

Fachhochschulstudiengänge Burgenland GmbH
Steinamangerstraße 21
A-7423 Pinkafeld

Theoretische Betrachtungen des elektrischen Lastverhaltens und DSM-Potentials von Bürogebäuden

**Diplomarbeit
zur Erlangung des akademischen Grades
Diplom-Ingenieur
für technisch-wissenschaftliche Berufe**

Betreuer: DI (FH) DI Georg Geissegger
Eingereicht von: BSc. Markus Puchegger
Personenkennzeichen: 0910400004
Datum: 1. Oktober 2011

VORWORT

Diese Arbeit entstand in enger Kooperation mit dem Forschungsprojekt „build2zero“, das sich zum Ziel gesetzt hat, den Energiebedarf von Gebäuden im Planungsstadium abzuschätzen und zu senken. Mein Dank gilt allen, die mir eine Mitarbeit im Zuge des Projekts ermöglicht haben.

Bedanken möchte ich mich auch bei Herrn DI Franz Inschlag für die Durchführung der Gebäudesimulationen zur Ermittlung der thermischen Lasten. Ein großer Dank gilt natürlich auch meinem Betreuer, DI (FH) DI Georg Geissegger, der immer ein offenes Ohr für meine Anliegen hatte und mir mit Rat und Tat zur Seite stand.

Zurückblickend auf die letzten fünf Jahre, die ich im Zuge meines Studiums an der FH Burgenland verbracht habe, möchte ich allen Vortragenden, aber auch StudienkollegInnen für eine schöne, lehrreiche Zeit ein herzliches Danke sagen. Es war eine schöne, aber auch intensive Zeit mit euch.

Gleichzeitig möchte ich mich ganz besonders bei meiner Familie und meinen Freunden bedanken, die stets Verständnis dafür hatten, dass meine Zeit knapp bemessen ist und mich stets in meinem Bestreben unterstützt haben.

Markus Puchegger, Steinbach, 25.09.2011

KURZFASSUNG

Diese Arbeit beschäftigt sich mit dem theoretischen elektrischen Lastverhalten von Bürogebäuden. Da durch den vermehrten Einsatz von fluktuierend erzeugenden, erneuerbaren Energieerzeugungsanlagen die Stromerzeugung nicht mehr einfach dem Bedarf folgen kann, sind variable, zeitkritische Stromtarife zu erwarten.

Die Betrachtung der einzelnen Verbraucher erfolgt dabei mithilfe von Zusammenhängen aus der Literatur. Zudem wurden die Börsenstrompreise des Jahres 2008 sowie die Wetterdaten aus einem Gebäudesimulationstool verwendet. Das Nutzerverhalten wurde auf Basis von Literaturdaten und einer Wahrscheinlichkeitsmatrix simuliert.

Die einzelnen Verbraucher wurden in drei Kategorien eingeteilt. Die Geräte der Infrastruktur sind weitgehend unabhängig von äußeren Einflüssen. Hier ist hauptsächlich das Nutzerverhalten ausschlaggebend. Bei der Beleuchtung spielt das Wetter durch die Tageslichtversorgung bereits eine bedeutende Rolle, während die äußeren Einflüsse bei der Peripherie (Heizen, Kühlen, Klimatisieren) die Hauptrolle spielen.

Durch die Nutzung am Tag, wenn die Strompreise im Allgemeinen höher sind als nachts, beziehen Bürogebäude hauptsächlich zu Zeiten hoher Stromtarife ihre elektrische Leistung. Dies gilt unabhängig von der Gebäudeausstattung und vom Gebäudetyp. Durch die Identifikation und Ausnutzung von Lastverschiebungspotentialen, kann hier jedoch abhängig von der Zusammensetzung der elektrischen Verbraucher ein nennenswerter Prozentsatz des Verbrauchs in Zeiten niedriger Tarife verschoben werden.

Die Ausnutzung von Speichern trägt ebenfalls dazu bei, Lastverschiebungspotential zu schaffen. Dabei können verschiedene Arten von Speichern genutzt werden. Elektrochemische Speicher können in Zeiten niedriger Strompreise beladen und deren gespeicherte Energie bei hohen Preisen genutzt werden. Bei Heiz- oder Kühlsystemen, die stark von elektrischen Geräten abhängen, können zudem thermische Speicher zu einer elektrischen Lastverschiebung beitragen. Dabei kann entweder das Gebäude selbst oder eine separate Einrichtung als thermischer Speicher genutzt werden.

ABSTRACT

The topic of this paper is the electric load behaviour of office buildings. Due to the rising usage of fluctuating renewable energy generating facilities, in the future electricity production will not be able to follow the demand anymore. Therefore time critical, variable charges are likely to be introduced.

The reflection of the individual consumers is made with help of correlation of literature. In addition, electricity exchange prices of the year 2008 and weather data from a building simulation tool are used. User behaviour was simulated randomly.

Three categories were built for the individual applications. Consumers of the category infrastructure are largely independent from external factors. Most crucial is the user himself. For lighting the weather has also an important role, whereas it is the most important factor for periphery (heating, cooling, air-conditioning).

Because of the using during the day, when exchange prices are higher than during nights, office buildings mainly demand electrical energy during high prices. This fact is valid unattached from the building equipment and the type of the building. By identification and utilization of demand side management potential, considerable parts of the demand can be shifted to hours with low prices.

Another possibility to shift loads is to use storage. There are different types of them. Electrochemical storage systems can be load up during low prices and the stored energy can be used during high prices. When using heating or cooling systems, which are highly dependent of electrical applications, thermal storages can also be useful for electrical load shifting. In this course, either the building itself or a separate storage facility can be used.

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite	
1	EINLEITUNG	1
1.1	Problemstellung	1
1.2	Zielsetzung	3
2	VERBRAUCHER	4
2.1	Infrastruktur	4
2.1.1	PC	4
2.1.2	Monitor	8
2.1.3	Notebook	12
2.1.4	Thin Client	13
2.1.5	Bildgebende Geräte	16
2.1.6	Server	23
2.1.7	Beamer	26
2.1.8	Aufzug	27
2.1.9	Mikrowellenherd	30
2.1.10	Elektroherd	31
2.1.11	Kaffeemaschine	33
2.1.12	Kühlschrank	34
2.1.13	Geschirrspüler	36
2.1.14	Wasserkocher	37
2.1.15	Telefon	38
2.1.16	Sonstige Geräte Büroangestellte	38
2.2	Beleuchtung	39
2.3	Peripherie	45
2.3.1	Allgemeines	45
2.3.2	Ventilatoren	46
2.3.3	Pumpen	52
2.3.4	Elektrische Widerstandsheizungen	59
2.3.5	Wärmepumpe	60
2.3.6	Kühlung	68
2.3.7	Be- / Entfeuchtung	72
2.3.8	Warmwasser	73
2.3.9	Sonstige Hilfsenergie	76
2.4	Übersicht der getroffenen Annahmen Lastverhalten	79

2.5	Potential Lastmanagement	82
2.5.1	Infrastruktur	85
2.5.2	Beleuchtung	95
2.5.3	Peripherie	98
2.5.4	Energiespeicher	102
2.6	Erzeugungsanlagen	105
3	UNTERSUCHUNG LASTGÄNGE	112
3.1	Standardgebäude	112
3.2	Modellierung der Lastgänge	119
3.2.1	Variante A	119
3.2.2	Variante B	129
3.2.3	Variante C	138
3.3	Potential Lastmanagement	143
3.3.1	Variante A	143
3.3.2	Variante B	148
3.3.3	Variante C	154
3.4	Sonstige Systemkomponenten	157
3.4.1	Erzeugungsanlagen	157
3.4.2	Speicher	160
4	SCHLUSSFOLGERUNG	165
5	ZUSAMMENFASSUNG	166
6	LITERATUR	167
	ANHANG	173
A.1	Tageslichtquotienten freie Aufstellung	173
A.2	Tageslichtquotienten verbaute Aufstellung	174
A.3	Übersicht untersuchte Varianten	175
A.4	Aufbau der Dateien zur Lastgangoptimierung	178

1 EINLEITUNG

1.1 Problemstellung

Da sich elektrische Energie nicht ohne Umwandlung (in z.B. chemische oder potentielle Energie) speichern lässt, muss stets ein Gleichgewicht zwischen der von den Kraftwerken gelieferten und der von den Verbrauchern benötigten Leistung vorhanden sein. Dies wird derzeit durch die Anpassung der Erzeugungsleistung an den momentanen Verbrauch gewährleistet. Dabei gilt es stets, temporär unterschiedliche Lasten abzudecken. Abbildung 1.1 zeigt den Verbrauch im öffentlichen Stromnetz Österreichs für Mittwoch, 19. Jänner 2011 (e-control, 2011).

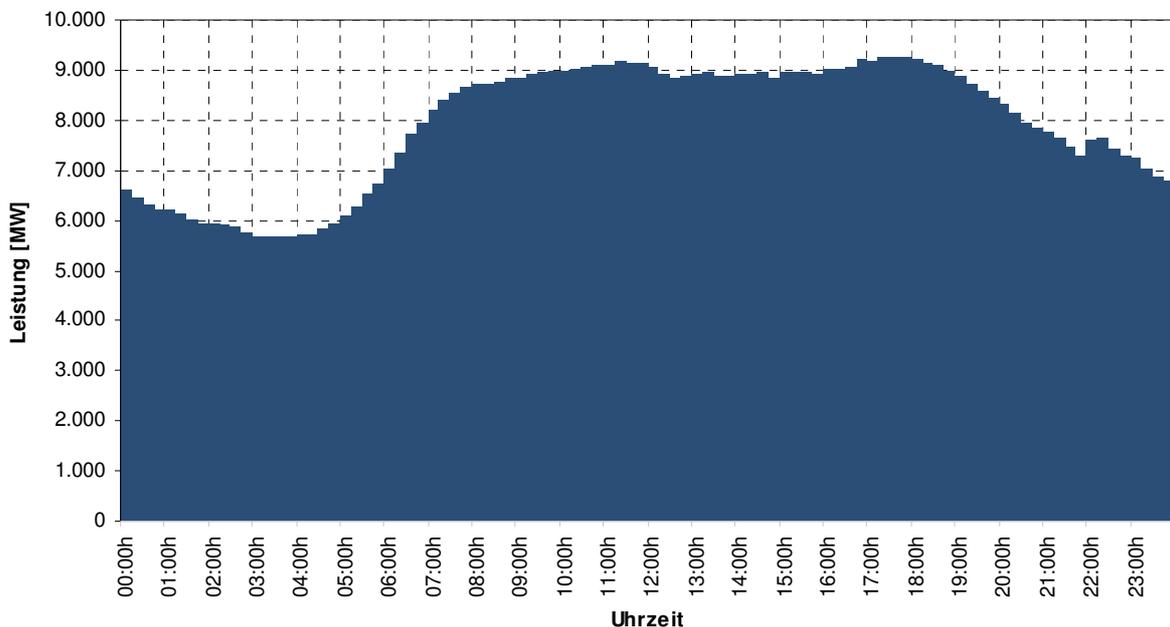


Abbildung 1.1: Tageslastgang im öffentlichen Stromnetz (e-control, 2011)

Es ist zu erkennen, dass die zu bereitzustellende Leistung über den Tagesverlauf schwankt. Während die niedrigste Last rund 6.000 MW beträgt und nachts auftritt, gibt es Mittags- und Abendspitzen von über 9.000 MW. Unterschiedliche Lasten treten allerdings nicht nur tageszeitabhängig auf. Arbeitsfreie Tage unterscheiden sich den Lastgang betreffend zwangsläufig von Werktagen. Ebenso gibt es jahreszeitliche und wetterbedingte Schwankungen. Ein geeignetes Zusammenspiel von Grund-, Mittel- und Spitzenlastkraftwerken sorgt für die stetige Anpassung der Erzeugung an den Verbrauch und somit für die Frequenzhaltung im Stromnetz. Über das Fahrplanmanagement wird dabei gewährleistet, dass stets ein Gleichgewicht zwischen Erzeugung und Verbrauch besteht. Größere Abweichungen von den zuvor erstellten Fahrplänen werden über teure Ausgleichsenergie aus Spitzenlastkraftwerken abgefangen.

Der vermehrte Einsatz von schwer regelbaren, meist von der Wetterlage abhängigen und in ihrer Erzeugung nicht ideal vorhersagbaren nachhaltigen Erzeugungsanlagen

macht einen Paradigmenwechsel notwendig. Es ist davon auszugehen, dass bald nicht mehr alle Anpassungen auf der Erzeugerseite durchgeführt werden können. Dadurch gewinnt die Nutzung von elektrischen Lastverschiebungspotentialen an Bedeutung. Der technischen Notwendigkeit der Erhaltung des Gleichgewichts von Erzeugung und Verbrauch mittels verbrauchsseitiger Maßnahmen stehen aber auch wirtschaftliche Anreize gegenüber. Arbeitspreise für Strom an der Börse sind stündlich laufenden Schwankungen unterlegen. Abbildung 1.2 zeigt die Strompreise am Spotmarkt der Österreichischen Strombörse EXAA für Mittwoch, 19. Jänner 2011 (EXAA, 2011).

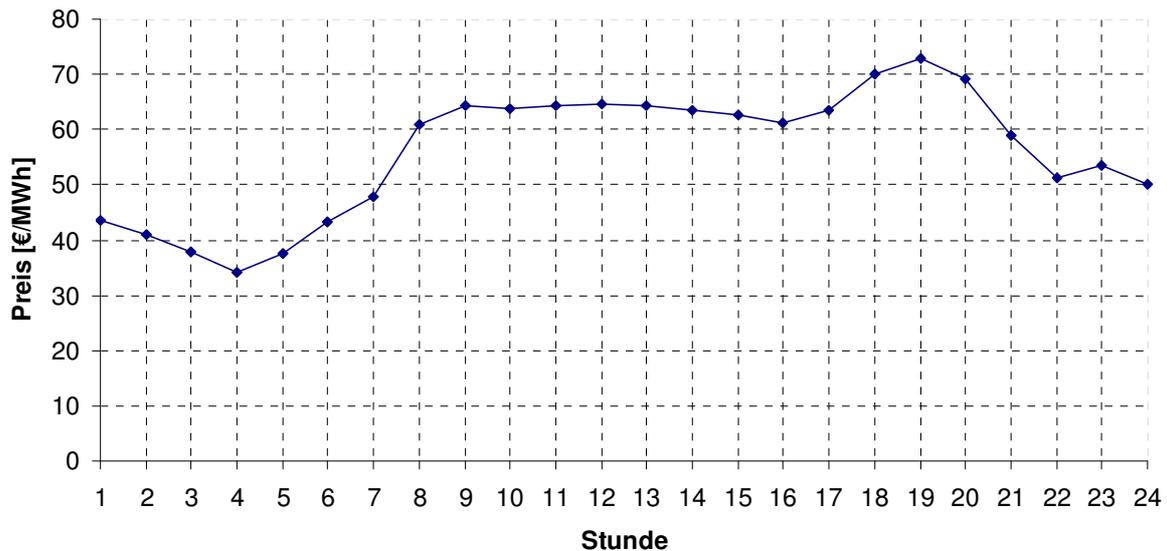


Abbildung 1.2: Spotmarktpreise EXAA (EXAA, 2011)

Es ist zu erkennen, dass die Preiskurve einen ähnlichen Verlauf hat wie die Leistungskurve in Abbildung 1.1. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Leistungsanpassung derzeit noch durch die Erzeugungsseite gewährleistet wird. Bei Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energie sind zu Zeiten hoher Erzeugung durch PV bei gleichzeitig hoher Winderzeugung auch andere Preisverläufe möglich.

Die Netznutzungsentgelte für Endkunden mit Lastgangmessung sind einerseits abhängig von der bezogenen elektrischen Arbeit. Andererseits wird über die Verrechnungsleistung der Anteil der Leistungskomponente der Netznutzungsentgelte berechnet. Sie wird als das arithmetische Mittel der im Abrechnungszeitraum monatlich ermittelten bzw. gemessenen höchsten viertelstündlichen Durchschnittsbelastung ermittelt (SNT-VO, 2010). Somit kann bei Endkunden mit Lastgangmessung bereits jetzt durch das Abschalten von Anwendungen zu Spitzenlastzeiten eine Kostenersparnis erzielt werden.

Derzeit müssen Lastgangmessungen bei Endkunden mit einem Jahresverbrauch von unter 100.000 kWh oder weniger als 50 kW Anschlussleistung nicht durchgeführt werden (EIWOG, 2010). Durch die Ausweitung der Lastgangmessung auf alle Endkunden (Europäisches Parlament, 2006) und den vermehrten Einsatz der fluktuierend erzeugenden erneuerbaren Energieerzeugungsanlagen ist zu erwarten, dass in Zukunft für alle Endverbraucher lastkritische Tarife zum Einsatz kommen werden. Um Anreize zur Vermeidung von Stromverbrauch zu Zeiten hohen Verbrauchs im

gesamten Netz zu schaffen, sind auch zeitvariable Tarife wahrscheinlich. Durch Optimierung der zeitlichen Nutzung der elektrischen Applikationen ist somit mit einer Kostensenkung für Endverbraucher zu rechnen. Je nach den an einem Zählpunkt angeschlossenen Verbrauchern bzw. deren Lastverhalten und Lastverschiebungspotential ergibt sich somit unterschiedliches Einsparungspotential.

1.2 Zielsetzung

Zentrale Fragestellung der Diplomarbeit ist die theoretische Bewertung des Lastverhaltens und der Möglichkeiten des Lastmanagements in Bürogebäuden. In einem ersten Schritt werden dabei die in Bürogebäuden auftretenden Verbraucher hinsichtlich ihres Lastverhaltens untersucht. Ebenso werden die Applikationen hinsichtlich der Möglichkeit zu Lastverschiebungen beleuchtet.

Anschließend werden verschiedene Lastgänge für ein fiktives Bürogebäude durch das Aggregieren verschiedener Verbraucher modelliert. Als Unterscheidungsmerkmal dient dabei nicht nur die Auswahl der Komponenten sondern auch deren Regelung. Ebenso wird untersucht, welche Auswirkungen dezentrale Erzeugungsanlagen und Speicher auf das Lastverhalten haben.

Als Lösung für zukünftig zu erwartende Tarifmodelle wird dann dahingehend optimiert, den Stromverbrauch in Zeiten möglichst niedriger Preise zu verschieben. Dabei werden zwei Tarifvarianten untersucht. Zum einen werden fixe Tageszeiten angenommen, an denen jeweils der höhere bzw. niedrigere von zwei Arbeitspreisen gilt. Hier wird entsprechend den Tarifen für Netzentgelte vorgegangen, wonach die Hochtarifzeit von 06:00 bis 22:00 und die Niedrigtarifzeit von 22:00 bis 06:00 gilt (SNT-VO, 2010). Bei der zweiten Tarifvariante wird angenommen, dass der Strompreis analog den Börsenpreisen jede Stunde einen anderen Wert annehmen kann.

Um Lastverschiebungen in einem Gebäude automatisch durchführen zu können, sind teilweise intelligente, miteinander kommunizierende Verbraucher notwendig. Für diese Untersuchung wird angenommen, dass die dafür benötigte Hardware im Gebäude vorhanden ist. Die Beschreibung dieser Hardware ist nicht Gegenstand der Betrachtungen. Die Auflösung der Lastganguntersuchungen folgt in Viertelstundenwerten mittels Microsoft Excel.

