



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE

Schlussbericht 21.05.2013

Energieeffizienz eines DC-Hauses

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm „Elektrizitätstechnologien und –anwendungen“
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Auftragnehmer:

Hochschule Luzern – Technik & Architektur, CEESAR - iHomeLab
Technikumstrasse 21
CH-6048/Horw
www.iHomeLab.ch

Autoren:

Stephan Tomek, iHomeLab, stephan.tomek@ihomelab.ch
Andreas Rumsch, iHomeLab, andreas.rumsch@ihomelab.ch
Prof. Alexander Klapproth, iHomeLab, info@ihomelab.ch

BFE-Bereichsleiter:	Michael Moser
BFE-Programmleiter:	Roland Brüniger
BFE-Vertragsnummer:	SI/500787-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Inhalt

I.	Abbildungsverzeichnis	5
II.	Tabellenverzeichnis.....	5
III.	Abkürzungen.....	6
IV.	Zusammenfassung	7
V.	Summary	8
VI.	Résumé.....	9
VII.	Einleitung	11
1	Grundlagen zu DC in Gebäuden	12
1.1	Energieverteilung.....	12
1.2	Auswirkungen durch DC.....	15
1.2.1	Technologien	15
1.2.2	Geräte.....	15
1.3	Normierungen.....	17
1.4	Treibende Elemente einer DC-Verteilung	17
1.5	Fazit.....	18
2	Gerätelandschaft Schweiz / Datenerhebung	19
2.1	Datenerhebung.....	19
2.2	Wohngebäude	20
2.2.1	Verbrauch nach Gebäudearten	22
2.3	Dienstleistungssektor	23
2.4	Industriesektor	25
2.5	Verkehr	26
3	Anwendungsspezifische Steigerung der Energieeffizienz durch DC	28
3.1	DC-DC Konverter	28
3.1.1	Schaltverluste	28
3.2	Beleuchtung.....	29
3.3	Elektronikgeräte.....	30
3.3.1	Externe Netzteile	31
3.4	Haushaltgeräte	31
3.5	Gebäudetechnik	32
3.6	Elektromobilität	32
3.7	Fazit.....	32
4	Auswertung gerätespezifische Steigerung der Energieeffizienz in der Zielgruppe	33
4.1	Wohngebäude	34
4.1.1	Kostenhochrechnung für das Einsparpotential	35
4.2	Dienstleistung	35
4.3	Industrie.....	36

5	Ausblick.....	37
6	Literaturverzeichnis.....	39
7	Anhang	40
7.1	Szenario „Weiter wie bisher“ Zusammenfassung Kenndaten und Ergebnisse.....	40
7.2	Erhebung Gebäudelandschaft der Schweiz 2011	41

I. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 - Leitungsverluste bei verschiedenen Verteilspannungen	12
Abbildung 2 - Verteilvariante 1: AC-DC Wandlung in der Wohnung.....	14
Abbildung 3 - Verteilvariante 2: AC-DC Wandlung in der HV	14
Abbildung 4 - Aufteilung des elektrischen Energieverbrauchs 2011 nach Verwendungszwecken	19
Abbildung 5 - Prognose Strombedarf Schweiz bis 2050 exkl. Netzverluste	20
Abbildung 6 - Elektrischer Energieverbrauch in Privathaushalten nach Gerätegruppen.....	21
Abbildung 7 - Elektrischer Energieverbrauch nach Gerätegruppen und Gebäudearten der CH.....	22
Abbildung 8 - Elektrischer Energieverbrauch nach Gerätegruppen 2010 EFH – MFH	23
Abbildung 9 - Dienstleistungssektor Energieendnachfrage [PJ] nach Branchen 2000 - 2050	24
Abbildung 10 - Energiebezugsflächen Industrie.....	26
Abbildung 11 - Schaltcharakteristik MOSFET IRF541	29
Abbildung 12 - Elektronisches Vorschaltgerät	29
Abbildung 13 - Primär getaktetes Netzteil (AC-DC-Wandler)	30

II. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 - Variationen Leiternutzung	13
Tabelle 2 - Gerätekategorien.....	16
Tabelle 3 - Stromverbrauch der privaten Haushalte 2000 bis 2011 nach Verwendungszwecken [PJ]	21
Tabelle 4 - Übersicht Verwendungszwecke der elektrischen Energie im Dienstleistungssektor.....	24
Tabelle 5 - Industrie elektrischer Energieverbrauch nach Verwendungszwecke	25
Tabelle 6 - Verkehr Nachfrage elektrischer Energie nach Verwendungszwecken [PJ].....	26
Tabelle 7 - Potential der Steigerung der Energieeffizienz für bereits DC-fähige Geräte	33
Tabelle 8 - Potential der Steigerung der Energieeffizienz für bereits DC-fähige Geräte	34
Tabelle 9 – Kostenhochrechnung für Umstieg auf DC-Verteilung im Einfamilienhaus.....	35
Tabelle 10 – Kostenhochrechnung für Umstieg auf DC-Verteilung im Einfamilienhaus.....	35
Tabelle 11 - Geschätzte Entwicklung der Gestehungskosten für Strom aus neuen erneuerbaren Energien (ohne Netz), sowie für Strom für elektrochemische Speicherung (Batterien) in Rp/KWh	37

III. Abkürzungen

AC	Alternating Current – Wechselstrom
AKKU	Akkumulator
BFE	Bundesamt für Energie
BFS	Bundesamt für Statistik
BLDC	Bürsten Loser DC (auch EC)
DC	Direct Current – Gleichstrom
DIN	Deutsche Industrie Norm
EC	Elektronisch Kommutiert
EFH	Einfamilienhaus
EG	Elektro- Geräte
EVG	Elektronisches Vorschalt- Gerät
FET	Felde- Effekt- Transistor
FI	Fehlerstrom- Schutzschalter
GV	Güter- Verkehr
HGÜ	Hochspannungs- Gleichstrom- Übertragung
HLK	Heizung, Lüftung, Klimatechnik
I&K	Information & Kommunikation
IEC	International Electrotechnical Commission
KVG	Konventionelles Vorschalt- Gerät
LS	Leitungs- Schutzschalter
MFH	Mehrfamilienhaus
MOSFET	Metall- Oxid- Halbleiter FET
NEE	Neue Erneuerbare Energien
NIN	Niederspannungs- Installations- Norm
PJ	Peta- Joule
PLC	Power Line Communication
PoE	Power over Ethernet
PV	Privat- Verkehr
RW	Raum- Wärme
VSE	Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen
WW	Warm- Wasser

IV. Zusammenfassung

Mobiltelefone, Smartphones, MP3-Player, Digitalkameras und viele andere portable Geräte sind Bestandteil unseres täglichen Lebens. Allen gemeinsam ist, dass sie mit Energie aus Batterien resp. Akkus betrieben werden – also mit Gleichstrom. Aber auch viele andere Geräte - Küchenmaschinen, Computer, TV und Radios – benötigen Gleichstrom, denn in praktisch allen Geräten ist heutzutage Elektronik verbaut. Um diese Geräte mit Energie zu versorgen, muss der Wechselstrom aus dem Stromnetz in Gleichstrom umgewandelt werden. Somit erfolgt in jedem Gerät eine Wandlung von Wechsel- zu Gleichstrom. Wechseln wir auf die Energieerzeugungsseite. In der Stromproduktion wächst der Anteil von Neuen Erneuerbaren Energiequellen (NEE) stetig: z.B. Sonnenenergie oder Windenergie. Bei Kleinanlagen wie PV auf dem Hausdach oder einer kleinen Windturbine ist der erzeugte Strom oft Gleichstrom. Aus diesen Gründen ist die Frage naheliegend, ob eine Verteilung der Energie mit Gleichstrom (DC-Verteilung) Vorteile bietet gegenüber der heute üblichen Verteilung von Wechselstrom (AC-Verteilung).

Es gibt bereits Pilotinstallationen, in welchen eine DC-Verteilung implementiert wurde. Eine dieser Installationen ist das Rechenzentrum von Green.CH in Lupfig AG. In dieser Anwendung wird als grösster Vorteil der Umstellung auf DC-Verteilung die Reduktion der Umwandlungen zwischen AC und DC und die damit verbundene erhöhte Zuverlässigkeit betrachtet. Als weiterer Effekt ist eine Steigerung der Energieeffizienz festgestellt worden: Das Rechenzentrum braucht ca. 20% weniger Energie als herkömmliche Zentren.

In der vorliegenden Studie wurde untersucht, ob durch eine Umstellung der Energieverteilung auf Gleichstrom in Wohn- und Bürogebäuden die Energieeffizienz ähnlich hoch gesteigert werden kann. Im Gegensatz zum Rechenzentrum sind in Wohn- und Bürogebäuden sehr unterschiedliche Geräte im Einsatz. Für die verschiedenen Gerätekategorien wurden die Potentiale der Energieeffizienz bestimmt. Weiter wurde analysiert, in wie fern bestehende Geräte heute schon an Gleichstrom angeschlossen werden können.

Um DC-Anwendungen in Wohn- und Bürogebäuden zu realisieren, muss eine DC-Infrastruktur geschaffen werden. Im Bereich von Wohn- und Bürogebäuden sprechen wir von einer vorhandenen Gebäudesubstanz mit einer bestehenden Infrastruktur und einer existierenden Verkabelung. Die Studie hat dieser Tatsache Rechnung getragen. Abklärungen haben gezeigt, dass für DC-Anwendungsfälle bisher keine einheitlichen Normen und auch Steckverbindungen entwickelt wurden. Der einzige Vergleichswert, der referenziert werden kann, ist die 48 Volt Grenze, welche ungefährlich für den Menschen ist. Die maximal mögliche Spannung ist durch die Isolationsfestigkeit der Leiter begrenzt und liegt bei 400V. Dieser Wert entspricht der maximalen Spannung im Drehstromnetz. Ein Hauptproblem in DC-Anwendungen ist die Funkenlöschung beim Trennen von Verbrauchern. Das Problem entsteht aus dem fehlenden Nulldurchgang der DC-Spannung. Auch Leitungsschutzschalter (LS) und Fehlerstromschutzschalter (FI) sind zwingend nötig, um die Personensicherheit zu gewährleisten. Für DC-Anwendungen sind nur wenige, teure Produkte erhältlich.

Interessant ist, dass heute schon die meisten Geräte ohne aufwändige Modifikationen an Gleichstrom betrieben werden können. Was dadurch wegfällt, ist der Gleichrichter. Dieser trägt jedoch nur unwesentlich zur Steigerung der Energieeffizienz bei (<1%).

Es hat sich gezeigt, dass die Umstellung auf DC-Verteilung den Einsatz neuer, effizienterer Technologien fördern kann. Am deutlichsten ist das bei mit Motoren betriebenen Endgeräten wie Kühlschränken oder Waschmaschinen zu sehen. Der Einsatz eines bürstenlosen DC-Motors anstelle der sehr günstigen Spaltnmotoren kann die Geräteeffizienz um bis zu 50% steigern. Neue Technologien können jedoch auch eingesetzt werden, wenn die Energie als Wechselstrom zugeführt wird (z.B. LED-Leuchten).

Berechnungen zeigen, dass wegen der notwendigen Investitionen in Elektroinstallationen und neue, DC-optimierte Geräte die Kosten für die eingesparte Energie (3'700 CHF pro jährlich eingesparte kWh) um Größenordnungen höher liegen, als wenn diese Energie mit Photovoltaik erzeugt würde (6 CHF pro jährlich erzeugte kWh).

Insgesamt zeigt die Studie, dass in Wohn- und Bürogebäuden kein wesentlicher Gewinn an Energieeffizienz erzielt werden kann, welcher durch die Umstellung auf DC-Verteilung begründet ist. Zudem erfordert eine Umstellung auf DC-Verteilung auch vergleichsweise hohe Investitionen.

V. Summary

SmartPhone, Digicam, Portable Players, mobile equipment is surrounding us even more and more and has become an important part of your daily live. DC voltage is the common denominator for all this goods - through batteries, accumulators or adapters. Because of the wide usage of electronic components, many devices require also DC voltage for their operation, e.g. TV, household devices, HiFi Systems, play stations and many more. The DC voltage is generated from mains, an AC entry point. Each single electrical appliance containing electronic components requires also a rectifier. Changing now to the power production side, we have the trend of growing renewable energy. Small installations in renewable energy, like photovoltaic roofs or wind generators normally produce DC current. The question is, if households can profit from available DC current and if this can increase the energy efficiency.

There are already pilot installations with DC infrastructure available, for instance the data center of Green.CH in Lupfig AG. The biggest advantage is the reduction of AC/DC conversions and the increased reliability of the system. Positive is also the efficiency increase of the data center, 20% less power consumption compared with other data centers.

This study has the goal to investigate if the energy efficiency can be increased by the same level in residential and office buildings switching to DC infrastructure. In contrast to the data center, residential and office buildings have a bigger variation of electrical appliances. The potential of efficiency increase has been analyzed for the different appliance categories. Furthermore it was checked if some appliances can be operated direct with DC current without modification.

A DC-infrastructure needs to be put in place first before using DC power in residential and office buildings. Residential and office buildings exist since a long time; the buildings are already equipped and operated with AC mains. This important fact had been considered switching from AC to DC power distribution in buildings. Having a look to the norms and definitions it became clear, that the industry did not pick up the issue of DC distribution in residential and office buildings so far. Also standards for plugs are missing today. The only reference is the 48 volt level, which is the level for people's safety, getting in touch with voltage. The isolation of the installed wires giving the border for the maximum of energy distributed in homes with DC. The calculation has showed that a level of 400 V is feasible. It is the same level resulting from the maximum voltage in a 3 phase AC environment. One major unsolved problem in DC environments is the spark quenching because of the missing zero-crossing in AC environment. Another topic is the availability of inexpensive installation equipment like: earth leaker circuit breaker and normal circuit breakers, which is not solved so far.

An interesting finding was that many electrical appliances can be connected to DC without any modification. This fact makes the rectifier obsolete. But the efficiency increase is just minor (<1%).

DC infrastructure can become an enabler for new, efficient technologies. Motor driven appliances like wash machines or refrigerators have the biggest potential. With the usage of brushless motors the efficiency can be lifted up to 50%. But these types of product modifications are costly. New technologies can also be used without switching to DC, e.g. LED technology. These devices can be operated on both AC and DC environment.

Calculations show that the costs for the saved energy because of necessary investments into electrical installations and new DC equipment (CHF 3'700 per kWh annual savings) turn out to be higher as if this energy is produced with photovoltaics (CHF 6 per kWh annual production).

Altogether, the study shows that no essential gain in energy efficiency - which is justified by the rearrangement to DC distribution - can be made in residential and office buildings. Moreover, a rearrangement to DC distribution requires also comparatively high investments.

VI. Résumé

Téléphones mobiles, smartphones, lecteurs MP3, appareils photos numériques et de nombreux autres appareils portables font partie intégrante de notre vie quotidienne. Leur point commun est qu'ils sont tous alimentés par l'énergie provenant de batteries ou d'accumulateurs – donc par du courant continu. Mais de nombreux autres appareils - machines de cuisine, ordinateurs, TV et radios – ont aussi besoin de courant continu, car pratiquement tous les appareils possèdent de nos jours des composants électroniques. Pour alimenter ces appareils en énergie, le courant alternatif du réseau électrique doit être converti en courant continu. Dans chaque appareil, on a donc une conversion du courant alternatif en courant continu. Passons à présent à l'aspect production d'énergie. Dans la production d'électricité, la part des nouvelles sources d'énergie renouvelables augmente en permanence: p.ex. énergie solaire ou énergie éolienne. Dans les petites installations, comme par exemple les panneaux photo-voltaïques sur le toit d'une maison ou des petites éoliennes, le courant produit est souvent du courant continu. On peut donc se demander à juste titre si une distribution de l'énergie avec courant continu (distribution DC) présente des avantages par rapport à la distribution courante actuellement avec du courant alternatif (distribution AC).

Il existe déjà des installations pilotes dans lesquelles une distribution DC a été mise en œuvre. L'une de ces installations est le centre de calcul de Green.CH au sein de la société Lupfig AG. Dans cette application, l'un des plus grands avantages du passage à la distribution DC est la réduction des conversions AC-DC et la plus grande fiabilité qui en résulte. Un autre effet constaté est l'augmentation de l'efficacité énergétique: Le centre de calcul a besoin d'env. 20 % d'énergie en moins que les centres traditionnels.

Dans la présente étude, on a examiné si le passage au courant continu pour la distribution de l'énergie dans les immeubles d'habitations et de bureaux permettait d'augmenter l'efficacité énergétique de la même manière. A la différence du centre de calcul, des appareils très divers sont utilisés dans les immeubles d'habitations et de bureaux. Le potentiel d'efficacité énergétique a été déterminé pour les diverses catégories d'appareils. On a analysé par ailleurs dans quelle mesure les appareils existants pouvaient dès aujourd'hui être raccordés au courant continu.

