Vollastbetrieb (20:30 Uhr)**

Aufgrund des gemeinsamen Rückleiters (blau) der unterschiedlichen Spannungsebenen addieren sich auf diesem die Ströme zu einem Gesamtstrom zusammen. Dieser beträgt zu Spitzenzeiten  $I_{(\max)} = 33,88 \text{ A}$ . Dadurch ist der  $1,5 \text{ mm}^2$  Rückleiter erheblich überlastet.

Der Spannungsfall ergibt sich wie bei den anderen Konzepten aus der Addition von Hin- und Rückleiter (GL.4). Da hier jedoch ein gemeinsamer Rückleiter vorhanden ist, der stärker belastet wird, muss der Spannungsabfall für Hin- bzw. Rückleiter einzeln berechnet und die Ergebnisse anschließend addiert werden. Als Beispiel wird der Spannungsfall für die  $24 \text{ V}_{\text{DC}}$ -Leitung berechnet:

$$U_{Vhin(24V)} = \frac{1 * l * \left( \frac{P_{\text{Verbraucher}(24V)}}{U_{24}} \right)}{\kappa * A}$$

$$U_{Vhin(24V)} = \frac{1 * 15 \text{ m} * \left( \frac{546,3 \text{ W}}{24 \text{ V}} \right)}{56 \frac{\text{m}}{\Omega \text{mm}^2} * 1,5 \text{ mm}^2} = 4,065 \text{ V}$$

$$U_{V(N-Leiter)} = \frac{1 * l * \left( \frac{P_{24V}}{U_{24}} + \frac{P_{19V}}{U_{19}} + \frac{P_{12V}}{U_{12}} + \frac{P_{9V}}{U_{9}} \right)}{\kappa * A} = 6,213 \text{ V}$$

$$U_{Vges(24V)} = U_{Vhin(24V)} + U_{V(N-Leiter)} = 4,065 \text{ V} + 6,213 \text{ V} = 10,278 \text{ V}$$

$$\Delta u_{24V} = 42,82 \%$$

Abbildung 34 stellt die einzelnen Spannungsfälle grafisch dar. Es ist zu erkennen, dass bei einer  $1,5 \text{ mm}^2$  Leitung, Spannungsabfälle von bis zu 71 % der angelegten Spannung erreicht werden (Anhang 2.3.3).

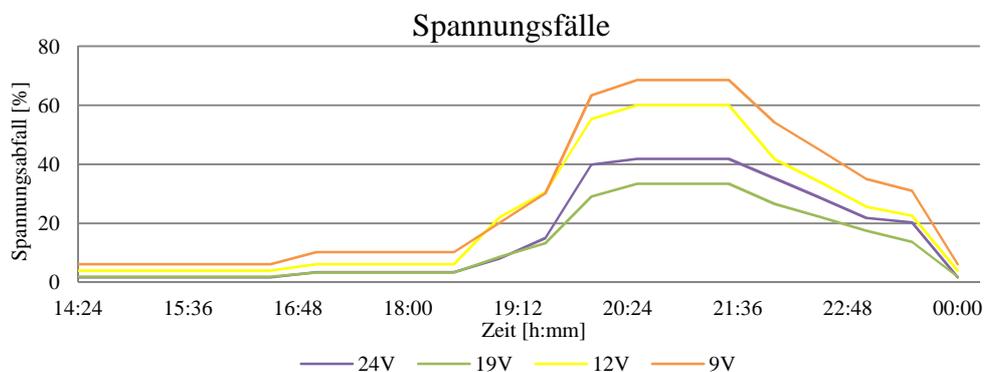
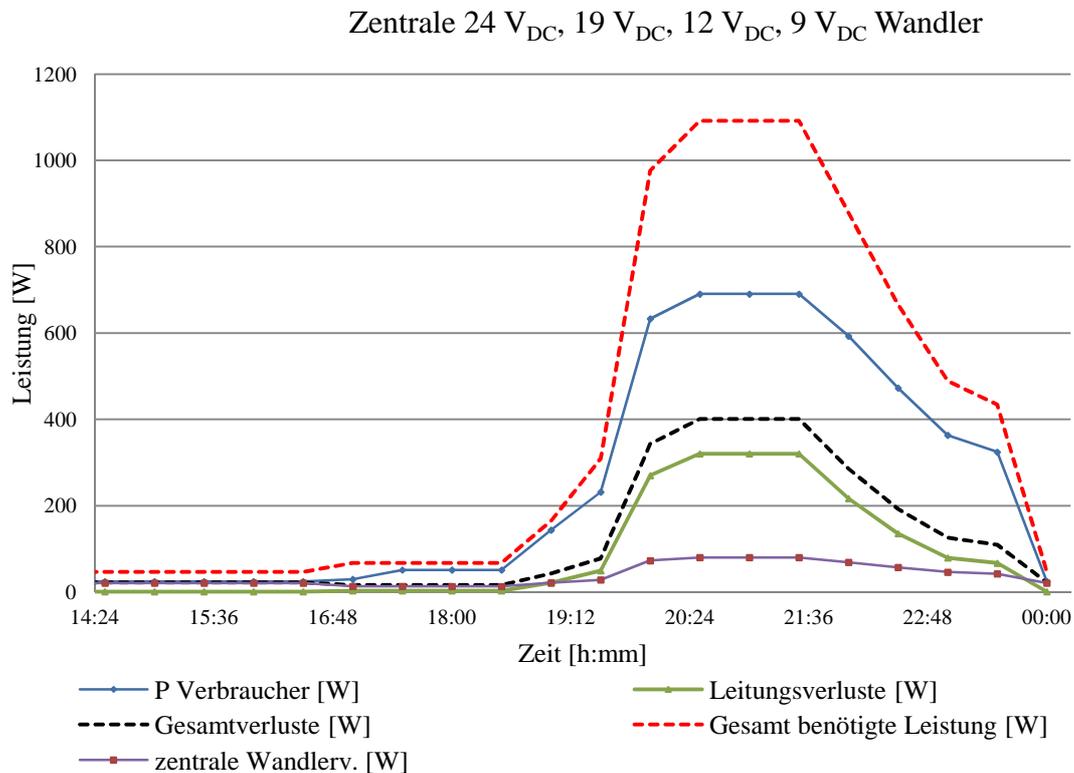


Abbildung 34: Spannungsfälle der einzelnen Leiter

Die hohen Leitungsverluste (Anhang 2.3.4) machen sich auch in Abbildung 35 bemerkbar. So wird bei diesem Konzept zu dem genauen Zeitpunkt (20:30 Uhr) eine Leistung von  $P_{\text{ges}} = 1091,62 \text{ W}$  benötigt, um alle Verbraucher mit  $P_{\text{Verbraucher}} = 690,69 \text{ W}$  zu betreiben. Daraus folgt, dass zu diesem Zeitpunkt Verluste von  $P_{\text{Gesamtverluste}} = 400,93 \text{ W}$  anfallen.



**Abbildung 35: Gesamtbetrachtung des zentralen Wandler Konzeptes**

Zur Verdeutlichung werden in Abbildung 36 die Zustände "Stand-by-Betrieb" (14:00 Uhr) und "maximaler Volllast-Betrieb" (20:30 Uhr) in einem prozentualen Kreisdiagramm dargestellt.

Im Stand-by-Betrieb fallen, wie bei den anderen DC-Konzepten auch, Verluste von 47 % an. Dies ist bei dem Konzept zum größten Teils auf den sehr schlechten Wirkungsgrad des hier simulierten  $24 \text{ V}_{\text{DC}}$ -Wandlers zurückzuführen. Der Wandler arbeitet in diesem Betriebszustand mit einem Wirkungsgrad von lediglich 25 %. Im Volllastbetrieb sind die Wandlerverluste so klein wie bei keinem anderen hier simulierten System (7 %). Die zentralen Wandler arbeiten alle mit einem sehr guten Wirkungsgrad, jedoch führen die hohen Leitungsverluste zu einem nicht vertretbaren Betriebszustand.

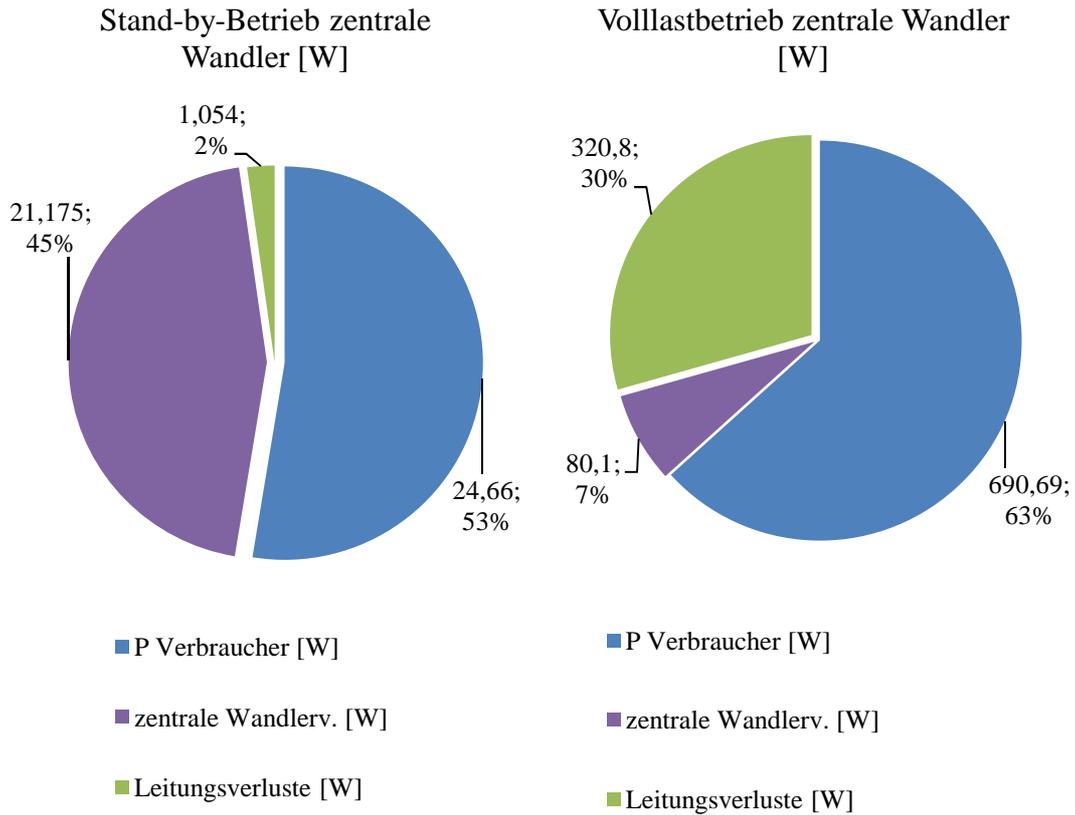


Abbildung 36: Min. und max. Zustand beim zentralen Wandler-Konzept

Hier wird über einen Tag eine Energiemenge von  $E_{ges} = 4,53 \text{ kWh}$  benötigt. Dies ist die größte Energieaufnahme im Vergleich zu den anderen hier simulierten Konzepten. Daraus folgt, dass die geringste Energiemenge (65 %) in den Verbrauchern umgesetzt wird.

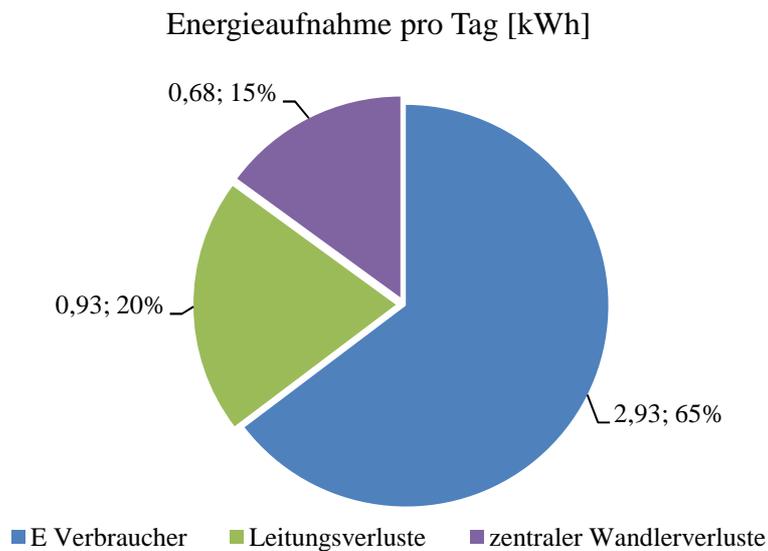
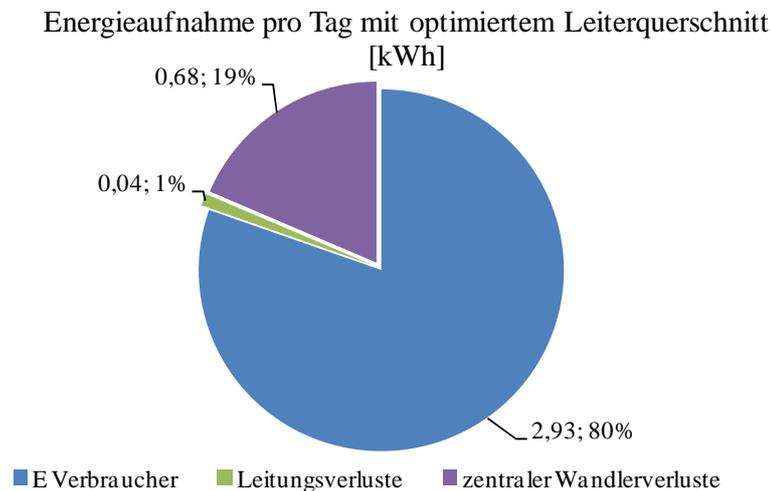


Abbildung 37: Energieaufnahme pro Tag des zentralen Wandler-Konzeptes

Abschließend werden die Leitungen so dimensioniert, dass der Spannungsfall unter den vorgeschriebenen 3 % bleibt. Um dies zu erreichen, müssen alle Leiter der verschiedenen Spannungsebenen einen Querschnitt von mindestens 35 mm<sup>2</sup> aufweisen. Mit diesem Querschnitt liegt der maximale Spannungsfall nur noch bei 2,82 %. (Anhang 2.3.5 und 2.3.6)



**Abbildung 38: Energieaufnahme pro Tag mit optimiertem Leiterquerschnitt**

Dies hat zur Folge, dass für den Betrieb nur noch eine Gesamtenergie von  $E_{\text{ges}} = 3,64$  kWh pro Tag benötigt wird (Abbildung 38). Mit dieser optimierten Leitung und den zentralen Wandlern fallen über den Tag nur noch 20 % Verluste an was bedeutet, dass das Konzept momentan die beste DC-Lösung darstellt.

Für die Installation müsste für dieses Konzept eine 5x35 mm<sup>2</sup> NYM Leitung verlegt werden. Die Kosten für eine 35 mm<sup>2</sup> NYM Leitung belaufen sich auf 20,06 €/m [11].

$$\text{Leitungskosten} = 20,06 \frac{\text{€}}{\text{m}} * 15 \text{ m}$$

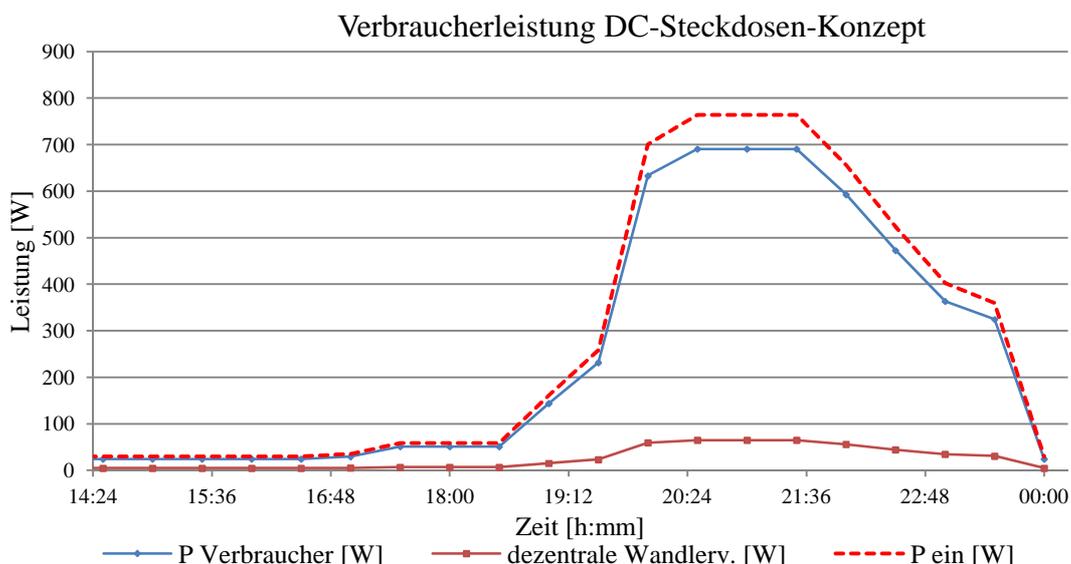
$$\text{Leitungskosten} = 300,90 \text{ €}$$

## 4.6 Gleichstromkonzept mit DC-Steckdosen

### 4.6.1 Lastprofil für das DC-Steckdosen-Konzept

Bei dem hier erstellten Konzept können Verbraucher teilweise über dieselbe Steckdose mit der von ihm benötigten Gleichspannung versorgt werden. Da die DC-Steckdosen zur Infrastruktur des Hauses zählen und so konstruiert werden, dass sie geringe Wandlerverluste und eine lange Lebensdauer aufweisen, wird hier auch ein verbesserter Wirkungsgrad der verbauten AC-DC-Wandler (im Vergleich zum AC-Fall) von 1 % angenommen. Somit werden für diesen Fall die Wirkungsgradannahmen aus Tabelle 3 zugrundegelegt.