Grundlage für die Optimierungen sind die stündlichen Strompreise des Jahres 2008 an der Österreichischen Strombörse EXAA. Mithilfe dieser Großhandelspreise werden virtuelle Stromkosten und virtuelle Strompreise generiert. Anhand dieser lässt sich zwar keine Aussage über die tatsächlichen Stromkosten eines Gebäudes treffen, setzt man die Zahlen allerdings zueinander ins Verhältnis, so lässt sich eine Abschätzung über die zukünftigen Einsparungspotentiale treffen.

2 VERBRAUCHER

In diesem Kapitel werden die einzelnen Verbraucher, die häufig in Bürogebäuden vorkommen, analysiert. Als ersten Schritt wird auf deren Eigenschaften hinsichtlich der Stromaufnahme eingegangen. In einem weiteren Schritt wird versucht, Optimierungsmaßnahmen hinsichtlich des Lastverhaltens aufzudecken.

Die Verbraucher werden dabei in drei Hauptgruppen unterteilt. Die Gruppe „Infrastruktur“ enthält neben den EDV-Geräten (PC, Monitor, Drucker, Notebook, Server, Beamer, Kopierer) noch sonstige Applikationen wie Aufzug, Kochgeräte, Kaffeemaschinen, Kühlschränke und Geschirrspüler. Unter die Beleuchtung fallen sämtliche im Gebäude anfallenden Beleuchtungen wie Arbeitsplatzbeleuchtung, Raumbeleuchtung, Gangbeleuchtung und Nachtbeleuchtung. Unter die letzte Gruppe „Peripherie“ fallen alle elektrischen Verbraucher der Raumklimatisierung inklusive der Verteilung.

Die Unterteilung in diese Hauptgruppen erfolgt nicht zuletzt auch aufgrund der Haupteinflussgrößen (abgesehen von der Art des Geräts selbst) auf das Lastverhalten. Es liegt auf der Hand, dass der Lastgang der unter „Infrastruktur“ gelisteten Verbraucher hauptsächlich vom Nutzerverhalten sowie von der Dauer der Nutzung abhängt. Die Beleuchtung hängt ebenfalls vom Nutzerverhalten ab, jedoch spielen hier auch externe Faktoren (natürlicher Lichteintrag für Tageslichtnutzung) eine entscheidende Rolle. Bei der Gruppe „Peripherie“ entscheidet ein Zusammenspiel aus meteorologischen Faktoren, gebäudespezifischen Werten, Regelung und Nutzerverhalten über das Lastverhalten der Verbraucher.

Für das Nutzerverhalten werden wenn möglich Erfahrungswerte aus der Literatur verwendet. Konnten solche nicht ermittelt werden, wurde ein aus der Sicht des Autors plausibles Nutzerverhalten angenommen bzw. werden verschiedene Möglichkeiten des Nutzerverhaltens untersucht.

Zuletzt werden noch die Erzeugungslastgänge typischer dezentraler Erzeugungsanlagen beschrieben.

2.1 Infrastruktur

2.1.1 PC

Aufgrund der Tatsache, dass Notebooks im Gegensatz zu PCs integrierte Akkus und Monitore haben, erfolgt hier eine gesonderte Betrachtung. Unter diesem Punkt wird lediglich die Stromaufnahme des PCs ohne Peripherie (Monitor, Drucker usw.) untersucht.

Im Jahr 2000 wurde zwischen der Amerikanischen Regierung und der Europäischen Union ein Abkommen über die Koordination von Energieeffizienzlabels für Büroausstattung unterzeichnet (Europäischer Rat, 2003). Damit wurde die Grundlage dafür geschaffen, das Amerikanische Effizienzlabel „Energy Star“ auch in Europa zu etablieren. Dieses Label wurde in einem gemeinsamen Programm der Umweltschutzbehörde und des Energiedepartements der Vereinigten Staaten ins Leben gerufen und setzt Standards für den Energieverbrauch elektrischer Geräte (Energy Star, 2011a).

Im Beschluss 2009/489/EG werden die Spezifikationen und Anforderungen für PCs und Laptops beschrieben (Europäische Kommission, 2009a). Es werden darin vier Betriebszustände unterschieden:

- Off-Modus:** Niedrigster Modus hinsichtlich der Leistungsaufnahme, der während der Verbindung mit der Stromversorgung hergestellt werden kann.
- Sleep-Modus:** Ein Status niedriger Leistungsaufnahme, den der Computer nach einer gewissen Periode von Inaktivität automatisch annehmen kann oder der vom Benutzer manuell gewählt werden kann. Ein Gerät im Sleep-Modus kann durch Netzwerkbefehle oder Eingabebefehle durch den Nutzer innerhalb von höchstens fünf Sekunden wieder die volle Betriebsbereitschaft erlangen.
- Idle-Modus:** Status, in dem das Betriebssystem und andere Programme gestartet sind, das Benutzerprofil erstellt wurde und das Gerät nicht im Schlafmodus ist. Die Aktivität ist limitiert auf die Basisanwendungen, die das System automatisch startet.
- Aktiver Modus:** Status, in dem der Computer hilfreiche Arbeit ausführt, die durch gleichzeitige Benutzereingabe oder durch Netzwerkbefehle angestoßen wird. Dieser Status beinhaltet auch Zeit im Idle-Modus zwischen den einzelnen Befehlen (Europäische Kommission, 2009a).

Bei stationären Arbeitsplatzrechnern und Laptops gibt es nach Untersuchungen der Österreichischen Energieagentur kaum Unterschiede zwischen der Leistungsaufnahme im Idle-Modus und im aktiven Modus. Abbildung 2.1 zeigt die Messung der Leistungsaufnahme an einem Desktop. Die durchschnittliche Leistungsaufnahme während des Messzeitraums, in dem am Computer gearbeitet wurde, liegt nur um 1,5 % höher als die Leistungsaufnahme im Idle-Modus (Bogner, 2011). Deshalb wird für die weiteren Betrachtungen der stationären Arbeitsplatzrechner und Laptops der Wert im Idle-Modus für den Zeitraum der Arbeitszeit, in dem sich der Computer nicht im Sleep- oder Off-Modus befindet, herangezogen.

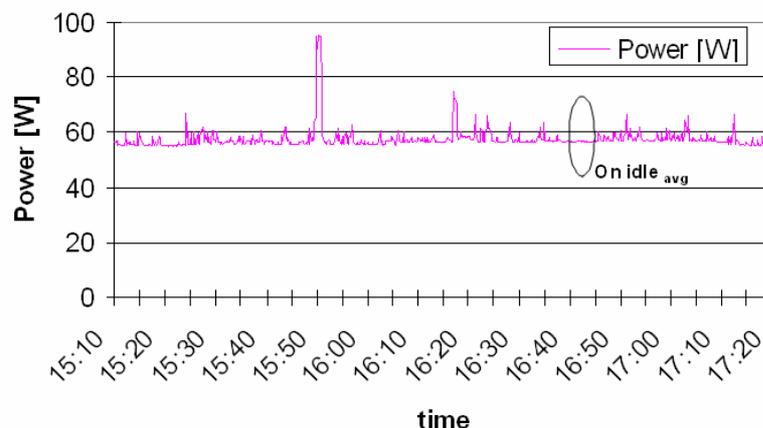


Abbildung 2.1: Leistungsaufnahme Desktop Aktiver Modus (Bogner, 2011)

Weiters wird bei stationären Rechnern zwischen Desktops und Workstations unterschieden (Europäische Kommission, 2009a). Desktops sind durch die Möglichkeit der Nutzung für einen breiten Bereich von Home- und Officeanwendungen definiert.

Workstations werden als High-Performance Geräte spezifiziert, welche für Anwendungen geeignet sind, die eine hohe Rechenleistung benötigen (CAD, Softwareentwicklung usw.). Um als Workstation zu gelten, muss ein Computer

- als Workstation gekennzeichnet sein,
- eine mean time between failures von mindestens 15.000 h haben,
- den Error-correcting Code (ECC) und/oder gepufferten Arbeitsspeicher unterstützen (Europäische Kommission, 2009a).

Zudem müssen drei aus sechs optionalen Kriterien hinsichtlich der Ausstattung mit Rechner- bzw. Grafikleistung erfüllt werden.

Desktops werden in vier Kategorien unterschieden, die wie folgt eingeteilt werden:

Kategorie A: Alle Geräte, die nicht den Definitionen der Kategorien B, C und D entsprechen.

Kategorie B: Müssen zwei Rechnerkerne und mindestens zwei Gigabyte Arbeitsspeicher besitzen.

Kategorie C: Müssen mehr als zwei Rechnerkerne und entweder mindestens zwei Gigabyte Arbeitsspeicher oder einen separaten Grafikchip besitzen.

Kategorie D: Müssen mindestens vier Rechnerkerne und entweder mindestens vier Gigabyte Arbeitsspeicher oder einen Grafikchip mit einem Bildspeicher von über 128 Bit besitzen (Europäische Kommission, 2009a).

Der Unterschied hinsichtlich der Ausstattungskriterien der Desktopkategorien und Workstations manifestiert sich auch in deren Leistungsaufnahme in den verschiedenen Betriebszuständen. Tabelle 2.1 zeigt die durchschnittliche Leistungsaufnahme der in der Datenbank der mit dem Energy Star ausgezeichneten Desktops und Workstations gelisteten Geräte, bei denen diese Werte gegeben sind, in den verschiedenen Betriebszuständen (Energy Star, 2011b). Es ist auffällig, dass hier ebenfalls nicht zwischen Idle-Modus und aktivem Modus unterschieden wird.

Tabelle 2.1: Leistungsaufnahme PCs (Energy Star, 2011b)

Kategorie	Off-Modus [W]	Sleep-Modus [W]	Idle-Modus [W]
Desktops	0,96	2,07	44,30
-Kategorie A	0,92	1,79	33,36
-Kategorie B	0,94	2,06	41,61
-Kategorie C	0,95	2,16	49,08
-Kategorie D	1,06	2,21	53,39
Workstations	1,34	6,37	134,30

Die durchschnittliche Leistungsaufnahme im Off-Modus zwischen den einzelnen Gerätekategorien unterscheidet sich nur gering. Ebenso gibt es zwischen den

einzelnen Desktopkategorien nur geringe Unterschiede der Leistung im Sleep-Modus. Die Workstations weisen aber hier schon eine etwa dreimal so hohe Aufnahme auf. Im Idle-Modus sind durchschnittliche Leistungsaufnahmen zwischen 33,36 W (Desktop Kategorie A) und 134,30 W (Workstations) zu finden. Erwartungsgemäß steigt (wie auch im Sleep- und Off-Modus) die Leistung mit zunehmender Mindestausstattung der Geräte.

Neben der Leistungsaufnahme im jeweiligen Modus hängt das Lastverhalten von PCs von der Nutzungsdauer im jeweiligen Zustand ab. Darauf haben zum einen die Arbeitszeit der Nutzer und zum anderen der Anteil der Arbeitszeit, in der der Computer genutzt wird, Einfluss. Diese Faktoren können natürlich je nach Arbeitsplatz zum Teil stark variieren. Desktops und Workstations müssen, um das Energieeffizienzlabel Energy Star zu bekommen, spätestens nach 30 Minuten Inaktivität automatisch in den Sleep-Modus übergehen (Europäische Kommission, 2009a). Somit lässt sich zudem die Aussage treffen, dass das Lastverhalten nicht nur vom Anteil der Arbeitszeit am Gerät abhängt, sondern auch von der Länge der Unterbrechungen. Betrachtet man beispielsweise einen achtstündigen Arbeitstag zuzüglich einer halben Stunde Mittagspause, so lassen sich bei einem 50%igen Anteil der Arbeitszeit am PC drei theoretische Extremfälle zeigen. Diese werden mit den Leistungsaufnahmewerten der Desktops der Kategorie C gezeigt.

Sind die jeweiligen Arbeitspausen am Gerät nicht länger als 30 Minuten, so läuft das Gerät während der gesamten achteinhalb Stunden im Idle-Modus durch (Abbildung 2.2). Erst bei längeren Pausen geht das Gerät in den Sleep-Modus über. Dies kann bei selbem Anteil an Nutzung bei einer vierstündigen Unterbrechung dazu führen, dass das Gerät nur viereinhalb Stunden im Idle-Modus und vier Stunden im Sleep-Modus betrieben wird (Abbildung 2.3). Findet die Zeit ohne Nutzung des PCs zudem am Rand der Arbeitszeit statt, kann davon ausgegangen werden, dass der Nutzer das Gerät ausschaltet und somit der Verbrauch im Off-Modus anzusetzen ist (Abbildung 2.4) und der Computer nur vier Stunden im Idle-Modus betrieben wird (Daten aus Energy Star, 2011b).

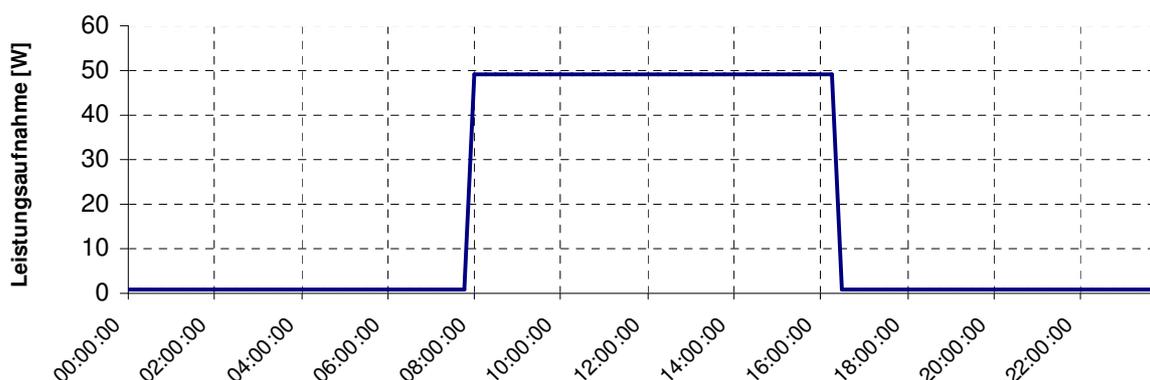


Abbildung 2.2: Theoretischer Extremfall 1 Lastgang Desktop (Daten aus Energy Star, 2011b)

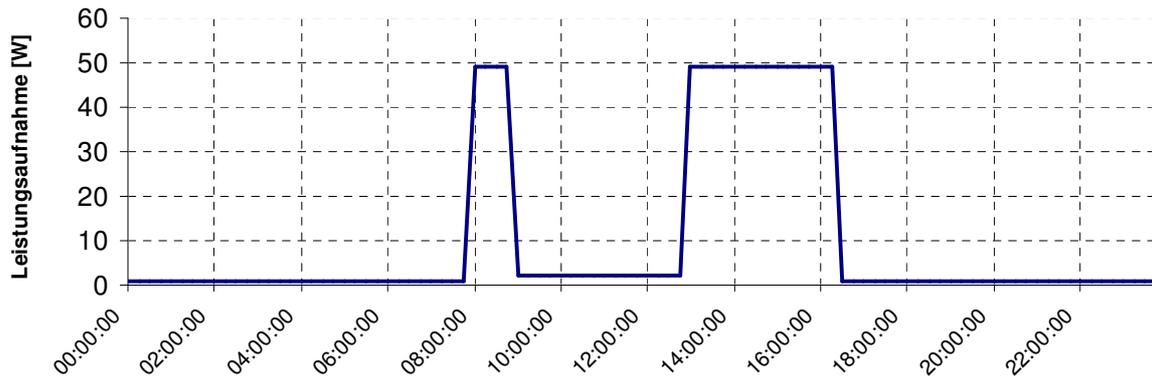


Abbildung 2.3: Theoretischer Extremfall 2 Lastgang Desktop (Daten aus Energy Star, 2011b)

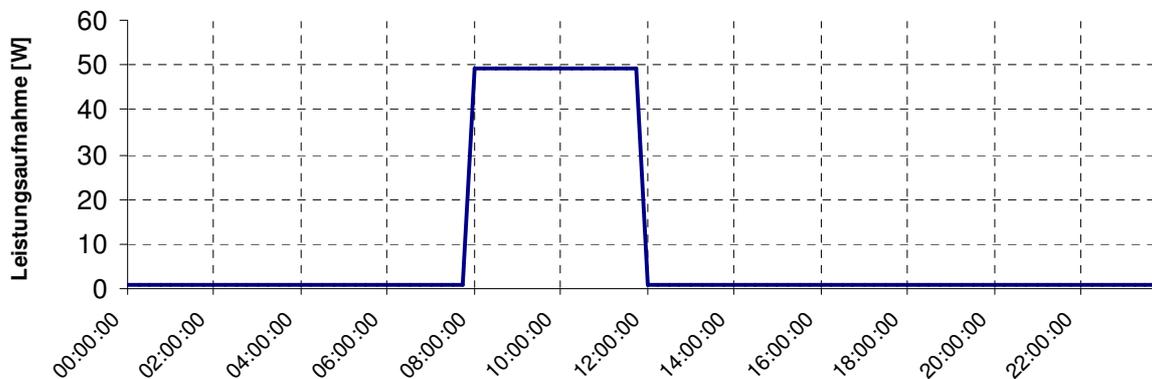


Abbildung 2.4: Theoretischer Extremfall 3 Lastgang Desktop (Daten aus Energy Star, 2011b)

Abgeleitet aus den soeben gezeigten, aus der Literatur abgeleiteten Zusammenhängen lässt sich die Aussage treffen, dass für die Modellierung von Lastgängen von PCs eine geeignete Auswahl der folgenden Faktoren zu treffen ist:

- Leistungsaufnahme im jeweiligen Modus
- Länge der Arbeitszeit
- Anteil der Arbeit am PC
- Länge und Zeitpunkt der Unterbrechungen
- Dauer der Inaktivität, bis der PC automatisch in den Sleep-Modus schaltet

2.1.2 Monitor

Arbeitsplätze, die mit PCs ausgestattet sind, sind in der Regel auch mit einem oder mehreren Monitoren ausgestattet. Somit hängt die Nutzung dieser Geräte eng mit der Nutzung der PCs zusammen.

Für Monitore gibt es den Beschluss 2009/789/EG der Europäischen Kommission, mit dem die Spezifikationen für Bildschirme aus dem Amerikanischen Programm über-

nommen wurden (Europäische Kommission, 2009b). Für Displays werden darin drei verschiedene Betriebszustände beschrieben:

On-Modus: Modus, in dem der Monitor an eine Stromquelle angeschlossen und eingeschaltet ist, sowie in seiner primären Funktion als Bildgeber genutzt wird.

Sleep-Modus: Modus, in dem der Monitor an eine Stromquelle angeschlossen und eingeschaltet ist und in einen Zustand niedriger Leistungsaufnahme versetzt wurde (durch ein Signal eines angeschlossenen Geräts oder durch ein internes Signal).

Off-Modus: Modus, in dem der Monitor an eine Stromquelle angeschlossen, jedoch durch einen mechanischen Schalter ausgeschaltet ist. Der Benutzer muss einen mechanischen Schalter betätigen, um den Off-Modus zu beenden (Europäische Kommission, 2009b).

Während ein Monitor, um das Energieeffizienzlabel Energy Star tragen zu dürfen, eine maximale Leistungsaufnahme von einem Watt im Off-Modus und zwei Watt im Sleep-Modus aufweisen darf, berechnet sich die erlaubte Leistungsaufnahme im On-Modus gemäß Tabelle 2.2 bzw. Gleichung (2.1) bis (2.3) (Europäische Kommission, 2009b).