La réalisation d'applications DC dans les immeubles d'habitations et de bureaux nécessite la création d'une infrastructure DC. Dans le domaine des immeubles d'habitations et de bureaux, il s'agit de la structure actuelle du bâtiment avec l'infrastructure et le câblage existants. L'étude a tenu compte de cet état de faits. Des vérifications ont montré qu'à ce jour, il n'y a pas eu de normes et de connexions homogènes développées pour les applications DC. La seule valeur de comparaison susceptible d'être référencée est la limite de 48 Volt, qui n'est pas dangereuse pour l'homme. La valeur de tension maximale est limitée par la résistance d'isolation du conducteur. Nos calculs ont donné une tension maximale de 400VDC, qui correspond à la tension maximale dans le réseau électrique triphasé. L'un des principaux problèmes des applications est le pare-étincelles lors de la séparation des utilisateurs. Le problème est dû à l'absence de passage à zéro de la tension DC. Les disjoncteurs de protection de ligne et les disjoncteurs à courant de défaut sont absolument nécessaires pour garantir la sécurité des personnes. Pour les applications DC, les produits disponibles sont rares et coûteux.

Il est intéressant de constater qu'aujourd'hui déjà la plupart des appareils peuvent fonctionner avec un courant continu sans que des modifications compliquées soient nécessaires. Le redresseur devient ainsi superflu. Il ne contribue plus que de manière négligeable à l'augmentation de l'efficacité énergétique (<1%).

Il s'est avéré que le passage à la distribution DC pouvait favoriser l'utilisation de nouvelles technologies plus efficaces. Ceci est le plus visible dans le cas des appareils terminaux à moteur tels que les réfrigérateurs ou les lave-linge. L'utilisation d'un moteur DC sans balai à la place des moteurs à bague de déphasage très avantageux peut augmenter l'efficacité de l'appareil jusqu'à 50 %. De nouvelles technologies peuvent également être utilisées lorsque l'énergie est injectée sous forme de courant alternatif (p.ex. lampes LED).

Les calculs montrent, à cause des investissements nécessaires dans des installations électriques et des appareils nouveaux et optimisés par DC, que les frais pour l'énergie économisée (3'700 CHF par kWh annuellement économisé) tombent plus haut autour d'ordres de grandeur comme si cette énergie est produite photovoltaïquement (6 CHF par kWh annuellement produit).

L'étude montre globalement qu'aucun gain significatif d'efficacité énergétique, qui est justifié par le

passage à la distribution DC - ne peut être réalisé dans les immeubles d'habitations et de bureaux. En outre, une adaptation à la distribution DC exige aussi des investissements comparativement élevés.

VII. Einleitung

Schon sehr früh in der Elektrifizierung der Industrieländer, stellte man sich die Frage ob der Transport und die Verteilung der elektrischen Energie in Wechsel- oder Gleichstrom erfolgen sollen. Damals vor 100 Jahren, hat sich die Industrie nach einem langen Tauziehen zwischen Thomas A. Edison und George Westinghouse für die Wechselspannung entschieden. Zum Sieg der Wechselspannung führte massgeblich der Vorteil der Transformationseigenschaft, welche es möglich machten die elektrische Energie über grosse Distanzen hinweg mit geringen Verlusten und dünnen Leiterquerschnitten zu transportieren. Somit konnte zentral produziert und die elektrische Energie für den Verbrauch zu weit abgelegenen Orten einfach transportiert werden. Nicht nur in der Verteilung, sondern auch in der Erzeugung und Anwendung brachte die Wechselspannung Vorteile mit sich. So konnte aus jeder rotierenden Bewegung eine Wechselspannung erzeugt werden, das Drehfeld der Wechselspannung konnte ohne grossen Aufwand wiederum in eine rotierende Bewegung umgeformt werden. Es wurde eine grosse Kompatibilität zu den damals noch weit verbreiteten Dampfmaschinen und deren Kraftübertragung mit Riemen geschaffen.

Durch die laufende Miniaturisierung und den Einzug der Computertechnologie veränderten sich die Lasten, die Gleichspannungsversorgung kam immer öfters zur Anwendung. Beispielsweise, werden in der Automatisierung herkömmlichen Antrieben elektronische Steuereinheiten vorgeschaltet. Die Entwicklung zu mehrheitlich elektronischen Lasten und der steigende Ausbau der erneuerbaren Energiequellen mit stark fluktuierender Energieerzeugung, welche mittels effizienten Energiespeichern ausgeglichen werden können, fordern zunehmend eine genauere Betrachtung einer Gleichstromverteilung.

Im ABB Pilot „Green.ch“, einem Rechencenter welches mit einer DC-Verteilung ausgestattet wurde, sind bereits erste Schritte hin zu diesem Trend überprüft worden. In diesem Pilot wurde vor allem auf den Vorteil gesetzt, dass durch die DC-Verteilung eine Spannungsumwandlung eingespart werden konnte (zwischen der Netzspannung und den Rechnern, denn diese werden direkt über die Gleichspannung der USV gespeist). Durch die Reduktion der Wandlungen konnte die Zuverlässigkeit der Energieversorgung gesteigert werden. Jedoch hatte diese Einsparung nicht nur Auswirkungen auf die Verlässlichkeit, sondern auch einen positiven Einfluss auf die Energieeffizienz. Jede Wandlung von AC zu DC und umgekehrt ist mit Verlusten behaftet. Analog zum Beispiel „Green.CH“ soll geprüft werden, ob die Gleichstromanwendung in Wohn-, Dienstleistungs-, sowie auch Industriegebäuden eine bessere Energieeffizienz zur Folge hat. Man erhofft sich vielmehr, ein Energienetz aufbauen zu können, in dem in Zukunft nicht mehr für nahezu alle Geräte eine separate Spannungsaufbereitung notwendig ist. Somit ist ein Energietransfer zwischen Produktionseinheiten, Speichern und schlussendlich den Verbrauchern ungehindert möglich.

Die Vorteile, welche aus einer solchen Umstellung resultieren würden, die Einbettung zukünftiger Energiegewinnung/Verbraucher, wie auch die noch zu bewältigenden Hürden/Schwierigkeiten sollen im Rahmen dieser Arbeit ermittelt und aufgezeigt werden.

1 Grundlagen zu DC in Gebäuden

Nachfolgend wird ein Überblick über die Thematik der DC Energieverteilung in Gebäuden gegeben. Dabei werden nebst den verschiedenen Versorgungsvarianten, Synergien und Komplikationen heutiger angewandten Techniken in Bezug auf eine Gleichstrom Energieverteilung, aufgezeigt.

1.1 Energieverteilung

Mit der Gleichspannungsverteilung in Gebäuden sollen die Verluste durch Spannungswandlungen aber auch Leitungsverluste möglichst gering gehalten werden. Um das Ziel verwirklichen zu können, muss vorerst eine geeignete Verteilvariante ausgearbeitet werden. Es muss eine Spannungsgrösse definiert werden, die sich zum einen für die Verteilung der Energie eignet und zum anderen möglichst der Spannungsgrösse entsprechen, die von den Endgeräten benötigt wird. Bei der optimalen Versorgungsspannung von Endgeräten gibt es zwei Extreme: tiefe Versorgungsspannung mit geringer Leistung (diverse elektronische Geräte) und hohe Versorgungsspannung mit hoher Leistung (Waschmaschinen und Kochherde). Für die Versorgung leistungsstarker Geräte ist eine um einiges höhere Spannung erforderlich, um die Stromstärke und die davon abhängigen Leiterquerschnitte möglichst tief zu halten. Denn höhere Leitungsquerschnitte resultieren in höheren Material-, respektive Installationskosten.

In Abbildung 1 sind die Leitungsverluste als Flächen in Abhängigkeit der betriebenen Last sowie der Leiterlänge bei einem Querschnitt von 2.5mm^2 illustriert.

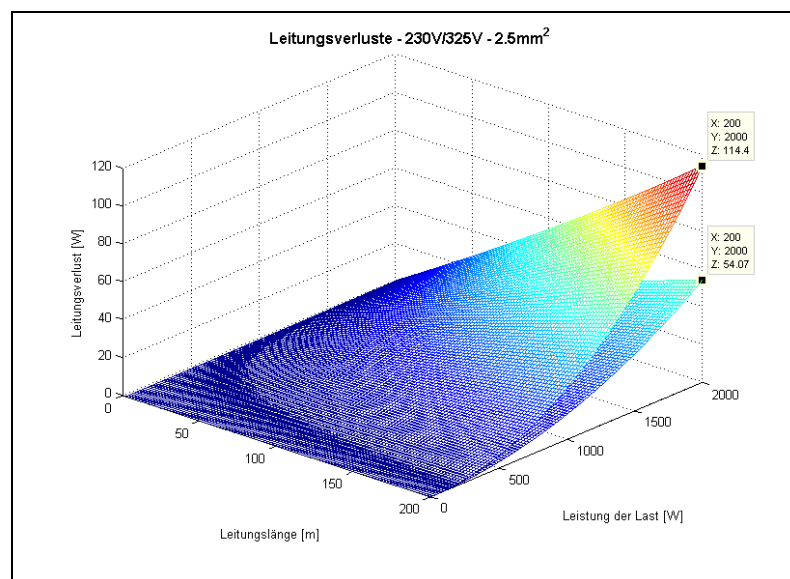


Abbildung 1 - Leitungsverluste bei verschiedenen Verteilspannungen

Die oben liegende Fläche repräsentiert die Verluste der Leitung bei einer Klemmenspannung mit einem Effektivwert von 230V, mit welcher die elektrische Energie bislang in Gebäuden verteilt wurde. Die unten liegende Fläche zeigt die Verluste für eine Verteilspannung von 325V. Diese Höhe der Spannung ist der Scheitelwert einer gegenwärtigen AC-Verteilung im Niederspannungsbereich und wäre deswegen ein möglicher Spannungspegel für eine künftige DC-Verteilung, da diese unmittelbar nach einer Gleichrichtung am Ausgang verfügbar wäre.

Doch der wesentliche Vorteil einer DC-Versorgung gegenüber einer AC-Versorgung bezogen auf die Leitungsverluste ist, dass bei einer Gleichstromübertragung nur Wirkleistung übertragen wird.

Kupferkosten und das Leitungsgewicht führten dazu, die Leitungen mit möglichst niedrigen Querschnitten zu verlegen, was jedoch in grösseren Verlustleistungen und Wärmeentwicklung resultiert. Leiterquerschnitte die in der Schweiz verlegt werden, sind in der Niederspannungs-Installations-Norm (NIN) definiert. Für die folgenden Untersuchungen sowie Beispielberechnungen wird jeweils ein Referenzquerschnitt von 2.5mm^2 angenommen. Bei einem festgelegten Leiterquerschnitt und einer konstanten Last können die Leitungsverluste nur noch mittels Variation der Spannung beeinflusst werden. Mit einer höheren Spannung fließen kleinere Ströme und resultieren somit geringere Verluste. Höhere Verteilspannungen eignen sich besser, wobei berücksichtigt werden muss, dass diese ab einer Höhe von 48 V eine Gefahr für den Menschen darstellen.

Bisher wurde die Verteilung der elektrischen Energie im Drehstrom Netz mit fünf, beziehungsweise drei Leiter realisiert. Damit war es möglich leistungsstarke Geräte mit drei Phasen zu versorgen, wodurch die Anschlussspannung deutlich erhöht und somit der Strom tief gehalten werden konnte. Je nach Symmetrie der Last konnte gar auf einen Rückleiter verzichtet werden. Die Versorgung kleinerer Geräte wurde jeweils über eine Phasen- und eine Rückleitung sichergestellt, wobei zu jeder Anschlussdose zusätzlich immer ein Erdleiter für die Fehlerstromschaltung geführt wird.

Will man die gleiche Energie mittels Gleichspannung übertragen, so wird die maximal mögliche Spannungshöhe durch die Isolationsfestigkeit der Leiter begrenzt. Werden die heutigen Anwendungen als Basis genommen, kann eine maximale Spannung von 400VDC ohne weitere Bedenken auf die Leitungen gegeben werden, da dies der maximal auftretenden Spannung zwischen zwei Leitern einer Drehstromverteilung entspricht. Mit dieser Voraussetzung stehen nun folgende Möglichkeiten für eine DC Installation zur Verfügung:

	Variante 1	Variante 2	Variante 3
L1	+ 325V	+ 325V	+ 325V
L2	- 325V	- 325V	N.A.
L3	+ 230V	N.A.	N.A.
N	0V	0V	0V

Tabelle 1 - Variationen Leiternutzung

Für Geräte mit einer mittleren Leistung würde wohl die dritte Variante mit einer Leiterspannung von mindestens 230VDC zur Anwendung kommen. Dieser Spannungspegel entspricht dem Effektivwert der Einphasen- Wechselfspannung. Geräte mit einphasigem Eingang könnten theoretisch direkt mit dieser DC-Versorgung betrieben werden. Trotzdem sollte für eine Normierung der Verteilspannung die Energieeinsparung nicht ausser Acht gelassen werden.

Die installierten Dreiphasenleiter könnten dazu genutzt werden, um Geräte mit erhöhtem Leistungsbedarf mit höherer Spannung zu versorgen, so wird der Stromfluss tief gehalten. Wie in den Varianten eins und zwei vermerkt, wäre es denkbar, den Strom in zwei der drei Leitungen mit einer Spannung von $\pm 325.26\text{VDC}$ zu verteilen, womit die Geräte mit einer maximalen Spannung von 650VDC versorgt werden könnten. Der dritte Leiter könnte auf ein mittleres Spannungslevel gehoben werden, was den Geräteherstellern zusätzliche Freiheit bieten würde.

Es bleibt noch zu untersuchen, wo im Verteilnetz die Wandlung zu Gleichspannung am besten erfolgt, damit die Effizienz möglichst hoch gehalten wird. Diesbezüglich werden die folgenden Szenarien genauer betrachtet:

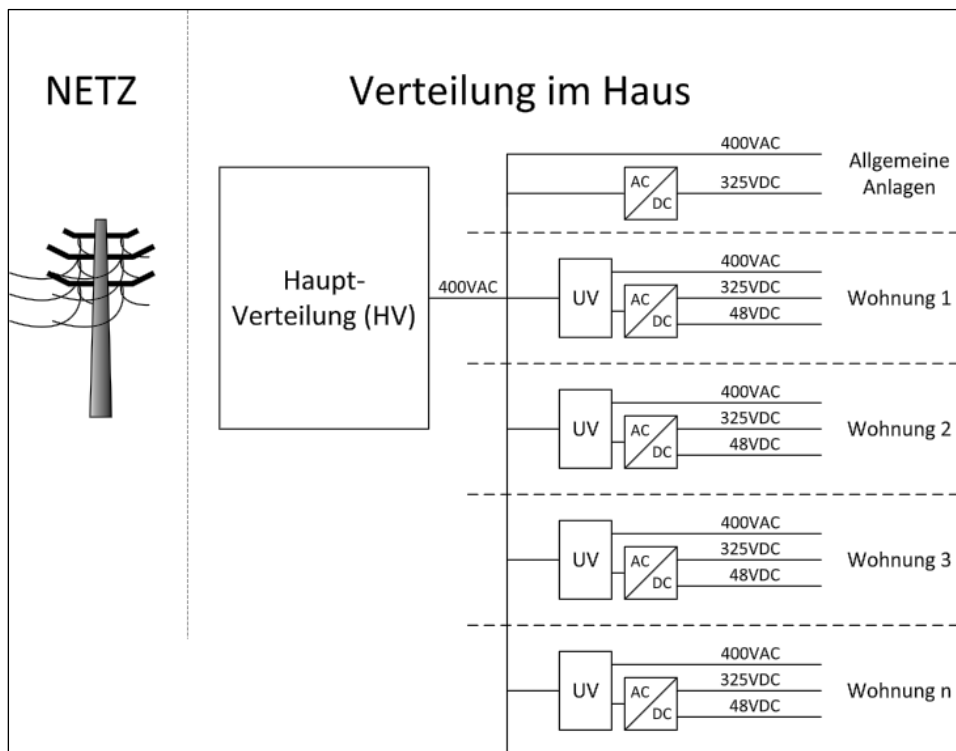


Abbildung 2 - Verteilvariante 1: AC-DC Wandlung in der Wohnung

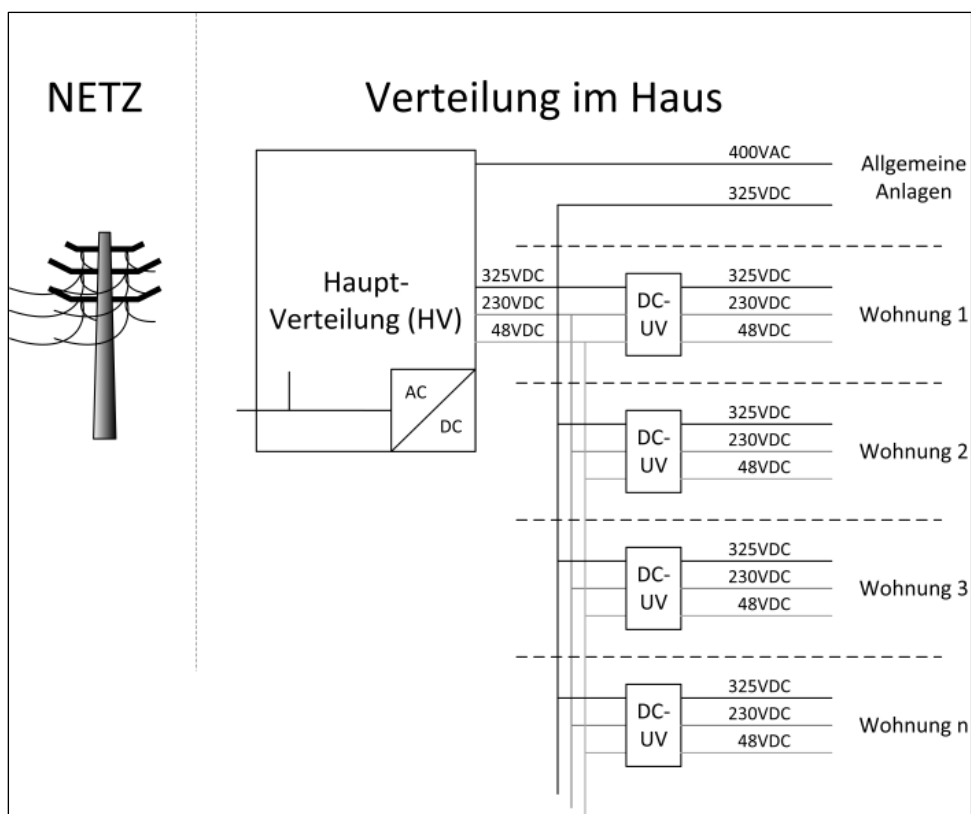


Abbildung 3 - Verteilvariante 2: AC-DC Wandlung in der HV

In den beiden Szenarien besteht weiterhin die Möglichkeit, gewisse Gebäudeinfrastrukturen mit 400VAC zu versorgen, so kann der Betrieb schwer ersetzbarer Anlagen gesichert werden. Diese Möglichkeit bietet sich in Szenario eins bis auf die Ebene der Wohnungen. Szenario 2 hat dafür einen zentralen Spannungswandler, was die Wandlungsverluste minimiert und so die Verteileffizienz steigert.