Die Verlustleistungen werden erneut mit den Formeln GL.1, GL.2 und GL.3 berechnet. Die Ergebnisse sind somit die Gleichen wie bei den DC-Konzepten im Unterpunkt 4.4.1. Die errechneten Werte befinden sich im Anhang unter 2.2.1. Die auftretenden Wandlerverluste sind somit in Abbildung 19 dargestellt. Diese mit den Werten des allgemeinen DC-Verbraucher-Lastprofil aus Abbildung 11 addiert, ergeben das hier benötigte DC-Steckdosen-Lastprofil (Abbildung 39). Dieses erstellte Lastprofil ist identisch mit dem des Konzeptes mit konstanter Spannung. Das Energiekreisdiagramm ist somit ebenfalls identisch mit dem aus Abbildung 21 und wird hier nicht nochmals aufgeführt.



**Abbildung 39: DC-Steckdosen-Lastprofil**

#### 4.6.2 Betrachtung der Verluste

Die Leitungsverluste wurden wie bei den anderen Konzepten mit den Gleichungen 4, 5 und dem dazugehörigen Lastprofil (4.6.1) berechnet. Im Anhang unter 2.4.2 können diese eingesehen werden.

Es wird deutlich, dass hier wie bei dem AC-Konzept nahezu keine Leitungsverluste (grüne Linie) mehr zu den dezentralen Wandlerverlusten (DC-Steckdosen) hinzukommen. Dies ist erneut auf die hohe Wechselspannung zurückzuführen mit denen die DC-Steckdosen versorgt werden. Aufgrund der besseren Wirkungsgradannahme und den somit geringeren Verlusten auf der Leitung und im Wandler, wird hier zu der Spitzenzeit (20:30 Uhr) eine Leistung von  $P_{\text{Gesamt benötigte Leistung}} = 759,4 \text{ W}$  benötigt (rot gestrichelte Linie) um die Verbraucherleistung von  $P_{\text{Verbraucher}} = 690,69 \text{ W}$  bereitzustellen. Dies bedeutet, dass lediglich  $P_{\text{Gesamtverluste}} = 68,73 \text{ W}$  verloren gehen.

Der Spannungsfall in dem hier simulierten Fall liegt bei maximal  $\Delta u = 0,5 \%$ . Daraus ist zu folgern, dass das hier betrachtete DC-Steckdosen-Konzept stets in der Norm liegt und somit auch in der Praxis realisierbar ist.

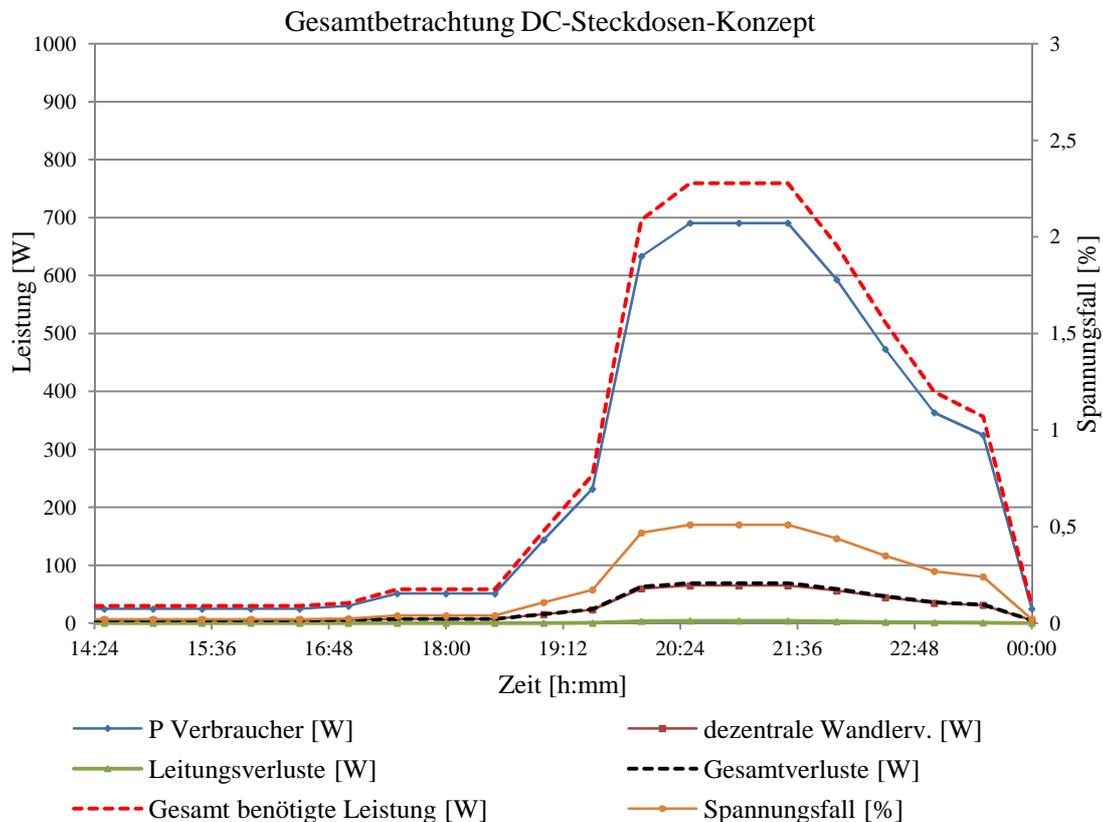
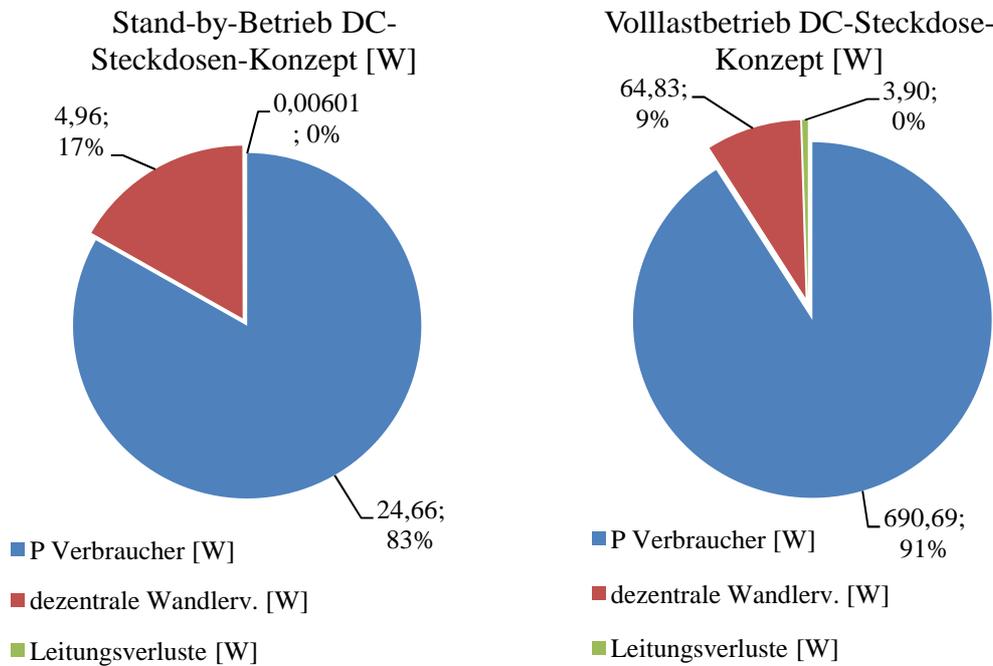


Abbildung 40: Gesamtbetrachtung DC-Steckdosen-Konzept

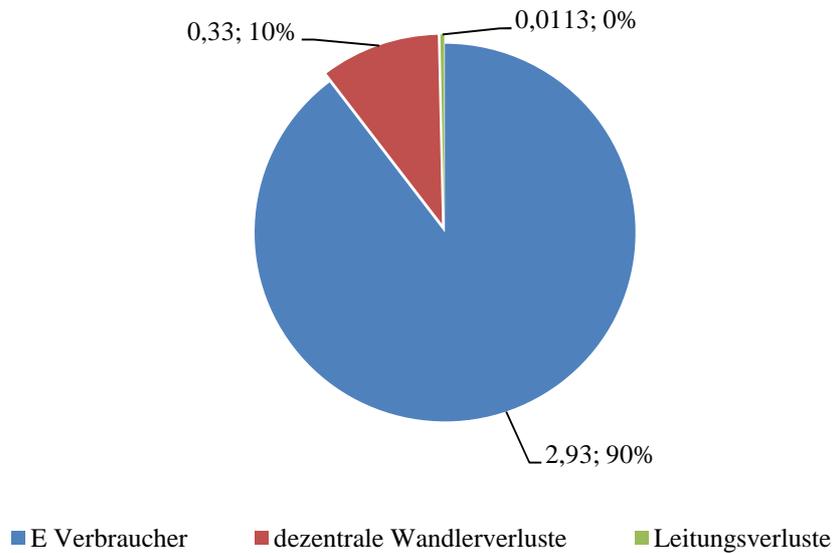
In Abbildung 41 werden die Zustände "Stand-by-Betrieb" (14:00 Uhr) und den "maximaler Volllastbetrieb" (20:30 Uhr) nochmals als Kreisdiagramm dargestellt. Die Leitungsverluste fallen hier nicht mit ins Gewicht. Außerdem ist die Verbraucher genutzte Leistung ( $P_{\text{Verbraucher}}$  mit 83 % bzw. 91 %) zu den hier dargestellten Zeiten in keiner anderen Simulation so groß.



**Abbildung 41: Minimaler und maximaler Zustand beim DC-Steckdosen-Konzept**

Auch im Energiekreisdiagramm (Abbildung 42), welches die Energieaufnahme über einen ganzen Tag darstellt, sind die Leitungsverluste mit 0 % (0,0113 kWh) beziffert. Insgesamt wird für den Betrieb der Verbraucher inklusive ihrer Leitungs- und Wandlerverluste eine Energie von  $E_{\text{ges}} = 3,27$  kWh pro Tag benötigt. Dies bedeutet, dass 90 % der benötigten Energie auch wirklich genutzt wird und lediglich 10 % als Verluste anfallen. Dies stellt in den hier angefertigten Simulationen das beste Ergebnis dar.

### Energieaufnahme pro Tag [kWh] DC-Steckdosen-Konzept



**Abbildung 42: Energieaufnahme pro Tag des DC-Steckdosen-Konzeptes**

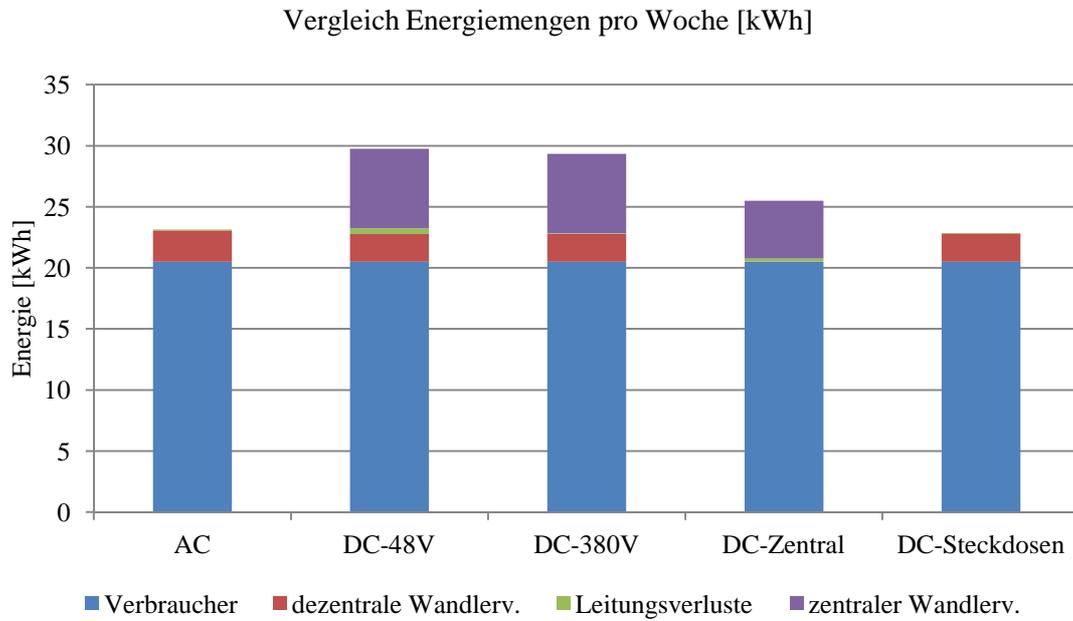
Wie die Simulation gezeigt hat, kann das DC-Steckdosen-Konzept mit einer handelsüblichen NYM 3\*1,5 mm<sup>2</sup> Leitung installiert werden. Die Kosten für eine solche Leitung belaufen sich bei einem 50 m Ring auf 0,88 €/m [9].

$$\text{Leitungskosten} = 0,88 \frac{\text{€}}{\text{m}} * 15 \text{ m} = 13,20 \text{ €}$$

Somit würde bei diesem Konzept ein Leitungsmaterialwert von 13,20 € verbaut werden.

## 4.7 Vergleich der Konzepte

Nachdem alle Konzepte mit ihren eigenen Lastprofilen simuliert wurden, sollen diese nun miteinander verglichen werden. Dafür sind die Energien, die die Konzepte in einer Woche benötigen, in Abbildung 43 dargestellt. Alle hier dargestellten Werte wurden mit einem Leiterquerschnitt von  $1,5 \text{ mm}^2$  simuliert.



**Abbildung 43: Benötigte Energie der Konzepte pro Woche (Anhang 2.5)**

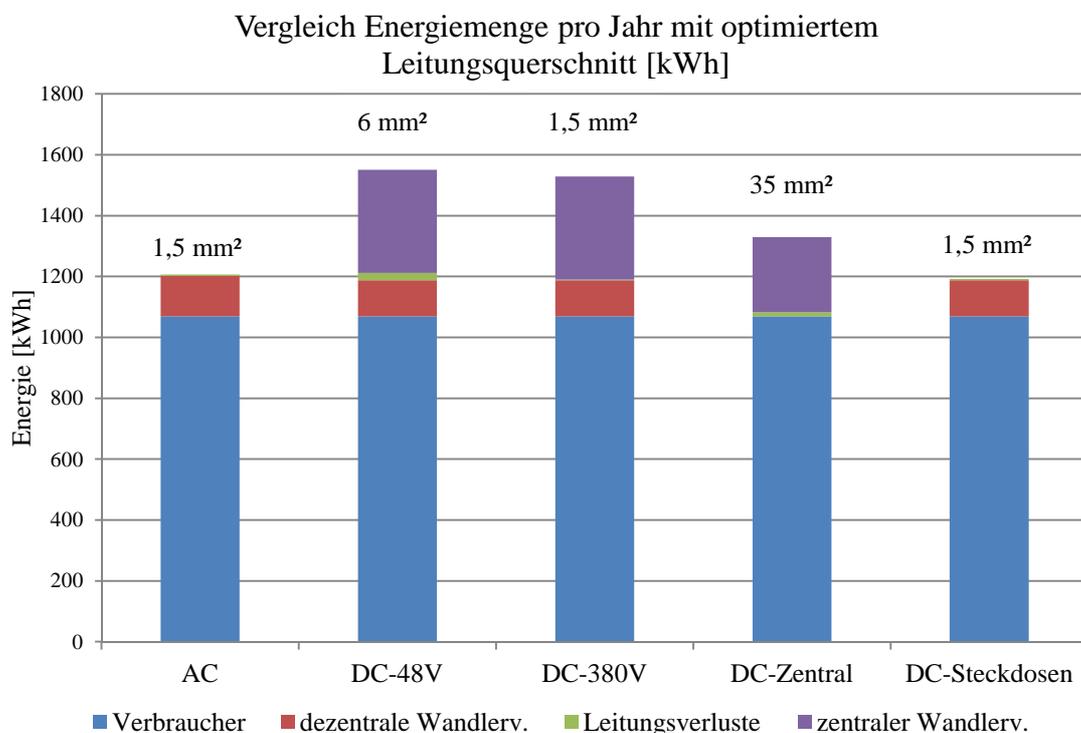
Auffällig ist, dass das hier simulierte DC-Steckdosen-Konzept über eine Woche gesehen geringfügig weniger Verluste als das AC-Konzept aufweist. Bei allen Konzepten sind die gleichen DC-Verbraucher (blau) angeschlossen. Diese verbrauchen pro Woche  $20,50 \text{ kWh}$ . Die dezentralen Wandler (rot) verbrauchen in den DC-Fällen und dem DC-Steckdosen-Konzept geringfügig weniger Energie ( $0,27 \text{ kWh/Woche}$ ), da hier der Wirkungsgrad um  $1 \%$  besser angenommen wurde.