Tabelle 2.2: Effizienzkriterien Bildschirme (Europäische Kommission, 2009b)

Kategorie	Berechnung
Kategorie 1: Bildschirmdiagonale $\leq 30''$ Bildschirmauflösung $\leq 1,1$ Megapixel	$P_{\max, M1} = 6 \cdot MP + 0,05 \cdot A_M + 3$ (2.1)
Kategorie 2: Bildschirmdiagonale $\leq 30''$ Bildschirmauflösung $\geq 1,1$ Megapixel	$P_{\max, M2} = 9 \cdot MP + 0,05 \cdot A_M + 3$ (2.2)
Kategorie 3: Bildschirmdiagonale 30 – 60 Zoll Alle Bildschirmauflösungen	$P_{\max, M3} = 0,27 \cdot A_M + 8$ (2.3)

$P_{\max, Mx}$ Maximal erlaubte Leistungsaufnahme der jeweiligen Monitorkategorie [W]

MP Bildschirmauflösung in Megapixel

A_M Sichtbare Bildschirmfläche in Quadrat Zoll

In der Datenbank der mit dem Label ausgezeichneten Geräte werden insgesamt 1.142 Monitore mit Angaben zur Leistungsaufnahme im jeweiligen Modus geführt. 183 Geräte entfallen auf Kategorie 1, 879 auf Kategorie 2 und 80 Geräte auf Kategorie 3 (Energy Star, 2011b).

Tabelle 2.3 zeigt die durchschnittlichen Leistungsaufnahmen je Kategorie sowie die durchschnittlichen Anforderungen gemäß Gleichung (2.1) bis (2.3) (Energy Star, 2011b).

Tabelle 2.3: Leistungsaufnahme Monitore (Energy Star, 2011b)

Kategorie	Off-Modus [W]		Sleep-Modus [W]		On-Modus [W]	
	Vorgabe	Real	Vorgabe	Real	Vorgabe	Real
Kategorie 1	1,00	0,30	2,00	0,41	14,66	11,56
Kategorie 2	1,00	0,33	2,00	0,45	28,84	21,80
Kategorie 3	1,00	0,45	2,00	1,14	235,27	185,62

Die Werte im Sleep-Modus und Off-Modus sind selbst bei unterschiedlichen Gerätekategorien sehr ähnlich. Lediglich die durchschnittliche Leistungsaufnahme der Kategorie 3 im Sleep-Modus weicht beträchtlich von den anderen Kategorien ab. Es ist zu erkennen, dass die Durchschnittswerte der Leistungsaufnahmen teilweise erheblich niedriger sind als die Anforderungen. Deshalb werden die Durchschnittswerte der gelisteten Geräte als für die Untersuchungen geeigneter als die Vorgabewerte betrachtet. Zudem wird davon ausgegangen, dass die Mehrzahl der Bildschirme an Büroarbeitsplätzen unter 30 Zoll Bildschirmdiagonale und eine Auflösung von über 1,1 Megapixel besitzen. Deshalb werden für die weiteren Untersuchungen, falls nicht anders angeführt, die Durchschnittswerte in den drei Betriebsmodi der Bildschirmkategorie 2 verwendet.

Desktops und Workstations müssen, um mit dem Label ausgezeichnet zu werden, nach 30 Minuten Inaktivität automatisch in den Sleep-Modus schalten. Ein zusätzliches Kriterium ist, dass das Power Management System des Computers dem Bildschirm bereits nach 15 Minuten den Befehl zum Sleep-Modus geben muss (Europäische Kommission, 2009a). Somit lassen sich für das Lastverhalten von Monitoren ähnliche Aussagen treffen wie für jenes der PCs: Die Leistungsaufnahme und Nutzungsdauer im jeweiligen Modus sowie die Länge der Pausen bestimmen den Lastgang. Kombiniert man den Lastgang des Desktops aus Abbildung 2.2 bis Abbildung 2.4 bei gleichem Nutzerverhalten mit einem Monitor der Kategorie 2, so lassen sich auch hier drei theoretische Extremfälle zeigen.

Es wurde wieder angenommen, dass 50 % der Arbeitszeit mit Computerarbeit verbracht werden. Sind die Pausen (ausgenommen Mittagspause) kürzer als 15 Minuten, so schaltet sich der Desktop nie, der Monitor nur in der halbstündigen Mittagspause für 15 Minuten in den Sleep-Modus (Abbildung 2.5). Bei der vierstündigen Arbeitsunterbrechung schaltet sich der Monitor 15 Minuten vor dem PC in den Ruhezustand (Abbildung 2.6). Beim dritten Fall (vierstündige Arbeitsunterbrechung am Rand der Arbeitszeit) ergibt sich ein Lastverlauf analog zum PC, da der Nutzer beide Geräte hier manuell in den Off-Modus versetzt (Abbildung 2.7) (Daten aus Energy Star, 2011b).

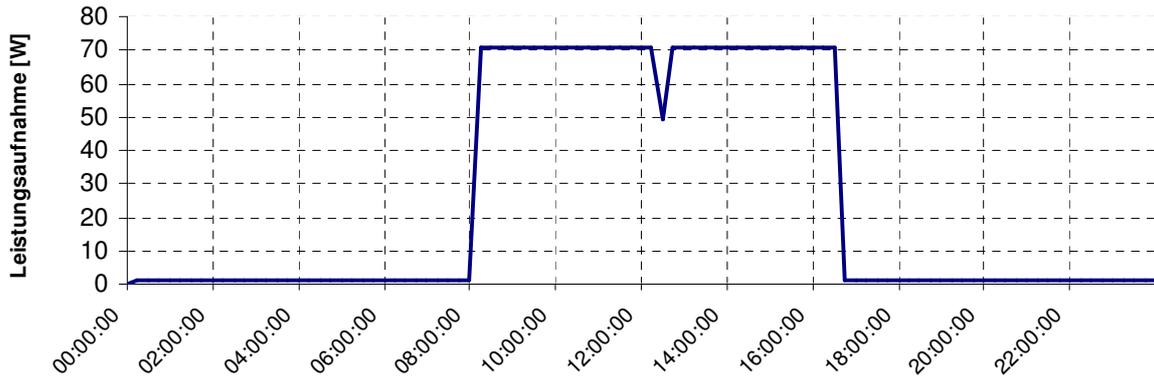


Abbildung 2.5: Theoretischer Extremfall 1 Lastgang Desktop + Monitor (Daten aus Energy Star, 2011b)

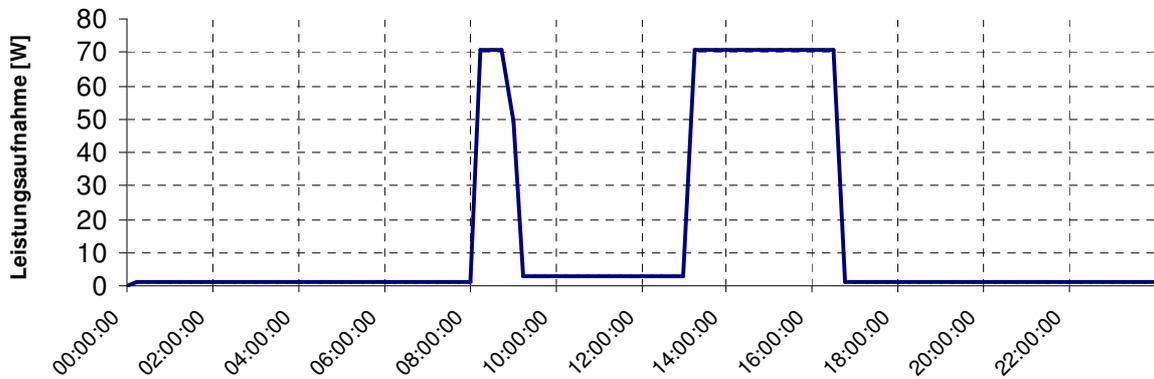


Abbildung 2.6: Theoretischer Extremfall 2 Lastgang Desktop + Monitor (Daten aus Energy Star, 2011b)

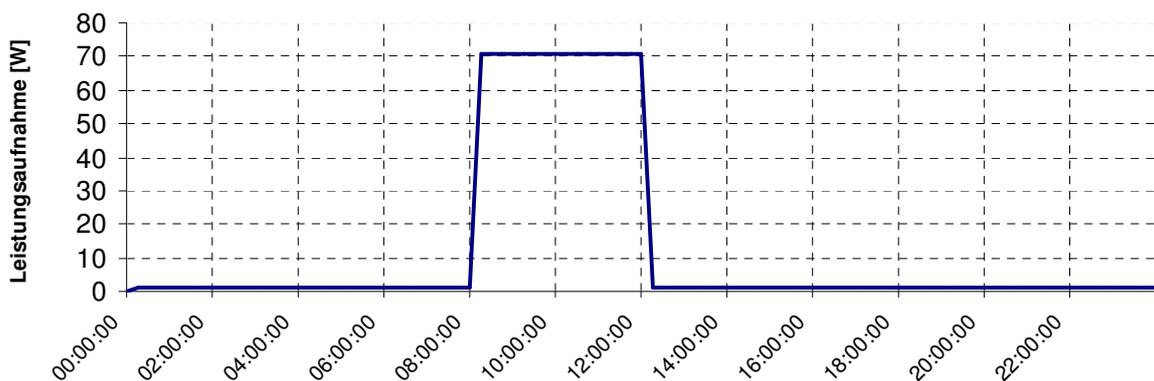


Abbildung 2.7: Theoretischer Extremfall 3 Lastgang Desktop + Monitor (Daten aus Energy Star, 2011b)

Aus diesen aus der Literatur abgeleiteten Zusammenhängen ist erkennbar, dass einerseits die Lastgänge von PC und Bildschirm eng miteinander verknüpft sind und andererseits die gleichen Faktoren für das Modellieren von Lastgängen entscheidend sind:

- Leistungsaufnahme im jeweiligen Modus
- Länge der Arbeitszeit
- Anteil der Arbeit am PC
- Länge und Zeitpunkt der Unterbrechungen
- Dauer der Inaktivität, bis der PC den Bildschirm automatisch in den Sleep-Modus schaltet

2.1.3 Notebook

Notebooks an Computerarbeitsplätzen können sowohl PCs als auch Bildschirme ersetzen. Die verschiedenen Betriebsmodi der PCs (Off-Modus, Sleep-Modus, Idle-Modus und aktiver Modus) gelten auch für Notebooks (Europäische Kommission, 2009a). Zudem wird bei Notebooks in drei Kategorien hinsichtlich der Geräteausstattung unterschieden:

Kategorie A: Alle Geräte, die nicht den Definitionen der Kategorien B und C entsprechen.

Kategorie B: Müssen einen separaten Grafikchip besitzen

Kategorie C: Müssen mindestens zwei Rechnerkerne und mindestens zwei Gigabyte Arbeitsspeicher sowie einen Grafikchip mit einem Bildspeicher von über 128 Bit besitzen (Europäische Kommission, 2009a).

Ähnlich wie bei PCs zeigt sich auch hier abhängig von der jeweiligen Gerätekategorie eine unterschiedliche Leistungsaufnahme in den drei Betriebszuständen. Die Durchschnittswerte der in der Datenbank von Energy Star gelisteten Geräte sind in Tabelle 2.4 angeführt (Energy Star, 2011b).

Tabelle 2.4: Leistungsaufnahme Notebooks (Energy Star, 2011b)

Kategorie	Off-Modus [W]	Sleep-Modus [W]	Idle-Modus [W]
Kategorie A	0,64	1,18	9,70
Kategorie B	0,64	1,23	14,09
Kategorie C	1,06	2,64	26,73

Die durchschnittliche Leistungsaufnahme im Off-Modus bei Kategorie A und B hat denselben Wert, ist jedoch bei Kategorie C erheblich höher. Ein ähnlicher Trend ist beim Sleep-Modus zu sehen. Die Leistungsaufnahme im Idle-Modus steigt wie zu erwarten abhängig von der Gerätekategorie. Vergleicht man die Leistungsaufnahmen der Notebooks mit jenen der entsprechenden PCs, so fällt auf, dass die Leistungen der Notebooks im Idle-Modus durchwegs geringer sind als jene der PCs. Dieser Aspekt gewinnt zudem an Bedeutung, wenn man bedenkt, dass Notebooks mit der Leistung im Idle-Modus auch noch das integrierte Display versorgen müssen. Als Hauptgrund dafür kann man Energiesparfunktionen von Notebooks wie zum Beispiel

das dynamische Anpassen der Prozessorleistung (Spannung und Frequenz) an die momentan notwendige Rechnerleistung zur Senkung der Leistungsaufnahme und Wärmeentwicklung vermuten (Intel, 2011).

Im weiteren Verlauf der Arbeit wird vereinfachend davon ausgegangen, dass sich diese dynamische Regelung über die Viertelstundenmittelwerte ausgleicht und somit als Durchschnitt für die Laptops der Verbrauch im Idle-Modus anzusetzen ist.

Um mit dem Energy Star ausgezeichnet zu werden, müssen Laptops ähnlich wie PCs nach spätestens 30 Minuten Inaktivität automatisch in den Sleep-Modus übergehen, das integrierte Display muss dies schon nach 15 Minuten tun (Europäische Kommission, 2009a). Die Leistungsaufnahme der Displays wird in der Datenbank nicht gesondert ausgewiesen und kann auch aus anderer Literatur nicht ermittelt werden. Es wird vereinfachend angenommen, dass sich die Leistungsaufnahme bei ausgeschaltetem Display halbiert. Dies wird auch unter der Berücksichtigung der Leistungsaufnahmen von PCs und Monitoren sowie der Anpassung der Prozessorleistung von Laptops als plausibel erachtet.

Neben der niedrigeren Leistungsaufnahme im Idle-Modus und dem integrierten Display unterscheiden sich Notebooks hinsichtlich ihres Lastverhaltens in einem weiteren Punkt entscheidend von PCs. Sie besitzen mit dem Akku einen integrierten Energiespeicher. Dieser wird – ohne automatisiertes Lastmanagement – jedoch nur in Verbindung mit dem Nutzerverhalten tragend. Werden die Laptops direkt am Arbeitsplatz im Büro verwendet, wird davon ausgegangen, dass sie stets an die externe Stromversorgung angeschlossen sind und somit die zuvor ermittelten Werte anzusetzen sind. Somit wird der Akku nur für den Betrieb außerhalb des Büros verwendet und ist im Standardfall nicht Gegenstand der Betrachtungen. Für das Lastmanagementpotential wird dieser Punkt aber in Kapitel 2.5 wieder aufgegriffen. Auch die erhöhte Leistungsaufnahme für die Wiederaufladung der Akkus wird hier nicht berücksichtigt, da angenommen wird, dass die Notebooks nicht in nennenswertem Ausmaß außerhalb des Büros verwendet werden.

Aufgrund der soeben gezeigten, aus der Literatur abgeleiteten Zusammenhänge lassen sich somit die Einflussfaktoren für das Lastverhalten von PCs und Monitoren auf die Notebooks übertragen:

- Leistungsaufnahme im jeweiligen Modus
- Länge der Arbeitszeit
- Anteil der Arbeit am PC
- Länge und Zeitpunkt der Unterbrechungen
- Dauer der Inaktivität, bis der Laptop bzw. das Display in den Sleep-Modus schaltet

2.1.4 Thin Client

Die Nutzung von Thin Clients stellt eine Variante des Server Based Computing (SBC) dar. Dabei werden alle Programme auf einem zentralen Großrechner ausgeführt. Nur das Ergebnis wird auf einem externen Bildschirm direkt beim Arbeitsplatz angezeigt. Bei der ursprünglichen Variante des SPC wurden alle Mausbewegungen, Tastatureingaben und sonstigen Befehle an den zentralen Server geschickt und von diesem

verarbeitet. Thin Clients können nun je nach Variante unterschiedliche, einfache Rechenschritte (z.B. Medienwiedergabe, Internetnutzung, Drucken) lokal durchführen. Die Ausführung von Programmen und die Speicherung von Daten obliegen aber dem zentralen Server (Köchling und Knermann, 2008).

Es wird zwischen zwei Kategorien von Thin Clients unterschieden:

Kategorie A: Alle Geräte, die nicht den Definitionen der Kategorie B entsprechen.

Kategorie B: Geräte, die das lokale ver- und entschlüsseln von Multimedia-dateien unterstützen (Europäische Kommission, 2009a).

Wie bei den anderen Geräten zeigt sich auch hier eine von der jeweiligen Gerätekategorie und dem jeweiligen Betriebszustand abhängige unterschiedliche Leistungsaufnahme. Die Durchschnittswerte die in der Datenbank von Energy Star gelisteten Geräte sind in Tabelle 2.5 angeführt (Energy Star, 2011b).

Tabelle 2.5: Leistungsaufnahme Thin Clients (Energy Star, 2011b)

Kategorie	Off-Modus [W]	Sleep-Modus [W]	Idle-Modus [W]
Kategorie A	0,96	2,00	9,35
Kategorie B	1,37	1,88	11,90

Es ist zu erkennen, dass die Leistungsaufnahmen im Idle-Modus deutlich geringer sind als jene der PCs. Im Sleep-Modus verzeichnen die Geräte eine Leistungsaufnahme von rund 2 W. Im Off-Modus liegt die Leistungsaufnahme bei 0,96 bzw. 1,37 W. Um das Label Energy Star zu erhalten, müssen Clients den dazugehörigen Monitor zudem nach spätestens 15 Minuten in den Sleep-Modus versetzen. Eine Vorgabe für den Sleep-Modus des Thin Clients selbst existiert hier nicht (Europäische Kommission, 2009a), es wird jedoch für die weiteren Betrachtungen davon ausgegangen, dass der Standard wie bei PCs und Laptops (Wechsel in den Sleep-Modus nach 30 Minuten Inaktivität) eingehalten wird. Somit lassen sich auch hier ähnliche Aussagen treffen wie für die PCs inklusive Monitor: Die Leistungsaufnahme und Nutzungsdauer im jeweiligen Modus sowie die Länge der Pausen bestimmen den Lastgang.

Zieht man wieder die drei theoretischen Extremfälle des Nutzerverhaltens bei 50%igem Anteil der Arbeitszeit am Computer heran, so ergeben sich die Lastverläufe gemäß Abbildung 2.8 bis Abbildung 2.10. Es wurde hier ein Thin Client der Kategorie B mit einem Bildschirm der Kategorie B kombiniert. Der Lastgang unterscheidet sich bei Benutzung des Thin Clients anstatt des Desktops lediglich durch die geringere Leistungsaufnahme (Daten aus Energy Star, 2011b).

Es ist jedoch zu beachten, dass die Rechenleistung der Server durch die Benutzung von Thin Clients durch die Auslagerung der Berechnungen steigt. Dieser Aspekt schlägt sich durch die größere Dimensionierung und höhere Auslastung des Servers und des dadurch erhöhten Stromverbrauchs bzw. der höheren Leistungsaufnahme des Servers nieder.

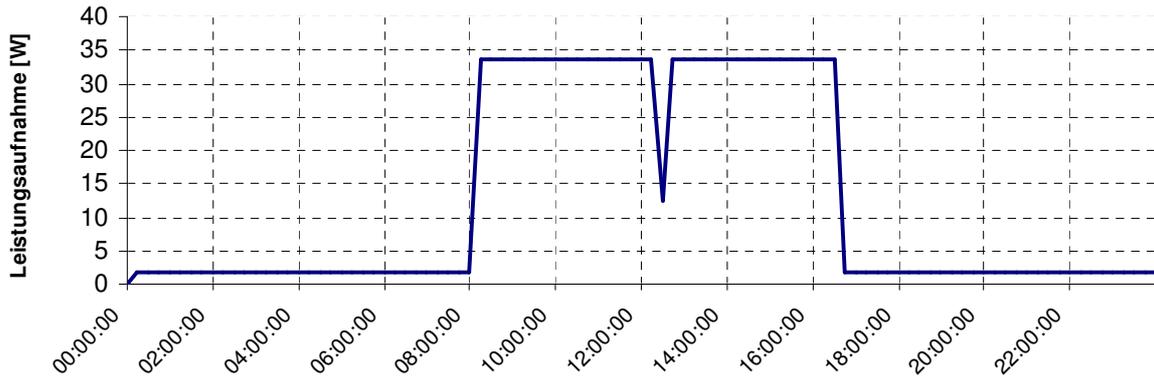


Abbildung 2.8: Theoretischer Extremfall 1 Lastgang Thin Client + Monitor (Daten aus Energy Star, 2011b).