1.2 Auswirkungen durch DC

1.2.1 Technologien

Während in der Hochspannungstechnik der Trend hin zu DC-Verteilungen steigt, werden im Bereich der Niederspannungstechnik derzeit noch Studien und Analysen durchgeführt. So hat ABB erst kürzlich erfolgreich einen Hochspannungs-Gleichstromschalter getestet. Hingegen wurden im Bereich der Niederspannung erst ein paar wenige Forschungs-/ Testobjekte - darunter „Green.ch“ - getätigt. Grund für die geringe Anzahl an DC-Installationen ist die tiefe Nachfrage, die aus einer kleinen am Markt verfügbaren DC-Produktpalette resultiert. Eine umfassende DC-Verteilung ist erst dann möglich, wenn Leitungsschutzschalter (LS) und Fehlerstromschutzschalter (FI) für DC-Spannungen bis zu 325V verfügbar sind. Ein Hauptproblem in DC-Anwendungen ist die Funkenlöschung beim Trennen von Verbrauchern. Das Problem entsteht aus dem fehlenden Nulldurchgang der DC-Spannung.

Eine Lösung besteht darin, die Funkspannung auf zwei in Serie geschaltete Schutzschalter aufzuteilen, womit eine Schaltspannung von bis zu 120VDC erreicht werden kann. Im Bereich der Fehlerstromschutzschalter gibt es Produkte, die elektronisch detektieren und für Allspannungen, d.h. auch für geglättete Gleichspannungen eingesetzt werden können. Obwohl zurzeit nur vereinzelt DC FI-Schutzschalter angeboten werden, sind bereits einige technische Lösungen patentiert.

Die DC-Verteilung hat auch Einfluss auf Kommunikationsbereiche. Gemeint sind hier Power Line Communication (PLC) Netzwerke, welche es ermöglichen, ein Netzwerk über die herkömmlichen Stromleitungen in der Wohnung/Haus von Raum zu Raum oder aber auch zwischen unterschiedlichen Gebäuden aufzubauen. Da diese Art der Kommunikation auch von den Netzbetreibern beispielsweise zur Steuerung oder Ablesung von Zählern verwendet wird, sind in der Norm EN 50065 die zugelassenen Signalpegel sowie das Band von 95 bis 148.5kHz für die private Nutzung spezifiziert. [4] Da diese Art der Kommunikation vor allem durch niederfrequente, eingestreute Interferenzen sowie durch die Leitungsimpedanz in Zusammenhang mit den eingestreuten Stromüberschwingungen gestört wird, haben Schaltnetzteile mit ihren hochfrequenten erzeugten Störungen nur einen geringen Einfluss auf die schmalbandige Powerline-Kommunikation. Jedoch gilt im Umfeld einer DC-Verteilung zu beachten, dass der Einsatz von Konvertern für die Übertragung der Daten auf das 1.262V grosse Signal wie Tiefpassfilter wirken. Daraus lässt sich ableiten, dass mittels PLC nur Daten innerhalb der gleichen Spannungsebene übermittelt werden können, was den Einsatz eines PLC-Netzwerks stark von der Netztopologie einer DC-Verteilung abhängig macht.

1.2.2 Geräte

Heute stellt der Markt für Elektrogeräte eine Vielzahl verschiedenster Geräte für die unterschiedlichsten Anwendungen bereit: z.B. Beleuchtung, Haushaltgeräte, Konsumerelektronik und Gebäudetechnik. Das Design, die Ausstattung und die technischen Lösungen der Geräte sind durch die AC-Energieübertragung geprägt worden. Heutzutage ist die Elektronik nicht mehr wegzudenken und der Anteil an Elektronikbaugruppen in Geräten wird stets vergrößert. Mit dem Einsatz elektronischer Komponenten, insbesondere von Halbleitern, hat sich auch die Versorgung der Geräte mit Gleichstrom – und somit eine AC-DC-Wandlung – verändert. So werden mittlerweile auch einfache Antriebe über Leistungs-Elektronikkomponenten mit Gleichstrom versorgt, um deren Drehzahl sowie Drehmoment regeln zu können. Ein Vorteil von Gleichstrom zeigt sich durch die zunehmende Mobilität der Bevölkerung jedoch immer mehr: die Energie lässt sich in Batterien oder Akkumulatoren speichern.

Vor dem Hintergrund, dass immer mehr Elektronikbaugruppen eingesetzt werden, scheint eine DC-Energieverteilung sinnvoll. Um den Einfluss einer DC-Energieverteilung auf die Energieeffizienz genauer untersuchen zu können, werden die Geräte in folgende Kategorien unterteilt:

Beleuchtung	<ul style="list-style-type: none"> – Halogenlampen – Fluoreszenz Lampen (Energiesparlampen) – LED Leuchten
Home Elektronik	<ul style="list-style-type: none"> – Radio – TV/Hi-Fi – Elektronische Musikinstrumente – Computer – Portable Geräte
Haushaltsgeräte	<ul style="list-style-type: none"> – Küchengeräte – Waschmaschine / Tumber – Reinigungsgeräte – Kleinheizungen
Gebäudetechnik	<ul style="list-style-type: none"> – HLK – Personentransporte – Gebäudeautomation
Elektromobilität	<ul style="list-style-type: none"> – Elektrobetriebene Autos – E-Bikes

Tabelle 2 - Gerätekategorien

Da heute praktisch alle Geräte mit Elektronikkomponenten versehen sind, ist jeweils auch eine Gleichstromversorgung enthalten. Mit geringen bis mittleren Anpassungen liessen sich die Geräte also vollständig mit Gleichstrom speisen.

Die Elektromobilität fügt eine weitere Dimension hinzu, so können die Akkumulatoren zur temporären Energiespeicherung eingesetzt werden. Sie wären in der Lage, lokal erzeugte Energie (z.B. aus Photovoltaikanlagen) zwischen zu speichern und bei Bedarf wieder abzugeben. Und Akkumulatoren sind Gleichstromspeicher, so könnten diese gut in ein Gleichstromverteilnetz integriert werden. Zurzeit werden die Fahrzeuge allerdings über ein Ladegerät mit dem Energienetz verbunden. Die Ladegeräte begrenzen den Strom, regulieren die Spannung und überwachen den Akkumulator, sie sind nicht für die dezentrale Energiespeicherung geeignet, so dass diese Variante der Energiespeicherung und -verteilung momentan ausscheidet. In zukünftigen Entwicklungen kann diese Anforderung berücksichtigt werden, so dass eine Anbindung der Fahrzeuge an das Energieverteilnetz vereinfacht wird.

Besonderes Augenmerk gilt den Schutzmassnahmen, welche für DC anders ausfallen als für AC. Ein wesentlicher Unterschied besteht darin, dass bei AC der Spannungsnulldurchgang in die Schutzmassnahmen einbezogen werden kann. Das ist bei DC nicht möglich. Beispielsweise ist die Funkenlöschung bei AC automatisch im Nulldurchgang gegeben, bei DC muss die Löschung aktiv vorgenommen werden. Auch sind die Schutzmassnahmen vom Pegel der Spannung abhängig, welche verwendet wird.

DC-Spannungen sind durch die fehlende Alternierung für den Menschen wesentlich weniger gefährlich, die höchstzulässige Berührungsspannung gemäss DIN VDE 0100 ist auf 120 VDC festgelegt. Herzkammerflimmern sowie Verbrennungen können jedoch auch bei DC auftreten, je nach Kontaktzeit ab 150 bis 500 mA. Zufällige Berührungen müssen für grössere Gleichspannungen als 120V verhindert werden. Der Berührungsschutz sollte wie bisher für AC ebenfalls für beide Pole vorgesehen werden.

1.3 Normierungen

Für die Planung, Errichtung und Prüfung elektrischer Installationen und Anlagen gelten in der Schweiz die Vorschriften der Niederspannungs-Installations-Norm (NIN). Sie stützt sich vor allem auf die Harmonisierungsdokumente IEC 60364 sowie einige Gesetze und Verordnungen. Die meisten Normierungen bezüglich elektrischer Energieverteilung beziehen sich allgemein auf Potentialunterschiede oder auf die zu übertragende Leistung. Dadurch gelten sie für beide Stromarten, AC und DC. Der wesentliche Unterschied beider Arten ist, dass aufgrund der konstanten Spannung bei Gleichstrom mit einem geringeren Gefährdungspotential für den Menschen gerechnet werden kann als bei einer Wechselspannung.

Mit der Elektrifizierung der verschiedenen Länder sind stets neue landesspezifische Vorschriften erlassen worden. Ein Beispiel dafür ist die Steckervielfalt. In der Umstellung von AC- auf DC-Energieverteilung sieht die IEC eine Chance, die Steckverbindungen weltweit zu harmonisieren. Eine entsprechende Norm dazu liegt allerdings noch nicht vor.

Mit der stetigen Zunahme von DC-betriebenen Geräten gewinnen auch die Stecker für Datenverbindungen an Bedeutung, z.B. RJ-45, USB oder Ethernet. Mit der USB Schnittstelle wurde beispielsweise die Chance genutzt, europaweit eine einheitliche Steckverbindung für den Anschluss von Mobiltelefonen an das Ladegerät zu schaffen. Dieses Abkommen wurde im Jahre 2009 von 13 führenden Mobiltelefonherstellern unterzeichnet, die EU-Verordnung trat zwei Jahre später in Kraft. Über eine derzeitige USB 3.0 Schnittstelle steht dem Verbraucher ein Mindeststrom von 150mA zur Verfügung, welcher je nach Gerät bis auf 900mA ansteigen kann. Auch bei Netzwerkverbindungen ist es bereits seit längerer Zeit möglich, grössere Ströme über die Leitung zum Endgerät zu übertragen, um dieses mit Energie zu versorgen. Die dabei seit 2003 zulässige maximale Verbrauchsleistung von 13W wurde im Jahre 2009 mit einer Neuauflage des Standards auf eine maximal zulässige Verbrauchsleistung von 25.5W erhöht.

1.4 Treibende Elemente einer DC-Verteilung

Das immer grösser werdende Angebot an Elektronikgeräten und die zunehmende Integration von Elektronikkomponenten in den Geräten begünstigen die DC-Energieverteilung. Die Fortschritte in der Entwicklung von Energiespeichern, speziell von Akkumulatoren, führen zu immer höheren Kapazitäten bei kleineren Baugrössen. Dieser Trend führt zu einer steigenden Anzahl von akkubetriebenen, also mobilen Geräten, welche den Kunden mehr Flexibilität und Freiheit bieten können. Gekoppelt an diesen Trend steigt die Anzahl erforderlicher Netzgeräte. Mit einer DC-Energieverteilung kann diesem Trend entgegengewirkt werden. Die Geräte könnten direkt am DC-Netz angeschlossen werden.

Ein weiterer wichtiger Trend ist die steigende Elektrifizierung im individuellen Personenverkehr. Die in Fahrzeugen verbauten Energiespeicher können für eine temporäre Speicherung dezentral produzierter Energie genutzt werden. Da die Energieerzeugung und -speicherung mit DC arbeitet, können beide Seiten direkt miteinander verbunden werden und es ist keine weitere Konvertierung nötig. Die Attraktivität für eine DC-Verteilung steigt somit und der technische Fortschritt der Energiespeicher kann die DC-Verteilung begünstigen. Momentan wird intensiv an Niedertemperaturspeichern geforscht, welche mit vergleichsweise wenig Aufwand eine grosse Energiemenge speichern können.

Energieerzeuger und -speicher, welche zu einem Verteilsystem verbunden sind - sogenannte Microgrids - werden vor allem durch die EMerge Alliance vorangetrieben. Von der EMerge Alliance werden die Standards entwickelt, um möglichst schnell eine kommerzielle DC-Verteilung realisieren zu können. Der EMerge Alliance gehören einige internationale Firmen und weitere Verbindungen an; z.B. die U.S. Firma Nextek Power Systems.

Begünstigt wird die Entwicklung von DC-Verteilsystemen zudem von der Entwicklung effizienter Hochleistungselektronik, welche die zentralen Komponenten für HGÜ und HVDC-Leitungen sind. Wenn die Kosten-Effizienz in diesem Bereich gesteigert werden kann, können auch DC-Leitungen mit niedrigeren Spannungen und geringeren Distanzen effizienter sein, als vergleichbare AC-Leitungen. Heute rechnet sich eine HGÜ erst ab 500 km. Der Vorteil einer HGÜ resultiert vor allem aus dem Nichtauftreten der Blindleistung. Der alternierende Betrieb bei AC führt zu einer permanenten Ladungsverschiebung und die langen Hochspannungsleitungen wirken wie ein Kondensator der ständig geladen und entladen wird.

1.5 Fazit

Die Entwicklung der Energieerzeugung - im speziellen die neuen erneuerbaren Energien - geht immer mehr in Richtung DC; die Verbraucher benötigen grösstenteils bereits DC, der Bedarf nimmt weiter zu. Viele Geräte, die nicht explizit eine AC-Spannung benötigen, können auf einen DC-Betrieb umgerüstet werden. Eine solche Umrüstung macht auch deshalb Sinn, da im Gerät bereits Gleichspannungen für die Steuerung oder für die Anzeige benötigt wird. Den grössten Aufwand in der Umrüstung auf DC benötigen die Antriebe. Wo heute günstige Motoren mit AC-Speisung eingesetzt werden, muss bei einer DC-Verteilung auf eher teurere DC-Antriebe umgestellt werden. Die Preise für die DC-Antriebe dürften allerdings sinken, wenn auf breiter Front auf DC umgestellt würde und somit die Stückzahlen der Antriebe deutlich stiegen.

Eine direkte DC-Versorgung der Geräte würde sich insgesamt positiv auf die Herstellkosten auswirken. Die Herstellkosten sinken, indem die Netzteile nicht mehr in jedem Gerät eingebaut werden müssen - was auch zu einer Platzersparnis führt. Die Anpassung der DC-Spannungen an die im Gerät benötigten Spannungen erfolgt mit der ohnehin im Gerät vorhandenen Spannungsaufbereitung. Eine zentralisierte, niederfrequent getaktete Stromwandlung von AC nach DC kann einen Wirkungsgrad von bis zu 97% erreichen.

Für eine Verteilung des Gleichstroms auf einem Spannungspegel von 48VDC sind für den Schutz (Leitungsschutzschalter, FI-Schutzschalter) bereits einige Komponenten auf dem Markt. Für den Personenschutz (FI-Schutzschalter) ist jedoch noch ein grosser Entwicklungsbedarf vorhanden. Von höheren Verteilspannungen muss aufgrund fehlender Schutzkomponenten derzeit noch abgesehen werden.

Der Anteil an grauer Energie und die Installationskosten können gesenkt werden, wenn die Konvertierung von AC nach DC zentralisiert wird und für die Energieverteilung weniger Leiter erforderlich sind.