Größere Unterschiede sind bei den Leitungsverlusten (grün) festzustellen. So weist das  $380 \text{ V}_{\text{DC}}$ -Konzept die geringsten Verluste auf ( $0,03 \text{ kWh}$ ). Die hohe Spannung führt aber auch zu Gefahren in der Handhabung. So ist eine Gleichspannung von  $380 \text{ V}_{\text{DC}}$  für den Menschen gefährlich. Aufgrund der im Vergleich zur Wechselspannung fehlenden Nulldurchgänge ist eine aufwändigere Schaltung notwendig, um die Gleichspannung im Notfall abzuschalten. Zudem muss bei  $380 \text{ V}_{\text{DC}}$  ein besonderer Schutz gegen das mögliche Berühren gewährleistet sein [11, 12]. Beim AC- und DC-Steckdosen-Konzept sind die Leitungsverluste

geringfügig höher, allerdings immer noch weit unter den vorgeschriebenen 3 %. Anders sieht es dagegen bei dem 48 V<sub>DC</sub>- und dem zentralen Wandler-Konzept aus. Die Simulationen haben ergeben, dass aufgrund des hohen Spannungsfalls auf den Leitungen eine derartige Installation nach VDE-Norm mit einer 1,5 mm<sup>2</sup> Leitung, nicht zulässig ist.

Die DC-Konzepte (konstante Spannung und zentrale Wandler) weisen im Gegensatz zum AC- und DC-Steckdosen-Konzept noch zusätzliche Verluste in den zentralen Wandlern (lila) auf. Aufgrund der großen Leistungsbereiche des einzelnen AC-DC-Wandlers in den 48 V<sub>DC</sub>- und 380 V<sub>DC</sub>-Konzepten sind hier wegen der geringen Belastung zeitweise nur Wirkungsgrade von ungefähr 50 % möglich (6,51 kWh/Woche). Beim zentralen DC-Konzept fallen die zentralen Wandlerverluste etwas geringer aus (4,73 kWh/Woche), da hier mehrere Wandler für die unterschiedlichen Spannungen verwendet werden und diese somit bessere Wirkungsgrade erzielen können.

Um die Konzepte nochmals detaillierter zu betrachten, werden in Abbildung 44 die benötigten Energien mit optimiertem Leitungsquerschnitt über den Zeitraum von einem Jahr dargestellt. Diese Konzepte könnten aufgrund der eingehaltenen Leitungsverluste (< 3 %) problemlos installiert werden.



**Abbildung 44: Benötigte Energie der Konzepte pro Jahr**

Diese Energiemengen sind in Tabelle 5 für Verbraucher, Leitungsverluste, dezentrale und zentrale Wandlerverluste für ein Jahr angegeben. Für die Energiekosten wird ein Strompreis von 25,55 Cent/kWh gewählt [13]. Für die anfallenden Leitungskosten wird die Annahme getroffen, dass diese über einen Zeitraum von 20 Jahren linear abgeschrieben werden.

**Tabelle 5: Energie der Konzepte pro Jahr mit Kosten**

	AC	48 V <sub>DC</sub>	380 V <sub>DC</sub>	DC-Zentral	DC-Steckdosen
Verbraucher [kWh]	1068,8	1068,8	1068,8	1068,8	1068,8
dezentrale Wandlerverluste [kWh]	133,2	119,4	119,4	0,0	119,4
Leitungsverluste [kWh]	4,2	23,3	1,5	14,1	4,1
zentraler Wandlerverluste [kWh]	0,0	339,5	339,5	246,8	
Energie pro Jahr [kWh]	1206,2	1551,0	1529,2	1329,7	1192,3
Energiekosten pro Jahr [€]	308,20	396,30	390,70	339,70	304,60
Leitungskosten(auf 20 Jahre) [€]	0,66	2,13	0,44	15,1	0,66
Gesamtkosten [€]	308,86	398,43	391,14	354,80	305,26

Die Gesamtkosten der jeweiligen Konzepte ist die Summe aus den Energiekosten und den auf 20 Jahren umgelegten Leitungskosten. Hierbei weist das DC-Steckdosen-Konzept geringfügig weniger Kosten (3,60 € weniger) als das AC-Konzept auf.

Abschließend ist festzuhalten, dass eine Installation von einem zusätzlichen DC-Netz, für das Entscheidungskriterium elektrische Verluste, mit den hier angenommenen Kriterien für das Haus "Knik naar de zon" kaum Vorteile mit sich führen würde. Aufgrund der Lastprofile konnte ein Mustertag sehr gut simuliert werden. Daraus wurde deutlich, dass die großen zentralen Wandler teilweise in einem sehr schlechten Wirkungsgrad arbeiten und somit hohe Verluste verursachen. Außerdem sind die Gesamtkosten aus Energieverbrauch und Leitungskosten im DC-Bereich über ein Jahr gesehen höher als bei einem Wechselspannungsnetz.

Auch wenn angenommen wird, dass alle Verbraucher mit einer konstanten DC-Spannung (z.B. 48 V<sub>DC</sub>) arbeiten und demzufolge der dezentrale DC-DC-Wandler wegfallen könnte, sind die Gesamtverluste (Leitungs- und zentrale Wandlerverluste) immer noch größer als die des AC- und DC-Steckdosen-Konzeptes.

Anders dagegen ist die Installation von DC-Steckdosen mit integrierten AC-DC-Wandlern, ein Konzept welches möglicherweise Vorteile aufweist. So wurden hier aufgrund der angenommenen besseren Wirkungsgrade elektrische Verluste geringfügig eingespart. Außerdem könnten je nach Platzierung der Steckdosen unterschiedliche Verbraucher, die die identische Gleichspannung benötigen, von einer DC-Steckdose und somit von einem Wandler versorgt werden. Dieser könnte dadurch einen besseren Wirkungsgrad im Stand-by- und Vollastbetrieb erzielen.

Ebenso sind die Leitungskosten bei diesem Konzept sehr gering, da es in das Wechselstromnetz integriert wird. Es werden keine zusätzlichen Leitungen, wie bei den anderen DC-Konzepten, benötigt. Es fallen lediglich Kosten für den Erwerb der DC-Steckdosen an. Um genauere Aussagen über dieses Konzept zu treffen, müsste eine solche DC-Steckdose gebaut und auf Wirkungsgrad, Kosten, Zuverlässigkeit und Materialaufwand (intern) untersucht werden.

## 5. Entscheidungskriterium "Materialaufwand"

Die Betrachtung der elektrischen Verluste hat ergeben, dass die Installation eines eigenen Gleichspannungsnetzes im Vergleich zum Wechselstromnetz in einem Wohnhaus keine Einsparung ergibt. Wahrscheinlicher bei dieser Installation sind höhere Verluste und Leitungskosten.

Ein anderes Entscheidungskriterium, das in dieser Arbeit betrachtet werden soll, ist der Materialaufwand. Es gilt zu untersuchen, wie viel Material eingespart werden kann, wenn alle Verbraucher direkt mit Gleichspannung versorgt und dadurch keine internen AC-DC-Wandler mehr benötigt werden.

Aus Abbildung 45 geht hervor, dass viele der elf Verbraucher, die in der Arbeit Berücksichtigung finden, in diesem Raum genutzt werden oder sogar installiert sind. Alle Verbraucher benötigen ihren eigenen AC-DC-Wandler. Insgesamt sind also 19 Wandler erforderlich, die intern oder als Netzteil die Verbraucher mit Gleichspannung versorgen. In den folgenden Unterpunkten soll nun die Lebensdauer bzw. die Austauschzyklen der einzelnen Verbraucher über einen Zeitraum von 20 Jahren betrachtet werden. Mit Hilfe dieser Daten kann ermittelt werden, wie viele Wandler bei einem AC-Netz benötigt und somit bei einem DC-Netz für das Wohnzimmer eingespart werden können.

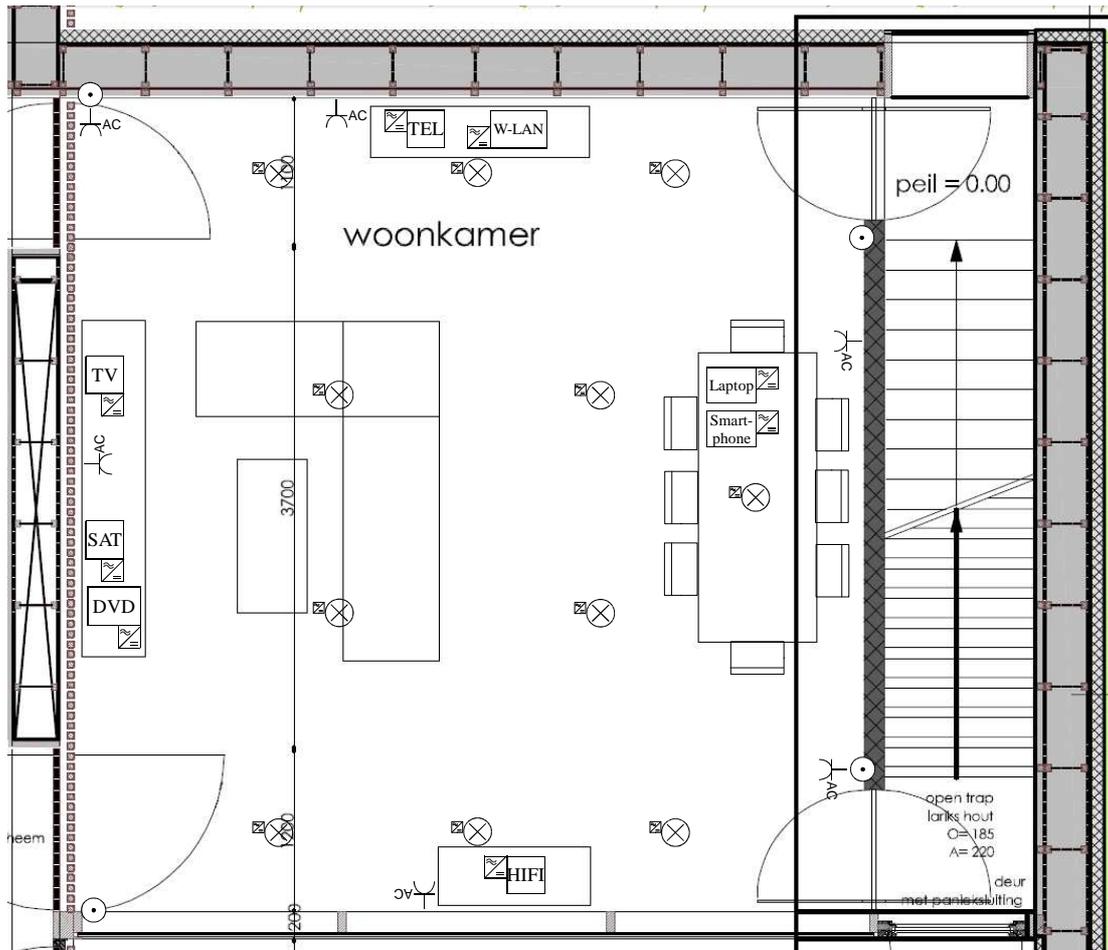


Abbildung 45: Wohnzimmer mit AC-Installation

### 5.1 Materialaufwand für das AC-Konzept

Abbildung 45 zeigt, dass 19 Wandler benötigt werden, um die Geräte im Wohnzimmer zu betreiben. Es soll nun betrachtet werden, wie oft beispielsweise ein Leuchtmittel in 20 Jahren gewechselt wird. Das hier ausgewählte Halogenleuchtmittel der Firma Megaman hat eine Lebensdauer von ~15.000 h [17] und ist, wie im ersten Teil der Arbeit definiert, 4 h pro Tag eingeschaltet.

$$\text{Austauschzyklus} = \frac{\left( \frac{15.000 \text{ h}}{4 \frac{\text{h}}{\text{Tag}}} \right)}{365 \frac{\text{Tage}}{\text{Jahr}}} = 10,27 \text{ Jahre}$$

Somit haben die Leuchtmittel nach ca. 10,27 Jahren ihre maximale Lebensdauer erreicht. Dies bedeutet, dass in 20 Jahren elf neue Leuchtmittel verbaut werden. Natürlich gibt es Leuchtmittel, die eine höhere Lebensdauer aufweisen, wiederum auch andere, die früher ausfallen. Aus diesem Grund wird hier mit dem Austauschzyklus von 10,27 Jahren gerechnet.

Nachfolgend wird der Fernseher betrachtet. Hierzu haben Marktforschungsunternehmen herausgefunden, dass in deutschen Haushalten nach etwa sechs bis sieben Jahren eine Neuanschaffung von Fernsehgeräten ansteht [18, 19]. Dies ist auf die ständig verbesserten Produkte zurückzuführen. Sind vor einigen Jahren (um 2005) viele Nutzer auf HD-READY umgestiegen, verlangen diese nun mit FULL-HD, 3D Funktion und SMART-TV nach Innovationen. Dies hat zur Folge, dass sich der mögliche Bewohner, in dem hier betrachteten Zeitraum von 20 Jahren, rund drei neue Fernseher anschaffen wird.

Vergleichbar ist die Situation bei DVD-Playern. Vor nicht allzu langer Zeit reichte ein gewöhnlicher DVD-Player aus. Der nachfolgende Player mit HD-READY wurde nur wenige Jahre später vom FULL-HD DVD-Player abgelöst. Heute sind diese Geräte wiederum veraltet, weil es die BLUE-RAY-Technik gibt. Demnach ist auch hier eine Lebensdauer von rund sechs Jahren zu erwarten, was wiederum bedeutet, dass im besagten Zeitraum drei neue Geräte angeschafft werden müssen. Der gleiche Austauschzyklus wird auch für einen SAT-Receiver vorhergesehen.

Schnurlostelefon und WLAN-Router werden in diesem Kontext mit einem Zyklus von acht Jahren betrachtet. Die Entwicklungen vom Modem über das ISDN-Modem zum DSL-Modem bis hin zum folgenden Glasfaser-Modem machen diesen Austauschzyklus plausibel.

Der längste Austauschzyklus wird für die HiFi-Anlage in Betracht gezogen. In den meisten Fällen wird in Qualität investiert, sodass ein Austausch nach ca. zehn Jahren denkbar ist. Dies würde zwei Geräteanschaffungen in 20 Jahren bedeuten.

Den kleinsten Austauschzyklus besitzen Smartphone und Laptop. Da die Nutzer aufgrund einer kontinuierlichen Neuentwicklung von Geräten laufend vom Hersteller davon überzeugt werden, dass ihr aktuelles Smartphone veraltet ist, wird dieses im Durchschnitt alle zwei Jahre gewechselt [20]. Demnach werden im betrachteten Zeitraum rund 10 Netzteile mit den neuen Geräten geliefert. Die Lebensdauer der ausgelieferten Netzteile ist sicherlich höher als der zweijährige Nutzungszeitraum von

Smartphones. Beim Laptop wird ein Zyklus von drei Jahren angenommen, d.h. in 20 Jahren wären sieben neue Ladegeräte erforderlich.