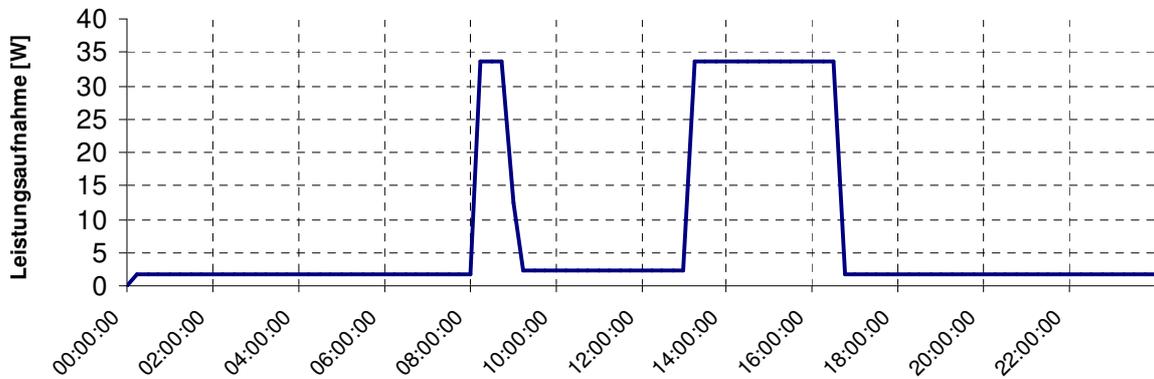


Abbildung 2.9: Theoretischer Extremfall 2 Lastgang Thin Client + Monitor (Daten aus Energy Star, 2011b).

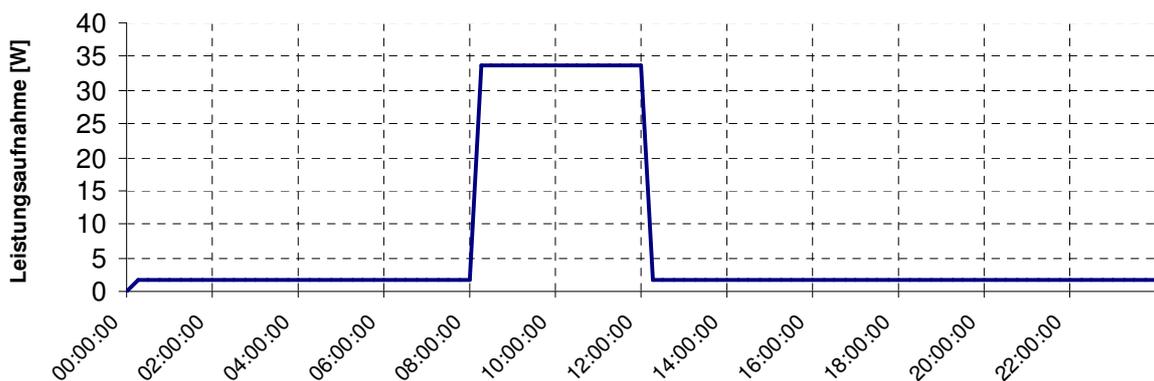


Abbildung 2.10: Extremfall 3 Lastgang Thin Client + Monitor (Daten aus Energy Star, 2011b).

Auch hier lassen sich anhand des aus der Literatur Abgeleiteten und Gezeigten die gleichen Faktoren wie bei der Kombination aus PC und Monitor für das Lastverhalten identifizieren:

- Leistungsaufnahme im jeweiligen Modus
- Länge der Arbeitszeit
- Anteil der Arbeit am Client
- Länge und Zeitpunkt der Unterbrechungen
- Dauer der Inaktivität, bis der Client bzw. das Display in den Sleep-Modus schaltet

2.1.5 Bildgebende Geräte

Kopierer, Faxgeräte, Drucker und Mehrzweckgeräte werden unter dem Überbegriff „Bildgebende Geräte“ zusammengefasst. Als Mehrzweckgerät sind hier Geräte definiert, die über zwei oder mehr der Funktionen Kopieren, Drucken, Scannen und Faxen verfügen. Es werden weiters folgende Betriebszustände unterschieden:

Aktiv-Modus: Das Gerät ist an eine Stromquelle angeschlossen und erfüllt eine der Hauptfunktionen.

Autoduplex-Modus: Modus, in dem automatisch Bilder auf beiden Seiten eines Blatt Papiers gedruckt werden, ohne dass dies manuell gewendet werden muss.

Idle-Modus: Modus, in dem das Gerät keine Ausdrücke erstellt, die Betriebsbedingungen aber erreicht hat. Aus diesem Zustand heraus müssen alle Funktionen aktiviert werden können und das Gerät muss aus diesem Zustand nach Erhalt von Eingabeoptionen (z.B. elektrische Impulse, Betätigen von Schaltern oder Knöpfen) mit minimaler Verzögerung in den aktiven Betriebszustand übergehen können.

Sleep-Modus: Modus, den das Gerät nach einiger Zeit der Inaktivität automatisch annimmt und der eine verminderte Leistungsaufnahme zur Folge hat. Aus diesem Zustand müssen alle Funktionen aktiviert werden können und das Gerät muss aus diesem Zustand nach Erhalt von Eingabeoptionen (z.B. Elektrische Impulse, Betätigen von Schaltern oder Knöpfen) in den aktiven Betriebszustand übergehen können. Hierbei kann es allerdings zu Verzögerungen kommen.

Off-Modus: Das Gerät wurde manuell oder automatisch ausgeschaltet, ist jedoch noch an eine Stromquelle angeschlossen. Dieser Zustand kann manuell oder automatisiert (z.B. durch eine Zeitschaltuhr) herbeigeführt und beendet werden (Europäische Kommission 2009c).

Um mit dem Label Energy Star ausgezeichnet zu werden, muss ein bildgebendes Gerät Anforderungen hinsichtlich des typischen Stromverbrauchs sowie für die Zeitspanne der Inaktivität, nach der der Betriebsmodus gewechselt wird, erfüllen. Der einzuhaltende typische Stromverbrauch ist dabei von der Druckgeschwindigkeit

und der Gerätekategorie abhängig und wird für die Zeitspanne einer Woche angegeben. Tabelle 2.6 zeigt eine Übersicht, Gleichungen 2.4 bis 2.17 die jeweiligen Gleichungen zur Berechnung der Grenzwerte für den typischen Stromverbrauch (Europäische Kommission 2009c).

Tabelle 2.6: Maximaler typischer Stromverbrauch bildgebender Geräte (Europäische Kommission 2009c)

Kategorie	Geschwindigkeit (ipm)	Berechnung
Kopierer, Faxgeräte, Drucker einfärbig	≤ 15	$STV_{\max} = 1$ (2.4)
	$15 < ipm \leq 40$	$STV_{\max} = 0,1 \cdot ipm - 0,5$ (2.5)
	$40 < ipm \leq 82$	$STV_{\max} = 0,35 \cdot ipm - 10,3$ (2.6)
	> 82	$STV_{\max} = 0,7 \cdot ipm + 39$ (2.7)
Kopierer, Faxgeräte, Drucker mehrfärbig	≤ 32	$STV_{\max} = 0,1 \cdot ipm + 2,8$ (2.8)
	$32 < ipm \leq 58$	$STV_{\max} = 0,35 \cdot ipm - 5,2$ (2.9)
	> 58	$STV_{\max} = 0,70 \cdot ipm - 26$ (2.10)
Mehrzweckgerät einfärbig	≤ 10	$STV_{\max} = 1,5$ (2.11)
	$10 < ipm \leq 26$	$STV_{\max} = 0,1 \cdot ipm + 0,5$ (2.12)
	$26 < ipm \leq 68$	$STV_{\max} = 0,35 \cdot ipm - 6$ (2.13)
	> 68	$STV_{\max} = 0,7 \cdot ipm - 30$ (2.14)
Mehrzweckgerät mehrfärbig	≤ 26	$STV_{\max} = 0,1 \cdot ipm + 3,5$ (2.15)
	$26 < ipm \leq 62$	$STV_{\max} = 0,35 \cdot ipm - 3$ (2.16)
	> 62	$STV_{\max} = 0,70 \cdot ipm - 25$ (2.17)

ipm Druckgeschwindigkeit in Seiten pro Minute

STV_{\max} Maximalwert für typischen Stromverbrauch [kWh]

Der Maximalwert für den typischen Stromverbrauch für einen Drucker mit einer Druckgeschwindigkeit von 50 Seiten pro Minute und der Möglichkeit mehrfärbiger Ausdrücke errechnet sich so mittels Gleichung 2.9 wie folgt:

$$STV_{\max} = 0,35 \cdot 50 - 5,2 = 12,3 \text{ kWh}$$

Um mit dem Energy Star ausgezeichnet zu werden, darf ein Gerät bei dem im Beschluss 2009/347/EG beschriebenen Prüfverfahren diesen Wert nicht übersteigen. Zur Ermittlung der Anzahl und Größe der Aufträge wird dabei die Druckgeschwindigkeit herangezogen. Die Anzahl der Aufträge pro Tag wird dabei wie folgt festgesetzt:

- Geschwindigkeit ≤ 8 Seiten pro Minute: 8 Aufträge pro Tag
- Geschwindigkeit zwischen 8 und 32 Seiten pro Minute: Aufträge pro Tag = Anzahl der Seiten pro Minute
- Geschwindigkeit ≥ 32 Seiten pro Minute: 32 Aufträge pro Tag (Europäische Kommission, 2009c)

Die Anzahl der Seiten pro Tag wird zudem mit Gleichung 2.18 (Europäische Kommission, 2009c) bestimmt:

$$ipd = 0,5 \cdot ipm^2 \quad (2.18)$$

ipd Anzahl der gedruckten Seiten pro Tag

Durch Division der gedruckten Seiten pro Tag durch die Aufträge pro Tag ergibt sich die definierte Seitenanzahl pro Auftrag. Eine Ausnahme bilden hier die Faxgeräte, die mit einer Seite pro Auftrag geprüft werden müssen (Europäische Kommission, 2009c).

Abbildung 2.11 zeigt schemenhaft die Leistungsaufnahme eines Geräts, während der typische Stromverbrauch gemessen wird (Europäische Kommission, 2009c).

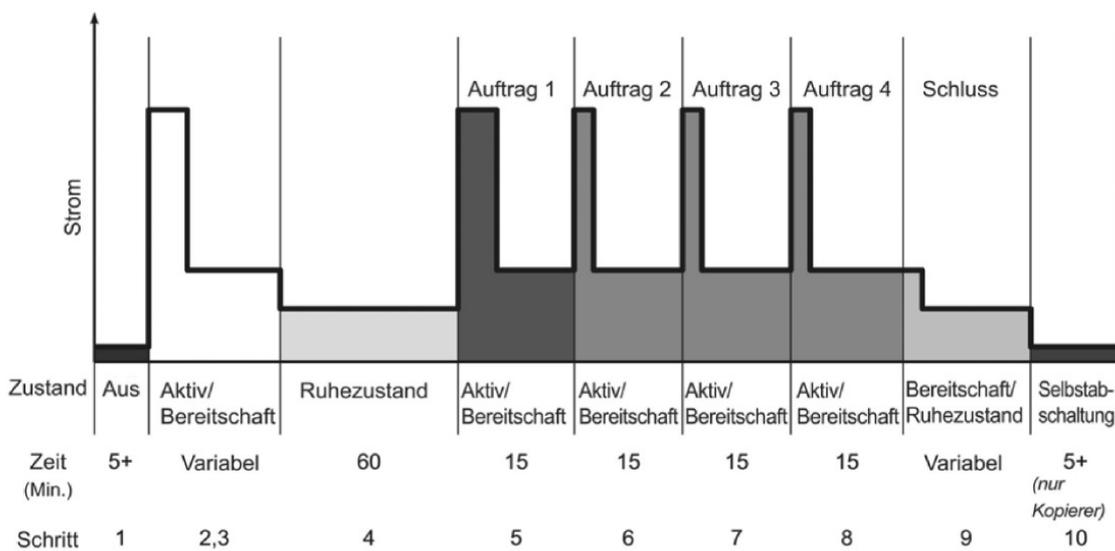


Abbildung 2.11: Messschema bildgebende Geräte (Europäische Kommission, 2009c)

Der Test startet im Off-Modus. Nachdem das Gerät eingeschaltet wird, wird gewartet, bis es Betriebsbereitschaft anzeigt. Nach einem Auftrag gemäß der definierten Seitenanzahl pro Auftrag wird gewartet, bis das Gerät vom Idle-Modus in den Sleep-Modus übergeht. Nach der Messung der Leistungsaufnahme im Ruhezustand (Sleep-Modus) wird der nächste Auftrag an das Gerät gesendet. Das Gerät wechselt wieder in den Idle-Modus. Es wird gewartet, bis 15 Minuten seit dem Auswurf der ersten Seite des Auftrags vergangen sind. Dann wird der nächste Auftrag gesendet. Mit den unterschiedlichen Zeiten wird erreicht, dass beim Auftrag 1 der Stromverbrauch für einen Auftrag beginnend aus dem Sleep-Modus, bei den Aufträgen 2-4 aus dem Idle-Modus gemessen wird. Danach wird noch die Leistungsaufnahme des Geräts beim Übergang des Idle-Modus in den Sleep-Modus gemessen (Europäische Kommission, 2009c).

Um auf den typischen Stromverbrauch zu kommen, sind nun unter Zuhilfenahme der im Test gemessenen Werte einige Rechenschritte definiert (Gleichung 2.19 – 2.23) (Europäische Kommission, 2009c):

$$\text{Durchschnittlicher Stromverbrauch pro Auftrag} = \frac{\text{Auftrag 2} + \text{Auftrag 3} + \text{Auftrag 4}}{3} \quad (2.19)$$

$$\text{Täglicher Stromverbrauch der Aufträge} = \text{Auftrag 1} \cdot 2 + (\text{Aufträge pro Tag} - 2) \cdot \text{Durchschnittlicher Stromverbrauch pro Auftrag} \quad (2.20)$$

$$\text{Täglicher Stromverbrauch Sleep - Modus} = (24 \text{ Stunden} - \frac{\text{Aufträge pro Tag}}{4} - \text{Zeit Schluss} \cdot 2) \cdot \text{Stromverbrauch Sleep - Modus} \quad (2.21)$$

$$\text{Täglicher Stromverbrauch} = \text{Täglicher Stromverbrauch Aufträge} + 2 \cdot \text{Stromverbrauch Schluss} + \text{Täglicher Stromverbrauch Sleep - Modus} \quad (2.22)$$

$$\text{STV} = \text{Täglicher Stromverbrauch} \cdot 5 + \text{Stromverbrauch Sleep - Modus} \cdot 48 \quad (2.23)$$

STV Typischer Stromverbrauch [kWh]

Für Geräte ohne Druckfunktion (z.B. Kopierer) wird in Gleichung 2.21 der Stromverbrauch im Sleep-Modus durch den Stromverbrauch bis zur Selbstabschaltung des Geräts ersetzt (vgl. Abbildung 2.11). Das Rechenschema setzt voraus, dass der Stromverbrauch für einen Auftrag den Verbrauch für jeweils 15 Minuten ab Auftragsbeginn beinhaltet. Es ist davon auszugehen, dass die Druckaufträge nicht die Zeit von 15 Minuten in Anspruch nehmen und somit im Stromverbrauch für einen Auftrag auch eine gewisse Zeitspanne im Idle-Modus enthalten ist (Europäische Kommission, 2009c).

Sind nun bei einem Gerät sowohl der typische Stromverbrauch als auch die Leistungsaufnahme im Sleep-Modus gegeben, lässt sich bei Vernachlässigung der Zeit am Schluss des Tests auf den Energieverbrauch der Geräte pro Auftrag zurückrechnen. Dies soll anhand eines Beispiels gezeigt werden. Es wird dabei ein Gerät herangezogen, das einen typischen Stromverbrauch von 10 kWh und eine Leistungsaufnahme im Sleep-Modus von 1,5 W aufweist. Es werden dabei die Gleichungen 2.19 bis 2.23 in abgeleiteter Form verwendet (Europäische Kommission, 2009c):

Durch Umformen und Einsetzen in Gleichung 2.23 erhält man den täglichen Stromverbrauch des Geräts:

$$\text{Täglicher Stromverbrauch} = \frac{10.000 \text{ Wh} - 1,5 \text{ W} \cdot 48 \text{ h}}{5} = 1.985,6 \text{ Wh}$$

Der tägliche Stromverbrauch im Sleep-Modus ergibt sich aus Gleichung 2.21, wobei für die Aufträge pro Tag der Wert, der im Beschluss der EU für die jeweilige Druckgeschwindigkeit (hier 50 Seiten pro Minute) angegeben ist, eingesetzt werden muss (Europäische Kommission 2009c). Hierbei wird die Zeit im Idle-Modus vernachlässigt, die das Gerät vom letzten Druckauftrag plus 15 Minuten noch im Idle-Modus verbringt. Ist die Zeit im Idle-Modus, nach der bei Inaktivität in den Sleep-Modus übergegangen wird, gleich 15 Minuten, so ist die dadurch entstehende Ungenauigkeit nahezu Null.

$$\text{Täglicher Stromverbrauch Sleep - Modus} = (24 \text{ h} - \frac{32}{4}) \cdot 1,5 \text{ W} = 24 \text{ Wh}$$

Setzt man die beiden Werte in Gleichung 2.22 ein, so erhält man den täglichen Stromverbrauch für die Aufträge. Der Stromverbrauch Schluss ist hierbei durch die Vernachlässigung der Zeit Schluss (vgl. Abbildung 2.11) ebenfalls mit Null anzusetzen.

$$\text{Täglicher Stromverbrauch Aufträge} = 1.985,6 \text{ Wh} - 24 \text{ Wh} = 1.961,6 \text{ Wh}$$

Da sich für die Realität schwer eine Aussage darüber treffen lässt, ob der Drucker für einen jeweiligen Auftrag aus dem Sleep-Modus oder aus dem Idle-Modus in den Aktiv-Modus übergeht, wird in weiterer Folge ein durchschnittlicher Stromverbrauch für alle Druckaufträge gebildet. Die Form von Gleichung 2.20 setzt dabei voraus, dass im Schnitt zwei Aufträge (z.B. am Morgen und nach der Mittagspause) aus dem Sleep-Modus und alle anderen aus dem Idle-Modus gestartet werden. Für das betrachtete Beispiel ergibt sich folgender Energieverbrauch pro Auftrag:

$$\text{Energieverbrauch pro Auftrag} = \frac{1.961,6 \text{ Wh}}{32 \text{ Aufträge}} = 61,3 \text{ Wh / Auftrag}$$

Da pro Auftrag eine Zeitspanne von 15 Minuten definiert ist, lässt sich zudem die Aussage treffen, dass für diesen Zeitraum eine durchschnittliche Leistungsaufnahme gemäß Gleichung 2.24 anzusetzen ist:

$$P_{\text{Auftrag}} = \text{Energieverbrauch pro Auftrag} \cdot 4 = 61,3 \text{ Wh} \cdot 4 = 245,2 \text{ W} \quad (2.24)$$

P_{Auftrag} Durchschnittliche Leistungsaufnahme im Viertelstundenintervall, in dem ein Auftrag verarbeitet wird [W]

Eine Analyse der in der Datenbank von Energy Star gelisteten bildgebenden Geräte zeigt, dass es keine Kopierer, Faxgeräte, Drucker und Mehrzweckgeräte gibt, bei denen sowohl der typische Stromverbrauch als auch die Leistungsaufnahme im Sleep-Modus angeführt werden (Energy Star, 2011b). Für letzteren Wert wird deswegen der Mittelwert der in der Datenbank geführten Geräte, bei denen hier eine Angabe vorhanden ist, für jede Geräteart gebildet. Der jeweilige Mittelwert je Gerätekategorie ist in Tabelle 2.7 dargestellt (Energy Star, 2011b).