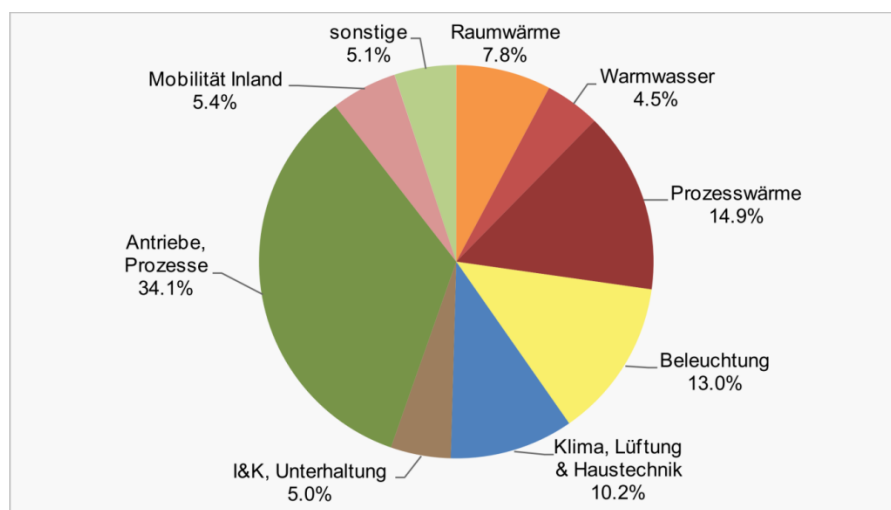
2 Gerätelandschaft Schweiz / Datenerhebung

Für eine Analyse der möglichen Energieeffizienzsteigerung in der Schweiz bei verschiedenen Geräten durch die DC Energieversorgung werden in diesem Kapitel die nötigen Grundlagen hergeleitet. Es interessiert für jede der in *Kapitel 1.2.2* aufgeführten Geräte-Kategorien der prozentuale Anteil am elektrischen Gesamtenergieverbrauch. Es wird der Energieverbrauch in der Schweiz in EFH, MFH und Dienstleistungsgebäuden wie Büros oder Hotels sowie Industriebauten betrachtet. Zukünftige energierelevante Änderungen, Bestimmungen und Verordnungen die den Verbrauch elektrischer Energie massgeblich beeinflussen könnten, fliessen auch in die Untersuchung ein. Hier ist die Energiewende 2035/2050 und der Absenkpfad des Bundes zu erwähnen. Bei der Erhebung wird auch auf den Energieverbrauch im Verkehr eingegangen und der gegenwärtige Trend zur Elektromobilität für die Abschätzung der Entwicklung bis im Jahre 2050 miteinbezogen.

2.1 Datenerhebung

Für die Datenerhebung werden Publikationen vom Bundesamt für Statistik und Bundesamt für Energie verwendet. Insbesondere wird die Publikation vom Bundesamt für Energie (BFE) „Die Energieperspektiven für die Schweiz bis 2050“ [6] betrachtet. Daraus wird abgeschätzt, wie sich der Energieverbrauch der einzelnen Gerätegruppen verändert, wenn aktuelle sowie künftige politische, ökonomische oder andere Einflüsse berücksichtigt werden.

Der Anteil elektrischer Energie an der insgesamt genutzten Energie stieg seit 1985 von gut 20% auf heute 25% an. Im Jahr 2011 erreicht die elektrische Energie einen Anteil von 211PJ / 58.6TWh, was etwa einem Viertel am Gesamtenergieverbrauch entspricht [7]. Abbildung 4 zeigt die Anteile einzelner Verwendungszwecke für elektrische Energie.



Quelle: Prognos, TEP, Infrac 2012

Abbildung 4 - Aufteilung des elektrischen Energieverbrauchs 2011 nach Verwendungszwecken

Der Anteil elektrischer Energie am Gesamtenergieverbrauch wird weiter zunehmen. Die zu erwartende Zunahme des elektrischen Energieträgers im Verkehr sowie die vermehrt eingesetzten Wärmepumpen steigern den elektrischen Energieverbrauch, reduzieren jedoch im Gegenzug den Verbrauch an fossilen Energieträgern. Gemäss einer Publikation der ETH Zürich [8] kann bis im Jahre 2050 mit einem zusätzlichen elektrischen Energiebedarf für den Betrieb der Wärmepumpen von etwa 7.2PJ / 2TWh ausgegangen werden. Es wird erwartet, dass die verstärkte Zunahme der Elektromobilität im Personen- sowie Güterverkehr ein Mehr von 21.6PJ / 6TWh verschlingen wird.

Basierend auf diesen Einschätzungen wird der Jahresverbrauch an elektrischer Energie im Jahre 2050 in dieser Studie – je nach Szenario – im Bereich zwischen 216PJ / 60TWh und 310PJ / 86TWh geschätzt.

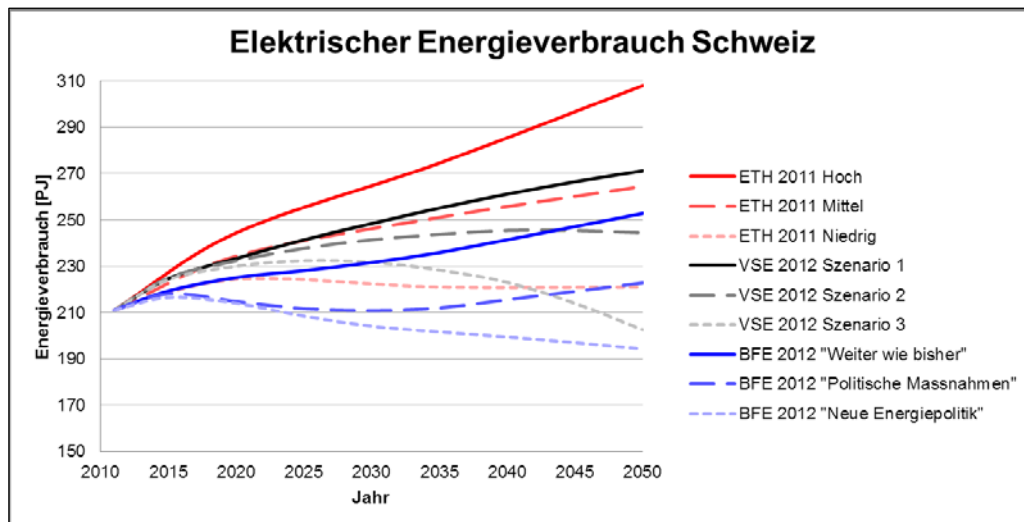


Abbildung 5 - Prognose Strombedarf Schweiz bis 2050 exkl. Netzverluste

Andere Studien wie jene vom VSE [9] oder dem BFE [6] liegen zwar mit ihren Prognosen für die Energienachfrage bis im Jahre 2050 mehrheitlich im Streufeld der Erwartungen der ETH, rechnen allerdings mit einem wesentlich geringeren Anstieg der Nachfrage oder sehen gar die Möglichkeit, den Verbrauch langfristig zu senken.

Die weiterführenden Analysen und Untersuchungen dieser Arbeit zur Ermittlung des möglichen zukünftigen Einsparpotentials aufgrund einer DC-Verteilung, werden auf den Entwicklungserwartungen des Szenarios „Weiter wie bisher“ vom BFE gestützt. Dieses Szenario repräsentiert keine Prognose, sondern eine Referenzentwicklung, für welche die Annahme getroffen wird, dass die eingeführten energiepolitischen Instrumente wie bisher weitergeführt sowie entsprechend dem technischen Fortschritt nachgeführt werden.

2.2 Wohngebäude

Der elektrische Energieverbrauch der privaten Haushalte beläuft sich auf 64.6PJ / 18TWh - etwas mehr als 30% des gesamten elektrischen Energieverbrauchs in der Schweiz. Für Haushalte beträgt der Anteil der elektrischen Energie am Gesamtverbrauch aller Energieträger fast 28%.

In Tabelle 3 ist für einzelne Elektrogeräte die Veränderung des Energieverbrauchs seit 2000 aufgeführt.

	2000	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	Δ '00 – '11
Beleuchtung	5.7	6.3	6.3	6.2	6.2	6.0	5.9	5.7	-1.4%
Kühlen und Gefrieren	7.1	7.2	7.1	7.1	7.2	7.1	7.1	7.0	-1.1%
Kühlgeräte	4.3	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	0.3%
Tiefkühlgeräte	2.8	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	-3.2%
Waschen und Trocknen	2.6	3.3	3.4	3.6	3.7	3.7	3.8	3.9	49.0%
Waschmaschinen	1.6	1.7	1.8	1.8	1.9	1.9	1.9	2.0	26.0%
Wäschetrockner	1.1	1.6	1.7	1.7	1.8	1.9	1.9	1.9	82.6%
Unterhaltung, IuK	5.3	5.4	5.4	5.5	5.6	5.6	5.5	5.3	-0.9%
TV	2.0	2.1	2.2	2.3	2.5	2.6	2.6	2.5	22.6%
Video	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	-47.4%
Radio/Phono	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	9.2%
Telefone	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	51.0%
Computer/ Peripherie	1.8	1.6	1.6	1.6	1.5	1.5	1.4	1.3	-23.9%
Klima, Lüftung, HT	3.6	4.0	4.0	3.7	4.0	4.0	4.4	3.8	5.5%
Antennenverstärker, HV	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	41.5%
Hilfsenergie RW	2.4	2.7	2.7	2.3	2.6	2.5	2.9	2.2	-7.9%
Klima, Lüftung	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	27.3%
sonstige Elektrogeräte	4.4	5.9	6.1	6.3	6.5	6.8	7.1	7.4	68.7%
Summe	28.8	32.1	32.4	32.4	33.1	33.3	33.8	33.1	14.9%

Quelle: Prognos 2012

Tabelle 3 - Stromverbrauch der privaten Haushalte 2000 bis 2011 nach Verwendungszwecken [PJ]

Durch den verstärkten Einsatz von Energiesparlampen und LED-Leuchtmitteln kann ein Rückgang des Energieverbrauchs bei der Beleuchtung verzeichnet werden. In den Bereichen „Waschen und Trocknen“ wie auch „sonstige Elektrogeräte“ ist eine markante Zunahme ersichtlich. „Sonstige Elektrogeräte“ beinhalten Elektrogeräte wie Staubsauger, Hilfsgeräte beim Kochen, elektronische Musikinstrumente usw.

Die Studie des BFE [6] (Energieverbrauch bis im Jahre 2050, Szenario „Weiter wie bisher“) rechnet mit einer Reduktion des elektrischen Energieverbrauchs von 7.5% für den Betrieb elektrischer Geräte, obwohl eine Zunahme der Anzahl der Geräte von 46% erwartet wird. Dabei sind die Gerätegruppen HLK, Warmwasser und Kochen nicht enthalten.

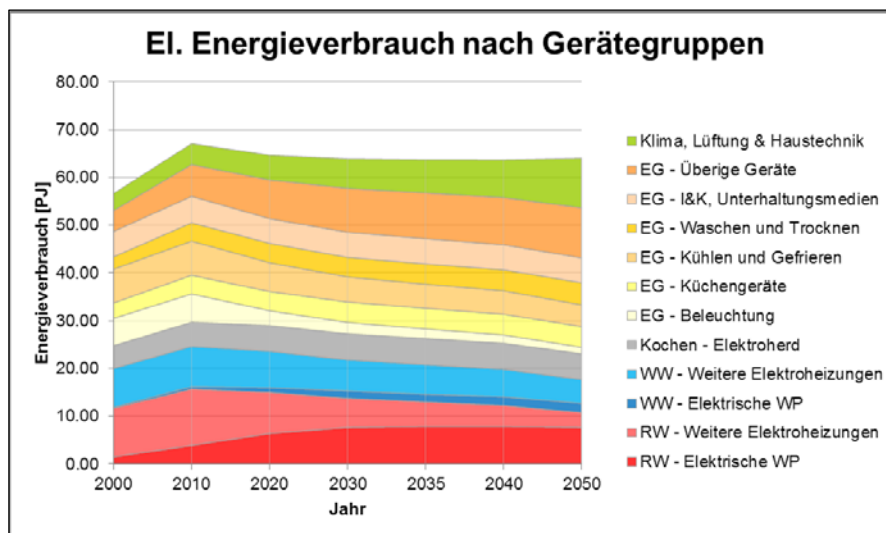


Abbildung 6 - Elektrischer Energieverbrauch in Privathaushalten nach Gerätegruppen

In Abbildung 8 - Elektrischer Energieverbrauch nach Gerätegruppen 2010 EFH – MFH ist die Entwicklung des Energieverbrauchs nach Gerätetypen bis 2050 dargestellt. Es zeigen sich einige wesentliche Entwicklungen:

- Der Energieverbrauch der Beleuchtung wird durch den Einsatz energieeffizienter Leuchtmittel zurückgehen.
- Durch den vermehrten Einsatz von Wärmepumpen bei der Raumwärme und der Warmwasseraufbereitung reduziert sich der Energieverbrauch in diesen Bereichen.
- Der vermehrte Einsatz von elektrisch betriebenen Geräten führt zu einer Erhöhung des Energieverbrauchs.
- Der Energieverbrauch für den Betrieb von Klimaanlage, Lüftungen und der Haustechnik, z.B. in Minergie-Häusern, wird steigen.

Insgesamt wird der Energieverbrauch ab dem Jahr 2020 ziemlich konstant bleiben.

Es wird davon ausgegangen, dass bis im Jahre 2050 eine Steigerung des beheizten Wohnflächenbestandes durch Wärmepumpen von heute etwa 10% auf rund 35% erfolgen wird. Analog zur Raumwärme wird der Prozentuale Anteil an Personen, welche durch Wärmepumpen aufgeheiztes Wasser verwenden um fast 19% auf rund 25% ansteigen.

Im Folgenden Abschnitt werden die zusammengetragenen Verbrauchswerte weiter unterteilt und auf die Gebäudearten Ein- und Mehrfamilienhäuser abgebildet.

2.2.1 Verbrauch nach Gebäudearten

Der Verbrauch an elektrischer Energie für private Haushalte wird in diesem Kapitel nach Ein- und Mehrfamilienhäusern unterteilt. In Abbildung 7 ist der Energiekonsum entsprechend der Gebäudeart und den Endverbrauchern aufgeteilt. Der Anteil der EFH am Verbrauch macht rund 30% der gesamten elektrischen Energie der Schweizer Haushalte aus.

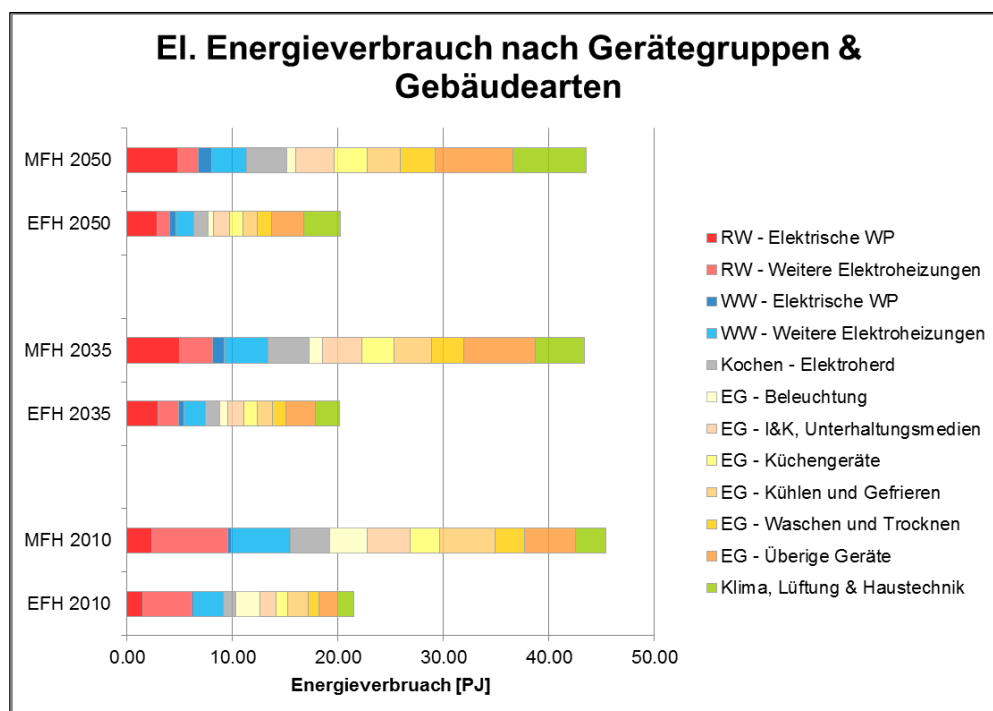


Abbildung 7 - Elektrischer Energieverbrauch nach Gerätegruppen und Gebäudearten der CH

Für die Aufteilung der Energieverbräuche der einzelnen Gerätegruppen pro Gebäudeart wurden für die Raumwärme und Beleuchtung die Anteile der Wohnflächen von EFH und MFH bezüglich der gesamten Schweizerischen Wohnfläche als Grundlage genommen. Die Bereiche Warmwasser sowie Klima, Lüftung und Haustechnik teilen sich entsprechend dem Flächenverhältnis, wobei jedoch auch die Gebäudeanzahl berücksichtigt wurde. Die Verteilung des Energieverbrauchs der Gruppen Kochen sowie der restlichen Elektronikgeräten ist auf die Anzahl an Wohnbauten gestützt.

Der Energieverbrauch der einzelnen Gerätegruppen pro Gebäudeart kann aus den Kreisdiagrammen aus Abbildung 8 entnommen werden. Diese zeigen den Energieverbrauch aus dem Jahre 2010. Die Gegenüberstellung des Verbrauchs dient als Grundlage, um in den einzelnen Bereichen pro Gebäudeart das Einsparpotential abzuschätzen.