Die erwartbaren Austauschzyklen der einzelnen Geräte sind in Tabelle 6 dargestellt. Zusätzlich wird die daraus resultierende Anzahl von benötigten AC-DC-Wandlern über den Zeitraum von 20 Jahren angegeben. In der Summe ergeben sich also für das Wohnzimmer 55 AC-DC-Wandler

**Tabelle 6 Anzahl der benötigten Wandler**

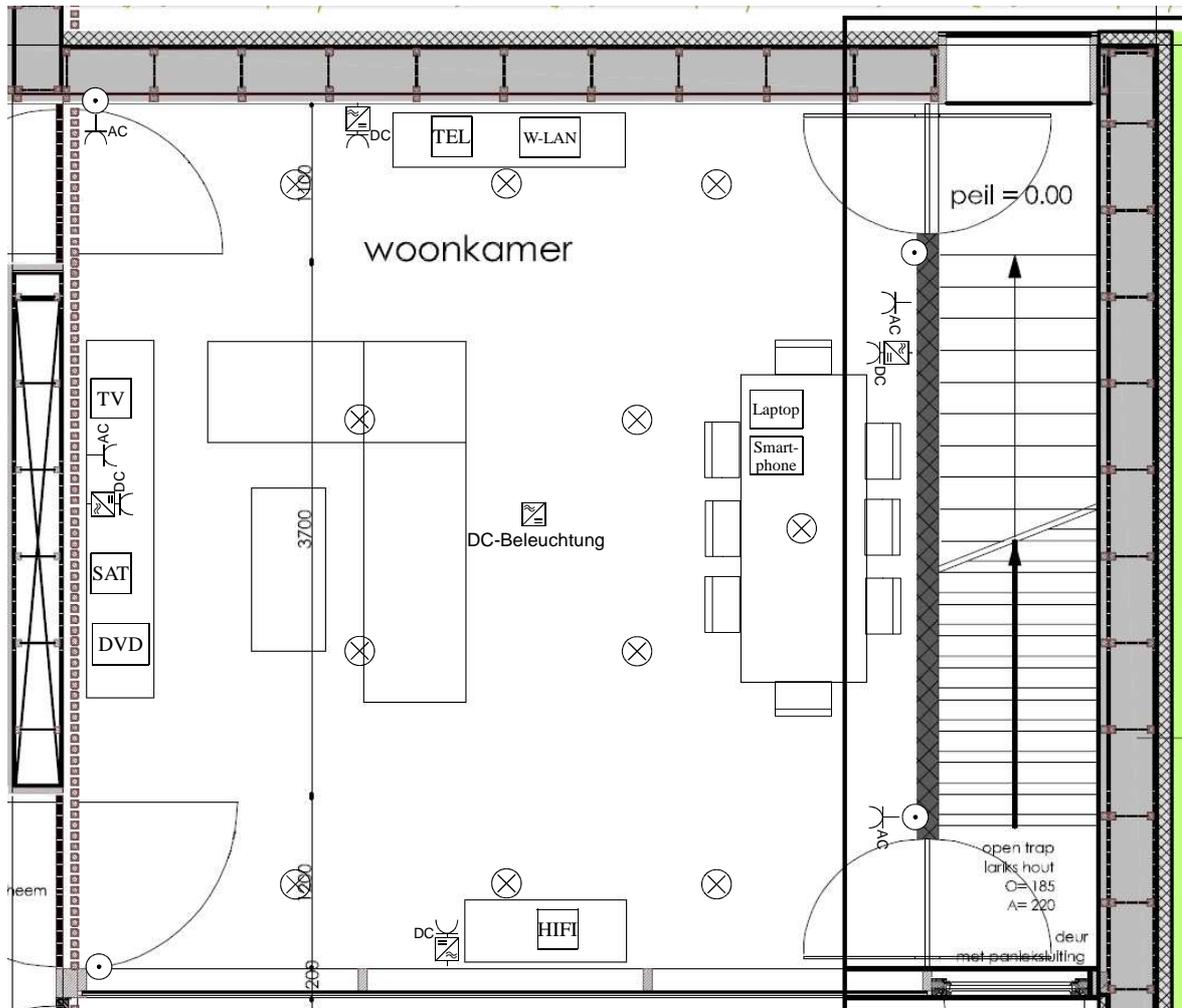
Geräte	Anzahl Wandler	Austauschzyklus [Jahre]	Anzahl 20 Jahre
Leuchtmittel (15000h)	11	10,27	21,41
LCD-TV	1	6	3,33
SAT-Receiver	1	6	3,33
DVD-Player	1	6	3,33
HiFi-Anlage	1	10	2,00
Schnurlostelefon	1	8	2,50
WLAN-Router	1	8	2,50
Smartphone	1	2	10,00
Laptop	1	3	6,67
Summe	19	Total	55,08

## 5.2 Materialaufwand für das DC-Konzept

Nun werden die DC-Konzepte betrachtet. Die Simulationen aus Kapitel 4 veranschaulichen, dass es aufgrund von hohen Verlusten unwirtschaftlich ist, ein komplettes DC-Netz mit eigenen Leitungen und zentralen Wandlern aufzubauen. Als optimal stellte sich das DC-Steckdosen-Konzept heraus, welches geringfügig weniger Verluste als das konventionelle Wechselspannungsnetz aufwies. Aus diesem Grund wird für jenes Konzept untersucht, wie groß der mögliche Materialaufwand in dem vorgegebenen Zeitraum von 20 Jahren betragen könnte.

Diese DC-Steckdosen werden im Wohnzimmer so verteilt, dass viele Verbraucher ihre benötigte Spannung gleichzeitig von einer Steckdose beziehen können. Abbildung 46 zeigt die Aufteilung der DC-Steckdosen. Da die DC-Steckdosen wie eingangs erwähnt mit der üblichen Wechselspannung versorgt werden, ist es unproblematisch zusätzliche AC-Steckdosen im Wohnzimmer zu platzieren. So

können auch Wechsellspannungsverbraucher, wie zum Beispiel der Staubsauger, problemlos verwendet werden. Für die Beleuchtung wird, wie bei der EMerge Alliance [22], nur ein zentraler AC-DC-Wandler benötigt, der beispielsweise in einer der Leuchten, einem Schalter oder wie in diesem Fall angenommen in der Decke verbaut wird.



**Abbildung 46: Wohnzimmer mit DC-Steckdoseninstallation**

Für das Wohnzimmer werden lediglich fünf DC-Steckdosen (inkl. Beleuchtung) angenommen. Mit diesen können alle Verbraucher mit Gleichspannung versorgt werden. Die AC-DC-Wandler werden hierbei unter Putz eingebaut, sodass diese zur Infrastruktur des Netzes gezählt werden können. Um Aussagen über eine mögliche Lebensdauer der DC-Steckdose zu treffen, wird ein Vergleich mit einem elektronischen Vorschaltgerät (EVG) angestellt. Dieses Gerät ist in Leuchtstoffleuchten fest verbaut und gehört somit auch zur Infrastruktur. Über den

ganzen Zeitraum bzw. der Lebensdauer einer Leuchte hinweg müssen gewöhnlich nur die Leuchtmittel mehrfach gewechselt werden. Aus diesem Grund weist das EVG eine sehr hohe Lebensdauer auf. Von der Firma OSRAM sind zum Beispiel auf dem Frankfurter Flughafen 50.000 EVGs verbaut worden. Davon sind nach 130.000 h Brenndauer weniger als 4 % ausgefallen [21]. Für die DC-Steckdosen kann somit eine noch höhere Lebensdauer als 20 Jahre erwartet werden, weil diese nicht ständig im Vollastbetrieb oder zeitweise gar nicht eingeschaltet sind.

In Tabelle 7 sind alle DC-Verbraucher aufgelistet, die im Wohnzimmer verwendet werden. Außerdem wird verdeutlicht, welche Verbraucher von den DC-Steckdosen, versorgt werden.

**Tabelle 7 Anzahl der benötigten Wandler**

Gerät	Anzahl Wandler	Austauschzyklus [Jahre]	Anzahl 20 Jahre
Leuchtmittel (15000h)	1	0	1
LCD TV	1		1
SAT-Receiver			
DVD-Player	1		1
HiFi-Anlage			
Schnurlostelefon	1		1
WLAN-Router			
Smartphone	1		1
Laptop			
Summe	5		Total

Aufgrund der langen Lebensdauer werden in 20 Jahren Laufzeit lediglich fünf DC-Steckdosen benötigt, wodurch eine hohe Materialersparnis erzielt wird. Zu den Kosten einer solchen Steckdose kann zum jetzigen Zeitpunkt noch keine Aussage getroffen werden. Es ist lediglich zu berücksichtigen, dass die unterschiedlichen Steckdosen teilweise nur eine Spannung bereitstellen müssen. So zum Beispiel beim Schnurlostelefon und WLAN-Router. Beide Netzteile funktionieren in den hier erstellten Berechnungen mit  $5 V_{DC}$ . Ebenso wird für die Beleuchtung ausschließlich  $24 V_{DC}$  benötigt. Deshalb sind unterschiedliche Kosten für die DC-Steckdosen zu erwarten.

### 5.3 Materialaufwand im Vergleich

Betrachtet man abschließend beide Systeme, so wird ersichtlich, dass aufgrund der Verwendung von DC-Steckdosen eine große Anzahl an AC-DC-Wandlern eingespart werden können.

**Tabelle 8 Wandlereinsparung zwischen AC- und DC-Netz**

	AC	DC	Differenz DC zu AC
Installation/Wandler	19	5	14
Erneuerungen in 20 Jahren	36	0	33
Gesamt	55	5	52

Mit den DC-Steckdosen ist über den Zeitraum von 20 Jahren insgesamt eine Materialersparnis von ca. 52 AC-DC-Wandlern im betrachteten Wohnzimmer möglich. Um Smartphone und Laptop in anderen Räumen oder auf Reisen laden zu können, sollten zwei weitere Wandler abgezogen werden, sodass noch 50 Wandler benötigt werden. Folglich ist mit dieser Einschätzung eine Installation von DC-Steckdosen aus Gründen der Nachhaltigkeit und der möglichen Einsparung von Wandler (Ressourcen) sinnvoll.

Um genauere Aussagen über die Zuverlässigkeit, die zu erwartenden Kosten, dem erreichbaren Wirkungsgrad und der Lebensdauer einer DC-Steckdose zu treffen, müsste ein derartiger Prototyp gebaut werden.

## 6. Fazit und Ausblick

Wie die bereits in der Einleitung vorgestellten Arbeiten und Projekte veranschaulichen, ist das Thema Gleichstromübertragung in Wohnhäusern ein Thema, welches in der Zukunft immer mehr an Bedeutung gewinnen wird.

In dieser Arbeit wurden "Optionen einer Gleichstromversorgung für ein Wohnhaus" unter Berücksichtigung der Entscheidungskriterien "elektrische Verluste" und "Materialaufwand" untersucht.

Aufgrund der relativ hohen elektrischen Verluste die bei DC-Konzepten anfallen (je nach Konzept bis zu 482,2 kWh/Jahr) ist es nur bedingt sinnvoll, ein Wohnhaus in einem Industrieland mit der schon vorhandenen Wechselspannungsinfrastruktur mit einem Gleichspannungsnetz zu betreiben. Anlässlich der häufig wechselnden Leistungsaufnahme der Verbraucher müssen die zentralen Wandler einen sehr großen Leistungsbereich mit einem möglichst optimalen Wirkungsgrad abdecken. Dieser Leistungsbereich erstreckt sich von 20 W im Stand-by-Betrieb bis hin zu 700 W bei Vollast mit den bekannten hohen Wandlerverlusten. Ein Lösungsansatz zur Verringerung dieser zentralen Wandlerverluste wäre die Installation eines zusätzlichen Wandlers, der den relativ langen Stand-by-Betrieb (bis zu 16 Stunden pro Tag) mit einem guten Wirkungsgrad abdecken könnte.

Die simulierten DC-Konzepte (DC-Zentral und konstante Spannung) ergaben mit Ausnahme der 380 V<sub>DC</sub> Variante hohe Leitungsverluste. Um diese Verluste zu reduzieren, wurden größere Leitungsquerschnitte erforderlich. Mit dem erhöhten Leitungsquerschnitt ließen sich die Verluste auf der Leitung je nach Konzept auf 23,3 kWh/Jahr (48 V<sub>DC</sub>-Konzept) und 14,1 kWh/Jahr (DC-Zentral) verringern. Dies erhöht jedoch den Verlegeaufwand und die Leitungskosten, sodass sich dadurch ein weiteres diskussionswürdiges Entscheidungskriterium ergeben würde, welches eine genauere Betrachtung erforderlich macht.

Im Gegensatz hierzu benötigt das DC-Steckdosen-Konzept keine zusätzlichen Leitungen, da es mit dem vorhandenen Wechselspannungsnetz betrieben werden kann. Infolge der guten Wirkungsgradannahmen ergab sich für dieses Konzept die geringsten Leitungsverluste von 4,12 kWh/Jahr.

Aus dem zweiten Abschnitt ergibt sich die Schlussfolgerung, dass ein großes Einsparpotential bei AC-DC-Wandlern zu erreichen ist, wenn die Wandler nicht im

Gerät sondern extern in DC-Steckdosen verbaut sind. Über einen Zeitraum von 20 Jahren können hier Materialkosten von bis zu 50 Wandlern eingespart werden.

In diesem Kontext wird jedoch deutlich, dass noch weitere Forschungsarbeit geleistet werden muss. So konnten noch keine Aussagen über die Kosten, Bauform, Lebensdauer und Sicherheitsaspekte einer solchen DC-Steckdose gemacht werden. Außerdem bleibt die Frage unbeantwortet, wie eine derart große Anzahl unterschiedlicher Hersteller von Endgeräten für ein solches DC-Projekt gewonnen werden können. Würden sich diese beispielsweise auf einige wenige Gleichspannungen einigen, könnte das DC-Steckdosen-Konzept sehr gut realisiert werden und die Verluste bei der Wandlung würden noch geringer ausfallen.

Abschließend wird eine Bewertungstabelle (Tabelle 9) erstellt, in der die Konzepte auf unterschiedliche Punkte verglichen und bewertet werden. Die Bewertungen reichen von "++" über "0" bis "--".

**Tabelle 9: Bewertungstabelle**

Kriterien	Konzepte									
	AC		48 V <sub>DC</sub>		380 V <sub>DC</sub>		DC-Zentral		DC-Steckdosen	
Verluste										
Stand-by (12:00) [%]	18 %	+	58 %	-	58 %	-	45 %	0	17 %	+
Volllast (20:30) [%]	10 %	0	19 %	-	19 %	-	7 %	+	9 %	0
Leitungsverluste [kWh]	0,0114	0	0,06	-	0,004	+	0,04	-	0,0113	0
Leitungskosten	3*1,5 mm <sup>2</sup>	0	2*6 mm <sup>2</sup>	-	2*1,5 mm <sup>2</sup>	+	5*35 mm <sup>2</sup>	--	3*1,5 mm <sup>2</sup>	0
Wandlerersparnis	-		--		--		+		++	
Zuverlässigkeit	-		0		0		0		+	
Sicherheit	-		+		-		-		+	
Realisierbarkeit	++		0		0		0		+	
<b>SUMME</b>	<b>0</b>		<b>-5</b>		<b>-3</b>		<b>-2</b>		<b>+6</b>	

Zunächst soll dabei eine Aussage über die im ersten Teil der Arbeit betrachteten elektrischen Verluste im Stand-by- sowie im Volllastbetrieb getroffen werden. In Tabelle 9 sind alle elektrischen Verluste prozentual angegeben.

Stand-by-Verluste:

Aus diesen geht hervor, dass zum Beispiel bei den Konzepten 48 V<sub>DC</sub> und 380 V<sub>DC</sub> 58 % der benötigten Leistung im Stand-by-Betrieb (12:00 Uhr) als Verluste anfallen. Damit machen diese Konzepte die größten Verluste aus und deshalb werden sie mit

einem "-" versehen. Als neutral ("0") wird das DC-Zentral-Konzept bewertet, welches immer noch viele Verluste (45 %) aufweist, diese aber geringer als bei den DC-Konstant-Konzepten sind. Folglich fallen das AC- und DC-Steckdosen-Konzept positiv auf. Hier wurden im Stand-by-Betrieb Verluste von 18 % bzw. 17 % ermittelt. Da lediglich 1 % Unterschied zwischen den Konzepten festzumachen ist, erhalten beide ein "+".

#### Volllastbetrieb:

Beim Volllastbetrieb (20:30 Uhr) weisen die DC-Konstant-Konzepte erneut die höchsten Verluste auf (19 %) und werden deshalb mit einem "-" bewertet. Bei den AC- und DC-Steckdosen-Konzepten zeigen sich erneut nahezu die gleichen elektrischen Verluste. Beide werden somit mit einer "0" eingestuft. Wie im ersten Teil der Arbeit bereits erwähnt, sind im Volllastbetrieb im DC-Zentral-Konzept die geringsten Verluste (7 %) festzuhalten und eben deshalb wird dieses Konzept mit einer positiven Bewertung ("+") versehen.