Tabelle 2.7: Mittelwert der Leistungsaufnahme Sleep-Modus (Energy Star, 2011b)

Kategorie	Sleep-Modus [W]
Kopierer	11,72
Faxgeräte	1,20
Drucker	4,47
Multifunktionsgeräte	3,23

Als nächster Schritt wurden unter Zuhilfenahme der Werte aus Tabelle 2.7 anhand der beschriebenen Vorgehensweise der Energieverbrauch pro Auftrag und die Durchschnittsleistung während der Viertelstunde eines Auftrags für jedes Gerät berechnet. Die daraus entstandenen Werte werden in ein Diagramm, bei dem die x-Achse die Druckgeschwindigkeit in Seiten pro Minute und die y-Achse die durchschnittliche Leistung während eines Auftrags darstellen, eingetragen. Mit Microsoft Excel wird dann eine Trendlinie durch die darin enthaltenen Werte gelegt, um eine Funktion der Leistungsaufnahme während des Druckvorgangs abhängig von der Druckgeschwin-

digkeit zu erhalten. Abbildung 2.12 zeigt die Werte für Schwarzweißdrucker mit der Trendlinie (Daten aus Energy Star, 2011b).

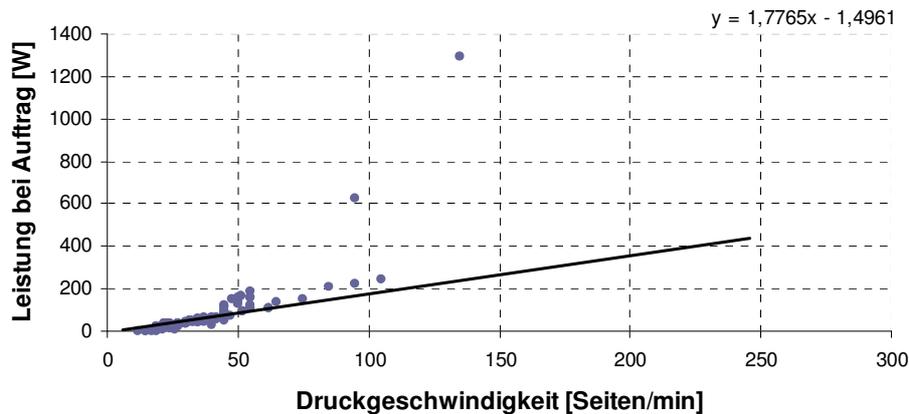


Abbildung 2.12: Trendlinie Leistungsaufnahme Schwarzweißdrucker (Daten aus Energy Star, 2011b)

Es ist zu erkennen, dass auch einige negative Werte auftreten. Diese sind auf die Mittelwertbildung bei der Leistungsaufnahme im Sleep-Modus zurückzuführen. Bis auf einige Ausreißerwerte liegen jedoch alle in der Nähe der ermittelten Trendlinie. Somit werden die auf diese Weise ermittelten Funktionen für die weiteren Berechnungen herangezogen. Wiederholt man diese Vorgehensweise für alle Arten bildgebender Geräte, so ergeben sich für die Leistungsaufnahmen während des Intervalls der Auftragsverarbeitung die Gleichungen 2.25 – 2.31 laut Tabelle 2.8.

Tabelle 2.8: Leistungsaufnahme bildgebender Geräte

Kategorie	Berechnung
Schwarzweißdrucker	$P_{\text{Auftrag}} = 1,7765 \cdot ipm - 1,4961$ (2.25)
Farbdrucker	$P_{\text{Auftrag}} = 0,8481 \cdot ipm + 81,003$ (2.26)
Schwarzweißkopierer	$P_{\text{Auftrag}} = 2,9426 \cdot ipm - 57,535$ (2.27)
Farbkopierer	$P_{\text{Auftrag}} = 14,91 \cdot ipm - 796,24$ (2.28)
Faxgeräte (nur schwarzweiß)	$P_{\text{Auftrag}} = 0,5677 \cdot ipm + 29,66$ (2.29)
Multifunktionsgerät Schwarzweiß	$P_{\text{Auftrag}} = 2,0316 \cdot ipm + 33,638$ (2.30)
Multifunktionsgerät Farbe	$P_{\text{Auftrag}} = 1,6596 \cdot ipm + 77,772$ (2.31)

Unter den beschriebenen Vorgaben aus dem EU-Bescheid (Europäische Kommission, 2009c) und den getroffenen Vereinfachungen sowie den gezeigten Zusammenhängen lassen sich somit für die Modellierung von Lastgängen der bildgebenden Geräte folgende Aussagen treffen:

- Außerhalb der Viertelstundenintervalle der Auftragsverarbeitung entspricht die Leistungsaufnahme immer jener im Sleep-Modus.

- Die Anzahl der Aufträge hängt ebenso wie die Leistungsaufnahme während der Aufträge von der Geschwindigkeit in Seiten pro Minute ab.
- Zusätzlich zu den bisher erläuterten Berechnungen wird angenommen, dass die Verteilung der Druckaufträge zufällig über die jeweilige Arbeitszeit eines Tages verteilt ist.
- Es wird zudem angenommen, dass nicht alle Mitarbeiter zeitgleich Mittagspause machen. Deswegen sind während des Arbeitstages keine Zeiten von der möglichen Auftragsbearbeitung ausgeschlossen.

Somit ergeben sich unter Berücksichtigung einer zufälligen Verteilung der Aufträge zum Beispiel die folgenden Lastgänge gemäß Abbildung 2.13. Es wurde jeweils ein Farbmultifunktionsgerät mit der Druckgeschwindigkeit von 8, 20 und 32 Seiten pro Minute dargestellt (Daten aus Energy Star, 2011b). Die Zufallszahlen wurden dabei zwischen 0 und 1 gleichverteilt. Dies bedeutet, dass die Zufallszahl jeden Wert zwischen diesen Zahlen mit gleicher Wahrscheinlichkeit annehmen kann (Eckey et al, 2005). Liegt die dabei für jeden Viertelstundenintervall entstandene Zahl unter dem Verhältnis aus der Anzahl der Druckaufträge pro Tag zu der Anzahl der Viertelstundenwerte pro Tag, so wird ein Auftrag durchgeführt, liegt sie darüber, dann erfolgt kein Druckauftrag. Es wurde vereinfachend angenommen, dass pro Viertelstundenintervall und Gerät maximal ein Auftrag durchgeführt wird.

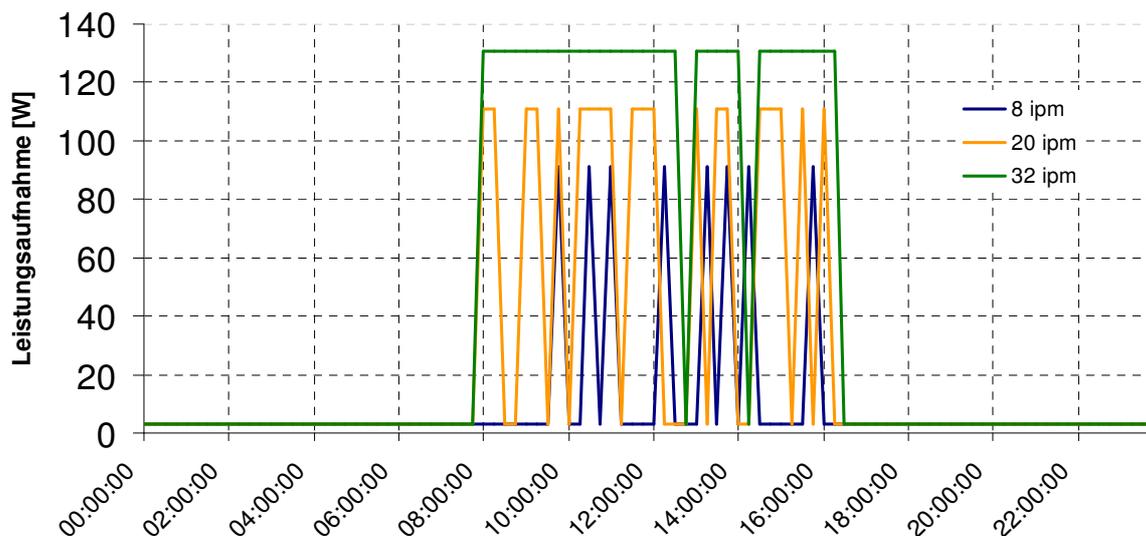


Abbildung 2.13: Beispiellastgänge für Multifunktionsgeräte (Daten aus Energy Star, 2011b)

Bei einer Arbeitszeit von acht Stunden und einer halben Stunde Mittagspause ergeben sich 34 Viertelstundenwerte. Bei der höchsten Auftragszahl (32 Aufträge) bleiben somit nur noch zwei Intervalle, an denen das jeweilige Gerät im Sleep-Modus verbringt. Dieser Wert erhöht sich jedoch bei sinkender Geschwindigkeit und damit sinkender Auftragsanzahl auf bis zu 26 Viertelstundenwerte. Die Leistungsaufnahme außerhalb der Anwesenheitszeit im Büro entspricht konstant dem Wert im Sleep-Modus. Die Leistungsaufnahme während der Auftragsbearbeitung hängt wie bereits gezeigt von der Anzahl der Seiten pro Minute ab. Beide Werte (Leistungsaufnahme im Sleep-Modus bzw. während der Auftragsbearbeitung) hängen zudem

von der Art des Geräts ab. Somit unterscheiden sich die Lastgänge von Kopierern, Druckern und Faxgeräten nur durch die unterschiedliche Leistungsaufnahme während der einzelnen Betriebszustände.

2.1.6 Server

Server sind Computer die ihre Clients (z.B. Desktops, Notebooks, Thin Clients) mit Ressourcen und Diensten versorgen. Sie wurden entwickelt, um Anfragen, die hauptsächlich über das Netzwerk und nicht über Eingabegeräte wie Maus oder Tastatur gestellt werden, zu bearbeiten. In der derzeit gültigen Richtlinie von Energy Star werden nur Server mit einem bzw. zwei Prozessorsockeln behandelt. Dabei sind die Leistungsaufnahmen laut Tabelle 2.9 im Idle-Modus nicht zu überschreiten (Energy Star, 2009).

Tabelle 2.9: Maximale Leistungsaufnahme von Servern (Energy Star, 2009)

Kategorie	Idle-Modus [W]
Kategorie A	55
Kategorie B	65
Kategorie C	100
Kategorie D	150

Die einzelnen Kategorien sind dabei folgendermaßen definiert:

Kategorie A: Standardserver mit einem Prozessorsockel

Kategorie B: Verwalteter Server mit einem Prozessorsockel

Kategorie C: Standardserver mit zwei Prozessorsockeln

Kategorie D: Verwalteter Server mit zwei Prozessorsockeln (Energy Star, 2009)

Der Unterschied zwischen einem Standardserver und einem verwalteten Server liegt darin, dass ein verwalteter Server mit mehreren redundanten Netzgeräten funktionieren und einen separaten Kontrollchip (z.B. einen Serviceprozessor) besitzen muss. Die Server mit einem oder zwei Prozessorsockeln dürfen zudem je nach Ausstattung unter Umständen eine höhere Leistungsaufnahme im Idle-Modus aufweisen (Tabelle 2.10). Die Zuschläge gelten nur für Server mit einem oder zwei, nicht jedoch für Server mit mehr Prozessorsockeln (Energy Star, 2009).

Tabelle 2.10: Zusätzlich erlaubte Leistungsaufnahme von Servern (Energy Star, 2009)

Zusatzausstattung	Zusätzlich erlaubte Leistungsaufnahme [W]
Zusätzliches Netzgerät	20 pro zusätzlichem Netzgerät
Mehr als eine Festplatte	8 pro Festplatte > 1
Zusätzlicher Arbeitsspeicher	2 pro GB > 4
Zusätzliche Bauteile	< 1 Gbit Schnittstelle: 0 = 1 Gbit Schnittstelle: 2 < 10 Gbit Schnittstelle: 4 > 10 Gbit Schnittstelle: 8

Die „Standard Performance Evaluation Corporation“ hat einige auf dem Markt erhältliche Server hinsichtlich ihrer Leistungsaufnahme im Idle-Modus und bei 100 % Auslastung getestet. Dieser Test beinhaltet auch Server mit mehr als zwei Prozessorsockeln. Aus den dort gemessenen Werten konnten die durchschnittlichen Leistungsaufnahmen gemäß Tabelle 2.11 ermittelt werden (SPEC, 2011). In der Tabelle ist zudem die Differenz zwischen der Leistungsaufnahme im Idle-Modus und bei 100 % Auslastung zu finden.

Tabelle 2.11: Leistungsaufnahme von Servern (SPEC, 2011)

Kategorie	Idle-Modus [W]	100 % Auslastung [W]	Differenz [W]
1 Sockel*	55 / 65	132,02 / 142,02	77,02
2 Sockel*	100 / 150	232,88 / 282,88	132,88
4 Sockel	252,30	578,01	325,71
8 Sockel	301,18	834,82	533,64

* Die Werte im Idle-Modus wurden aufgrund der genaueren Unterscheidung der Servertypen aus Tabelle 2.9 übernommen.

Insgesamt sind in der vorhandenen Datenbank nur sieben Server mit mehr als acht Prozessorsockeln gelistet. Um auch hier einen Defaultwert ermitteln zu können, wird erneut die Trendlinienfunktion des Tabellenkalkulationsprogramms genutzt. Abhängig von der Anzahl der Prozessorsockel wird die jeweilige Leistungsaufnahme in einem Diagramm aufgetragen und die Trendlinien werden ermittelt. Abbildung 2.14 und Abbildung 2.15 (Daten aus SPEC, 2011) zeigen die Trendlinien für die Leistungsaufnahmen im Idle-Modus sowie der Differenz der Leistungsaufnahmen zwischen dem Idle-Modus und 100 % Auslastung.

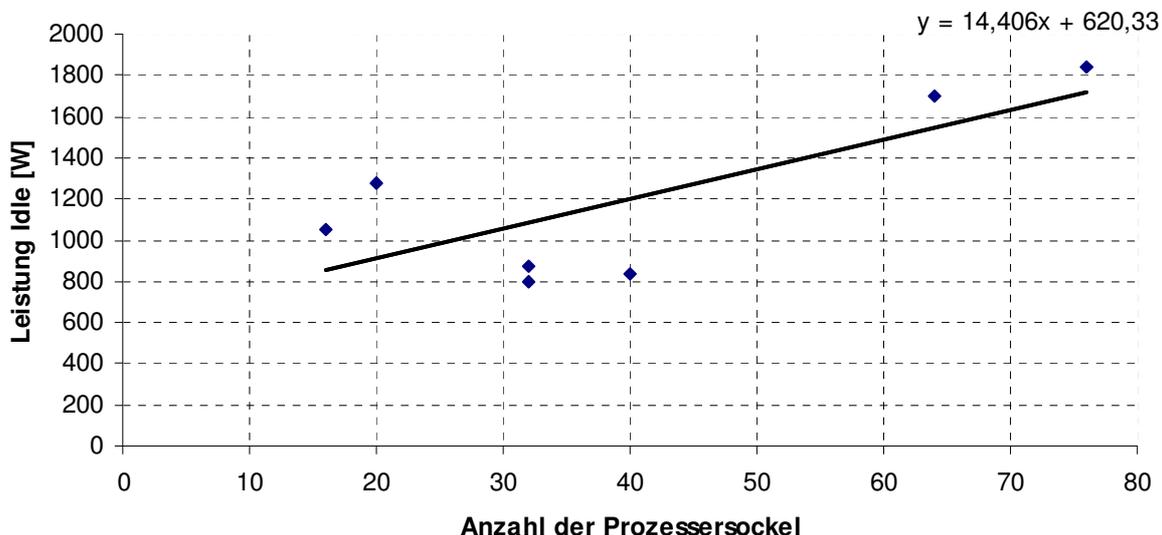


Abbildung 2.14: Trendlinie Leistungsaufnahme Server im Idle-Modus (Daten aus SPEC, 2011)

Die Leistungsaufnahme im Idle-Modus für Server mit mehr als acht Prozessorsockeln wurde mit der Trendlinienfunktion nach Gleichung 2.32 (vgl. Abbildung 2.14) ermittelt (Daten aus SPEC, 2011).

$$P_{Server>8,Idle} = 14,406 \cdot \text{Anzahl Prozessorsocket} + 620,33 \quad (2.32)$$

$P_{Server>8,Idle}$ Leistungsaufnahme Server mit mehr als 8 Prozessorsockeln im Idle-Modus [W]

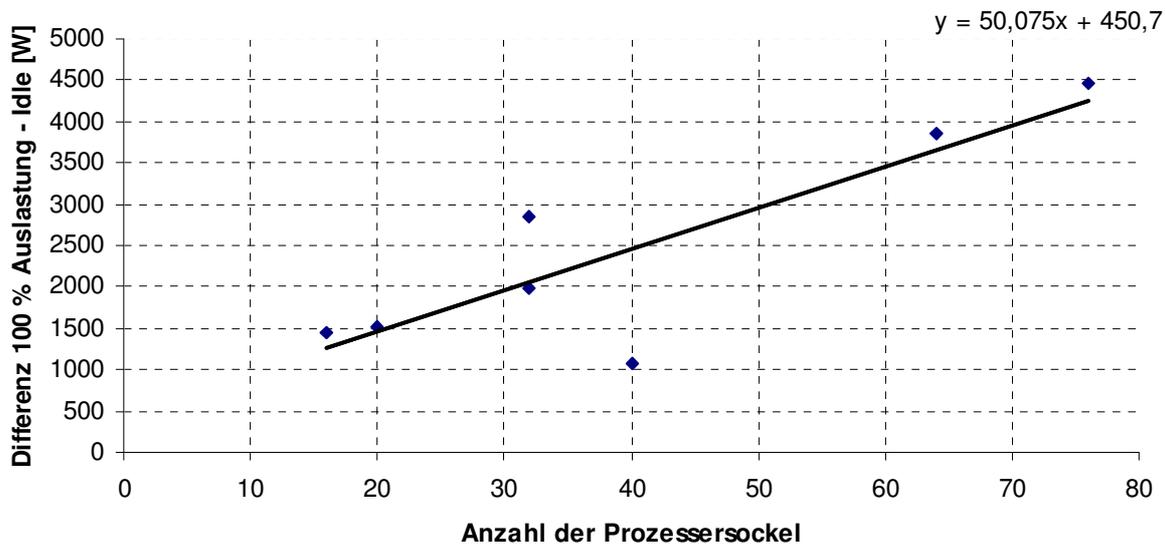


Abbildung 2.15: Trendlinie Differenz Leistungsaufnahme 100 % Auslastung zu Idle-Modus (Daten aus SPEC, 2011)

Die Differenz der Leistungsaufnahme zwischen 100 % Auslastung und dem Betrieb im Idle-Modus für Server mit mehr als acht Prozessorsockeln wird nach Gleichung 2.33 (vgl. Abbildung 2.15) ermittelt.

$$P_{Server>8,Differenz} = 50,075 \cdot \text{Anzahl Prozessorsocket} + 450,7 \quad (2.33)$$

$P_{Server>8,Differenz}$ Differenz Leistungsaufnahme Server mit mehr als acht Prozessorsockeln zwischen 100 % Auslastung und Idle-Modus [W]

Anhand der gezeigten Methodik kann die Leistungsaufnahme jedes Servers im Idle-Modus sowie die Differenz zwischen 100 % Auslastung und Idle-Modus ermittelt werden. Linearisiert man die Leistungsaufnahme zwischen dem Idle-Modus und 100 % Auslastung, so lässt sich der Wert für jeden Auslastungszustand des Servers berechnen (Gleichung 2.34).

$$P_{Server} = P_{Server,Idle} + \text{Auslastung} \cdot P_{Server,Differenz} \quad (2.34)$$

P_{Server} Durchschnittliche Leistungsaufnahme des Servers im jeweiligen Viertelstundenintervall [W]

$P_{Server,Idle}$ Leistungsaufnahme des Servers im Idle-Modus [W]

Auslastung Durchschnittliche Auslastung des Servers im jeweiligen Viertelstundenintervall [-]

$P_{Server,Differenz}$ Differenz der Leistungsaufnahme des Servers zwischen 100 % Auslastung und Idle-Modus [W]

Die Auslastung des Servers hängt sowohl von der Auslegung als auch vom Nutzerverhalten ab. Es wird angenommen, dass diese Werte bei der Konzeption der IT-Struktur bekannt sind bzw. abgeschätzt werden können. So muss beispielsweise ein Server, der auch die Rechenleistung für Thin Clients bereitstellen muss, größer ausgelegt werden als Server für Desktops. Auch der Lastgang ist abhängig von der jeweiligen Nutzungsart. So können Server fast ausschließlich zu den Bürozeiten laufen, wenn auch Nutzer anwesend sind. Die Auslastung von Servern kann aber auch außerhalb der Bürozeiten sehr hoch sein. Hier können zum Beispiel Berechnungen im Rahmen von Wartungsarbeiten und Selbstprüfungen, Abwicklung von Mailverkehr sowie über Nacht laufende Programme und Simulationen durchgeführt werden. Die Abschätzung der Auslastungskurve ist somit eng mit der Planung und Auslegung des IT-Systems verbunden. Es wird angenommen, dass Angaben darüber durch den Verantwortlichen dieser Planung und Auslegung gemacht werden können, welche in die Berechnung des jeweiligen Falles übernommen werden.