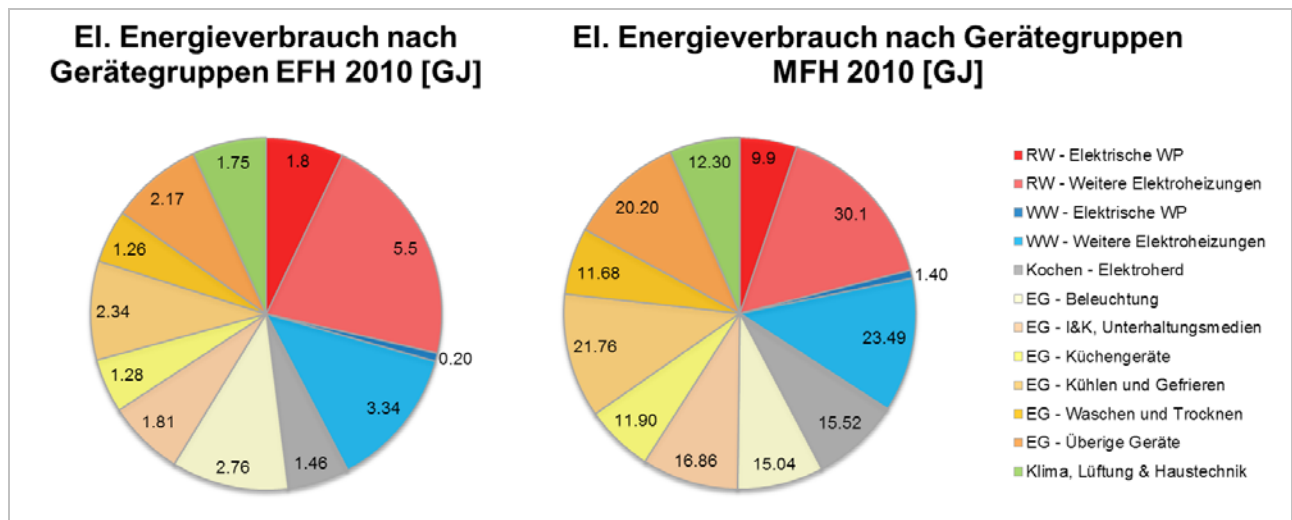


Abbildung 8 - Elektrischer Energieverbrauch nach Gerätegruppen 2010 EFH – MFH

Bei EFH ist der Anteil der Energie für Gebäudetechnik grösser als bei MFH, dies aufgrund der grösszügigeren Wohnflächen bei EFH. Die zukünftige Entwicklung des Energieverbrauchs korrespondiert mit den Werten aus Kapitel 2.2. D.h. der Energiebedarf für Beleuchtung, Raumwärme und Warmwasseraufbereitung wird sinken. Insbesondere fällt die Reduktion des Energiebedarfs für Beleuchtung ins Gewicht.

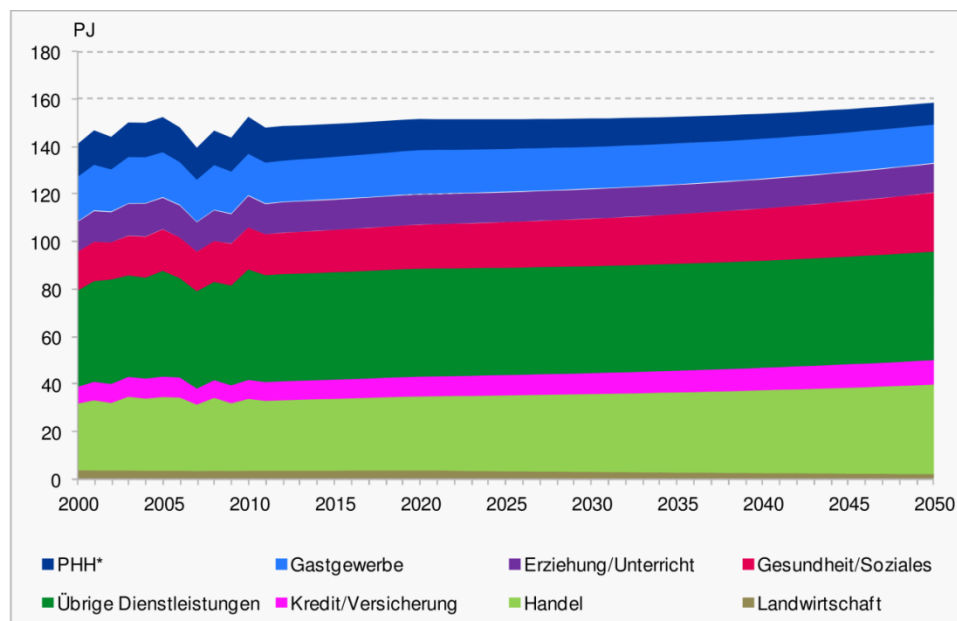
Bei MFH ist der Energiebedarf für die Haustechnik geringer, da sie pro MFH nur einmal benötigt wird und so effizienter betrieben werden kann. Der Anteil für die Beleuchtung ist kleiner als bei EFH. Für das Kochen wird anteilmässig mehr Energie verbraucht als in EFH. Der Grund liegt darin, dass davon ausgegangen wird, dass jede Wohnung einen Herd aufweist. Deshalb wird der Energiebedarf auf die Anzahl Wohneinheiten bezogen.

2.3 Dienstleistungssektor

Bei einem Gesamtenergieverbrauch aller Energieträger von 132.8PJ / 36.8TWh im Jahre 2011 im Dienstleistungssektor wird mit einem Anteil von 62.6PJ / 17.4TWh fast die Hälfte des Verbrauchs (47%) über den elektrischen Energieträger bezogen.

Für die Zukunft wird die Elektrizität noch weiter an Relevanz gewinnen und der Anteil am Gesamtverbrauch auf 53.6% im Jahre 2035 und bis auf 59% im Jahre 2050 klettern.

Abbildung 9 gibt einen Überblick über die Entwicklung des Gesamtenergieverbrauchs aller Energieträger aufgeteilt auf die verschiedenen Branchen bis ins Jahr 2050. Aufgrund fehlender Daten konnte die Aufteilung des elektrischen Energieverbrauchs auf die einzelnen Branchen nicht vorgenommen werden.



*PHH: Endenergieverbrauch von Ferien-/Zweitwohnungen bzw. Gemeinschaftszählern von Mehrfamilienhäusern, der in der Energiebilanz dem Dienstleistungssektor zugerechnet wird.

Quelle: Prognos 2012

Abbildung 9 - Dienstleistungssektor Energieendnachfrage [PJ] nach Branchen 2000 - 2050

Aus der Grafik in Abbildung 9 kann entnommen werden, dass der Gesamtenergieverbrauch in den Branchen Handel, Gesundheit / Soziales weiter steigen wird. Die Landwirtschaft wird zukünftig weniger Energiebedarf aufweisen. Insgesamt wird der Gesamtenergiebedarf für den Dienstleistungssektor bis ins Jahr 2050 weiter steigen.

Tabelle 4 gibt Aufschluss über die Verwendungszwecke der elektrischen Energie im Dienstleistungssektor über die nächsten Jahre bis 2050.

PJ	2000	2010	2020	2030	2035	2040	2050
Verwendungszwecke							
Raumwärme	4.5	5.7	5.0	4.4	4.0	3.7	3.2
Warmwasser	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2
Beleuchtung	13.8	15.4	15.7	16.0	16.1	16.2	16.3
Klima, Lüftung & Haustechnik	14.7	17.0	21.2	24.6	26.6	28.9	34.2
I&K, Unterhaltungsmedien	2.6	4.1	4.7	5.1	5.3	5.6	6.1
Antriebe, Prozesse	17.9	20.1	23.0	24.3	25.1	26.2	28.6
Sonstige	2.1	3.0	3.4	3.5	3.6	3.6	3.8
Total Verwendungszwecke	56.2	66.0	73.8	78.7	81.8	85.2	93.6

Quelle: Prognos 2012

Tabelle 4 - Übersicht Verwendungszwecke der elektrischen Energie im Dienstleistungssektor

Der Verbrauch an elektrischer Energie wird in der Dienstleistung um ca. 40% gegenüber dem Jahr 2010 steigen. Vergleicht man diese Zunahme mit der Zunahme der Gesamtenergie, wird deutlich dass vermehrt andere Energieträger durch Elektrizität ersetzt werden. Markant ist die erwartete Zunahme für Klima, Lüftung und Haustechnik, wo eine Verdoppelung des Energieverbrauchs gegenüber 2010 erwartet wird.

2.4 Industriesektor

Fast ein Drittel an elektrischer Energie – im Jahre 2010 69.4JP – werden in der Industrie aufgewendet. Es wird davon ausgegangen, dass der Anteil elektrischer Energie in den nächsten Jahren in der Industrie zunehmen wird. Allerdings geht der Gesamtenergieverbrauch zurück, wobei die nicht elektrischen Energieträger stärker zurückgehen als die Elektrizität.

In der nachstehenden Tabelle wird der aktuelle und zukünftige elektrische Energieverbrauch der Industrie aufgezeigt, aufgeteilt in die einzelnen Verwendungszwecke.

Verwendungszweck	2000	2010	2020	2030	2035	2040	2050
in PJ							
Raumwärme	0.12	0.29	0.29	0.30	0.30	0.31	0.31
Warmwasser	0.02	0.03	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03
Prozesswärme	21.09	23.29	23.21	22.35	21.98	21.71	21.07
Beleuchtung	5.67	5.82	5.83	5.59	5.44	5.41	5.28
Klima, Lüftung & Haustechnik	1.24	1.03	1.58	1.92	2.09	2.14	2.20
I&K, Unterhaltungsmedien	0.57	0.71	0.95	1.07	1.14	1.21	1.36
Antriebe, Prozesse	36.30	38.11	39.55	38.61	38.26	38.21	38.30
Mobilität Inland	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
sonstige	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	65.08	69.37	71.53	69.95	69.33	69.10	68.63

Quelle: Prognos 2012

Tabelle 5 - Industrie elektrischer Energieverbrauch nach Verwendungszwecke

Die grössten Verbraucher sind die Kategorien „Prozesswärme“ und „Antriebe Prozesse“. Während für die Prozesswärme ein sinkender Verbrauch an elektrischer Energie prognostiziert wird, wird der Verbrauch für Antriebe und Prozesse konstant bleiben.

Im Verbrauch elektrischer Energie für Raumwärme und Beleuchtung sind die Bezugsflächen relevant. Nachfolgend ist die erwartete Änderung der Produktions- und Büroflächen visualisiert.

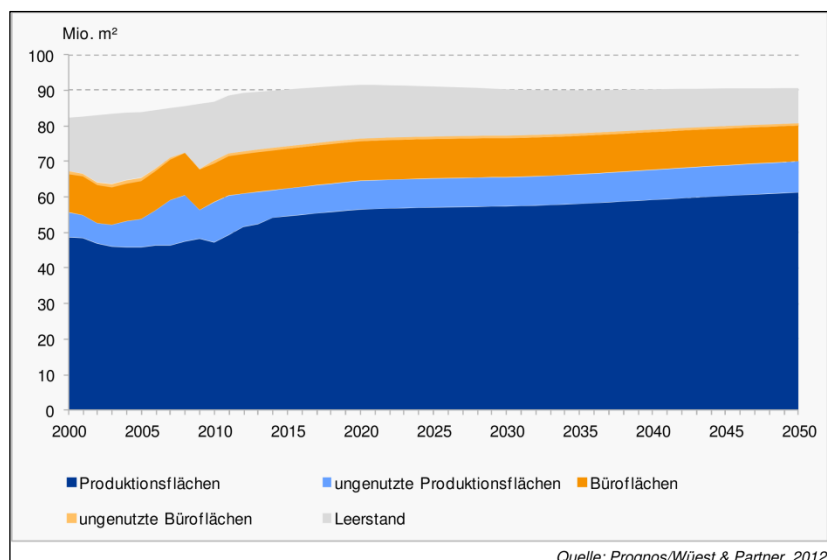


Abbildung 10 - Energiebezugsflächen Industrie

Die Energiebezugsflächen werden insgesamt gleich bleiben, jedoch wird ein Anstieg der Produktionsflächen erwartet, der den Leerstand reduziert.

Eine detailliertere Unterteilung der Verwendungszwecke in die verschiedenen Industriesektoren ist mit den verfügbaren Daten nicht durchführbar.

2.5 Verkehr

Im Sektor Verkehr geht man in Zukunft von einer starken Zunahme des elektrischen Energieverbrauchs aus. Die Zunahme ist im Wesentlichen auf die weiter zunehmende Elektrifizierung des Personentransports auf den Schweizer Strassen zurückzuführen. Der Anteil elektrischer Energie im Verkehr wird von heute etwa 5% auf 13.5% bis 2050 steigen. Ab 2030 erfolgt eine Substitution durch Wasserstoff als Energieträger. Zur Herstellung von Wasserstoff wird Strom benötigt (Power to Gas), was den Verbrauch an elektrischer Energie zusätzlich steigen lässt.

Nachstehend ist die Elektrizitätsnachfrage im Verkehr entsprechend den Verwendungszwecken aufgelistet.

Verwendungszweck	2000	2010	2020	2030	2035	2040	2050
PV Schiene	7.1	8.7	9.6	10.3	10.3	10.3	10.6
PV Strasse	0.0	0.0	0.5	2.7	4.6	6.5	8.9
GV Schiene	2.4	2.7	3.6	3.9	3.9	3.9	3.9
GV Strasse	0.0	0.0	0.0	0.2	0.3	0.3	0.4
PV Strasse (H2)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.4	1.5
GV Strasse (H2)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.3
Total Strom- und H2-Nachfrage	9.5	11.4	13.8	17.1	19.1	21.5	25.5

Quelle: Infras 2012

Tabelle 6 - Verkehr Nachfrage elektrischer Energie nach Verwendungszwecken [PJ]

Elektrofahrzeuge im Güterverkehr auf der Strasse werden erst ab dem Jahre 2030 zum Einsatz kommen und auch dann nur mit einem sehr kleinen Anteil. Das liegt u.a. daran, dass zuerst Energiespeicher entwickelt werden müssen, die eine genügend hohe Energiedichte aufweisen. Erst dann wird der Einsatz von Elektrofahrzeugen im Güterverkehr auf der Strasse lohnenswert. Jedoch wird eine vermehrte Verlagerung des Güterverkehrs auf die Schiene erwartet, weshalb bis 2030 mit einer Zunahme des Stromverbrauchs von mehr als 40% für den Schienentransport erwartet wird.

Für den Privatverkehr auf der Strasse ist ab 2020 mit einem starken Wachstum des Strombedarfs zu rechnen, der bis im Jahre 2050 zu einem Anteil von 4.1% des gesamten schweizerischen elektrischen Energieverbrauchs anwachsen soll.

3 Anwendungsspezifische Steigerung der Energieeffizienz durch DC

Um das Potential zur Energieeffizienzsteigerung zu untersuchen, welche aufgrund einer DC-Energieverteilung erreicht werden kann, werden in diesem Kapitel die einzelnen Gerätekategorien aus Kapitel 1.2.2 untersucht. Es wird aufgezeigt, ob eine Steigerung der Effizienz erwartet werden kann und in welchem Rahmen diese Steigerung liegt. Es wird auch auf nachteilige Einflüsse eingegangen, welche sich durch die DC-Verteilung ergeben können.

Eine zentrale Komponente der elektrischen Energieverteilung ist die Transformation der Spannung. Das hat gegen Ende des 19. Jahrhunderts auch zum Durchbruch der Wechselstromverteilung geführt. Eine Gleichspannung wird mit einem DC-DC-Konverter auf einen anderen Spannungspegel transformiert.

3.1 DC-DC Konverter

Gleichspannungswandler kommen nahezu bei allen Elektronikschaltungen zum Einsatz, wobei in vielen Fällen bereits ein einfacher ohmscher Spannungsteiler oder ein Längsregler zur Reduktion der Spannung alle Anforderungen erfüllt. Doch gerade bei grossen Strömen weisen diese Techniken erhebliche Verluste auf, getaktete Wandler eignen sich in diesen Fällen viel besser. Der DC-DC-Konverter zerhackt die eingangsseitige Gleichspannung in kurze Pulse, transformiert die so entstandene pulsierende Gleichspannung und glättet sie am Ausgang wieder. Die Schaltungstechnik wird mit Transistoren realisiert. Der grosse Vorteil des Zerhackens besteht darin, dass die Transistoren entweder voll gesperrt oder maximal leitend sind. Obwohl so die niedrigsten Verluste entstehen, können die Schaltverluste – die Verluste die während des Umschaltens vom leitenden in den sperrenden Zustand entstehen – nicht vernachlässigt werden. Mehr dazu in Kapitel 3.1.1. Es sind diese Schaltverluste, welche einen wesentlichen Einfluss auf die Effizienz und die Temperaturentwicklung der Konverter haben. Ein weiterer Vorteil des Zerhackens ist, dass ein Transformator eingesetzt werden kann, um eine galvanisch getrennte Ausgangsspannung zu ermöglichen.