#### Leitungsverluste:

Als weiteres Bewertungskriterium werden die über einen gesamten Tag anfallenden elektrischen Leitungsverluste bei optimierten Leitungsquerschnitten betrachtet. Diese werden in Tabelle 9 in kWh angegeben. Dabei weist das 380 V<sub>DC</sub>-Konzept aufgrund der hohen Gleichspannung die geringsten Verluste auf (0,004 kWh) und wird deshalb positiv ("+") bewertet. Als neutral ("0") und mit nahezu identischen Leitungsverlusten wird das AC- und das DC-Steckdosen-Konzept bewertet. Die größten Leitungsverluste weisen das 48 V<sub>DC</sub>- (0,06 kWh) und das DC-Zentral-Konzept (0,04 kWh) auf. Aus diesem Grund erhalten beide eine negative "-" Bewertung.

#### Leitungskosten:

Aufgrund der hohen Leitungsverluste müssen je nach Konzept erheblich größere Querschnitte verlegt werden. Das 380 V<sub>DC</sub>-Konzept ist in diesem Kontext das Konzept mit den geringsten Kosten für die Leitungen (2\*1,5 mm<sup>2</sup>) und wird erneut positiv bewertet ("+" ). Eine Ader mehr benötigen das AC- und das DC-Steckdosen-Konzept (3\*1,5 mm<sup>2</sup>), weshalb beide bei dieser Bewertung als neutral ("0") eingestuft werden. Die Leiterquerschnitte müssen bei geringerer Spannung vergrößert werden, um den Spannungsfall (max. 3 %) einzuhalten. So muss für das 48 V<sub>DC</sub>-Konzept eine

6 mm<sup>2</sup> Leitung verlegt werden ("-"). Für das DC-Zentral-Konzept wird ein Querschnitt von 35 mm<sup>2</sup> benötigt, um den Spannungsfall unter den vorgeschriebenen 3 % zu halten. Folglich wird es mit "--" bewertet.

Wandlerersparnis:

Das nächste Bewertungskriterium, welches in der Tabelle ersichtlich wird, bewertet die möglichen Wandlerersparnisse eines DC-Netzes. Wie die Berechnungen aus dem zweiten Teil der Arbeit ergeben haben, weist das DC-Steckdosen-Konzept die größte Ersparnis auf und wird somit mit "++" bewertet. Betrachtet man nur die Wandlereinsparungen des DC-Zentral-Konzeptes, ohne die dort auftretenden hohen elektrischen Verluste zu berücksichtigen, weist dieses Konzept ebenfalls positive Aspekte auf und wird deshalb mit "+" bewertet, das AC-Konzept jedoch mit "-". Hier sind die Wandler entweder als Netzteil oder intern im Gerät verbaut. Dies hat zur Folge, dass bei einem defekten Wandler in der Regel das ganze Gerät erneuert werden muss. Als sehr negativ ("--") müssen die DC-Konstant-Konzepte angesehen werden. Hier werden sowohl zentrale als auch dezentrale Wandler benötigt, die eine Wandlereinsparung nahezu unmöglich machen.

Im Folgenden werden weitere Kriterien angeführt, die bei einer Bewertung der Konzepte berücksichtigt werden müssen (Zuverlässigkeit, Sicherheit, Nachhaltigkeit, Realisierbarkeit).

Zuverlässigkeit:

Für eine DC-Steckdose kann die Zuverlässigkeit mit "+" angenommen werden. Wenn beispielsweise eine Steckdose einen Fehler aufweist, kann einfach ein Ersatz eingebaut oder eine andere Steckdose im Raum verwendet werden, um das Gerät weiter zu betreiben. Außerdem sollte man davon ausgehen, dass die hierfür entwickelten Steckdosen eine lange Lebensdauer aufweisen und deshalb eine hohe Zuverlässigkeit haben. Bei den Konzepten mit zentralen Wandlern kann auch von einer hohen Lebensdauer ausgegangen werden, jedoch kann hier ein möglicher Defekt zu einem längeren Ausfall des gesamten DC-Netzes und somit zu einer Abwertung der Zuverlässigkeit führen. Aus diesem Grund wird dieses Konzept als neutral ("0") eingestuft. Das AC-Konzept wird hinsichtlich der Zuverlässigkeit negativ ("-") bewertet. Dies wird damit begründet, dass viele Hersteller versuchen die Geräte mit geringen Materialkosten herzustellen. So wird bei den Bauteilkosten für

die internen Wandler gespart, wodurch die Zuverlässigkeit und auch die Wandlerlebensdauer abnimmt [29]. Wenn ein solcher interner Wandler defekt ist, wird das ganze Gerät in der Regel aus wirtschaftlichen Gründen entsorgt.

Sicherheit:

Die 48 V<sub>DC</sub>-, DC-Zentral- und DC-Steckdosen-Konzepte sind positiv ("+") eingestuft, weil bei allen Konzepten der Nutzer nur mit kleinen für ihn ungefährlichen Gleichspannungen in Berührung kommen kann. Das AC- und das 380 V<sub>DC</sub>-Konzept stellen Gefahren für den Menschen dar, folglich werden diese negativ eingestuft ("-").

Realisierbarkeit:

Zu guter Letzt wird die Realisierbarkeit bewertet. Hierbei wird das AC-Konzept als das beste und somit mit "++" bewertet. Es existiert bereits in allen Häusern und wird seit sehr vielen Jahren genutzt. Als positiv ("+") lässt sich das DC-Steckdosen-Konzept einstufen, weil es aufgrund der Nutzung des überall vorhandenen AC-Netzes ohne größeren Aufwand realisiert werden kann. Es benötigt keine Installation von zusätzlichen Leitungen und die DC-Steckdosen könnten beispielsweise im Austausch mit den AC-Steckdosen in die vorhandenen Wandöffnungen eingebaut werden. Mit neutral ("0") werden die Konzepte bewertet, die ein eigenes Netz benötigen. Hier ist ein enormer Aufwand zu betreiben, um ein solches Netz in ein bereits bestehendes Haus zu integrieren.

Aus der Summe der Bewertungen hebt sich das DC-Steckdosen-Konzept ab. Es erreicht unter den hier berücksichtigten Kriterien ein Ergebnis von +6. Weit dahinter liegen das AC-Konzept mit 0 und das DC-Zentral-Konzept mit -2 Punkten. Außerdem das 380 V<sub>DC</sub>-Konzept mit -3 und das 48 V<sub>DC</sub>-Konzept mit -4 Punkten. Somit kann abschließend festgehalten werden, dass eine Mischung bestehend aus einem AC-Netz (mit seinen geringen Leitungsverlusten) und einem DC-Steckdosen-Konzept (mit der hohen Materialersparnis von Wandlern) einen Lösungsansatz für die Gleichstromversorgung eines Wohnhauses darstellt. Wenn beide Ansätze gut aufeinander abgestimmt werden, könnte sich daraus eine zukunftsweisende Technik ergeben.

## Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen

Symbol	Einheit	Beschreibung
U	V	Spannung
I	A	Stromstärke
$U_{DC}$	$V_{DC}$	Gleichspannung
$U_{AC}$	$V_{AC}$	Wechselspannung
P	W	Leistung
E	kWh	Energie
t	h	Zeit
A	mm <sup>2</sup>	Querschnitt
$P_{ein}$	W	Eingangsleistung der Verbraucher
$P_{max}$	W	maximal Leistung
$P_{min}$	W	minimal Leistung
$P_{Verbraucher}$	W	Leistung die im Verbraucher umgesetzt wird
$P_{Wandlerverluste}$	W	Leistung die im Wandler verloren geht
$P_{Stand-by}$	W	Leistung die im Stand-by verbraucht wird
$\eta_{Stand-by}$	%	Wirkungsgrad der Verbraucher im Stand-by-Betrieb
$\eta_{Vollast}$	%	Wirkungsgrad der Verbraucher im Vollastbetrieb
$P_{Gesamtverluste (min)}$	W	minimale Gesamtverluste des Konzepts
$P_{Gesamtverluste (max)}$	W	maximale Gesamtverluste des Konzepts
$E_{Gesamt}$	kWh	Gesamtenergie
$U_V$	V	Spannungsverluste
$P_V$	W	Verlustleistung
l	m	Länge
$\kappa$	$\frac{m}{\Omega \cdot mm^2}$	spezifische Leitfähigkeit
$\Delta u$	%	prozentualer Spannungsfall
$P_{Vmin}$	W	minimale Verlustleistung
$P_{Vmax}$	W	maximale Verlustleistung

## Abkürzungsverzeichnis

AC	Wechselspannung
DC	Gleichspannung
LED	Licht emittierende Diode
DVD	Digital Versatile disc (digitale vielseitige Scheibe)
HiFi	High Fidelity (hohe (Klang-)Treue)
SAT	Satellitenempfänger
WLAN	Wireless Local Area Network
LCD	liquid crystal display
EVG	Elektronisches Vorschaltgerät
Abb.	Abbildung
z.B.	Zum Beispiel
bzw.	Beziehungsweise

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Wohnzimmerplan mit Leitungslängen und Verbraucher .....	8
Abbildung 2: Beispiel Konzept .....	8
Abbildung 3: Darstellung eines Wechselstromnetzes .....	9
Abbildung 4: Gleichstromnetz mit konstanter Spannung.....	10
Abbildung 5: Gleichstromnetz mit zentralen Wandlern.....	11
Abbildung 6: DC-Steckdosen-Konzept .....	12
Abbildung 7: Verbraucher für einen 4-Personen-Haushalts für den Sommer [5].....	14
Abbildung 8: Alle Verbraucherleistung über den Tag .....	15
Abbildung 9: Lastprofil aus der Summe aller Verbraucherleistungen (AC und DC) .	15
Abbildung 10: Anteil am Energieverbrauch von AC und DC pro Woche.....	16
Abbildung 11: Lastprofil der DC-Verbraucher .....	17
Abbildung 12: Verdeutlichung eines Verbrauchers .....	19
Abbildung 13: AC-Wandlerverluste.....	23
Abbildung 14: Lastprofil AC-Konzept.....	24
Abbildung 15: Prozentuale Energiemengen für das AC-Lastprofil .....	24
Abbildung 16: Gesamtbetrachtung AC-Konzept.....	25
Abbildung 17: Minimaler und maximaler Zustand beim AC-Konzept.....	26
Abbildung 18: Energieaufnahme pro Tag AC-Konzept.....	27
Abbildung 19: DC-Wandlerverluste.....	28
Abbildung 20: Lastprofil DC-Konzept.....	29
Abbildung 21: Prozentuale Energiemenge für das DC-Lastprofil .....	29
Abbildung 22: Leistungsbereich des simulierten zentralen AC-DC-Wandlers.....	30
Abbildung 23: Gesamtbetrachtung 48 V <sub>DC</sub> -Konzept .....	31
Abbildung 24: Minimaler und maximaler Zustand beim 48 V <sub>DC</sub> -Konzept.....	32
Abbildung 25: Energieaufnahme pro Tag beim 48 V <sub>DC</sub> -Konzept.....	33
Abbildung 26: Energieaufnahme pro Tag beim 48 V <sub>DC</sub> -Konzept mit optimiertem Leitungsquerschnitt.....	34
Abbildung 27: Gesamtbetrachtung 380 V <sub>DC</sub> -Konzept.....	35
Abbildung 28: Minimaler und maximaler Zustand beim 380 V <sub>DC</sub> -Konzept.....	36
Abbildung 29: Energieaufnahme pro Tag beim 380 V <sub>DC</sub> -Konzept.....	37
Abbildung 30: Einzellastprofile der jeweiligen zentralen Wandler .....	39
Abbildung 31 Prozentuale Energiemenge für das DC-Zentral-Konzept.....	40

Abbildung 32: Leistungsbereich des zentralen 24 V <sub>DC</sub> AC-DC-Wandlers .....	41
Abbildung 33: Konzept zentrale Wandler im Vollastbetrieb (20:30 Uhr) .....	41
Abbildung 34: Spannungsfälle der einzelnen Leiter .....	42
Abbildung 35: Gesamtbetrachtung des zentralen Wandler Konzeptes .....	43
Abbildung 36: Min. und max. Zustand beim zentralen Wandler-Konzept .....	44
Abbildung 37: Energieaufnahme pro Tag des zentralen Wandler-Konzeptes .....	44
Abbildung 38: Energieaufnahme pro Tag mit optimiertem Leitungsquerschnitt.....	45
Abbildung 39: DC-Steckdosen-Lastprofil .....	46
Abbildung 40: Gesamtbetrachtung DC-Steckdosen-Konzept .....	47
Abbildung 41: Minimaler und maximaler Zustand beim DC-Steckdosen-Konzept ...	48
Abbildung 42: Energieaufnahme pro Tag des DC-Steckdosen-Konzeptes.....	49
Abbildung 43: Benötigte Energie der Konzepte pro Woche (Anhang 2.5).....	50
Abbildung 44: Benötigte Energie der Konzepte pro Jahr.....	51
Abbildung 45: Wohnzimmer mit AC-Installation .....	55
Abbildung 46: Wohnzimmer mit DC-Steckdoseninstallation .....	58
Abbildung 47 zentraler 12 V <sub>DC</sub> -Wandler .....	91
Abbildung 48 zentraler 9 V <sub>DC</sub> -Wandler .....	91

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Mögliche Leitungslängen "Knik naar de zon" .....	7
Tabelle 2: Wirkungsgrad Annahmen AC-Fall.....	22
Tabelle 3: Wirkungsgrad Annahmen DC-Fall.....	27
Tabelle 4: Einteilung der Verbraucher in die unterschiedlichen Spannungen .....	38
Tabelle 5: Energie der Konzepte pro Jahr mit Kosten.....	52
Tabelle 6 Anzahl der benötigten Wandler .....	57
Tabelle 7 Anzahl der benötigten Wandler .....	59
Tabelle 8 Wandlereinsparung zwischen AC- und DC-Netz.....	60
Tabelle 9 Die gesamt Leistung der in dieser Arbeit betrachteten DC-Verbraucher....	78

## Literaturverzeichnis

- [1] Günter Myrell und Daniel Manthey:  
Mission X - Genialen Entdeckern auf der Spur  
ISBN: 3-423-24580-8, Deutscher Taschenbuch Verlag,  
München, 2006
- [2] Yasir Arafat und Mohammad Amin  
Feasibility study of low voltage DC house and compatible home appliance  
design,  
CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, Master of Science Thesis  
Göteborg, Sweden, 2011
- [3] Benjamin Klaus und Henning Valentin,  
Haushaltsgeräte im Gleichstrombetrieb; Stromsparen mit Gleichstrom?  
Cologne University of Applied Sciences, Masterprojekt,  
Köln, Oktober 2013
- [4] Eberhard Waffeschmidt, Ulrich Böke,  
Low Voltage DC Grids; Proceedings INTELEC2013,  
Hamburg, Oktober 2013
- [5] Mark Bost, Dr. Bernd Hirschl, Dr. Astrid Aretz  
Effekte von Eigenverbrauch und Netzparität bei der Photovoltaik  
Institut für ökologische Wirtschaftsforschung  
Berlin, Hamburg, 2011
- [6] Spezifischer Leitwert oder elektrische Leitfähigkeit  $\kappa$  (kappa)  
[Online] verfügbar unter:  
[www.elektronik-kompodium.de/sites/grd/0201116.htm](http://www.elektronik-kompodium.de/sites/grd/0201116.htm)  
[zuletzt abgerufen, März 2014]
- [7] VDE Kapitel 12: Kabel und Leitungen  
[Online] verfügbar unter:  
[www.vde-verlag.de/buecher/leseprobe/lese3000.pdf](http://www.vde-verlag.de/buecher/leseprobe/lese3000.pdf)  
[zuletzt abgerufen, März 2014]