Aus den anhand der Literatur gezeigten Zusammenhängen lässt sich folgern, dass der Lastgang von Servern von folgenden Faktoren abhängt:

- Leistungsaufnahme im Idle-Modus und im jeweiligen Auslastungszustand
- Verteilung der Auslastungszustände über die Zeit

2.1.7 Beamer

Das Energieeffizienzlabel Energy Star ist derzeit für Beamer noch nicht vorhanden. Deshalb werden hier die auf der Internetplattform „Topprodukte“ (BMLFUW, 2011) gelisteten Geräte verwendet. Es wird dabei zwischen Geräten mit LCD (Liquid Crystal Display) und DLP-Technik (Digital Light Processing) unterschieden, wobei diese auch eine unterschiedliche durchschnittliche Leistungsaufnahme aufweisen. Tabelle 2.12 zeigt diese im Standby-Modus bzw. im Betriebsmodus der dort gelisteten effizienten Geräte.

Tabelle 2.12: Leistungsaufnahme Beamer (BMLFUW, 2011)

Kategorie	Standby-Modus [W]	Idle-Modus [W]
LCD-Beamer	3,87	297,45
DLP-Beamer	7,04	281,45

Beamer werden in der Regel entweder an der Decke oder Wand fix montiert oder auf ein Möbelstück gestellt. Es kann davon ausgegangen werden, dass Geräte, die fix montiert wurden, nur mit der Fernbedienung bedient werden und deshalb außerhalb der Betriebszeiten immer die Leistungsaufnahme im Standby-Modus aufweisen. Geräte, die auf ein Möbelstück gestellt werden, werden häufig nur vorübergehend benutzt und es wird davon ausgegangen, dass diese außerhalb der Betriebszeiten vom Netz getrennt werden und keine Leistungsaufnahme vorhanden ist. Der konkrete Zeitpunkt der Nutzung lässt sich dabei nicht voraussagen. Es ist jedoch davon auszugehen, dass diese nur während der Anwesenheitszeit im Büro auftritt. Die Mittagspause wird hier allerdings nicht von vornherein ausgeschlossen, da die Geräte auch während Pausen (z.B. in Schulungen) oft durchlaufen.

Abgeleitet aus BMLFUW (2011) lässt sich also die Aussage treffen, dass der Lastgang von Beamern von folgenden Faktoren abhängt:

- Leistungsaufnahme im jeweiligen Modus
- Art der Beamertechnologie
- Nutzungsdauer und –zeit
- Aufstellungsart (Fixmontage oder Aufstellung auf Möbelstück)

2.1.8 Aufzug

Die Energieeffizienz von Aufzügen ist in der Richtlinie VDI 4707 geregelt (VDI 4707, 2007). Die in diesem Kapitel durchgeführten Berechnungen (Gleichung 2.35 bis 2.39) leiten sich aus dieser Richtlinie ab. Effizienzklassen werden hier zunächst getrennt für das Fahren und für den Stillstand angeführt. Der Energieverbrauch wird mit Gleichung 2.35 auf die gefahrene Distanz und die Nennlast normalisiert. Die Zwei im Nenner steht dafür, dass eine Referenzfahrt stets aus einer Auf- und einer Abfahrt des Aufzugs besteht.

$$\text{spezifischer Energiebedarf} = \frac{A_{\text{Aufzug},F}}{2 \cdot (\text{Anzahl Etagen} - 1) \cdot \text{Etagenhöhe} \cdot \text{Nennlast}} \quad (2.35)$$

$A_{\text{Aufzug},F}$ Energieverbrauch einer Fahrt [Wh]

Dieser spezifische Energiebedarf wird in der Einheit $mWh/m \cdot kg$ angegeben. Tabelle 2.13 gibt eine Übersicht über die in der Richtlinie enthaltenen Grenzwerte für die einzelnen Effizienzklassen.

Tabelle 2.13: Energieeffizienzklassen Aufzüge (VDI 4707, 2007)

Effizienzklasse	Fahren [$mWh/m \cdot kg$]	Stillstand [W]
Klasse A	$\leq 0,8$	≤ 50
Klasse B	$\leq 1,2$	≤ 100
Klasse C	$\leq 1,8$	≤ 200
Klasse D	$\leq 2,7$	≤ 400
Klasse E	$\leq 4,0$	≤ 800
Klasse F	$\leq 6,0$	≤ 1.600
Klasse G	$> 6,0$	> 1.600

Über die Gleichung 2.36 lässt sich der spezifische Energiebedarf während der Fahrt wieder in die elektrische Arbeit einer Fahrt zurückrechnen (VDI 4707, 2007).

$$A_{\text{Aufzug},F} = \frac{\text{spezifischer Energiebedarf} \cdot 2 \cdot (\text{Anzahl Etagen} - 1) \cdot \text{Etagenhöhe} \cdot \text{Nennlast}}{1000} \quad (2.36)$$

Hinsichtlich der Nutzungshäufigkeit und -dauer der Aufzüge werden die vier Kategorien laut Tabelle 2.14 unterschieden (VDI 4707, 2007).

Tabelle 2.14: Nutzungskategorien Aufzüge (VDI 4707, 2007)

Nutzungskategorie	1	2	3	4
Nutzungsintensität	gering	mittel	stark	sehr stark
Durchschnittliche Fahrtzeit in Stunden pro Tag	0,5 (≤ 1)	1,5 (> 1 - 2)	3 (> 2 – 4,5)	6 (>4,5)
Durchschnittliche Stillstandszeit in Stunden pro Tag	23,5	22,5	21	18

Für typische Gebäude- und Verwendungsarten werden folgende Nutzungskategorien angegeben:

Kategorie 1: Wohnhaus mit bis zu 20 Wohnungen, kleines Büro- und Verwaltungsgebäude mit zwei bis fünf Geschossen, kleine Hotels, Lastenaufzug mit wenig Betrieb

Kategorie 2: Wohnhaus mit bis zu 50 Wohnungen, mittleres Büro- und Verwaltungsgebäude mit bis zu 10 Geschossen, mittlere Hotels, Lastenaufzug mit mittlerem Betrieb

Kategorie 3: Wohnhaus mit mehr als 50 Wohnungen, hohes Büro- und Verwaltungsgebäude mit über 10 Geschossen, großes Hotel, kleines bis mittleres Krankenhaus, Lastenaufzug in Produktionsprozess bei einer Schicht

Kategorie 4: Büro und Verwaltungsgebäude über 100 m Höhe, großes Krankenhaus, Lastenaufzug im Produktionsprozess bei mehreren Schichten (VDI 4707, 2007)

Anhand der Werte aus Tabelle 2.14, der Fahrtgeschwindigkeit des Aufzugs und der Fahrtstrecke lässt sich nun anhand Gleichung 2.37 die Anzahl der Fahrten pro Tag berechnen (VDI 4707, 2007).

$$F_{\text{Fahrten pro Tag}} = \frac{\text{Durchschnittliche Fahrtzeit} \cdot 3600 \cdot \text{Fahrtgeschwindigkeit}}{2 \cdot (\text{Anzahl der Etagen} - 1) \cdot \text{Etagenhöhe}} \quad (2.37)$$

Die Leistungsaufnahme während der Fahrt errechnet sich aus Gleichung 2.38 (VDI 4707, 2007).

$$P_{\text{Aufzug},F} = \frac{A_{\text{Aufzug},F} \cdot 3600 \cdot \text{Fahrtgeschwindigkeit}}{2 \cdot (\text{Anzahl der Etagen} - 1) \cdot \text{Etagenhöhe}} \quad (2.38)$$

$P_{\text{Aufzug},F}$ Leistungsaufnahme Aufzug während der Fahrt [W]

Da die Betrachtung der Lastgänge in Viertelstundenmittelwerten erfolgt, ist die Leistungsaufnahme für jede Fahrt auf das jeweilige Zeitintervall aufzuteilen. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass während eines Intervalls auch mehrere Fahrten möglich sind, errechnet sich die durchschnittliche Leistungsaufnahme jedes Zeitintervalls durch die Gleichung 2.39 (VDI 4707, 2007). Es wird dabei die Vereinfachung

getroffen, dass die Leistungsaufnahme im Stillstand immer anfällt, also zusätzlich zu der Leistungsaufnahme einer Fahrt auch während der Fahrt.

$$P_{\text{Aufzug}} = \text{Anzahl der Fahrten} \cdot A_{\text{Aufzug},F} \cdot 4 + P_{\text{Aufzug},\text{Stills tan d}} \quad (2.39)$$

$$\begin{array}{ll} P_{\text{Aufzug}} & \text{Durchschnittliche Leistungsaufnahme Aufzug [W]} \\ P_{\text{Aufzug},\text{Stills tan d}} & \text{Leistungsaufnahme Aufzug im Stillstand [W]} \end{array}$$

Das Lastverhalten von Aufzügen setzt sich somit aus dem Verbrauch im Stillstand und dem Verbrauch der Fahrten zusammen. Es ist anzunehmen, dass die Fahrten nur während der Nutzungsdauer der Büros stattfinden. Die Modellierung eines Lastganges soll hier anhand eines Beispiels gezeigt werden. Als Grundlage dient ein Aufzug, der sowohl im Stillstand als auch während der Fahrt genau die Grenzwerte der Effizienzklasse A erfüllt (spezifischer Energieverbrauch = $0,8 \text{ mWh/m} \cdot \text{kg}$, Leistung im Stillstand = 50 W). Das Gebäude hat fünf Geschosse (Etagenhöhe = 3 m) und ist der Kategorie 1 zuzuordnen. Die Fahrtgeschwindigkeit des Aufzugs beträgt 1 m/s , die Nennlast 500 kg .

Der Energieverbrauch einer Fahrt errechnet sich aus Gleichung 2.36:

$$A_{\text{Aufzug},F} = \frac{0,8 \text{ mWh/m} \cdot \text{kg} \cdot 2 \cdot (5-1) \cdot 3 \text{ m} \cdot 500 \text{ kg}}{1000} = 9,6 \text{ Wh}$$

Die Anzahl der Fahrten pro Tag ergibt sich aus Gleichung 2.37:

$$\text{Fahrten pro Tag} = \frac{0,5 \text{ h} \cdot 3600 \cdot 1 \text{ m/s}}{2 \cdot (5-1) \cdot 3 \text{ m}} = 75 \text{ Fahrten}$$

Aus Gleichung 2.39 ergibt sich die durchschnittliche Leistungsaufnahme des Aufzugs im jeweiligen Viertelstundenwert während der Bürozeiten. Bei drei Fahrten beträgt die durchschnittliche Leistungsaufnahme beispielsweise:

$$P_{\text{Aufzug}} = 3 \text{ Fahrten} \cdot 9,6 \text{ Wh} \cdot 4 + 50 \text{ W} = 161,6 \text{ W}$$

Die Anzahl der Fahrten wird dabei durch zufällige Verteilung der Fahrten pro Tag auf die Viertelstundenwerte der Anwesenheitszeit im Büro verteilt. Dabei wurde für jedes Viertelstundenintervall im Nutzungszeitraum zwischen 8:00 und 16:30 eine Zufallszahl zwischen 0 und 1 gleichverteilt generiert. Diese Zufallszahl wurde mit einem Faktor multipliziert, der so gewählt wurde, dass die Endsumme der Fahrten den errechneten Fahrten pro Tag entspricht (hier 75). Dabei wurde jedes Viertelstundenergebnis auf ganze Zahlen gerundet. Mit den Zahlen dieses Beispiels ergibt sich der Lastgang gemäß Abbildung 2.16 (Daten aus VDI 4707, 2007).

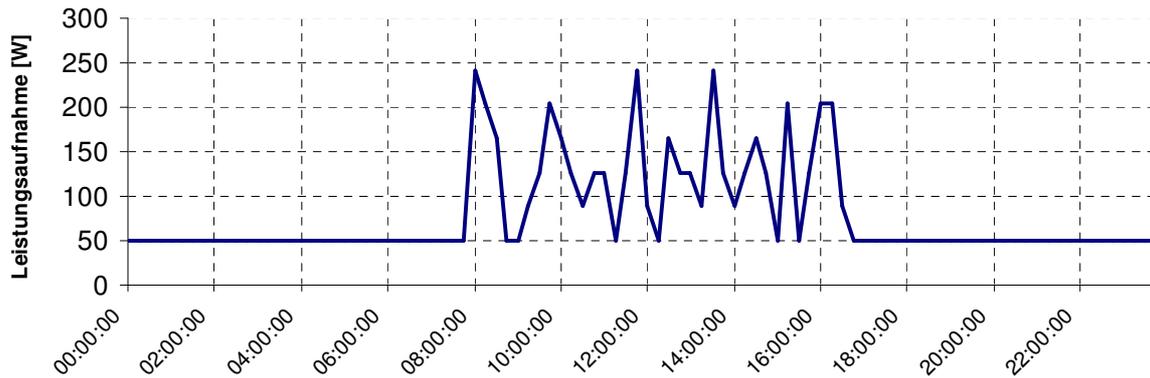


Abbildung 2.16: Theoretischer Beispiellastgang Aufzug (Daten aus VDI 4707, 2007)

Die Leistungsaufnahme des Aufzugs schwankt in diesem Fall zwischen 50 und 242 W. Der Leistungssprung pro zusätzlicher Fahrt beträgt 38,4 W. In der Realität sind bei kürzeren bzw. einfachen Fahrten natürlich auch kleinere Leistungssprünge möglich. Für dieses Modell werden die gezeigten Rechenschritte aber als hinreichend genau angesehen.

Anhand der gezeigten Zusammenhänge aus der Richtlinie VDI 4707 lässt sich ableiten, dass das elektrische Lastverhalten von Aufzügen von folgenden Faktoren abhängig ist:

- Leistungsaufnahme im Stillstand
- Spezifischer Energiebedarf
- Fahrdauer und Zeitpunkt
- Anzahl der Gebäudegeschosse
- Höhe der Geschoße
- Fahrtgeschwindigkeit
- Nutzungskategorie
- Nennlast (VDI 4707, 2007)

Es kann angenommen werden, dass Fahrten nur während der Nutzungsdauer des Gebäudes stattfinden.

2.1.9 Mikrowellenherd

In einem Test der Stiftung Warentest wurden 16 Mikrowellenherde unter anderem hinsichtlich des Energieverbrauchs getestet (Stiftung Warentest, 2008). Deren durchschnittliche Leistungsaufnahme im Standby Modus beträgt 2,25 W. Somit wird außerhalb der Betriebszeiten dieser Wert angesetzt. Für den Betrieb wird ein Wirkungsgrad von 60 % angenommen (Producto AG, 2011a). Das heißt, dass die elektrische Leistungsaufnahme bei der Leistungsstufe 750 W z.B. 1.250 W beträgt. Weiters beträgt der durchschnittliche Jahresverbrauch der Geräte aus dem Test ~ 109 kWh (Stiftung Warentest, 2008).

Da Mikrowellenherde vordergründig zum Erwärmen von Speisen und Getränken verwendet werden, ist anzunehmen, dass diese hauptsächlich in der Mittagspause und am Beginn der Arbeitszeit zur Zubereitung eines Frühstücks verwendet werden. Der Standardlastgang beruht somit auf einer zufälligen Verteilung der 109 kWh (Abzüglich 19,71 kWh für den Standby-Modus) während der ersten Stunde eines Arbeitstags und während der Mittagszeit (11:30 – 13:00). Dabei wurde für jedes Viertelstundenintervall im Nutzungszeitraum zwischen 11:30 und 13:00 eine Zufallszahl zwischen 0 und 1 gleichverteilt generiert. Diese Zufallszahl wurde mit einem Faktor multipliziert, der so gewählt wurde, dass die Endsumme des Stromverbrauchs pro Jahr den 109 kWh entspricht. Da der Mikrowellenherd unter diesen Annahmen nicht für ein komplettes Viertelstundenintervall durchläuft, wird die Leistungsaufnahme von 1.250 W im Viertelstundenintervall auch nicht annähernd erreicht. Es kann sich somit beispielsweise ein Lastgang gemäß Abbildung 2.17 ergeben (Daten aus Stiftung Warentest, 2008).

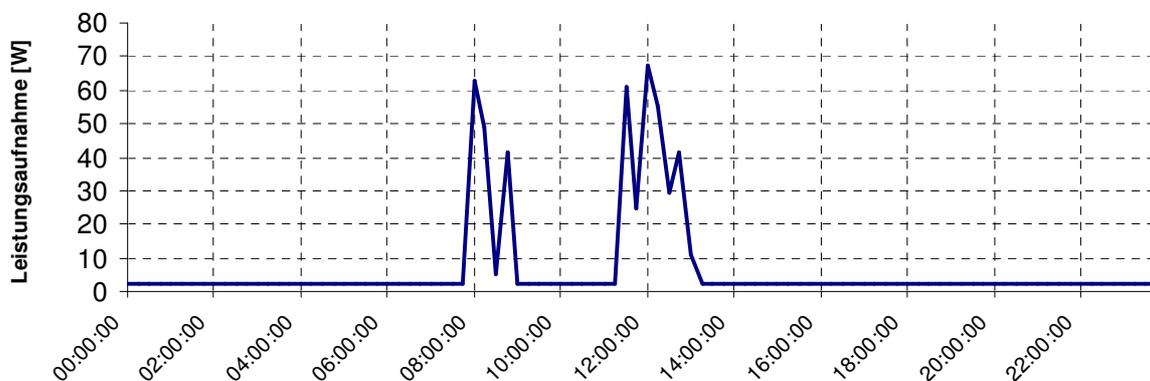


Abbildung 2.17: Theoretischer Beispiellastgang Mikrowelle (Daten aus Stiftung Warentest, 2008)

Für die weitere Betrachtungsweise ist der Standardlastgang von Mikrowellenherden also lediglich von der Anzahl der Geräte und deren Nutzungszeiten abhängig, die restlichen Parameter sind festgelegt bzw. werden durch die Zufallsverteilung des Jahresstromverbrauchs bestimmt.