Durch hohe Taktraten beim Zerhacken können kleine Bauformen der Transformatoren verwendet werden. Allerdings steigen durch die höheren Taktfrequenzen die Schaltverluste im DC-DC-Konverter. Für die Effizienzbetrachtung der DC-DC-Konverter müssen somit die Schaltverluste und die Verluste im Eisenkern des Transformators und der Glättungs-drossel betrachtet werden. Im Transformator und der Glättungs-drossel entstehen die Verluste durch die Ummagnetisierung im Eisenkern.

3.1.1 Schaltverluste

Um die Gleichspannung in kurze Pulse zu wandeln, werden Transistoren als Schalter eingesetzt, wobei meist Feldeffekt-Transistoren (FET) verbaut werden. FETs haben gegenüber Bipolar-Transistoren den grossen Vorteil, dass die Ansteuerung des Transistors weitgehend verlustlos ist. Dennoch ist jeder Schaltvorgang des Transistors mit Verlusten behaftet, die vom Schaltstrom als auch von der Spannung abhängig sind. In einer Simulation wurden die Schaltvorgänge eines MOSFETs aufgezeichnet (Abbildung 11), um die Verluste während des Schaltens zu illustrieren. Dazu diente ein Transistor vom Typ IRF541 als Grundlage, dessen Gate-Source- und Drain-Source-Spannung sowie der entsprechende Drain-Strom im Diagramm dargestellt sind. Die Verlustleistung während dem Schaltvorgang steigt kurzzeitig auf bis zu 112.5 Watt an. Je häufiger nun die Schaltvorgang durchgeführt wird (= höhere Taktfrequenz), umso höher wird die Verlustenergie, die in Form von Wärme abgeführt werden muss; und welche die Effizienz des Konverters reduziert. Die Verlustenergie ist zudem von der Schaltzeit des Transistors abhängig, weshalb Transistoren mit möglichst kurzen Schaltzeiten gewählt werden müssen. Die Schaltfrequenz soll so niedrig wie möglich gehalten werden.

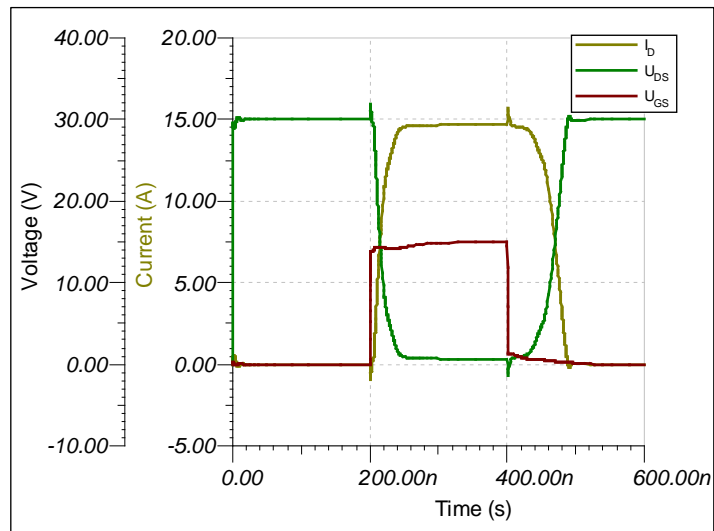
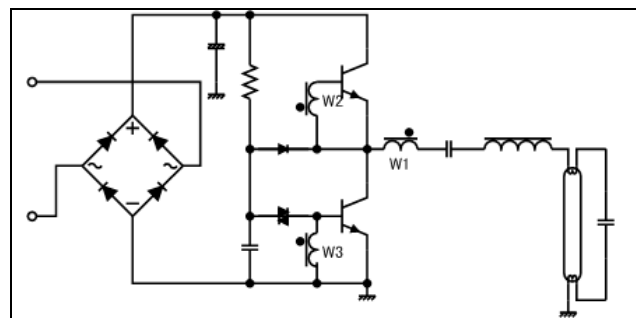


Abbildung 11 - Schaltcharakteristik MOSFET IRF541

3.2 Beleuchtung

Für den Betrieb einer Glühbirne hat die Stromform keinen Einfluss, weder auf die Funktionalität noch auf die Effektivität. Der einzige Nachteil einer AC-Versorgung gegenüber DC ist, dass das Licht der Glühbirne bei zu niedriger Frequenz als Flackern wahrgenommen wird. Auch für Halogen-Leuchten ist der Betrieb mit DC weder ein Vorteil noch ein Nachteil gegenüber einer AC-Versorgung.

Durch die Funktionsweise von Gasentladungslampen – der Ionisierung des Füllgases – müssen diese mit Wechselspannung betrieben werden, da sich sonst die Gas-Ionen auf der einen und die freien Elektronen auf der anderen Seite ansammeln würden. Das führt mit der Zeit zu einer einseitigen Ausleuchtung. Ebenso notwendig ist eine vorgeschaltete Strombegrenzung, da eine Leuchtstofflampe eine fallende Widerstandskennlinie aufweist. Diese Begrenzung wird mit einer Drosselspule realisiert, welche zugleich auch noch die nötige Zündspannung liefert und bei konventionellen Vorschaltgeräten (KVG) auch zu grossen Verluste führt. Bei den neueren, elektronischen Vorschaltgeräten (EVG) wird die Eingangsspannung zuerst gleichgerichtet und anschliessend in eine 35kHz Rechteck-Wechselspannung umgeformt (s. Abbildung 12).



Quelle: Wikipedia

Abbildung 12 - Elektronisches Vorschaltgerät

Da bei EVGs die Eingangsspannung ohnehin gleichgerichtet wird, kann eine mit einem EVG ausgestattete Leuchte ohne weitere Aufwände direkt mit Gleichspannung gespeist werden. Eine Effizienzsteigerung kann nur erreicht werden, wenn der Gleichrichter im EVG weggelassen wird und so die Verluste über den Dioden eingespart werden können. Das bedeutet jedoch eine Modifikation des EVGs. Das Einsparpotential liegt bei unter 1%:

$$\Delta P_{rel} = \frac{U_{Gleichrichter} * I}{U_{Netz} * I} = \frac{U_{Gleichrichter}}{U_{Netz}} = \frac{1.2V}{230V} = 0.52\%$$

(Bei Berücksichtigung eines Brückengleichrichters und einem Spannungsabfall von 0.6V pro Diode)

In letzter Zeit werden vermehrt Leuchten mit LED-Leuchtmitteln eingesetzt. LEDs sind Halbleiter und benötigen deshalb eine Gleichspannung. Um LEDs am AC-Netz zu betreiben ist ein Vorschaltgerät notwendig, welches den Strom begrenzt und regelt. Da das Vorschaltgerät die anliegende Wechselspannung gleichrichtet, kann es grundsätzlich auch mit DC betrieben werden. Dabei ist aber keine Effizienzsteigerung möglich, wenn das Vorschaltgerät nicht modifiziert wird. Eine geringe Steigerung von unter 1% ist möglich, wenn der Gleichrichter entfernt wird.

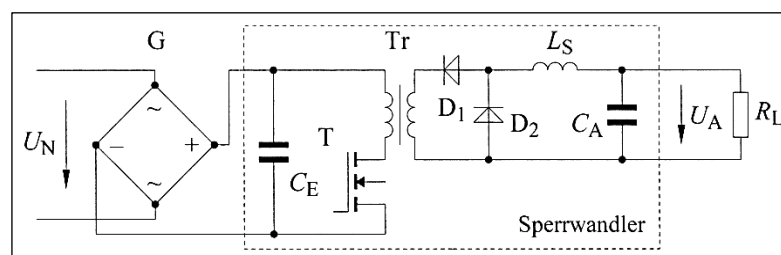
3.3 Elektronikgeräte

Gegenwärtige Geräte der Kategorie I&K, Unterhaltungsmedien sind ausschliesslich mit elektronischen Komponenten ausgestattet, weshalb ein Netzteil mit einem DC-Ausgang unumgänglich ist. Je nach Geräteart werden diese Netzteile entweder im Gehäuse integriert oder aber auch als separates Zubehör mitgeliefert, um das Gerät selbst so kompakt als möglich zu halten.

Sofern die Geräte mit primär getakteten Schaltnetzteilen ausgestattet sind (s. Abbildung 13), können sie direkt mit DC gespeist werden. Eine Steigerung der Energieeffizienz ist so nicht möglich. Wird der eingangsseitige Gleichrichter weggelassen, kann eine Steigerung von weniger als 1% erreicht werden.

Grössere Effizienzsteigerungen lassen sich erreichen, wenn das Gerät direkt mit der zugeführten DC-Spannung arbeiten kann. Dies bedingt dann einen entsprechenden Spannungspegel in der DC-Verteilung. Alle Verluste, die durch die bei AC-Verteilung erforderliche Spannungswandlung entstehen, fallen dann weg. Der Wirkungsgrad von Schaltnetzteilen ist stark von der Qualität des Schaltungsdesigns und der verwendeten Komponenten abhängig. Bei billigen Geräten kann der Wirkungsgrad unter 60% liegen. Der Wegfall dieser Schaltnetzteile kann so zu einer wesentlichen Steigerung der Effizienz von bis zu über 40% führen.

In den meisten Geräten sind jedoch verschiedene Spannungspegel erforderlich, so dass bei einer DC-Verteilung – wie auch bei der AC-Verteilung – im Gerät DC-DC-Konverter notwendig sind. Die oben erwähnte Steigerung der Effizienz reduziert sich somit wieder und ist von der Qualität der Konverter abhängig. Da der Spannungspegel bei einer DC-Verteilung deutlich über der in den Geräten verwendeten Gleichspannungen liegt, sind DC-DC-Konverter in den meisten Fällen vorhanden. Es ist daher zu erwarten, dass insgesamt für Geräte der Kategorie I&K, Unterhaltungsmedien eine Steigerung der Energieeffizienz viel näher bei 1% liegt.



Quelle: Grundkurs Leistungselektronik

Abbildung 13 - Primär getaktetes Netzteil (AC-DC-Wandler)

3.3.1 Externe Netzteile

Externe Netzteile werden eingesetzt, um einerseits die Baugröße der – meist portablen – Geräte gering zu halten, oder andererseits um die Anpassung an die Spannungsversorgung in den verschiedenen Ländern auf das externe Netzteil beschränken zu können. Das Gerät selber kann so weltweit ohne Modifikation eingesetzt werden, es muss nur das passende Netzteil verwendet werden. Weitere Vorteile von externen Netzteilen sind eine geringere EMV-Störung im Gerät und eine bessere Wärmeabfuhr. Mit dem steigenden Interesse an effizienten Geräten veröffentlichte die „ENERGY STAR Agency“ im Jahr 2005 einen Effizienz Kennzeichnungsplan für externe Netzgeräte [13]. Die höchste Effizienzklasse V (fünf) erfordert für Ausgangsleistungen von über 50W einen Wirkungsgrad von mindestens 87%.

Auch bei externen Netzteilen gilt: Könnte durch eine DC-Verteilung auf diese verzichtet werden, würde die Energieeffizienz um bis zu 13% steigen, vorausgesetzt Klasse V Netzteile werden verwendet. Da jedoch für die Geräte kein einheitlicher Spannungspegel definiert ist, ist eine direkte Speisung der Geräte nur in wenigen Fällen möglich. In allen anderen Fällen wird eine externe DC-DC-Konvertierung erforderlich sein. Die Potentiale zur Steigerung der Energieeffizienz liegen im selben Bereich wie bei den internen Netzgeräten: im tiefen einstelligen Prozentbereich.

3.4 Haushaltgeräte

Bei Haushaltgeräten gilt es zwei Energieverbrauchsarten zu unterscheiden: Energie für die eigentliche Arbeit des Geräts (z.B. Wärme, rotierende Bewegung) sowie Energie für die Steuerung und Anzeige der Geräte. Da die Steuerung von Geräten heute fast ausnahmslos elektronisch erfolgt, ist dazu eine Gleichspannung erforderlich. Eine Umstellung auf DC-Verteilung bringt – wie bereits bei den bisher beschriebenen Gerätearten – nur eine minimale Verbesserung der Energieeffizienz im Bereich bis 1% bezogen auf die für die Steuerung erforderliche Energie.

Für die Wärmeerzeugung spielt es bzgl. des Wirkungsgrads keine Rolle, ob mit einer AC- oder DC-Verteilung gearbeitet wird. Wird die Steuerung mit berücksichtigt, ergibt sich nur ein vernachlässigbar kleiner Effizienzgewinn, da die für die Wärmeerzeugung benötigte Energie um Faktoren grösser ist als für die Steuerung. Diese Haushaltgeräte stellen rein ohmsche Verbraucher dar, und können ohne weitere Modifikationen mit Gleichspannung betrieben werden.

Motorbetriebene Haushaltgeräte können oft nicht einfach mit Gleichspannung betrieben werden. Eine Umstellung auf DC-Verteilung erfordert seitens der Hersteller einen erhöhten Aufwand zur Anpassung. Diese Anpassungen bedeuten bei einfachen Haushaltgeräten z.B. den Ersatz eines Spaltnotors durch einen BLDC-Motor (bürstenloser Gleichstrommotor) mit entsprechender Steuerung. Derartige Anpassungen führen zu einer wesentlichen Steigerung des Wirkungsgrads. Während ein Spaltnotor einen Wirkungsgrad von höchstens 30% aufweist, erreichen BLDC-Motoren Wirkungsgrade von über 70%. Für BLDC-Motoren ist jedoch eine elektronische Ansteuerung erforderlich, welche den Wirkungsgrad wieder vermindert. Eine Umstellung auf DC-Verteilung kann bei motorbetriebenen Haushaltgeräten zur Steigerung der Energieeffizienz im Bereich bis etwa 50% beitragen, wobei dies auf die geänderte Technologie zurückzuführen ist und nicht auf die DC-Verteilung.

Bei Haushaltgeräten, die intern bereits mit Gleichspannung arbeiten, bringt eine Umstellung auf DC-Verteilung wiederum nur eine kleine Steigerung der Energieeffizienz, da höchstens der Gleichrichter eingespart werden kann.

Wie von der Firma VZug AG bestätigt wurde, ist bei Haushaltsgeräten mit einer DC-Verteilung keine nennenswerte Effizienzsteigerung möglich. Eine Umstellung auf DC in dieser Gerätegruppe ist möglich, aber kostspielig.

3.5 Gebäudetechnik

Die Gebäudetechnik wird zunehmend wichtiger und wird eingesetzt, um Gebäude möglichst energieeffizient und komfortabel zu betreiben. Ähnlich wie bei den Haushaltgeräten wird ein kleiner Teil der Energie für die Steuerung der Gebäudetechnik verwendet. Der grössere Anteil an Energie wird für die eigentliche Arbeit benötigt, meist für Antriebe. Auch hier gilt bezüglich möglicher Steigerung der Energieeffizienz – wie bei den anderen Gerätekategorien – ein Wert im tiefen einstelligen Prozentbereich.

Die Anforderungen an die Antriebe in der Gebäudetechnik sind laufend verschärft worden, so dass bereits sehr effiziente Anlagen verwendet werden. Die Antriebe werden vielfach über Wechselrichter betrieben, so dass bereits Gleichspannung eingesetzt wird. Eine Umstellung der Energieversorgung auf DC-Verteilung bringt somit wieder nur die durch den Wegfall des Gleichrichters erzielbare Steigerung der Energieeffizienz von unter 1%.

3.6 Elektromobilität

Im Bereich der Elektromobilität sind für die mögliche Steigerung der Effizienz durch eine Umstellung auf die DC-Verteilung nur die Lagegeräte relevant. Akkuladestationen wie sie auf dem Markt erhältlich sind, weisen einen Wirkungsgrad von bis zu 92% auf [13]. Die Unterschiede sind jedoch gross: bei Ladegeräten für E-Bikes liegen die Wirkungsgrade bei gut 70% [14], während bei Ladestationen für Elektroautos deutlich höhere Werte erreicht werden. Da die Ladegeräte intern mit Gleichspannung arbeiten, muss bei der AC-Verteilung die Wechselspannung gleichgerichtet werden. Würden die Ladegeräte mit Gleichspannung gespeist, könnte der Gleichrichter eingespart werden.

Es ist davon auszugehen, dass die erforderliche Ladespannung nicht dem Spannungspegel der DC-Verteilung entspricht. Es ist also auch dann eine DC-DC-Konvertierung notwendig. Der Umstieg auf die DC-Verteilung bringt also wiederum ein Potential zur Steigerung der Energieeffizienz im 1%-Bereich. Lediglich im Falle dass der Spannungspegel der DC-Verteilung zur Ladespannung der Akkus passt, kann auf die DC-DC-Konvertierung verzichtet werden. Die Effizienz würde dann um einige Prozent steigen, je nach Wirkungsgrad der wegfallenden AC-DC-Konvertierung.

3.7 Fazit

Nahezu alle Geräte der untersuchten Kategorien haben Elektronik verbaut. Während im Bereich der Home-Elektronik das Gerät fast ausschliesslich aus Elektronikkomponenten besteht, bilden sie bei anderen Gerätegruppen das Interface zwischen dem Benutzer und den Steuerungen die letztendlich Antriebe oder Heizungen mit Strom versorgen. Ebenso benötigen energieeffiziente Leuchtmittel und Antriebe elektronische Vorschaltgeräte. Diese Geräte benötigen also alle in mehr oder weniger grossem Umfang Gleichspannung.