- [8] ABB Technische Informationen Verlegearten, Strombelastbarkeit von Kabeln und Leitungen  
[Online] verfügbar unter:  
[http://library.abb.com/GLOBAL/SCOT/SCOT209.nsf/VerityDisplay/C6ED3B4782C5F804C12572A5003A1CA0/\\$File/2CDC401002D0102.pdf](http://library.abb.com/GLOBAL/SCOT/SCOT209.nsf/VerityDisplay/C6ED3B4782C5F804C12572A5003A1CA0/$File/2CDC401002D0102.pdf)  
[zuletzt abgerufen, April 2014]
- [9] Conrad Elektrohandel  
[Online] verfügbar unter:  
<http://www.conrad.de/ce/de/product/1025805/NYM-J-Installationskabel-3-x-15-mm-Grau-50-m-LappKabel?ref=searchDetail>  
[zuletzt abgerufen, März 2014]
- [10] Conrad Elektrohandel  
[Online] verfügbar unter:  
<http://www.conrad.de/ce/de/product/1025813/NYM-J-Installationskabel-3-x-6-mm-Grau-50-m-LappKabel?queryFromSuggest=true>  
[zuletzt abgerufen, März 2014]
- [10] [Online] verfügbar unter:  
[http://www.elektro-wandelt.de/Mantelleitungen-NYM/NYM-J-mit-Schutzleiter/35-mm/Mantelleitung-PVC-grau-NYM-J-5x35-Meterware1m.html?force\\_sid=20dfcc9f45e17108905b7ee1679a9cab&listtype=search&searchparam=5x35&searchcnid=ec748d90a6c3412d2.58034263](http://www.elektro-wandelt.de/Mantelleitungen-NYM/NYM-J-mit-Schutzleiter/35-mm/Mantelleitung-PVC-grau-NYM-J-5x35-Meterware1m.html?force_sid=20dfcc9f45e17108905b7ee1679a9cab&listtype=search&searchparam=5x35&searchcnid=ec748d90a6c3412d2.58034263)  
[zuletzt abgerufen, März 2014]
- [11] Jürg P. Schwerzmann  
Data Center Convention 2013; Gleichstrom im Rechenzentrum  
[Online] verfügbar unter:  
<http://www.powerbuilding.eu/media/Download%20Zuerich%202013/03%20J.%20Schwerzmann%20GE%20Critical%20Power.pdf>  
[zuletzt abgerufen, März 2014]

- [12] Kristof Engelen, Erik Leung Shun, Pieter Vermeyen, Ief Pardon, Reinhilde D'hulst, Johan Driesen, Ronnie Belmans  
The Feasibility of Small-Scale Residential DC Distribution Systems  
Proceedings of IEEE IECON'06 The 32nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society  
[Online] verfügbar unter:  
<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=4153073&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel5%2F4152824%2F4152825%2F04153073.pdf%3Farnumber%3D4153073>  
[zuletzt abgerufen, März 2014]
- [13] Lekker, Energie wie ich sie mag.  
[Online] verfügbar unter:  
<http://www.lekker-energie.de/strom/lekker-strom-direkt>  
[zuletzt abgerufen, März 2014]
- [14] Jessica E Chaidez  
DC House Modeling and System Design  
Senior Project, ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT  
California Polytechnic State University  
San Luis Obispo, June 2011
- [15] Suchat Srikaew, Wattanapong Rakwichian, Worajit Setthapun  
THE DESIGN OF COMMUNITY PV-DC POWER GRID SYSTEM  
Paper for "The Third International Conference on Sustainable Energy Development, Hanoi 16 – 18, October 2013  
Asian Development Institute for Community Economy and Technology  
Chiang Mai Rajabhat University, Chiang Mai, Thailand
- [16] "De Wijk van Morgen", "Viertel von Morgen" oder  
"The district of tomorrow"  
[Online] verfügbar unter:  
<http://www.dewijkvanmorgen.nl/index.jsp?id=104>  
[zuletzt abgerufen, März 2014]

- [17] Amazon Onlineshop  
[Online] verfügbar unter:  
[http://www.amazon.de/Kompaktleuchtstofflampe-GU10-11W-827-14142/dp/B003AQM18A/ref=sr\\_1\\_3?ie=UTF8&qid=1395736967&sr=8-3&keywords=leuchtstofflampe+gu10](http://www.amazon.de/Kompaktleuchtstofflampe-GU10-11W-827-14142/dp/B003AQM18A/ref=sr_1_3?ie=UTF8&qid=1395736967&sr=8-3&keywords=leuchtstofflampe+gu10)  
[zuletzt abgerufen, März 2014]
- [18] BITKOM  
[Online] verfügbar unter:  
[http://www.bitkom.org/de/presse/70864\\_68872.aspx](http://www.bitkom.org/de/presse/70864_68872.aspx)  
[zuletzt abgerufen, März 2014]
- [19] BITKOM  
[Online] verfügbar unter:  
[http://www.bitkom.org/files/documents/BITKOM\\_CE\\_Studie\\_2012\\_1\\_Webversion\\_1\\_14.09.2012.pdf](http://www.bitkom.org/files/documents/BITKOM_CE_Studie_2012_1_Webversion_1_14.09.2012.pdf)  
[zuletzt abgerufen, März 2014]
- [20] EMC Europe; corporate recycling made simple  
[Online] verfügbar unter:  
<http://www.emc-recycle.com/de/umwelt/wohin-gehen-die-geraete/>  
[zuletzt abgerufen, März 2014]
- [21] Osram Quicktronic; Technische Fibel; Elektronische Vorschaltgeräte für Leuchtstofflampen und Kompaktleuchtstofflampen  
Leuchteneinbauhinweise, Installationshinweise, Betriebshinweise  
[erhalten durch E-Mail Anfrage, Dezember 2013]
- [22] EMerge Alliance  
[Online] verfügbar unter:  
<http://www.emergealliance.org/About/Vision.aspx>  
[zuletzt abgerufen, März 2014]

- [23] Reichelt Elektronikhandel  
[Online] verfügbar unter:  
[http://www.reichelt.de/PSA-120U-240V/3/index.html?&ACTION=3&LA=446&ARTICLE=115362&artnr=PSA+120 U-240V&SEARCH=phihong](http://www.reichelt.de/PSA-120U-240V/3/index.html?&ACTION=3&LA=446&ARTICLE=115362&artnr=PSA+120+U-240V&SEARCH=phihong)  
[zuletzt abgerufen, März 2014]
- [24] [Online] verfügbar unter:  
<http://www.caseking.de/shop/catalog/Netzteile/80-Plus-Platinum/Antec-EarthWatts-EA-550-Netzteil-80-PLUS-Platinum-550-Watt::18645.html>  
[zuletzt abgerufen, März 2014]
- [25] Elektronik Praxis; Wissen, Impulse, Kontakte  
[Online] verfügbar unter:  
<http://www.elektronikpraxis.vogel.de/themen/hardwareentwicklung/powermanagement/stromversorgung/articles/331739/index2.html>  
[zuletzt abgerufen, März 2014]
- [26] Mouser Electronics  
[Online] verfügbar unter:  
[http://www.mouser.com/ds/2/132/nts500-m\\_ds\\_1218252437-37035.pdf](http://www.mouser.com/ds/2/132/nts500-m_ds_1218252437-37035.pdf)  
[zuletzt abgerufen, März 2014]
- [27] MEAN WELL; Your Reliable Power Partner  
[Online] verfügbar unter:  
<http://www.meanwell.com/search/psp-600/default.htm>  
[zuletzt abgerufen, März 2014]
- [28] MEAN WELL; Your Reliable Power Partner  
[Online] verfügbar unter:  
<http://www.meanwell.com/search/hrpg-600/default.htm>  
[zuletzt abgerufen, März 2014]

- [29] N-TV; Artikel "Gebaut, um kaputtzugehen; Flachbildfernseher leben kurz"  
[Online] verfügbar unter:  
[http://www.n-tv.de/technik/Flachbildfernseher-leben-kurz-  
article6174416.html](http://www.n-tv.de/technik/Flachbildfernseher-leben-kurz-article6174416.html)  
[zuletzt abgerufen, April 2014]

## Anhang

In Anhang sind die Tabellen untergebracht, die für die Erstellung der Diagramme aus den Abbildungen nötig waren. An den Tabellen ist angemerkt zu welcher Abbildung diese gehören.

Für fast alle Tabellen wurden lediglich die Zeiten ab 16:00 Uhr aufgeführt, da davor (siehe Tabelle 10) die Leistungsaufnahme konstant bleibt.

## 1. Verbraucher

### 1.1 DC-Verbraucher über den Tag (Abbildung 11)

#### Werte für das DC-Verbraucher-Lastprofil

**Tabelle 10 Die gesamt Leistung der in dieser Arbeit betrachteten DC-Verbraucher**

Zeit	Leistung [W]	Zeit	Leistung [W]
00:00	24,66	12:00	24,66
00:30	24,66	12:30	24,66
01:00	24,66	13:00	24,66
01:30	24,66	13:30	24,66
02:00	24,66	14:00	24,66
02:30	24,66	14:30	24,66
03:00	24,66	15:00	24,66
03:30	24,66	15:30	24,66
04:00	24,66	16:00	24,66
04:30	24,66	16:30	24,66
05:00	24,66	17:00	29,66
05:30	24,66	17:30	51,16
06:00	24,66	18:00	51,16
06:30	24,66	18:30	51,16
07:00	24,66	19:00	143,9
07:30	24,66	19:30	231,8
08:00	24,66	20:00	633,3
08:30	24,66	20:30	690,69
09:00	24,66	21:00	690,69
09:30	24,66	21:30	690,69
10:00	24,66	22:00	592,95
10:30	24,66	22:30	472,77
11:00	24,66	23:00	363,37
11:30	24,66	23:30	324,66



## 2.0 Simulation der einzelnen Konzepte

### 2.1 Wechselstromkonzept

#### 2.1.1 $P_{\text{ein}}$ Wechselstromverbraucher (Abbildung 13, Abbildung 14)

	Beleuchtung				DVD-Player			
	Verbraucher [W]	$\eta$ [%]	Wandlerv. [W]	$P_{\text{ein}}$ [W]	Verbraucher [W]	$\eta$ [%]	Wandlerv. [W]	$P_{\text{ein}}$ [W]
16:00	0	0	0	0,00	0,52	75	0,17	0,69
16:30	0	0	0	0,00	0,52	75	0,17	0,69
17:00	0	0	0	0,00	0,52	75	0,17	0,69
17:30	0	0	0	0,00	0,52	75	0,17	0,69
18:00	0	0	0	0,00	0,52	75	0,17	0,69
18:30	0	0	0	0,00	0,52	75	0,17	0,69
19:00	0	0	0	0,00	0,52	75	0,17	0,69
19:30	0	0	0	0,00	0,52	75	0,17	0,69
20:00	300	91	29,67	329,67	0,52	75	0,17	0,69
20:30	300	91	29,67	329,67	19,2	90	2,13	21,33
21:00	300	91	29,67	329,67	19,2	90	2,13	21,33
21:30	300	91	29,67	329,67	19,2	90	2,13	21,33
22:00	300	91	29,67	329,67	19,2	90	2,13	21,33
22:30	300	91	29,67	329,67	0,52	75	0,17	0,69
23:00	300	91	29,67	329,67	0,52	75	0,17	0,69
23:30	300	91	29,67	329,67	0,52	75	0,17	0,69
00:00	0	0	0	0,00	0,52	75	0,17	0,69

	Elektr. Kleingeräte				HiFi-Anlage			
	Leistung [W]	$\eta$ [%]	Wandlerv. [W]	$P_{\text{ein}}$ [W]	Leistung [W]	$\eta$ [%]	Wandlerv. [W]	$P_{\text{ein}}$ [W]
16:00	0	0	0,00	0,00	3,3	80	0,83	4,13
16:30	0	0	0,00	0,00	3,3	80	0,83	4,13
17:00	5	92	0,43	5,43	3,3	80	0,83	4,13
17:30	5	92	0,43	5,43	24,8	90	2,76	27,56
18:00	5	92	0,43	5,43	24,8	90	2,76	27,56
18:30	5	92	0,43	5,43	24,8	90	2,76	27,56
19:00	0	0	0,00	0,00	24,8	90	2,76	27,56
19:30	0	0	0,00	0,00	3,3	80	0,83	4,13
20:00	0	0	0,00	0,00	3,3	80	0,83	4,13
20:30	0	0	0,00	0,00	3,3	80	0,83	4,13
21:00	0	0	0,00	0,00	3,3	80	0,83	4,13
21:30	0	0	0,00	0,00	3,3	80	0,83	4,13
22:00	0	0	0,00	0,00	3,3	80	0,83	4,13
22:30	0	0	0,00	0,00	3,3	80	0,83	4,13
23:00	0	0	0,00	0,00	3,3	80	0,83	4,13

23:30	0	0	0,00	0,00	3,3	80	0,83	4,13
00:00	0	0	0,00	0,00	3,3	80	0,83	4,13

	Kompakt-PC				LCD-TV-1			
	Leistung [W]	$\eta$ [%]	Wandlerv. [W]	$P_{\text{ein}}$ [W]	Leistung [W]	$\eta$ [%]	Wandlerv. [W]	$P_{\text{ein}}$ [W]
16:00	3,5	75	1,17	4,67	0,5	75	0,17	0,67
16:30	3,5	75	1,17	4,67	0,5	75	0,17	0,67
17:00	3,5	75	1,17	4,67	0,5	75	0,17	0,67
17:30	3,5	75	1,17	4,67	0,5	75	0,17	0,67
18:00	3,5	75	1,17	4,67	0,5	75	0,17	0,67
18:30	3,5	75	1,17	4,67	0,5	75	0,17	0,67
19:00	78	90	8,67	86,67	0,5	75	0,17	0,67
19:30	78	90	8,67	86,67	102	90	11,33	113,33
20:00	78	90	8,67	86,67	102	90	11,33	113,33
20:30	78	90	8,67	86,67	102	90	11,33	113,33
21:00	78	90	8,67	86,67	102	90	11,33	113,33
21:30	78	90	8,67	86,67	102	90	11,33	113,33
22:00	3,5	75	1,17	4,67	102	90	11,33	113,33
22:30	3,5	75	1,17	4,67	0,5	75	0,17	0,67
23:00	3,5	75	1,17	4,67	0,5	75	0,17	0,67
23:30	3,5	75	1,17	4,67	0,5	75	0,17	0,67
00:00	3,5	75	1,17	4,67	0,5	75	0,17	0,67

	LCD-TV-2				LCD-Monitor			
	Leistung [W]	$\eta$ [%]	Wandlerv. [W]	$P_{\text{ein}}$ [W]	Leistung [W]	$\eta$ [%]	Wandlerv. [W]	$P_{\text{ein}}$ [W]
16:00	0,5	75	0,17	0,67	0,96	75	0,32	1,28
16:30	0,5	75	0,17	0,67	0,96	75	0,32	1,28
17:00	0,5	75	0,17	0,67	0,96	75	0,32	1,28
17:30	0,5	75	0,17	0,67	0,96	75	0,32	1,28
18:00	0,5	75	0,17	0,67	0,96	75	0,32	1,28
18:30	0,5	75	0,17	0,67	0,96	75	0,32	1,28
19:00	0,5	75	0,17	0,67	24,2	90	2,69	26,89
19:30	0,5	75	0,17	0,67	24,2	90	2,69	26,89
20:00	102	90	11,33	113,33	24,2	90	2,69	26,89
20:30	102	90	11,33	113,33	24,2	90	2,69	26,89
21:00	102	90	11,33	113,33	24,2	90	2,69	26,89
21:30	102	90	11,33	113,33	24,2	90	2,69	26,89
22:00	102	90	11,33	113,33	0,96	75	0,32	1,28
22:30	102	90	11,33	113,33	0,96	75	0,32	1,28
23:00	0,5	75	0,17	0,67	0,96	75	0,32	1,28
23:30	0,5	75	0,17	0,67	0,96	75	0,32	1,28
00:00	0,5	75	0,17	0,67	0,96	75	0,32	1,28

	Notebook				SAT-Kabel-Empfänger			
	Leistung [W]	$\eta$ [%]	Wandlerv. [W]	$P_{\text{ein}}$ [W]	Leistung [W]	$\eta$ [%]	Wandlerv. [W]	$P_{\text{ein}}$ [W]
16:00	1,19	77	0,36	1,55	4,5	78	1,27	5,77
16:30	1,19	77	0,36	1,55	4,5	78	1,27	5,77
17:00	1,19	77	0,36	1,55	4,5	78	1,27	5,77
17:30	1,19	77	0,36	1,55	4,5	78	1,27	5,77
18:00	1,19	77	0,36	1,55	4,5	78	1,27	5,77
18:30	1,19	77	0,36	1,55	4,5	78	1,27	5,77
19:00	1,19	77	0,36	1,55	4,5	78	1,27	5,77
19:30	1,19	77	0,36	1,55	12,4	91	1,23	13,63
20:00	1,19	77	0,36	1,55	12,4	91	1,23	13,63
20:30	39,9	90	4,43	44,33	12,4	91	1,23	13,63
21:00	39,9	90	4,43	44,33	12,4	91	1,23	13,63
21:30	39,9	90	4,43	44,33	12,4	91	1,23	13,63
22:00	39,9	90	4,43	44,33	12,4	91	1,23	13,63
22:30	39,9	90	4,43	44,33	12,4	91	1,23	13,63
23:00	39,9	90	4,43	44,33	4,5	78	1,27	5,77
23:30	1,19	77	0,36	1,55	4,5	78	1,27	5,77
00:00	1,19	77	0,36	1,55	4,5	78	1,27	5,77