2.1.10 Elektroherd

Eine andere Möglichkeit zur Zubereitung von Speisen in Büros bieten Kombinationen aus Backöfen und Kochfeldern. Die auf der Plattform „Topprodukte“ gelisteten Standgeräte haben hier eine durchschnittliche Leistungsaufnahme im Standby-Modus von 5,95 W (BMLFUW, 2011). In der DIN EN 50304 werden die Verfahren zur Messung der Energieeffizienz von Elektroherden und Backöfen beschrieben. Beim Backrohr wird beispielsweise die Energiemenge gemessen, die notwendig ist, um einen nassen Ziegelstein um 55 K zu erwärmen. Anhand der dabei verbrauchten Energie und des Volumens des Backrohrs wird eine der Effizienzklassen gemäß Tabelle 2.15 eingeteilt (DIN EN 50304, 2010).

Tabelle 2.15: Energieeffizienzklassen Elektroherde (DIN EN 50304, 2010)

Effizienzklasse	Volumen ≤ 12 l [kWh]	35 l \leq Volumen < 65 l [kWh]	Volumen ≥ 65 l [kWh]
Klasse A	$E < 0,60$	$E < 0,80$	$E < 1,00$
Klasse B	$0,60 \leq E < 0,80$	$0,80 \leq E < 1,00$	$1,00 \leq E < 1,20$
Klasse C	$0,80 \leq E < 1,00$	$1,00 \leq E < 1,20$	$1,20 \leq E < 1,40$
Klasse D	$1,00 \leq E < 1,20$	$1,20 \leq E < 1,40$	$1,40 \leq E < 1,60$
Klasse E	$1,20 \leq E < 1,40$	$1,40 \leq E < 1,60$	$1,60 \leq E < 1,80$
Klasse F	$1,40 \leq E < 1,60$	$1,60 \leq E < 1,80$	$1,80 \leq E < 2,00$
Klasse G	$1,60 \leq E$	$1,80 \leq E$	$2,00 \leq E$

Da das Messverfahren nicht direkt eine Aussage über die Leistungsaufnahme des Elektroherds im jeweiligen Betriebszustand zulässt, werden diese Vorgaben bzw. der Mittelwert der jeweiligen Kategorie nur durch Faktoren berücksichtigt.

Für den Betrieb ist zu beachten, dass selten sämtliche Kochfelder und das Backrohr auf einmal im Betrieb sind. Deswegen ist hier ein Gleichzeitigkeitsfaktor zu finden, mit dem die Maximalleistung (= Anschlusswert) multipliziert werden kann, um zur Leistungsaufnahme zu kommen. Eine gleichverteilte Zufallszahl spiegelt dann wieder das Verhalten der Benutzer wider. Es ist anzunehmen, dass es auch während der definierten Zeiten mit möglichem Betrieb Intervalle gibt, an denen außer dem Wert im Standby keine Leistungsaufnahme erfolgt. Deshalb wird die Zufallszahl vom Tabellenkalkulationsprogramm hier für jedes Intervall zwischen einem positiven und negativen Wert, der je nach Nutzerverhalten variiert werden kann, bestimmt. Ist die Zufallszahl kleiner als null, so wird angenommen, dass der Elektroherd in diesem Zeitraum nicht in Betrieb ist. Mit der Eingrenzung des Wertes zwischen -2 und 1 wird z.B. vorausgesetzt, dass das Verhältnis aus Stillstandszeit zu Betriebszeit in den Zeiträumen, in denen ein möglicher Betrieb angenommen wird, 2:1 beträgt. Hier ist jedoch anzumerken, dass die Nutzungsintensität von Elektroherden von Fall zu Fall stark schwanken kann. Somit kann die Leistungsaufnahme für die Elektroherde zu den möglichen Betriebszeiten nach Gleichung 2.40 errechnet werden.

$$P_{E-Herd} = \text{Anschlussleistung} \cdot f_{\text{Gleichzeitigkeit}} \cdot f_{\text{Energieeffizienz}} \cdot \text{Zufallszahl} \quad (2.40)$$

P_{E-Herd} Durchschnittliche Leistungsaufnahme des Elektroherds [W]

$f_{\text{Gleichzeitigkeit}}$ Faktor für die Gleichzeitigkeit der Benutzung [-]

$f_{\text{Energieeffizienz}}$ Faktor für die Energieeffizienzklasse [-]

Zufallszahl Zufallszahl zwischen zwei Werten, die abhängig von der Nutzungsintensität gewählt werden, generiert durch das Tabellenkalkulationsprogramm [-]

Die Anschlussleistungen sind vom Hersteller anzugeben. Als Energieeffizienzfaktor wird der Wert gemäß Tabelle 2.15 verwendet. Somit bleibt noch die Bestimmung eines sinnvollen Faktors für die Gleichzeitigkeit der Benutzung. Hierfür wurde die Gleichung 2.41 genutzt (Altenbernd und Möller, 2011).

$$f_{\text{Gleichzeitigkeit}} = 0,03 + \frac{0,93}{n} \quad (2.41)$$

n Anzahl der Leistungsabnahmeeinheiten

Unter der Annahme, dass ein Elektroherd mit vier Kochplatten und einem Backrohr ausgestattet ist, beträgt der Gleichzeitigkeitsfaktor also 0,256. Nimmt man nun zum Beispiel an, dass der Elektroherd zu denselben Zeiten benutzt wird, wie der Mikrowellenherd (erste Stunde des Arbeitstages sowie zwischen 11:30 und 13:00), kann sich bei einer Anschlussleistung von 11 kW und der Effizienzklasse A bei mittlerer Größe und dem möglichen Zufallszahlenbereich zwischen -2 und 1 der Lastgang gemäß Abbildung 2.18 ergeben (Daten aus BMLFUW, 2011, DIN EN 50304, 2010 und Altenbernd und Möller, 2011).

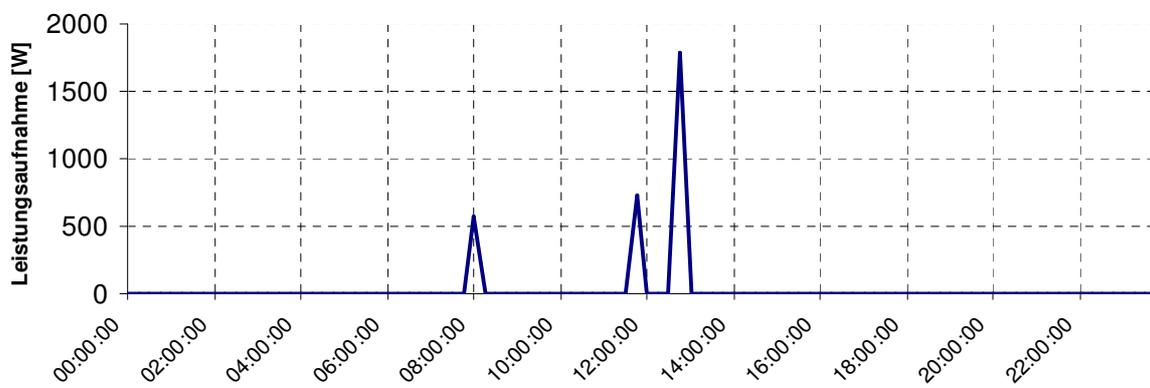


Abbildung 2.18: Theoretischer Beispiellastgang Elektroherd (Daten aus BMLFUW, 2011, DIN EN 50304, 2010 und Altenbernd und Möller, 2011)

Anhand der gezeigten, aus der Literatur abgeleiteten Zusammenhänge lassen sich für den Lastgang von Elektroherden die folgenden entscheidenden Faktoren ableiten:

- Nutzungszeiten
- Anschlussleistung
- Nutzungsintensität
- Anzahl der Abnahmeeinheiten des Geräts
- Energieeffizienzklasse

2.1.11 Kaffeemaschine

Die Plattform „Topprodukte“ gibt für effiziente Kaffeemaschinen folgende Kriterien an (BMLFUW, 2011):

- Durchschnittliche Leistungsaufnahme im Standby-Modus $\leq 3,5$ W
- Durchschnittliche Leistungsaufnahme im Bereit-Zustand ≤ 30 W
- Automatische Schaltung vom Bereit-Zustand in den Standby-Modus nach maximal einer Stunde.

Der Unterschied der beiden Modi liegt darin, dass das Gerät im Bereit-Zustand auf Knopfdruck sofort Kaffee produziert, während aus dem Standby-Modus eine Aufheizphase der Kaffeeproduktion voran geht. Eine Forschungsarbeit über effiziente Kaffeemaschinen gibt einen durchschnittlichen Energieverbrauch von 9,13 Wh für eine Tasse Kaffee an (Nipkow, 2009). Nimmt man die drei Kriterien für effiziente Kaffeemaschinen als fixe Richtwerte an, so ist der Lastgang somit noch von folgenden Faktoren abhängig:

- Nutzungszeiten
- Anzahl der Kaffeetassen

Bei einer Nutzungszeit der Kaffeemaschine in der ersten Stunde des Arbeitstages sowie zwischen 12:00 und 13:00 (am Ende der Mittagspause) ergibt sich somit ein Lastgang gemäß Abbildung 2.19 (Daten aus BMLFUW, 2011 und Nipkow 2009). Dabei wurde während jedem Viertelstundenintervall eine zufällige Anzahl zwischen null und fünf Kaffeetassen zubereitet, wobei zwischen diesen Werten eine auf Ganze gerundete Gleichverteilung erfolgt.

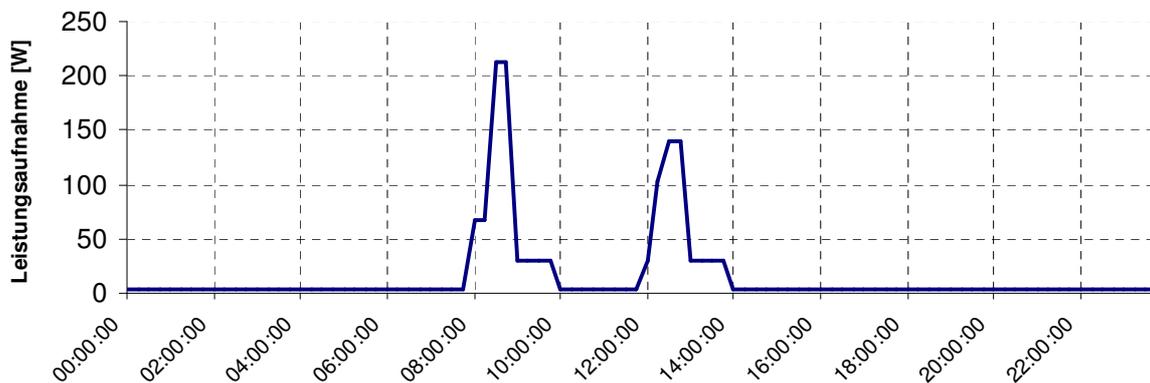


Abbildung 2.19: Theoretischer Beispiellastgang Kaffeemaschine (Daten aus BMLFUW, 2011 und Nipkow, 2009)

Die meiste Zeit verbringt die Kaffeemaschine im Standby-Modus bei einer Leistungsaufnahme von 3,5 W. In den ersten beiden Stunden der Bürozeit und von 12:00 bis 14:00 beträgt die Leistungsaufnahme 30 W plus die Leistungsaufnahme gemäß der Menge der zubereiteten Tassen, danach verbringt das Gerät je eine Stunde im Standby.

2.1.12 KÜHLSCHRANK

Kühlschränke arbeiten in der Regel innerhalb eines Temperaturfensters. Bei Erreichen der oberen Temperaturgrenze schaltet sich das Kühlaggregat ein, wird die untere Temperaturgrenze erreicht, wieder aus. Die Gleichungen 2.42 und 2.43 werden zur Modellierung des Kühlschrankverhaltens verwendet (Stadler et al, 2007).

$$T_{i+1} = \varepsilon \cdot T_i + (1 - \varepsilon) \cdot \left(T_0 - \eta_{KA} \cdot \frac{q_i}{A} \right) \quad (2.42)$$

T_{i+1}	Temperatur des Kühlbereichs zum Zeitpunkt t_{i+1} [°C]
T_i	Temperatur des Kühlbereichs zum Zeitpunkt t_i [°C]
T_0	Umgebungstemperatur [°C]
η_{KA}	Leistungszahl der Kühleinrichtung [-]
q_i	Durchschnittliche elektrische Leistungsaufnahme des Kühlaggregats im letzten Zeitintervall [W]
A	Isolierungswert des Kühlschranks [W/°C]
ε	Systemträgheit gemäß Gleichung 2.43 [-]
$\varepsilon = e^{-\frac{\tau \cdot A}{m_c}}$	(2.43)
τ	Zeit zwischen den beiden Zeitschritten T_i und T_{i+1} [h]
m_c	Thermische Masse [kWh/°C]

Für die weiteren Untersuchungen wurde eine Leistungszahl von 1,5 für das Kühlaggregat geschätzt. Die thermische Masse wird mit 15,97 kWh/°C angenommen (Stadler et al, 2007), eine Variation dieser wirkt sich aber kaum auf das Lastverhalten aus und wird daher nicht vorgenommen. Als Zeit zwischen den beiden Zeitschritten gilt natürlich auch hier das Viertelstundenintervall. Plausible Werte für die Isolierung konnten aus der Literatur nicht ermittelt werden. Somit muss vorher eine Vorgabe der Temperaturgrenzen sowie die elektrische Leistungsaufnahme und der Jahresnormverbrauch (z.B. aus dem Datenblatt für den Kühlschrank) festgesetzt werden. Mittels Zielwertsuche in einem Tabellenkalkulationsprogramm lässt sich dann der Wert für die Isolierung ermitteln. Als Beispiel wurden die Temperaturgrenzen von 4 bzw. 8°C, eine Leistungsaufnahme von 100 W und ein Jahresverbrauch von 150 kWh angenommen. Letzter Wert wurde als Zielwert verwendet, wobei die Isolierung als veränderbarer Wert diente. Für die Isolierung ergibt sich somit ein Wert von $\sim 1,84$ W/°C. Es entsteht ein Lastgang gemäß Abbildung 2.20 (Daten aus Stadler et al, 2007).

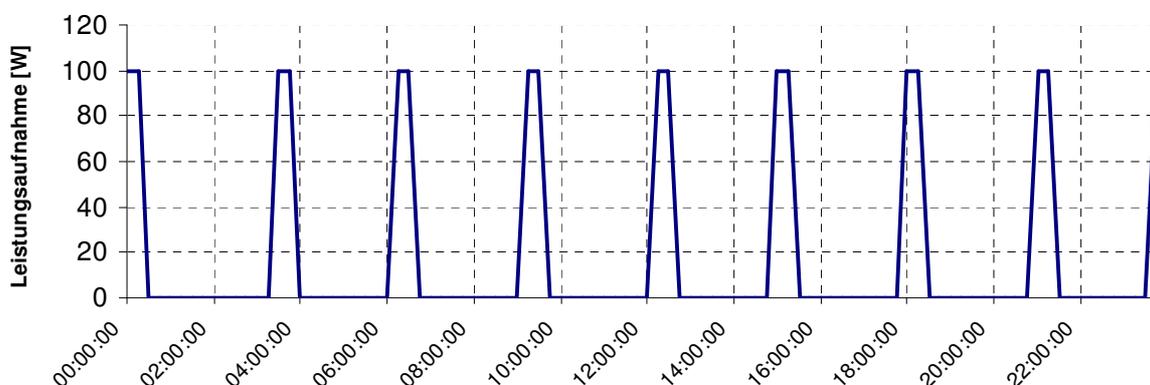


Abbildung 2.20: Theoretischer Beispiellastgang Kühlschrank (Daten aus Stadler et al, 2007)

Es wurde vereinfachend angenommen, dass es zwischen der vollen Leistungsaufnahme über den Viertelstundenintervall und keiner Leistungsaufnahme keine Zwischenzustände gibt und jede Kühlperiode somit 15 Minuten oder ein Vielfaches davon dauert.

Der Lastgang ist auch abhängig von der jeweiligen Starttemperatur, eine Variation dieser verschiebt die Kurve jedoch nur entlang der Zeitachse, ändert aber nichts an ihrer Charakteristik.

Lagert man warme Lebensmittel im Kühlschrank ein, entsteht zudem erhöhter Kühlbedarf. Dieser Aspekt wird in dieser Betrachtung jedoch aufgrund der Komplexität dieses Themas bei gleichzeitig eher geringen zu erwartenden Auswirkungen vor allem bei Bürokühlschränken (hier wird eher kein Großeinkauf auf einmal eingekühlt) außer Acht gelassen. Weiters wird die Kühlschrankbeleuchtung, die beim Öffnen der Tür aktiv wird, vernachlässigt.

Für den Lastgang der Kühlschränke lassen sich somit folgende kritische Faktoren festhalten (Stadler et al, 2007):

- Jahresstromverbrauch
- Leistungsaufnahme des Kühlaggregats
- Leistungszahl des Kühlaggregats
- Temperaturgrenzen
- Thermische Masse
- Umgebungstemperatur
- Isolationswert
- Starttemperatur

2.1.13 Geschirrspüler

Geschirrspüler folgen einem Programmablauf, einmal gestartet ist das Programm bis zum Ende durchzuführen und kann nicht mehr unterbrochen werden. Dieses Programm besteht aus mehreren Phasen. Nach einer ersten Heizphase (Leistungsaufnahme 1.800 bis 2.500 W) folgt eine Phase geringerer Leistungsaufnahme, in der das Wasser mit dem Spülmittel vermischt wird. Mit einer weiteren Heizperiode wird das Wasser auf Waschtemperatur erhitzt. Danach folgt die Waschphase, in der nur Strom für die Zirkulation des Wassers benötigt wird. Für den Spülvorgang gibt es noch eine letzte Heizphase, danach folgt der Spülgang (Lünsdorf und Sonnenschein, 2009). Die auf der Plattform „Topprodukte“ gelisteten Geräte werden nach der Breite kategorisiert. Der Energieverbrauch pro Waschgang für Geräte mit 60 cm Breite beträgt im Durchschnitt 0,93 kWh, für Geräte mit 45 cm Breite 0,8 kWh (BMLFUW, 2011). Die in den „Eco Top Ten“ gelisteten Geräte weisen zudem eine durchschnittliche Leistungsaufnahme im Standby von 2,71 W auf (Producto AG, 2011b). Für die erste Modellierung des Lastgangs werden somit diese Werte als Defaultwerte herangezogen. Der Programmablauf wird auf die Viertelstundenwerte aufgeteilt. Bei den herangezogenen Werten aus (BMLFUW, 2011) handelt es sich um effiziente Geräte, weswegen angenommen wird, dass die Leistungsaufnahme in der Heizphase auch an der unteren Grenze (1.800 W) liegt. Bei drei Heizphasen im Programmablauf würde bei einer Leistungsaufnahme von 1.800 W und einer Dauer der Heizphase von 15

Minuten bereits ein Verbrauch von 1,35 kWh entstehen. Deswegen kann die Aussage getroffen werden, dass die Heizphase kürzer ist und der Mittelwert der Leistungsaufnahme im Viertelstundenintervall, in dem geheizt wird, niedriger als mit 1.800 W anzusetzen ist. Für die Verteilung der Last während des Programmablaufs des Waschens wird zudem die Annahme getroffen, dass 85 % der Energie in den Intervallen mit Heizphasen und 15 % während der restlichen Intervalle benötigt wird. Somit werden zum Beispiel bei Geräten mit einem Verbrauch von 0,93 kWh pro Waschgang 0,79 kWh für das Heizen und 0,14 kWh für den Rest verbraucht. Verteilt man die 0,79 kWh auf drei Heizphasen so ergibt sich ein Energieverbrauch von 0,263 kWh pro Heizphase, was in 15 Minuten einer durchschnittlichen Leistungsaufnahme von 1,052 kW entspricht. Für die drei anderen Phasen wird der Verbrauch von 0,14 kWh analog aufgeteilt und es ergibt sich eine Leistungsaufnahme von 188 W. Somit ergibt sich bei einem Waschgang pro Tag der Lastverlauf gemäß Abbildung 2.21 (Daten aus BMLFUW, 2011 und Lünsdorf und Sonnenschein, 2009).