Die Umstellung der Verteilung der Energie von AC auf DC hat nur einen kleinen Einfluss auf die Steigerung der Energieeffizienz. Sie liegt im Bereich von unter 1% und ist durch den Wegfall des Gleichrichters begründet. Bei Geräten, die bei einer Umstellung auf DC-Verteilung wesentlich modifiziert werden müssen (z.B. Tausch des Motors), kann jedoch eine wesentlich höhere Energieeffizienz erreicht werden. Das Potential zur Steigerung der Energieeffizienz kann dann auch bis zu 50% betragen. Die DC-Verteilung kann so auch zum Treiber werden, energieeffizientere Geräte zu entwickeln und auf den Markt zu bringen.

4 Auswertung gerätespezifische Steigerung der Energieeffizienz in der Zielgruppe

Aus den ermittelten Daten der Gebäudelandschaft der Schweiz, den entsprechenden erwarteten Energieverbrauchswerten bis zum Jahre 2050 sowie aus den Ergebnissen der möglichen Effizienzsteigerung der untersuchten Gerätegruppen, wird in diesem Kapitel das Effizienzsteigerungspotential entsprechend den Verbraucherkategorien beschrieben. Es wird nur das Potential betrachtet, welches durch die Geräte erreicht werden kann, wenn auf DC-Verteilung umgestellt wird.

Wie in Kapitel 3 erläutert, liegt das Potential der Energieeffizienzsteigerung sehr tief. Betrachtet man Geräte und Anlagen welche grundsätzlich mit DC betrieben werden können, liegt die Effizienzsteigerung unter 1%. Wird also nur die Umstellung der Verteilung der Energie betrachtet, ergeben sich für die Gerätearten die Potentiale gemäss Tabelle 8. Das Einsparpotential ist auf den Wegfall des bei DC-Verteilung nicht mehr erforderlichen Gleichrichters zurückzuführen. Bei einigen Geräten (z.B. Reinigungsgeräten) kann es erforderlich sein, einen für DC geeigneten Antrieb zu verbauen. Das führt dann zu einer deutlich höheren Energieeffizienz.

	DC-tauglich	Potential, wenn Gerät auf reinen DC-Betrieb ausgelegt ist.	
Beleuchtung			
Halogenlampen	3)	0%	
Fluoreszenz Lampen (Energiesparlampen)	1)	< 1%	
LED Leuchten	3)	< 1%	
Home Elektronik			
Radio	3)	< 1%	
TV/Hi-Fi	3)	< 1%	
Elektronische Musikinstrumente	3)	< 1%	
Computer	3)	< 1%	
Portable Geräte	3)	< 1%	
Haushaltsgeräte			
Küchengeräte	2)	< 1%	
Waschmaschine / Tumber	1)	20%	effizienterer Antrieb
Reinigungsgeräte	2)	40%	effizienterer Antrieb
Kleinheizungen	3)	0%	nur Prozessenergie
Gebäudetechnik			
HLK	1)	<< 1%	hoher Anteil Prozessenergie
Personentransporte	1)	<< 1%	hoher Anteil Prozessenergie
Gebäudeautomation	1)	<< 1%	hoher Anteil Prozessenergie
Um Potential Energieeffizienz ausnutzen zu können:			
1) muss ersetzt werden (Gleichrichter)			
2) muss teilweise ersetzt werden (je nach verwendetem Antrieb)			
3) ohne Anpassung einsetzbar			

Tabelle 7 - Potential der Steigerung der Energieeffizienz für bereits DC-fähige Geräte

In Tabelle 11 sind die einzelnen Geräte der Verwendung in der Zielgruppe gegenübergestellt. Es zeigt sich, dass im residentiellen Bereich die Energieeffizienz – wegen den dort vorhandenen Haushaltgeräten – prozentual eher gesteigert werden kann, als im Dienstleistungs- und Industriesektor.

	Beleuchtung	Elektronikgeräte	Haushaltgeräte	Gebäudetechnik
Wohngebäude	0% .. < 1%	< 1%	0% .. 40%	<< 1%
Dienstleistung	0% .. < 1%	< 1%	-	<< 1%
Industrie	0% .. < 1%	< 1%	-	<< 1%

Tabelle 8 - Potential der Steigerung der Energieeffizienz für bereits DC-fähige Geräte

Im Fall von Anpassungen oder eines Umbaus der Geräte damit sie an DC betrieben werden können (z.B. Einsatz von BLDC-Motoren statt Spaltnmotoren), kann eine höhere Energieeffizienz erreicht werden. Das betrifft vor allem die Haushaltgeräte, welche mit kostengünstigen Antrieben ausgestattet sind. Geräte und Anlagen aus der Gebäudetechnik werden bereits heute mit effizienten Antrieben ausgestattet. Das Steigerungspotential der Energieeffizienz ist allerdings nicht auf die Art der Verteilung der Energie zurückzuführen, sondern auf die verwendete Technologie im Gerät. Die effizientere Technologie kann also auch bei einer AC-Verteilung gewinnbringend eingesetzt werden.

4.1 Wohngebäude

Mit dem Ziel, den Gesamtenergieverbrauch langfristig zu reduzieren, wird im Bereich des Wohnungsbaus vermehrt auf eine gesteuerte Raumklimatisierung gesetzt (z.B. Minergiestandard). Der Gesamtenergieverbrauch wird durch diese Massnahmen reduziert, wobei sich jedoch der Verbrauch an elektrischer Energie von derzeit 4.5 PJ / 1.25TWh auf 10.5 PJ / 2.9TWh im Jahr 2050 erhöhen wird. Dies ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass vermehrt mit elektrischer Energie betriebene Wärmepumpen für Raumwärme und Warmwasseraufbereitung zum Einsatz kommen. Die Effizienz der Anlagen wird somit steigen, jedoch nicht wegen der DC-Verteilung, sondern aufgrund der eingesetzten Technologie.

Bei Haushaltgeräten kann die Umrüstung auf DC eine wesentliche Effizienzsteigerung bringen, wenn der preiswerte Antrieb ausgetauscht wird. Wird ein Spaltnmotor durch einen BLDC-motor ersetzt, wird das Gerät bis zu 50% effizienter. Die alternative Methode – das Haushaltgerät mit einem Wechselrichter auszurüsten – wirkt nachteilig, da zusätzliche Verluste entstehen.

Gemäss einer Studie von McKinsey & Company [16] wird erwartet, dass bis zum Jahre 2020 über 70% aller neu installierten sowie ersetzten Leuchtmittel LED Leuchten sein werden. In Wohngebäuden wird die Effizienz der Beleuchtung aufgrund des Technologiewechsels erfolgen. Eine weitere Steigerung der Effizienz wäre möglich, wenn die Versorgungsspannung in den Leuchtmitteln den gleichen Spannungspegel wie die DC-Verteilung hätte. Durch die tieferen Spannungen müssen dann jedoch höhere Ströme über die Leitungen transportiert werden, was die Leitungsverluste wiederum erhöht. Die Leitungsverluste müssten durch einen höheren Wirkungsgrad des zentralen AC-DC-Konverters ausgeglichen werden, was allerdings nicht immer möglich ist. Ein Wirkungsgrad von 97% lässt sich heutzutage kaum weiter steigern.

4.1.1 Kostenhochrechnung für das Einsparpotential

Am Beispiel von einem Einfamilienhaus wird gezeigt, mit welchen Umrüstkosten bei einer DC-Verteilung zu rechnen ist. Es wird davon ausgegangen, dass ein Teil der bestehenden Elektroinstallationen in einem Gebäude auch für DC weiter verwendet werden kann (z.B. Verrohrung, Verkabelung). Leiterschuttschalter, Fehlerstromschutzschalter und Steckdosen müssen jedoch ausgewechselt werden. Auch ein Teil der Geräte im Haushalt muss ausgetauscht werden. Beim Einsparpotential wird berücksichtigt, dass der Anteil elektrischer Energie für Gerätesteuerungen 10% ausmacht. Dieser Anteil liesse sich durch die Umstellung auf DC, um max. 1% reduzieren. Ein weitaus grösserer Anteil, 90%, für Prozesse wie Warmwasser, Raumwärme, Kochen und Waschen benötigt. (s. Tabelle 9). (Daten aus [19])

Durchschnittliche Kosten EFH	875'000	[CHF]		
Kosten für Elektroinstallation (5%)	43'750	[CHF]		
Material Elektroinstallation (40%)	17'500	[CHF]		
Davon 50% für Austausch (Steckdosen, LS, ...) und AC/DC-Konverter	8'750	[CHF]		
Austausch Geräte (pauschal)	15'000	[CHF]		
Kosten für Umrüstung pro EFH	23'750	[CHF]		
Kosten für Umrüstung aller EFH			22'410	[Mio CHF]
Energieverbrauch elektrisch aller EFH			6'000	[GWh]
Einsparpotential (Anteil Steuerung 10%)			6	[GWh]
Investitionskosten pro jährlich eingesparte kWh			3'700	[CHF / kWh]

Tabelle 9 – Kostenhochrechnung für Umstieg auf DC-Verteilung im Einfamilienhaus

Als Vergleich seien hier noch die Investitionen berechnet, um die durch eine DC-Verteilung eingesparte Energie alternativ mit Photovoltaik-Anlagen zu produzieren (Daten aus [18]).

Jahresertrag pro kW installierte Leistung	950	[kWh / kW]		
Erforderliche installierte Leistung	6'300	[kW]		
Kosten pro installierte Leistung (30kW Anlagen angebaut)	6'000	[CHF / kW]		
Gesamtinvestitionen	37.80	[Mio CHF]		
Investitionskosten pro jährlich solar produzierte kWh			6	[CHF / kWh]

Tabelle 10 – Kostenhochrechnung für Umstieg auf DC-Verteilung im Einfamilienhaus

Deutlich wird, dass es wesentlich weniger Investitionen erfordert, eine kWh mit Photovoltaikanlagen zu erzeugen, als diese mit einer Umstellung auf DC-Verteilung einzusparen.

4.2 Dienstleistung

Geräte der Gruppen „Antriebe, Prozesse“, „Klima, Lüftung & Haustechnik“ und „Beleuchtung“ werden in der Dienstleistung heute beinahe 80% der elektrischen Energie verbraucht, bis 2050 werden es 85% sein. Aus der Analyse in Kapitel 3 geht hervor, dass in den zwei Hauptgruppen „Antriebe, Prozesse“ sowie der Gebäudetechnik aufgrund des hohen Anteils an bereits effizienten Antrieben die Energieeffizienz kaum gesteigert werden kann. Die DC-Verteilung führt auch hier nur zu einer marginalen Steigerung der Energieeffizienz. Der grösste Gewinn an Effizienz ist der verwendeten Technologie zuzuschreiben.

In Dienstleistungsbetrieben ist mit längeren Leitungslängen für die Energieverteilung zu rechnen als in Wohngebäuden. Die Leitungsverluste müssen somit auch hier besonders berücksichtigt werden. Vor allem wenn tiefe Spannungspegel verwendet werden sollen, muss die Leitungslänge begrenzt werden, damit die Leitungsverluste nicht höher ausfallen als die Effizienzgewinne.

Für die Beleuchtung im Bereich der Dienstleistung wird ein relativ grosser Anteil des Stromverbrauchs aufgewendet. Das wesentliche Effizienzsteigerungspotential liegt nicht in der Umstellung auf DC-Verteilung, sondern im Umstieg auf LED-Leuchten. Eine Umstellung hin zu LED Leuchten zeichnet sich in diesem Bereich bereits ab.

4.3 Industrie

In der Industrie wird mit einem auch in Zukunft gleichbleibenden Energieverbrauch von über 90PJ / 25TWh gerechnet. Davon werden über 90% für „Prozesswärme“, „Antriebe & Prozesse“ und „Raumwärme“ verwendet. Für diese Bereiche spielt die Art der Energieverteilung keine Rolle. Für die Bereiche „I&K, Unterhaltungsmedien“ sowie „Beleuchtung“, für welche weniger als 5% der elektrischen Energie verwendet werden, kann eine minimale Effizienzsteigerung durch die Umstellung auf DC-Verteilung erreicht werden.

5 Ausblick

Wird die Energieverteilung auf DC umgestellt, zeigt sich eine ernüchternde Bilanz was die möglichen Potentiale zur Steigerung der Energieeffizienz anbelangt. Unabhängig von Gerätegruppe und Gebäudeart ergibt sich ein Potential von weniger als 1% für die Endgeräte. Wird das Gesamtsystem betrachtet, müssen die Leitungsverluste berücksichtigt werden. Hier weist die DC-Verteilung einen Vorteil auf, da über das bestehende Leitungsnetz eine um den Faktor $\sqrt{2}$ höherer Spannungspegel verwendet werden kann, ohne die Isolationsfestigkeit zu erhöhen. Demzufolge sinken die Ströme um denselben Faktor. Zusätzlich fallen die Blindleistungen der AC-Verteilung weg. Diese Vorteile waren ausschlaggebend, um in der Hochspannungsübertragung auf DC zu wechseln. Diese Vorteile könnten auch zu einer effizienteren Nutzung der elektrischen Energie in Gebäuden beitragen.

Die Umstellung auf DC-Verteilung wird jedoch weniger durch die mögliche Steigerung der Effizienz gefördert, sondern viel mehr durch die laufend wachsende Erzeugung von Gleichstrom in dezentralen Produktionsanlagen. Gerade die Anlagen für neue erneuerbare Energien (NEE), z.B. Photovoltaik- oder Windkraftanlagen, erzeugen Gleichstrom, welcher zuerst in Wechselstrom umgewandelt werden muss – dies mit den damit verbundenen Verlusten des Wechselrichters. Die Nachfrage nach neuen erneuerbaren Energien ist auch im Steigen begriffen.

Wegen der geringen Grösse, in welchen solche „Kleinstkraftwerke“ bereits realisiert werden können, eignen sich diese sehr gut für eine dezentrale Stromproduktion. Allerdings ist es aufgrund der grossen Schwankungen dieser Stromproduktion unentbehrlich, sich auf eine Grundversorgung abstützen zu können. Ebenso muss die Möglichkeit gegeben sein, die kurzzeitig überschüssige Energie irgendwie zu speichern. Das zwingende Zusammenspiel von Energieerzeugung, -verbrauch und -speicherung kann die Entwicklung von Microgrids, die auf einem DC-Verteilssystem beruhen, begünstigen.

	2010	2020	2035	2050
Biomasse-WKK	14-20	12-17	8-12	8-12
Geothermie	-	7-12	6-13	5-15
Wind	14-20	12-17	10-15	8-12
Photovoltaik	35-55	20-30	10-15	6-10
Elektrochemische Speicherung ¹⁾	40-70	16-28	8-14	5-8

1) Werte bis 2020 aus der Literatur; danach Lernkurven geschätzt.

Quelle: ETH Zürich

Tabelle 11 - Geschätzte Entwicklung der Gestehungskosten für Strom aus neuen erneuerbaren Energien (ohne Netz), sowie für Strom für elektrochemische Speicherung (Batterien) in Rp/KWh

Die Verbreitung von NEE sind die Kosten, die pro Energieeinheit bezahlt werden müssen, ein entscheidender Faktor. Gemäss Schätzungen der ETH Zürich [7] werden sich die Gestehungskosten für Strom aus erneuerbaren Energiequellen in Zukunft stark reduzieren (Tabelle 11).

Die Verbreitung von Microgrids wird von den verfügbaren Speichern für elektrische Energie abhängen. Die Energiedichte von Bleiakkus – diese machen heute noch zwei Drittel aller grossen Akkumulatoren aus – beträgt 30 Wh / kg, an Lithium-Luft-Akkus mit einer Energiedichte von 2000 Wh / kg wird gearbeitet [16]. Die Weiterentwicklung der Akkumulatorentechnik wird derzeit vor allem durch militärische Anwendungen und die Elektromobilität getrieben.

Getrieben durch die Einsparungen der Leitungsverluste im Vergleich zur AC-Übertragung, werden im Bereich der Hochspannungstechnik die Entwicklung sowie auch die Umstellung auf DC-Netze weiter voranschreiten. Die Verbreitung dieser Technologie ist stark von den Erfolgen der Leistungshalbleitertechnik abhängig, die massgeblich die Effizienz von DC-Übertragungen beeinflussen. Um auch im Mittel- und Niederspannungsbereich auf eine DC-Verteilung wechseln zu können, sind die grössten Herausforderungen in der Halbleitertechnologie zu lösen: Die Aufgaben sind Schalten von DC und die Reduktion der Schaltverluste.

Mit der Umstellung auf eine DC-Verteilung in Gebäuden müssen auch wirtschaftliche Kriterien berücksichtigt werden. Eine besondere Herausforderung stellen die unterschiedlichen Zeitachsen: Geräte haben einen Lebenszyklus von bis zu 20 Jahren, während Immobilien 30 – 100 Jahre alt werden, Renovationen inklusive. Diese ausgedehnten Zeitspannen erfordern nicht nur von den Geräteherstellern grosse Flexibilität, sondern auch bei den Elektroinstallationen. Lösungen müssen über mehrere Jahrzehnte für AC und DC bereitgestellt werden, bis eine vollständige Umstellung auf DC erfolgt ist. Ein Lösungsansatz könnte eine partielle DC-Verteilung für einzelne Gerätekategorien – z.B. Beleuchtung – sein. Konzepte wie USB und Power over Ethernet (PoE) kommen dem schon recht nahe.