	Schnurlostelefon				WLAN-Router			
	Leistung [W]	$\eta$ [%]	Wandlerv. [W]	$P_{\text{ein}}$ [W]	Leistung [W]	$\eta$ [%]	Wandlerv. [W]	$P_{\text{ein}}$ [W]
16:00	2,1	92	0,18	2,28	7,59	91	0,75	8,34
16:30	2,1	92	0,18	2,28	7,59	91	0,75	8,34
17:00	2,1	92	0,18	2,28	7,59	91	0,75	8,34
17:30	2,1	92	0,18	2,28	7,59	91	0,75	8,34
18:00	2,1	92	0,18	2,28	7,59	91	0,75	8,34
18:30	2,1	92	0,18	2,28	7,59	91	0,75	8,34
19:00	2,1	92	0,18	2,28	7,59	91	0,75	8,34
19:30	2,1	92	0,18	2,28	7,59	91	0,75	8,34
20:00	2,1	92	0,18	2,28	7,59	91	0,75	8,34
20:30	2,1	92	0,18	2,28	7,59	91	0,75	8,34
21:00	2,1	92	0,18	2,28	7,59	91	0,75	8,34
21:30	2,1	92	0,18	2,28	7,59	91	0,75	8,34
22:00	2,1	92	0,18	2,28	7,59	91	0,75	8,34
22:30	2,1	92	0,18	2,28	7,59	91	0,75	8,34
23:00	2,1	92	0,18	2,28	7,59	91	0,75	8,34
23:30	2,1	92	0,18	2,28	7,59	91	0,75	8,34
00:00	2,1	92	0,18	2,28	7,59	91	0,75	8,34

## 2.1.2 Simulation aller Verluste für das Wechselstromkonzept

(Abbildung 16, Abbildung 17)

	$P_{\text{Verbraucher}}$ [W]	dezentrale Wandlerv. [W]	Leitungs- verluste [W]	Gesamt Verluste [W]	Gesamt [W]	Spannungsfall [%]
16:00	24,66	5,38	0,0061	5,38	30,04	0,02
16:30	24,66	5,38	0,0061	5,38	30,04	0,02
17:00	29,66	5,81	0,0085	5,81	35,48	0,02
17:30	51,16	7,74	0,0234	7,76	58,93	0,04
18:00	51,16	7,74	0,0234	7,76	58,93	0,04
18:30	51,16	7,74	0,0234	7,76	58,93	0,04
19:00	143,9	17,18	0,1752	17,35	161,25	0,11
19:30	231,8	26,37	0,4500	26,81	258,62	0,17
20:00	633,3	67,21	3,3129	70,51	703,82	0,47
20:30	690,69	73,24	3,9400	77,18	753,62	0,52
21:00	690,69	73,24	3,9400	77,18	753,62	0,52
21:30	690,69	73,24	3,9400	77,18	753,62	0,52
22:00	592,95	63,37	2,9082	66,28	645,00	0,44
22:30	472,77	50,25	1,8468	52,09	524,87	0,35
23:00	363,37	39,12	1,0937	40,21	403,59	0,27
23:30	324,66	35,05	0,8735	35,92	360,58	0,24
00:00	24,66	5,38	0,0061	5,38	30,04	0,02

## 2.2 Gleichstromkonzept mit konstanter Spannung 48 V<sub>DC</sub> und 380 V<sub>DC</sub>

### 2.2.1 P<sub>ein</sub> Gleichstromverbraucher (Abbildung 19, Abbildung 20)

	Beleuchtung				DVD-Player			
	Leistung [W]	η [%]	Wandlerv. [W]	P <sub>ein</sub> [W]	Leistung [W]	η [%]	Wandlerv. [W]	P <sub>ein</sub> [W]
16:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,52	76,00	0,16	0,68
16:30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,52	76,00	0,16	0,68
17:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,52	76,00	0,16	0,68
17:30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,52	76,00	0,16	0,68
18:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,52	76,00	0,16	0,68
18:30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,52	76,00	0,16	0,68
19:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,52	76,00	0,16	0,68
19:30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,52	76,00	0,16	0,68
20:00	300,00	92,00	26,09	326,09	0,52	76,00	0,16	0,68
20:30	300,00	92,00	26,09	326,09	19,2	91,00	1,899	21,10
21:00	300,00	92,00	26,09	326,09	19,2	91,00	1,899	21,10
21:30	300,00	92,00	26,09	326,09	19,2	91,00	1,899	21,10
22:00	300,00	92,00	26,09	326,09	19,2	91,00	1,899	21,10
22:30	300,00	92,00	26,09	326,09	0,52	76,00	0,16	0,68
23:00	300,00	92,00	26,09	326,09	0,52	76,00	0,16	0,68
23:30	300,00	92,00	26,09	326,09	0,52	76,00	0,16	0,68
00:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,52	76,00	0,16	0,68

	Elektr. Kleingeräte				HiFi-Anlage			
	Leistung [W]	η [%]	Wandlerv. [W]	P <sub>ein</sub> [W]	Leistung [W]	η [%]	Wandlerv. [W]	P <sub>ein</sub> [W]
16:00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,30	81,00	0,77	4,07
16:30	0,00	0,00	0,00	0,00	3,30	81,00	0,77	4,07
17:00	5,00	93,00	0,38	5,38	3,30	81,00	0,77	4,07
17:30	5,00	93,00	0,38	5,38	24,80	91,00	2,45	27,25
18:00	5,00	93,00	0,38	5,38	24,80	91,00	2,45	27,25
18:30	5,00	93,00	0,38	5,38	24,80	91,00	2,45	27,25
19:00	0,00	0,00	0,00	0,00	24,80	91,00	2,45	27,25
19:30	0,00	0,00	0,00	0,00	3,30	81,00	0,77	4,07
20:00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,30	81,00	0,77	4,07
20:30	0,00	0,00	0,00	0,00	3,30	81,00	0,77	4,07
21:00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,30	81,00	0,77	4,07
21:30	0,00	0,00	0,00	0,00	3,30	81,00	0,77	4,07
22:00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,30	81,00	0,77	4,07
22:30	0,00	0,00	0,00	0,00	3,30	81,00	0,77	4,07
23:00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,30	81,00	0,77	4,07
23:30	0,00	0,00	0,00	0,00	3,30	81,00	0,77	4,07
00:00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,30	81,00	0,77	4,07

	Kompakt-PC				LCD-TV-1			
	Leistung [W]	$\eta$ [%]	Wandlerv. [W]	$P_{\text{ein}}$ [W]	Leistung [W]	$\eta$ [%]	Wandlerv. [W]	$P_{\text{ein}}$ [W]
16:00	3,50	76,00	1,11	4,61	0,50	76,00	0,16	0,66
16:30	3,50	76,00	1,11	4,61	0,50	76,00	0,16	0,66
17:00	3,50	76,00	1,11	4,61	0,50	76,00	0,16	0,66
17:30	3,50	76,00	1,11	4,61	0,50	76,00	0,16	0,66
18:00	3,50	76,00	1,11	4,61	0,50	76,00	0,16	0,66
18:30	3,50	76,00	1,11	4,61	0,50	76,00	0,16	0,66
19:00	78,00	91,00	7,71	85,71	0,50	76,00	0,16	0,66
19:30	78,00	91,00	7,71	85,71	102,00	91,00	10,09	112,09
20:00	78,00	91,00	7,71	85,71	102,00	91,00	10,09	112,09
20:30	78,00	91,00	7,71	85,71	102,00	91,00	10,09	112,09
21:00	78,00	91,00	7,71	85,71	102,00	91,00	10,09	112,09
21:30	78,00	91,00	7,71	85,71	102,00	91,00	10,09	112,09
22:00	3,50	76,00	1,11	4,61	102,00	91,00	10,09	112,09
22:30	3,50	76,00	1,11	4,61	0,50	76,00	0,16	0,66
23:00	3,50	76,00	1,11	4,61	0,50	76,00	0,16	0,66
23:30	3,50	76,00	1,11	4,61	0,50	76,00	0,16	0,66
00:00	3,50	76,00	1,11	4,61	0,50	76,00	0,16	0,66

	LCD-TV-2				LCD-Monitor			
	Leistung [W]	$\eta$ [%]	Wandlerv. [W]	$P_{\text{ein}}$ [W]	Leistung [W]	$\eta$ [%]	Wandlerv. [W]	$P_{\text{ein}}$ [W]
16:00	0,50	76,00	0,16	0,66	0,96	76,00	0,30	1,26
16:30	0,50	76,00	0,16	0,66	0,96	76,00	0,30	1,26
17:00	0,50	76,00	0,16	0,66	0,96	76,00	0,30	1,26
17:30	0,50	76,00	0,16	0,66	0,96	76,00	0,30	1,26
18:00	0,50	76,00	0,16	0,66	0,96	76,00	0,30	1,26
18:30	0,50	76,00	0,16	0,66	0,96	76,00	0,30	1,26
19:00	0,50	76,00	0,16	0,66	24,20	91,00	2,39	26,59
19:30	0,50	76,00	0,16	0,66	24,20	91,00	2,39	26,59
20:00	102,00	91,00	10,09	112,09	24,20	91,00	2,39	26,59
20:30	102,00	91,00	10,09	112,09	24,20	91,00	2,39	26,59
21:00	102,00	91,00	10,09	112,09	24,20	91,00	2,39	26,59
21:30	102,00	91,00	10,09	112,09	24,20	91,00	2,39	26,59
22:00	102,00	91,00	10,09	112,09	0,96	76,00	0,30	1,26
22:30	102,00	91,00	10,09	112,09	0,96	76,00	0,30	1,26
23:00	0,50	76,00	0,16	0,66	0,96	76,00	0,30	1,26
23:30	0,50	76,00	0,16	0,66	0,96	76,00	0,30	1,26
00:00	0,50	76,00	0,16	0,66	0,96	76,00	0,30	1,26

	Notebook				SAT-Kabel-Empfänger			
	Leistung [W]	$\eta$ [%]	Wandlerv. [W]	$P_{\text{ein}}$ [W]	Leistung [W]	$\eta$ [%]	Wandlerv. [W]	$P_{\text{ein}}$ [W]
16:00	1,19	78,00	0,34	1,53	4,50	79,00	1,20	5,70
16:30	1,19	78,00	0,34	1,53	4,50	79,00	1,20	5,70
17:00	1,19	78,00	0,34	1,53	4,50	79,00	1,20	5,70
17:30	1,19	78,00	0,34	1,53	4,50	79,00	1,20	5,70
18:00	1,19	78,00	0,34	1,53	4,50	79,00	1,20	5,70
18:30	1,19	78,00	0,34	1,53	4,50	79,00	1,20	5,70
19:00	1,19	78,00	0,34	1,53	4,50	79,00	1,20	5,70
19:30	1,19	78,00	0,34	1,53	12,40	92,00	1,08	13,48
20:00	1,19	78,00	0,34	1,53	12,40	92,00	1,08	13,48
20:30	39,90	91,00	3,95	43,85	12,40	92,00	1,08	13,48
21:00	39,90	91,00	3,95	43,85	12,40	92,00	1,08	13,48
21:30	39,90	91,00	3,95	43,85	12,40	92,00	1,08	13,48
22:00	39,90	91,00	3,95	43,85	12,40	92,00	1,08	13,48
22:30	39,90	91,00	3,95	43,85	12,40	92,00	1,08	13,48
23:00	39,90	91,00	3,95	43,85	4,50	79,00	1,20	5,70
23:30	1,19	78,00	0,34	1,53	4,50	79,00	1,20	5,70
00:00	1,19	78,00	0,34	1,53	4,50	79,00	1,20	5,70

	Schnurlostelefon				WLAN-Router			
	Leistung [W]	$\eta$ [%]	Wandlerv. [W]	$P_{\text{ein}}$ [W]	Leistung [W]	$\eta$ [%]	Wandlerv. [W]	$P_{\text{ein}}$ [W]
16:00	2,10	93,00	0,16	2,26	7,59	92,00	0,66	8,25
16:30	2,10	93,00	0,16	2,26	7,59	92,00	0,66	8,25
17:00	2,10	93,00	0,16	2,26	7,59	92,00	0,66	8,25
17:30	2,10	93,00	0,16	2,26	7,59	92,00	0,66	8,25
18:00	2,10	93,00	0,16	2,26	7,59	92,00	0,66	8,25
18:30	2,10	93,00	0,16	2,26	7,59	92,00	0,66	8,25
19:00	2,10	93,00	0,16	2,26	7,59	92,00	0,66	8,25
19:30	2,10	93,00	0,16	2,26	7,59	92,00	0,66	8,25
20:00	2,10	93,00	0,16	2,26	7,59	92,00	0,66	8,25
20:30	2,10	93,00	0,16	2,26	7,59	92,00	0,66	8,25
21:00	2,10	93,00	0,16	2,26	7,59	92,00	0,66	8,25
21:30	2,10	93,00	0,16	2,26	7,59	92,00	0,66	8,25
22:00	2,10	93,00	0,16	2,26	7,59	92,00	0,66	8,25
22:30	2,10	93,00	0,16	2,26	7,59	92,00	0,66	8,25
23:00	2,10	93,00	0,16	2,26	7,59	92,00	0,66	8,25
23:30	2,10	93,00	0,16	2,26	7,59	92,00	0,66	8,25
00:00	2,10	93,00	0,16	2,26	7,59	92,00	0,66	8,25

2.2.2 Simulation aller Verluste für das Gleichstromkonzept mit konstanter Spannung 48 V<sub>DC</sub> und 1,5 mm<sup>2</sup> Leitungsquerschnitt (Abbildung 23, Abbildung 24, Abbildung 25)

	P <sub>Verbraucher</sub> [W]	dezentrale Wandlerv. [W]	Leitungs- verluste [W]	zentraler Wandler- wirkungs- grad [%]	zentrale Wandlerv. [W]	Gesamt Verluste [W]	Gesamt [W]	Spannungs- fall [%]
16:00	24,66	4,96	0,136	50,0	29,62	34,72	59,38	0,46
16:30	24,66	4,96	0,136	50,0	29,62	34,72	59,38	0,46
17:00	29,66	5,34	0,190	57,5	25,87	31,39	61,05	0,54
17:30	51,16	7,01	0,525	72,5	22,07	29,61	80,77	0,90
18:00	51,16	7,01	0,525	72,5	22,07	29,61	80,77	0,90
18:30	51,16	7,01	0,525	72,5	22,07	29,61	80,77	0,90
19:00	143,9	15,34	3,931	85,0	28,10	47,37	191,27	2,47
19:30	231,8	23,47	10,101	88,5	33,17	66,74	298,54	3,96
20:00	633,3	59,49	74,398	88,3	91,80	225,68	858,98	10,74
20:30	690,69	64,83	88,482	86,3	119,94	273,25	963,94	11,71
21:00	690,69	64,83	88,482	86,3	119,94	273,25	963,94	11,71
21:30	690,69	64,83	88,482	86,3	119,94	273,25	963,94	11,71
22:00	592,95	56,13	65,307	87,3	94,43	215,87	808,82	10,06
22:30	472,77	44,47	41,471	89,9	58,11	144,05	616,82	8,02
23:00	363,37	34,66	24,558	88,9	49,70	108,91	472,28	6,17
23:30	324,66	31,05	19,613	88,5	46,22	96,88	421,54	5,51
00:00	24,66	4,96	0,136	50,0	29,62	34,72	59,38	0,46

2.2.3 Simulation aller Verluste für das Gleichstromkonzept mit konstanter Spannung 48 V<sub>DC</sub> und optimiertem Leitungsquerschnitt (6 mm<sup>2</sup>) (Abbildung 26)

	P <sub>Verbraucher</sub> [W]	dezentrale Umrichterv. [W]	Leitungs- verluste [W]	zentraler Wandler- wirkungs- grad [%]	zentrale Wandlerv. [W]	Gesamt Verluste [W]	Gesamt [W]	Spannungs- fall [%]
16:00	24,66	4,96	0,034	50,0	29,62	34,61	59,27	0,11
16:30	24,66	4,96	0,034	50,0	29,62	34,61	59,27	0,11
17:00	29,66	5,34	0,047	57,5	25,87	31,25	60,91	0,14
17:30	51,16	7,01	0,131	72,5	22,07	29,21	80,37	0,23
18:00	51,16	7,01	0,131	72,5	22,07	29,21	80,37	0,23
18:30	51,16	7,01	0,131	72,5	22,07	29,21	80,37	0,23
19:00	143,90	15,34	0,983	85,0	28,10	44,42	188,32	0,62
19:30	231,80	23,47	2,525	88,5	33,17	59,17	290,97	0,99
20:00	633,30	59,49	18,599	88,3	91,80	169,88	803,18	2,68
20:30	690,69	64,83	22,121	86,3	119,94	206,89	897,58	2,93
21:00	690,69	64,83	22,121	86,3	119,94	206,89	897,58	2,93
21:30	690,69	64,83	22,121	86,3	119,94	206,89	897,58	2,93
22:00	592,95	56,13	16,327	87,3	94,43	166,89	759,84	2,52
22:30	472,77	44,47	10,368	89,9	58,11	112,95	585,72	2,00
23:00	363,37	34,66	6,139	88,9	49,70	90,49	453,86	1,54
23:30	324,66	31,05	4,903	88,5	46,22	82,17	406,83	1,38
00:00	24,66	4,96	0,034	50,0	29,62	34,61	59,27	0,11