Für die Weiterentwicklung der DC-Verteilung im Gebäude müsste in einer weiteren Studie erfasst werden, inwiefern eine DC-DC Wandlung von einer Primärspannung mit hohem Spannungspegel (z.B. 325VDC) sich in die Endgeräte integrieren lässt. Ebenso müsste durch die hohe Spannung und der in *Kapitel 1.2* erwähnten Problematiken beim Schalten von DC, für eine erste Umsetzung gemeinsam mit der IEC ein geeignetes Stecker System erarbeitet werden. Denn wie aus dieser Studie entnommen werden kann, sollte wenn möglich von einer niedrigen Verteilspannung abgesehen werden.

6 Literaturverzeichnis

- [1] D. Nilsson und A. Sannino, «Efficiency analysis of low- and medium- voltage dc distribution systems».
- [2] ABB Schweiz AG, «Massgeschneiderte Sicherheit für Photovoltaik-Anlagen,» ABB Schweiz AG, 2011.
- [3] ABB, *System pro M compact - F200 PV B type for smooth DC earth current for photovoltaic applications*, ABB.
- [4] K. Dostert, Powerline Kommunikation, Poing: Franzis Verlag GmbH, 2000.
- [5] EMerge Alliance, «About EMerge Alliance,» 2013. [Online]. Available: <http://www.emergealliance.org/About/OurMission.aspx>. [Zugriff am 12 January 2013].
- [6] A. Kirchner, «Die Energieperspektiven für die Schweiz bis 2050,» Bundesamt für Energie, Basel, 2012.
- [7] Bundesamt für Energie BFE, «Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2011,» Bundesamt für Energie BFE, Bern, 2012.
- [8] Boulouchos, Konstantinos; Andersson, Göran; Bretschger, Lucas, «Energiezukunft Schweiz,» ETH Zürich, Zürich, 2011.
- [9] Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen VSE, «Wege in die neue Stromzukunft,» Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen VSE, Aarau, 2012.
- [10] Prognos AG, «Der Energieverbrauch der Privaten Haushalte 2000 - 2011,» Bundesamt für Energie BFE, Basel, 2012.
- [11] C. Calwell und T. Reeder, «Power Supplies: A Hidden Opportunity for Energy Savings,» NRDC - Natural Resources Defense Council, San Francisco, CA, 2002.
- [12] J. Specovius, Grundkurs der Leistungselektronik, Vieweg + Teubner , 2008.
- [13] ENERGY STAR, «International Efficiency Marking Protocol for External Power Supplies,» ENERGY STAR, 2008.
- [14] ABB, *Electric Vehicle Charging Infrastructure - Terra 51 Charge Station*, ABB EV Charging Infrastructure, 2011.
- [15] TCS Mobilitätsberatung, «Schnelle E-Bikes auf dem TCS-Prüfstand,» TCS Mobilitätsberatung, Emmen, 2012.
- [16] McKinsey & Company, «Lighting the Way: Perspectives on the global lighting market,» McKinsey & Company, 2011.
- [17] M. Läubli, «Wettstreit um die Superbatterie,» *Tages Anzeiger*, 2012.
- [18] S. Novak et al, «Photovoltaik (PV) Anlagekosten 2012 in der Schweiz,» Bundesamt für Energie BFE, Bern, 2012.
- [19] Wüest & Partner, «Immobilienmarkt Schweiz 2013,» Wüest & Partner, Zürich, 2013.

7 Anhang

- Auszug aus „Die Energieperspektiven für die Schweiz bis 2050“
Szenario „Weiter wie bisher“ Zusammenfassung Kenndaten und Ergebnisse
- Erhebung Gebäudelandschaft der Schweiz 2011

7.1 Szenario „Weiter wie bisher“ Zusammenfassung Kenndaten und Ergebnisse

Rahmendaten	Einheit	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Bevölkerung	Mio.	7.2	7.5	7.9	8.2	8.4	8.6	8.8	8.9	9.0	9.0	9.0
BIP real in Preisen von 2010	Mrd. CHF	464.2	495.4	546.6	584.2	617.9	645.6	670.5	700.0	734.4	768.6	800.7
Energiebezugsflächen total	Mio. m ²	623.5	659.2	708.8	753.9	798.5	835.6	863.2	885.7	905.3	922.0	937.5
Wohnflächen (EBF), inkl. ZW + FW	Mio. m ²	416.5	448.1	486.7	523.0	560.5	592.0	614.4	631.4	645.0	655.9	665.8
Fahrleistung Personenverkehr gesamt	Mrd. Pkm	100.1	106.0	114.2	122.9	131.1	137.3	141.1	146.0	148.8	150.2	151.3
Güterverkehrsleistung Gesamtverkehr	Mrd. tkm	23.6	26.0	26.9	30.4	34.2	37.0	39.1	40.3	40.9	41.6	42.3
Preise WWB Haushalte (real 2010)												
Heizöl extra leicht	Rp./l	55.4	73.3	85.4	102.3	110.0	116.8	122.6	126.9	129.5	132.5	134.4
Erdgas	Rp./kWh	6.5	7.5	9.1	11.0	11.8	12.6	13.3	13.9	14.3	14.7	14.9
Holz	CHF/Ster	45.4	47.2	52.8	79.1	91.3	102.5	112.5	119.6	124.4	128.0	130.0
Elektrizität	Rp./kWh	23.0	21.8	23.6	25.2	25.7	26.5	27.8	29.3	28.7	28.9	28.8
Fernwärme	CHF/GJ	16.7	19.4	21.6	26.1	28.1	30.1	31.9	33.1	34.0	34.8	35.3
Preise WWB Verkehr (real 2010)												
Benzin 95, nicht-gew. Verkehr, mit MwSt.	CHF/l	1.53	1.60	1.64	1.77	1.84	1.89	1.94	1.98	2.00	2.02	2.04
Benzin 98, nicht-gew. Verkehr, mit MwSt.	CHF/l	1.58	1.64	1.69	1.81	1.88	1.94	1.98	2.02	2.04	2.07	2.09
Diesel, nicht-gew. Verkehr, mit MwSt.	CHF/l	1.57	1.71	1.72	1.90	1.97	2.04	2.09	2.13	2.15	2.18	2.19
Endenergienachfrage nach Sektoren												
Private Haushalte	PJ	239.9	265.9	271.5	250.0	240.6	230.2	219.4	208.5	198.9	190.4	182.5
Dienstleistungen	PJ	137.0	148.7	148.7	145.7	147.7	147.9	148.5	149.5	151.0	153.2	156.1
Industrie	PJ	161.2	169.7	171.1	171.2	170.0	164.4	158.5	153.6	149.9	146.3	142.8
Verkehr (ohne int. Flugverkehr)	PJ	239.1	240.7	249.4	241.0	229.5	216.8	203.9	194.3	187.8	181.7	176.8
Summe Endenergienachfrage	PJ	777.2	825.0	840.8	807.9	787.8	759.3	730.3	706.0	687.7	671.6	658.2
statistische Differenz inkl. Landwirtschaft	PJ	14.2	14.6	12.9	12.6	12.3	11.9	11.4	11.0	10.8	10.5	10.3
Summe inkl. stat. Differenz	PJ	791.4	839.6	853.6	820.5	800.1	771.2	741.7	717.0	698.4	682.2	668.5
Elektrizitätsnachfrage nach Sektoren												
Private Haushalte	PJ	56.6	63.5	67.0	65.1	64.6	64.3	64.0	63.8	63.7	63.9	64.1
Dienstleistungen	PJ	53.9	60.5	63.8	67.3	71.4	73.9	76.7	79.9	83.4	87.5	92.1
Industrie	PJ	65.1	68.0	69.4	70.8	71.5	70.8	70.0	69.3	69.1	68.9	68.6
Verkehr	PJ	9.5	10.7	11.4	12.4	13.8	15.2	17.1	19.0	21.1	22.6	23.7
Summe Elektrizitätsnachfrage	PJ	185.1	202.7	211.5	215.6	221.3	224.3	227.8	232.0	237.3	242.9	248.5
statistische Differenz inkl. Landwirtschaft	PJ	3.6	3.7	3.6	3.7	3.8	3.8	3.9	4.0	4.0	4.1	4.2
Summe Elektrizitätsnachfrage	PJ	188.6	206.4	215.2	219.3	225.1	228.1	231.6	235.9	241.4	247.1	252.8
Elektrizität für Fernwärmeerzeugung	PJ	0.02	0.02	0.05	0.08	0.11	0.17	0.17	0.20	0.20	0.20	0.20
Verbrauch der Speicherpumpen	PJ	7.98	7.98	9.20	15.62	27.16	27.16	27.16	27.16	27.16	27.16	27.16
nachr.: Landesverbrauch ¹⁾	PJ	210.1	228.8	238.2	250.9	268.4	271.5	275.0	279.4	284.9	290.8	296.6
Umwandlungssektor												
Fernwärme Input	PJ	7.4	8.7	8.9	8.6	8.8	9.2	9.3	9.6	9.8	9.8	9.9
sonstige	PJ	12.8	16.8	16.3	15.5	14.9	14.2	13.4	12.8	12.4	12.0	11.7
Elektrizitätserzeugung, Variante C	PJ	450.8	416.9	460.8	462.2	459.6	423.4	384.7	380.1	383.6	391.0	394.8
Elektrizitätserzeugung, Variante C&E	PJ	450.8	416.9	460.8	467.5	468.4	439.2	394.9	382.1	378.1	377.4	384.8
Total Energieverbrauch												
Variante C	PJ	1'050.0	1'045.7	1'093.0	1'055.6	1'025.5	957.0	885.2	852.1	832.1	818.0	803.1
Variante C&E	PJ	1'050.0	1'045.7	1'093.0	1'060.9	1'034.3	972.8	895.4	854.0	826.6	804.5	793.1
davon fossile Energieträger												
Variante C	PJ	572.4	595.6	589.0	548.2	532.0	517.2	515.2	563.6	536.2	517.9	496.8
Variante C&E	PJ	572.4	595.6	589.0	548.2	526.2	506.7	488.6	520.1	473.7	435.4	409.4
davon Kernbrennstoffe												
Variante C	PJ	261.9	233.0	266.1	260.1	228.6	166.6	90.6	0.0	0.0	0.0	0.0
Variante C&E	PJ	261.9	233.0	266.1	260.1	228.6	166.6	90.6	0.0	0.0	0.0	0.0

¹⁾ Landesverbrauch zzgl. Fernwärmeerzeugung und Pumpstrom

Quelle: Prognos 2012

Anhang - Tabelle 1 - Szenario "Weiter wie bisher" Zusammenfassung Kenndaten und Ergebnisse

7.2 Erhebung Gebäudelandschaft der Schweiz 2011

Allgemeine Übersicht "Gebäude" 2011										CH
	Gebäude mit Wohnnutzung									
	Total	Bauperiode				Mit ... Wohnung(en)				
		vor 1946	1946-1980	1981-2000	2001-2011	1	2	3-5	6-9	10+
Total	1'656'864	536'491	559'701	378'733	181'939	1'088'128	205'763	161'368	121'889	71'605
Reine Wohngebäude	1'379'925	375'775	490'222	340'127	173'801	953'813	151'251	118'626	102'296	53'939
Einfamilienhäuser	953'813	236'371	329'538	257'065	130'839	953'813				
Mehrfamilienhäuser	426'112	139'404	160'684	83'062	42'962		151'251	118'626	102'296	53'939
Wohngebäude mit Nebennutzung	196'336	120'415	44'926	26'036	4'959	87'082	42'168	33'911	16'999	16'176
Gebäude mit teilweiser Wohnnutzung	80'603	40'301	24'553	12'570	3'179	47'233	12'344	8'831	2'594	1'490
Bauperiode										
vor 1919 erbaut	333'166	333'166				189'711	68'607	56'562	10'792	4'954
1919-1945 erbaut	203'325	203'325				128'940	30'985	28'248	9'177	4'922
1946-1960 erbaut	190'965		190'965			121'933	23'627	16'008	19'550	9'080
1961-1970 erbaut	173'398		173'398			104'866	21'281	12'198	19'056	15'107
1971-1980 erbaut	195'338		195'338			134'079	20'468	11'103	15'565	13'281
1981-1990 erbaut	201'628			201'628		146'159	17'767	12'826	16'001	8'188
1991-2000 erbaut	177'105			177'105		128'246	13'383	12'220	15'356	7'328
2001-2005 erbaut	80'750				80'750	63'317	3'880	4'548	6'201	2'601
2006-2011 erbaut	101'189				101'189	70'877	5'765	7'655	10'191	6'144
Geschosszahl										
1	118'852	27'311	63'893	18'432	9'216	112'723	3'652	617	99	56
2	772'028	226'867	280'406	168'332	96'423	649'327	100'508	18'209	2'227	442
3	506'866	188'522	126'176	141'451	50'717	289'556	87'264	80'831	42'239	5'040
4-5	211'188	77'020	68'286	43'825	22'057	34'106	13'192	56'218	69'133	36'360
6-7	36'836	14'729	14'131	5'118	2'858	1'850	889	5'075	7'492	20'816
8+	11'094	2'042	6'809	1'575	668	566	258	418	699	8'891
Mit Warmwasserversorgung	1'650'601	532'348	558'279	378'140	181'834	1'082'461	205'591	161'298	121'770	71'573
Mit Heizung	1'654'330	534'940	558'981	378'554	181'855	1'085'952	205'698	161'337	121'817	71'579
Einzelofenheizung	145'129	97'915	33'287	12'510	1'417	119'377	16'697	7'240	1'130	342
Heizöl	22'700	12'730	7'384	2'466	120	17'337	2'860	1'930	407	123
Kohle	312	230	81	1	0	235	25	34	10	7
Gas	5'328	2'666	1'068	1'476	118	3'995	428	658	171	63
Elektrizität	28'127	15'147	9'895	2'927	158	21'915	3'994	1'849	238	48
Holz	85'370	65'679	14'419	4'546	726	73'370	9'189	2'443	153	27
Andere Energieträger	3'292	1'463	440	1'094	295	2'525	201	326	151	74
Etagenheizung	32'404	19'754	7'196	4'766	688	6'594	13'750	9'431	1'781	693
Heizöl	8'106	5'019	2'289	693	105	2'195	3'183	2'065	380	224

Kohle	96	87	7	2	0	19	30	35	6	5
Gas	4'325	2'962	416	714	233	570	1'252	1'800	489	179
Elektrizität	13'218	6'848	3'586	2'687	97	1'465	6'243	4'419	800	247
Holz	5'901	4'606	827	420	48	2'166	2'734	938	40	10
Andere Energieträger	758	232	71	250	205	179	308	174	66	28
Zentralheizung für das Gebäude	1'290'522	382'712	452'622	302'192	152'996	869'646	161'663	123'196	81'848	48'648
Heizöl	710'524	214'253	335'182	134'603	26'486	447'944	96'243	76'934	53'421	32'457
Kohle	1'602	1'076	418	51	57	1'120	115	140	157	55
Gas	212'453	74'976	36'931	59'950	40'596	135'416	17'362	26'352	19'560	12'365
Elektrizität	121'480	27'736	45'486	43'708	4'550	102'821	11'615	5'093	1'333	487
Holz	96'381	52'729	19'717	17'009	6'926	64'346	24'015	6'716	793	337
Wärmepumpe	139'424	10'878	12'164	43'917	72'465	114'231	11'705	7'132	4'527	1'583
Sonnenkollektor	2'017	387	499	591	540	1'561	271	112	46	22
Andere Energieträger	6'641	677	2'225	2'363	1'376	2'207	337	717	2'011	1'342
Zentralheizung für mehrere Gebäude	147'175	24'785	55'772	51'198	15'420	69'882	10'453	16'711	31'882	16'887
Heizöl	94'375	14'190	45'039	31'581	3'565	45'161	5'995	10'267	21'330	10'835
Kohle	26	7	4	2	13	14	0	6	3	2
Gas	29'137	5'501	7'775	11'100	4'761	10'003	1'565	4'116	8'211	4'883
Elektrizität	2'147	415	617	1'004	111	1'365	291	210	176	96
Holz	10'456	4'030	1'518	2'699	2'209	6'041	2'005	1'106	742	435
Wärmepumpe	10'506	590	661	4'606	4'649	7'075	564	950	1'301	556
Sonnenkollektor	95	16	30	37	12	45	12	19	9	8
Andere Energieträger	433	36	128	169	100	178	21	37	110	72
Öffentliche Fernwärmeversorgung	29'214	7'753	8'453	6'637	6'371	13'076	1'975	4'024	4'806	4'826
Fernwärme	29'214	7'753	8'453	6'637	6'371	13'076	1'975	4'024	4'806	4'826
Andere Heizungsart	9'886	2'021	1'651	1'251	4'963	7'377	1'160	735	370	183
Keine Heizung	2'534	1'551	720	179	84	2'176	65	31	72	26
<p>Bundesamt für Statistik, GWS Auskunft: in- fo.gewo@bfs.admin.ch © BFS - Statistisches Lexikon der Schweiz</p>										
Quelle: www.bfs.admin.ch										
Anhang - Tabelle 2 - Erhebung Gebäudelandschaft der Schweiz 2011										