2.2.4 Simulation aller Verluste für das Gleichstromkonzept mit konstanter Spannung 380 V<sub>DC</sub> und 1,5 mm<sup>2</sup> Leitungsquerschnitt (Abbildung 27, Abbildung 28, Abbildung 29)

	P <sub>Verbraucher</sub> [W]	dezentrale Wandlerv. [W]	Leitungsverluste [W]	zentraler Wandler- wirkungs- grad [%]	zentrale Wandlerv. [W]	Gesamt Verluste [W]	Gesamt [W]	Spannungs- fall [%]
16:00	24,66	4,96	0,002	50,0	29,62	34,58	59,24	0,01
16:30	24,66	4,96	0,002	50,0	29,62	34,58	59,24	0,01
17:00	29,66	5,34	0,003	57,5	25,87	31,21	60,87	0,01
17:30	51,16	7,01	0,008	72,5	22,07	29,09	80,25	0,01
18:00	51,16	7,01	0,008	72,5	22,07	29,09	80,25	0,01
18:30	51,16	7,01	0,008	72,5	22,07	29,09	80,25	0,01
19:00	143,90	15,34	0,063	85,0	28,10	43,50	187,40	0,04
19:30	231,80	23,47	0,161	88,5	33,17	56,80	288,60	0,06
20:00	633,30	59,49	1,187	88,3	91,80	152,47	785,77	0,17
20:30	690,69	64,83	1,412	86,3	119,94	186,18	876,87	0,19
21:00	690,69	64,83	1,412	86,3	119,94	186,18	876,87	0,19
21:30	690,69	64,83	1,412	86,3	119,94	186,18	876,87	0,19
22:00	592,95	56,13	1,042	87,3	94,43	151,60	744,55	0,16
22:30	472,77	44,47	0,662	89,9	58,11	103,24	576,01	0,13
23:00	363,37	34,66	0,392	88,9	49,70	84,75	448,12	0,10
23:30	324,66	31,05	0,313	88,5	46,22	77,58	402,24	0,09
00:00	24,66	4,96	0,002	50,0	29,62	34,58	59,24	0,01

## 2.3 Zentrale Wandler-Konzept

2.3.1  $P_{\text{Verbraucher}}$  auf die Spannungen ( $24 V_{\text{DC}}$ ,  $19 V_{\text{DC}}$ ,  $12 V_{\text{DC}}$ ,  $9 V_{\text{DC}}$ ) für aufgeteilt (Abbildung 30)

	$24 V_{\text{DC}}$	$19 V_{\text{DC}}$	$12 V_{\text{DC}}$	$9 V_{\text{DC}}$
16:00	6,05	1,19	7,73	9,69
16:30	6,05	1,19	7,73	9,69
17:00	6,05	1,19	7,73	9,69
17:30	27,55	1,19	7,73	14,69
18:00	27,55	1,19	7,73	14,69
18:30	27,55	1,19	7,73	14,69
19:00	27,55	1,19	68,22	14,69
19:30	43,3	1,19	76,12	9,69
20:00	144,8	1,19	76,12	9,69
20:30	546,3	1,19	94,8	9,69
21:00	546,3	39,9	94,8	9,69
21:30	546,3	39,9	94,8	9,69
22:00	546,3	39,9	34,31	9,69
22:30	509,05	39,9	15,63	9,69
23:00	407,55	39,9	7,73	9,69
23:30	306,05	39,9	7,73	9,69
00:00	306,05	1,19	7,73	9,69

### 2.3.2 Wirkungsgradverlauf der zentralen 9 V<sub>DC</sub>-und 12V<sub>DC</sub>-Wandlers

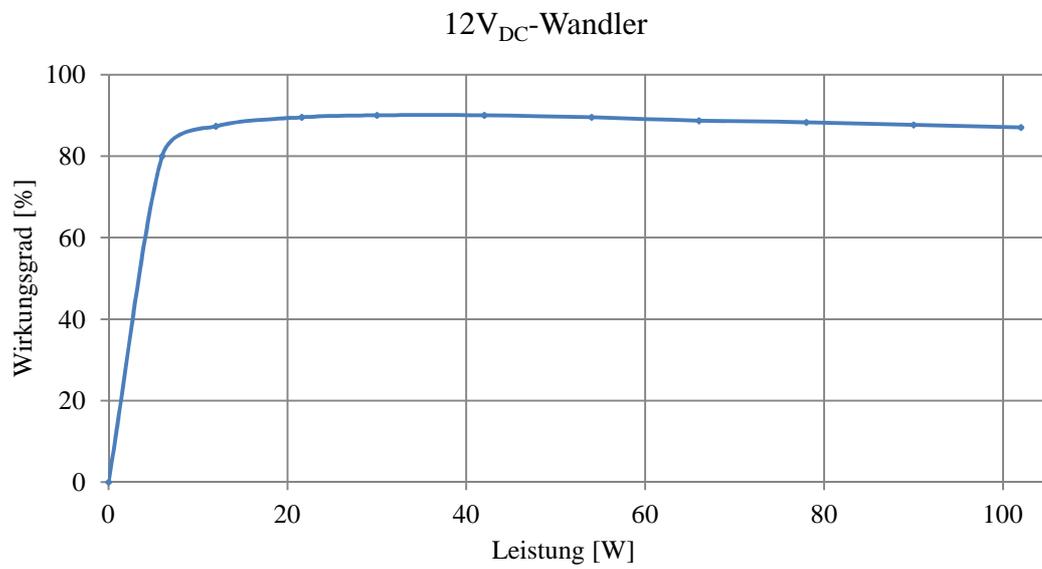


Abbildung 47 zentraler 12 V<sub>DC</sub>-Wandler

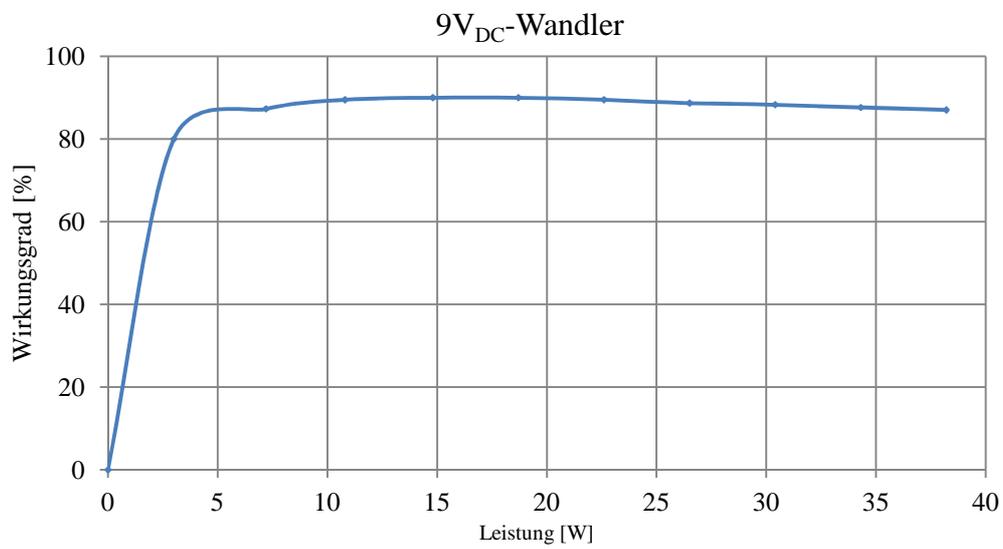


Abbildung 48 zentraler 9 V<sub>DC</sub>-Wandler

2.3.3 Betrachtung der Spannungsfälle für das Gleichstromkonzept  
mit zentralen Wandlern und 1,5 mm<sup>2</sup> Leitungsquerschnitt.(Abbildung 34)

	24V Spannungsfall [%]	19V Spannungsfall [%]	12V Spannungsfall [%]	9V Spannungsfall [%]
16:00	1,724	1,999	4,031	6,233
16:30	1,724	1,999	4,031	6,233
17:00	3,492	3,392	6,235	10,274
17:30	3,492	3,392	6,235	10,274
18:00	3,492	3,392	6,235	10,274
18:30	3,492	3,392	6,235	10,274
19:00	8,137	8,642	22,050	20,256
19:30	15,008	13,346	30,478	30,187
20:00	39,903	29,069	55,372	63,380
20:30	42,822	34,672	63,528	71,166
21:00	42,822	34,672	63,528	71,166
21:30	42,822	34,672	63,528	71,166
22:00	36,162	27,717	45,015	56,483
22:30	28,638	22,189	33,945	44,812
23:00	21,841	17,577	25,664	35,077
23:30	20,325	13,748	22,632	31,035
00:00	1,724	1,999	4,031	6,233

2.3.4 Simulation aller Verluste für das Gleichstromkonzept mit zentralen Wandler und 1,5 mm<sup>2</sup> Leitungsquerschnitt (Abbildung 35, Abbildung 36, Abbildung 37)

	Leistung [W]	Gesamt Leistungsverluste [W]	zentrale Wandlerv. Gesamt [W]	Gesamt Verluste [W]	Gesamt [W]
16:00	24,66	1,054	21,175	22,230	46,890
16:30	24,66	1,054	21,175	22,230	46,890
17:00	29,66	3,031	13,393	16,424	67,584
17:30	51,16	3,031	13,393	16,424	67,584
18:00	51,16	3,031	13,393	16,424	67,584
18:30	51,16	3,031	13,393	16,424	67,584
19:00	143,90	21,453	21,599	43,053	165,453
19:30	231,80	49,585	28,322	77,908	309,708
20:00	633,30	270,053	73,206	343,259	976,559
20:30	690,69	320,807	80,123	400,929	1091,619
21:00	690,69	320,807	80,123	400,929	1091,619
21:30	690,69	320,807	80,123	400,929	1091,619
22:00	592,95	216,766	69,075	285,841	878,791
22:30	472,77	135,402	57,478	192,880	665,650
23:00	363,37	79,327	46,482	125,809	489,179
23:30	324,66	67,201	42,404	109,605	434,265
00:00	24,66	1,054	21,175	22,230	46,890

2.3.5 Betrachtung der Spannungsfälle für das Gleichstromkonzept  
mit zentralen Wandlern und optimiertem Leitungsquerschnitt  
Leitungsquerschnitt (35 mm<sup>2</sup>)

	24V Spannungsfall [%]	19V Spannungsfall [%]	12V Spannungsfall [%]	9V Spannungsfall [%]
16:00	0,073	0,085	0,171	0,265
16:30	0,073	0,085	0,171	0,265
17:00	0,148	0,143	0,264	0,436
17:30	0,148	0,143	0,264	0,436
18:00	0,148	0,143	0,264	0,436
18:30	0,148	0,143	0,264	0,436
19:00	0,333	0,351	0,914	0,827
19:30	0,624	0,548	1,268	1,243
20:00	1,691	1,222	2,335	2,666
20:30	1,806	1,449	2,665	2,973
21:00	1,806	1,449	2,665	2,973
21:30	1,806	1,449	2,665	2,973
22:00	1,545	1,182	1,920	2,409
22:30	1,226	0,949	1,452	1,917
23:00	0,935	0,752	1,098	1,501
23:30	0,870	0,588	0,968	1,328
00:00	0,073	0,085	0,171	0,265

2.3.6 Simulation aller Verluste für das Gleichstromkonzept mit zentralen Wandler und optimiertem Leitungsquerschnitt (35 mm<sup>2</sup>) (Abbildung 26)

	Leistung [W]	Gesamt Leistungsverluste [W]	zentrale Wandlerv. Gesamt [W]	Gesamt Verluste [W]	Gesamt [W]
16:00	24,66	0,044	21,175	21,220	45,880
16:30	24,66	0,044	21,175	21,220	45,880
17:00	29,66	0,127	13,393	13,520	64,680
17:30	51,16	0,127	13,393	13,520	64,680
18:00	51,16	0,127	13,393	13,520	64,680
18:30	51,16	0,127	13,393	13,520	64,680
19:00	143,90	0,854	21,599	22,453	144,853
19:30	231,80	1,999	28,322	30,322	262,122
20:00	633,30	11,295	73,206	84,501	717,801
20:30	690,69	13,270	80,123	93,393	784,083
21:00	690,69	13,270	80,123	93,393	784,083
21:30	690,69	13,270	80,123	93,393	784,083
22:00	592,95	9,232	69,075	78,307	671,257
22:30	472,77	5,788	57,478	63,266	536,036
23:00	363,37	3,393	46,482	49,875	413,245
23:30	324,66	2,874	42,404	45,278	369,938
00:00	24,66	0,044	21,175	21,220	45,880

## 2.4 DC-Steckdosen-Konzept

2.4.1  $P_{\text{ein}}$  ist identisch mit den Werten aus 2.2.1 ( $P_{\text{ein}}$  Gleichstromverbraucher) und somit dort aufgeführt

2.4.2. Simulation aller Verluste für das DC-Steckdosen-Konzept mit (Abbildung 40, Abbildung 41, Abbildung 42)

	$P_{\text{Verbraucher}}$ [W]	dezentrale Wandlerv. [W]	Leitungs- verluste [W]	Gesamt Verluste [W]	Gesamt [W]	Spannungsfall [%]
16:00	24,66	4,96	0,00601	4,97	29,63	0,020
16:30	24,66	4,96	0,00601	4,97	29,63	0,020
17:00	29,66	5,34	0,00838	5,34	35,00	0,024
17:30	51,16	7,01	0,02313	7,04	58,20	0,039
18:00	51,16	7,01	0,02313	7,04	58,20	0,039
18:30	51,16	7,01	0,02313	7,04	58,20	0,039
19:00	143,90	15,34	0,17317	15,51	159,41	0,108
19:30	231,80	23,47	0,44493	23,92	255,72	0,172
20:00	633,30	59,49	3,27641	62,76	696,06	0,468
20:30	690,69	64,83	3,8966	68,73	759,42	0,510
21:00	690,69	64,83	3,89664	68,73	759,42	0,510
21:30	690,69	64,83	3,89664	68,73	759,42	0,510
22:00	592,95	56,13	2,87611	59,01	651,96	0,438
22:30	472,77	44,47	1,82639	46,30	519,07	0,349
23:00	363,37	34,66	1,08158	35,74	399,11	0,269
23:30	324,66	31,05	0,86383	31,91	356,57	0,240
00:00	24,66	4,96	0,00601	4,97	29,63	0,020

## 2.5 Vergleich der Konzepte

### Energiemengen pro Tag [kWh]

	AC	DC-48V	DC-380V	DC-Zentral	DC-Steckdosen
E Verbraucher	2,93	2,93	2,93	2,93	2,93
dezentrale Wandlerv.	0,37	0,33	0,33		0,33
Leitungsverluste	0,0114	0,26	0,004	0,93	0,0113
zentraler Wandlerv.		0,93	0,93	0,68	
Gesamt	3,305	4,44	4,19	4,53	3,27
Kosten	0,84	1,13	1,07	1,16	0,83

### Energiemengen pro Woche [kWh]

	AC	DC-48V	DC-380V	DC-Zentral	DC-Steckdosen
E Verbraucher	20,50	20,50	20,50	20,50	20,50
dezentrale Wandlerv.	2,56	2,29	2,29		2,29
Leitungsverluste	0,0797	0,45	0,03	0,27	0,0788
zentraler Wandlerv.		6,51	6,51	4,73	
Gesamt	23,13	29,75	29,33	25,50	22,87
Kosten	5,91	7,60	7,49	6,52	5,84

### Energiemengen pro Jahr [kWh]

	AC	DC-48V	DC-380V	DC-Zentral	DC-Steckdosen
E Verbraucher	1068,79	1068,79	1068,79	1068,79	1068,79
dezentrale Wandlerv.	133,24	119,37	119,37	0,00	119,37
Leitungsverluste	4,1548	93,30	1,49	337,66	4,1089
zentraler Wandlerv.	0,00	339,54	339,54	246,83	
Gesamt	1206,19	1621,00	1529,19	1653,28	1192,28
Kosten	308,18	414,17	390,71	422,41	304,63