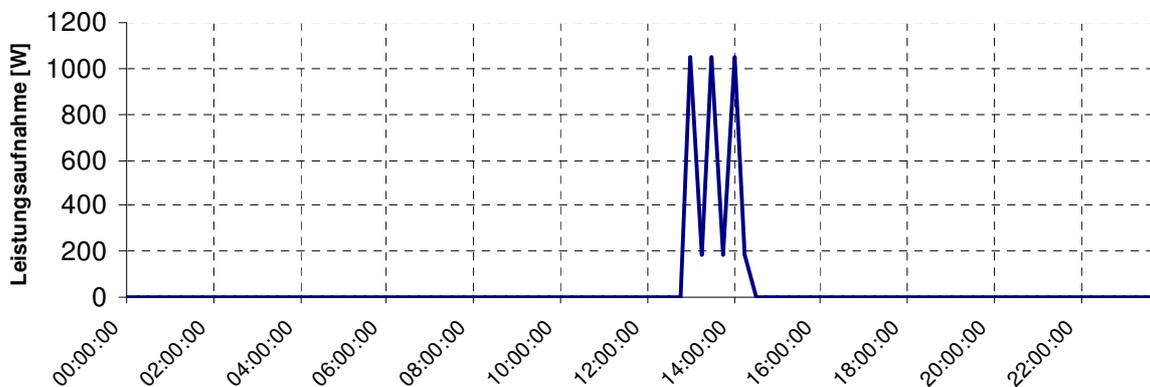


Abbildung 2.21: Theoretischer Beispiellastgang Geschirrspüler (Daten aus BMLFUW, 2011 und Lünsdorf und Sonnenschein, 2009)

Es wurde bei diesem Beispiel angenommen, dass der Geschirrspüler einmal pro Tag zu Mittag in Betrieb genommen wird.

Es lassen sich die Aussagen treffen, dass der Lastgang für Geschirrspüler anhand der Methodik der Modellbildung von folgenden Faktoren abhängt:

- Stromverbrauch eines Waschgangs
- Zeitpunkt und Anzahl der Waschgänge

2.1.14 Wasserkocher

Wasserkocher können aufgrund der hohen Leistungsaufnahme ebenfalls erhebliche Auswirkung auf den Lastverlauf haben. Wasserkocher gibt es üblicherweise mit einer Leistungsaufnahme von 600 bis 3.000 W und einem Fassungsvermögen von ein bis zwei Litern (Producto AG, 2011c). Die benötigte Energie zur Erhitzung des Wassers ergibt sich aus der isobaren Zustandsänderung unter Berücksichtigung des Wirkungsgrads gemäß Gleichung 2.44 (Schramek, 2009a).

$$Q = \frac{m \cdot c_{p,W} \cdot dT}{\eta_{WK}} \quad (2.44)$$

Q	Benötigte Energiemenge [kJ]
m	Masse Wasser [kg]
$c_{p,W}$	Spezifische Wärmekapazität Wasser [kJ/kgK]
dT	Temperaturunterschied Wasser [K]
η_{WK}	Gesamtwirkungsgrad des Wasserkochers [-]

Dies bedeutet, dass bei einem geschätzten Gesamtwirkungsgrad von 85 % für die Erwärmung von einem Liter Wasser von 15°C auf 100°C bei einer konstanten spezifischen Wärmekapazität von 4,19 kJ/kgK und einer Dichte des Wassers von 1.000 kg/m³ die Energie von 419 kJ notwendig ist. Dies entspricht rund 0,12 kWh und bei einem Wasserkocher mit einer Leistung von 2.000 W einer Erhitzungsdauer von 216 Sekunden. Über einen Viertelstundenintervall (900 Sekunden) ergibt sich somit ein Mittelwert der Leistungsaufnahme von 480 W.

Es lässt sich somit die Aussage treffen, dass der Lastgang von Wasserkochern von folgenden Faktoren abhängt (Schramek, 2009a):

- Nutzungszeit
- Heizleistung und Wirkungsgrad
- Zu erwärmende Wassermenge

2.1.15 Telefon

Die in (Energy Star, 2011b) gelisteten Telefone weisen einen durchschnittlichen Leistungsbedarf im Standby-Modus von 1,23 W auf. Angaben zum Verbrauch im Betrieb wurden nicht gemacht, es sind auch im Kriterienkatalog keine angeführt (Energy Star, 2011c). Somit wird der Lastgang eines Telefons konstant mit der jeweiligen Leistungsaufnahme im Standby-Modus angenommen, als Defaultwert dienen hier die 1,23 W.

2.1.16 Sonstige Geräte Büroangestellte

Da Büros im Normalfall auch mit Steckdosen ausgestattet sind, kann angenommen werden, dass die Nutzer auch selbst mitgebrachte Geräte wie zum Beispiel Radios oder Handyladegeräte im Büro verwenden. Dies zu bewerten ist jedoch aufgrund der mangelnden Kenntnisse über die Art und Verwendung dieser Geräte nur schwer möglich. Zum anderen kann angenommen werden, dass durch private Geräte keine erhebliche Veränderung der Lastcharakteristik und des Gesamtverbrauchs auftritt, da große Verbraucher von Firmen wohl nur mit ausdrücklicher Genehmigung und somit Kenntnis der Art des Geräts gestattet werden. Aus diesem Grund wird der Verbrauch von Geräten, welche nicht gesondert behandelt wurden, bei den weiteren Betrachtungen vernachlässigt.

2.2 Beleuchtung

Der jährliche Energiebedarf der Beleuchtung kann laut der Vornorm DIN 18599-4 (DIN 18599-4, 2007) nach dem Schema gemäß Abbildung 2.22 berechnet werden (Schema vereinfacht dargestellt).



Abbildung 2.22: Rechenschema Energiebedarf Beleuchtung (DIN 18599-4, 2007)

Als Ausgangswert dient die elektrische Bewertungsleistung der Beleuchtungsanlage. Sie stellt die gesamte elektrische Anschlussleistung der Beleuchtungsanlage im jeweiligen Berechnungsbereich dar. Die Ermittlung dieser kann entweder nach dem Tabellenverfahren, nach dem Wirkungsgradverfahren oder durch detaillierte Fachplanung erfolgen. Sie wird als spezifischer Wert in Watt pro Quadratmeter angegeben und hängt unter anderem von der Beleuchtungsstärke ab. Das Maß für die Beleuchtungsstärke ist das Lux [lx], der Quotient des Lichtstroms, der auf ein Flächenelement trifft und der Fläche des Elements (DIN 18599-4, 2007). Laut der Vornorm DIN 18599-10 müssen unterschiedliche Nutzungskategorien von Flächen unterschiedlich beleuchtet sein. So müssen Büros beispielsweise einen Wert der Beleuchtungsstärke von 500 lx auf einer Höhe von 0,8 m über dem Boden aufweisen, während Verkehrsflächen (z.B. Gang, Stiegenhaus) einen Wert von 100 lx auf Bodenebene aufweisen müssen (DIN 18599-10, 2007). Als Wert der Beleuchtungsstärke bezeichnet man den Wert, unter dem die mittlere Beleuchtungsstärke auf einer Fläche nicht sinken darf. Berücksichtigt ist hier über den Wartungsfaktor auch, dass die künstliche Beleuchtungsstärke bei gleich bleibender elektrischer Bewertungsleistung aufgrund diverser Faktoren (Alterung, Verschmutzung) mit der Zeit sinkt (DIN 18599-4, 2007).

Eine nähere Erklärung der Ermittlung der elektrischen Bewertungsleistung erfolgt an dieser Stelle nicht und kann in der Literatur nachgelesen werden. Die Betrachtung der Beleuchtung erfolgt anhand der Unterteilung in Zonen mit und ohne Tageslichtversorgung. Diese Zonen können aufgrund variierender Randbedingungen (z.B. unterschiedliche Nutzungsart, unterschiedliche Tageslichtverhältnisse) nochmals in Bereiche unterteilt werden. Bei Berechnungszonen bzw. -bereichen ohne Tageslichtversorgung entscheiden lediglich die Präsenz und die Betriebszeit (bei Tag und bei Nacht) über den Stromverbrauch. Bei Zonen (Bereichen) mit Tageslichtversorgung kann die Beleuchtung bei ausreichender Versorgung mit natürlichem Tageslicht, auch

teilweise oder ganz ausgeschaltet werden. Deswegen kommt hier als zusätzlich zu berücksichtigender Faktor die Versorgung mit Tageslicht dazu (DIN 18599-4, 2007).

Fügt man dem Rechenschema (vgl. Abbildung 2.22) eine zeitliche Auflösung hinzu, so kann man daraus schließen, dass Bereiche ohne Tageslichtversorgung bei Anwesenheit immer gemäß der elektrischen Bewertungsleistung künstlich beleuchtet werden müssen. Währenddessen müssen Bereiche mit Tageslichtversorgung nur nachts bzw. abhängig von den jeweiligen natürlichen Beleuchtungsverhältnissen künstlich beleuchtet werden. Um die natürlichen Beleuchtungsverhältnisse in einem Gebäude ermitteln zu können, ist der Tageslichtquotient hilfreich. Dieser ist definiert als das Verhältnis der Beleuchtungsstärke in einem Punkt einer Ebene im Gebäude zur Horizontalbeleuchtungsstärke bei unverbauter Himmelskugel (DIN 18599-4, 2007). Somit kann die natürliche Beleuchtungsstärke im Gebäude an jedem Punkt durch die Gleichung 2.45 berechnet werden.

$$B_{nat,x} = B_{nat,au} \cdot TLQ \quad (2.45)$$

$B_{nat,x}$	Natürliche Beleuchtungsstärke im Punkt x im Raum [lx]
$B_{nat,au}$	Horizontalbeleuchtungsstärke bei unverbauter Himmelskugel [lx]
TLQ	Tageslichtquotient [%]

Die Horizontalbeleuchtungsstärke verändert sich natürlich bei unterschiedlichen Tageslichtquotienten und kann zum jeweiligen Zeitpunkt durch Gleichung 2.46 (Heimrath, 2009) näherungsweise ermittelt werden.

$$B_{nat,au} = Irr_{gl} \cdot 125 \quad (2.46)$$

Irr_{gl}	Globalstrahlung auf horizontale Fläche [W/m ²]
------------	--

Für einen Raum (eine Fläche) kann somit eine Vielzahl an Werten für den Tageslichtquotienten errechnet werden. Es ergibt sich so für jede betrachtete Fläche (jeden Raum) je nach Anzahl der betrachteten Werte eine Auflösung in einem Raster, der der Fläche entspricht. Da der Wertungswert der Beleuchtungsstärke als „mittlere“ Beleuchtungsstärke auf einer bestimmten Fläche definiert ist, wird für jede Zone der Mittelwert des Tageslichtquotienten für die weiteren Betrachtungen verwendet (DIN 18599-4, 2007).

Abbildung 2.23 zeigt die mit den Gleichungen 2.45 und 2.46 ermittelten Werte für die natürliche Beleuchtungsstärke im Raum bei unterschiedlichen Tageslichtquotienten und Globalstrahlungswerten.

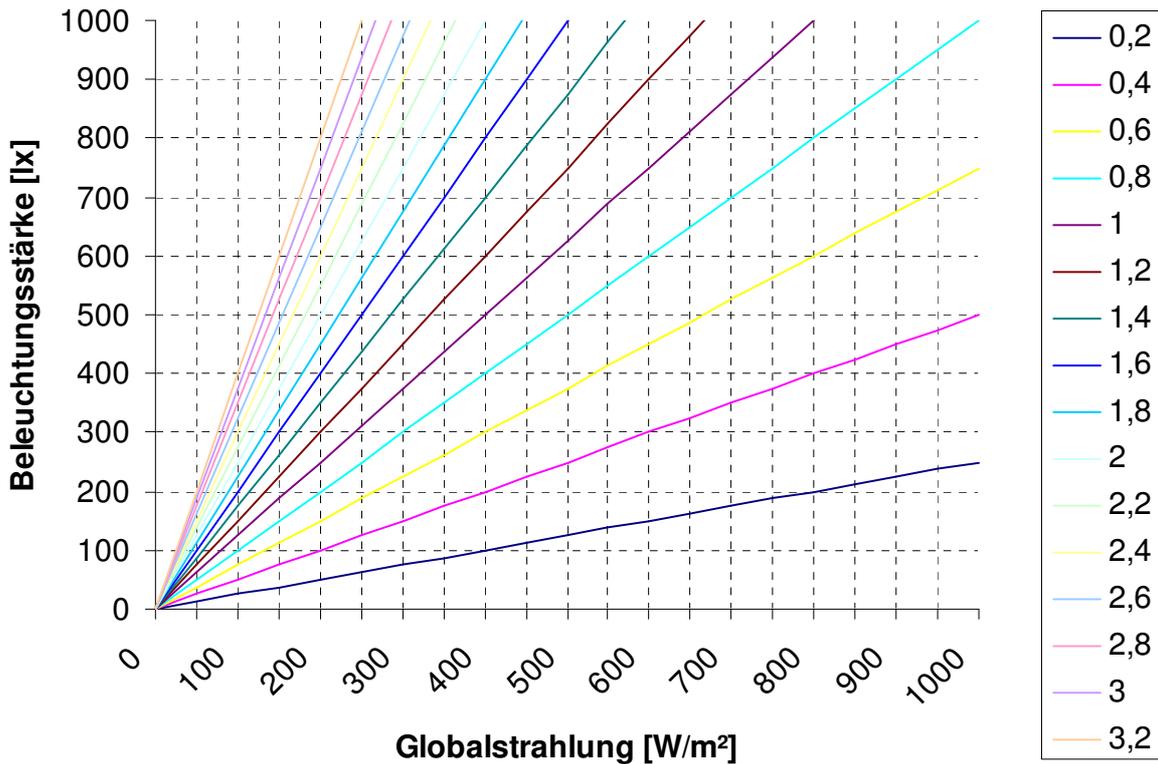


Abbildung 2.23: Beleuchtungsstärke im Raum in Abhängigkeit vom Tageslichtquotienten und der Globalstrahlung

Geht man von den vorgeschriebenen 500 lx für die Beleuchtung in Büros aus, so erkennt man, dass der Wert bei einem Tageslichtquotient von 0,2 selbst bei einer Globalstrahlung von 1.000 W/m² nicht erreicht wird. Bei höheren Tageslichtquotienten wird der Wert hingegen schon bei einem Bruchteil dieser Globalstrahlung erreicht.

Die Präsenz in einem Raum kann bei der Ermittlung des jährlichen Energiebedarfs durch einen Faktor, mit dem der Beleuchtungsenergiebedarf multipliziert werden muss, berücksichtigt werden. Dieser wird durch Gleichung 2.47 (DIN 18599-4, 2007) ermittelt.

$$F_{Präs} = 1 - F_{Ab} \cdot F_{Reg} \quad (2.47)$$

$F_{Präs}$ Präsenzfaktor [-]

F_{Ab} Abwesenheitsfaktor eines Raumes [-]

F_{Reg} Faktor zur Berücksichtigung der Effizienz der Präsenzkontrolle [-]

Der Abwesenheitsfaktor ist hier je nach Raum unterschiedlich. Bei Einzel- und Gruppenbüros beträgt dieser Faktor 0,3 und bei Großraumbüros (über sechs Arbeitsplätze) 0,0. Bei Verkehrsflächen beträgt der Faktor 0,8 (DIN 18599-10, 2007). Der Faktor zur Berücksichtigung der Effizienz der Präsenzkontrolle beträgt ohne Präsenzmelder 0,5 und mit Präsenzmelder 0,95 (DIN 18599-4, 2007). Diese Faktoren werden in der Folge verwendet, um die Wahrscheinlichkeit, ob das Licht in einem Raum zu einem bestimmten Zeitpunkt eingeschaltet ist, zu ermitteln. Dabei wird wieder für

das jeweilige Viertelstundenintervall eine gleichverteilte Zufallszahl ermittelt. Ist diese Zufallszahl größer als der Präsenzfaktor, so ist das Licht ausgeschaltet, ist er kleiner, ist das Licht an.

Aufgrund der gezeigten Zusammenhänge aus der Literatur kann während der Betriebszeiten des Gebäudes zur Ermittlung eines Lastgangs für die Beleuchtung folgender Ansatz je nach Zone gewählt werden.

- Zonen ohne Tageslichtversorgung bei Tag und Nacht: Während der Betriebszeit des Bürogebäudes ist in jedem Viertelstundenintervall in jedem Raum mit der Wahrscheinlichkeit des Präsenzfaktors das Licht an und somit die elektrische Bewertungsleistung der Beleuchtung als elektrische Leistungsaufnahme anzusetzen.
- Zonen mit Tageslichtversorgung bei Nacht: Während der Betriebszeit des Bürogebäudes ist in jedem Viertelstundenintervall in jedem Raum mit der Wahrscheinlichkeit des Präsenzfaktors das Licht an und somit die elektrische Bewertungsleistung der Beleuchtung als elektrische Leistungsaufnahme anzusetzen.
- Zonen mit Tageslichtversorgung bei Tag: Während der Betriebszeit ist das Licht mit der Wahrscheinlichkeit des Präsenzfaktors eingeschaltet, wenn der Wert der Beleuchtung nicht durch den natürlichen Lichteintrag erreicht wird. Wenn die Beleuchtung in einem Raum in mehreren Zonen separat geregelt werden kann, so ist jede Zone gesondert zu betrachten. Wird der Wert der Beleuchtung durch den natürlichen Lichteintrag erreicht, so wird das Licht ausgeschaltet.
- Außerhalb der Betriebszeit erfolgt keine Leistungsaufnahme.

Abbildung 2.24 (Sommer) Abbildung 2.25 (Winter) Abbildung 2.26 (Übergangszeit) zeigen drei Beispiellastgänge für die Beleuchtung eines Großraumbüros (Abwesenheitsfaktor = 0) mit 100 m² Fläche, einer elektrischen Bewertungsleistung von 15 W/m² und einem Tageslichtquotienten von 1. Die dahinter liegenden Globalstrahlungswerte kommen aus einem Wetterdatensatz, der mit dem Gebäudesimulationsprogramm TRNSYS erstellt wurde (Daten aus Inschlag, 2011).

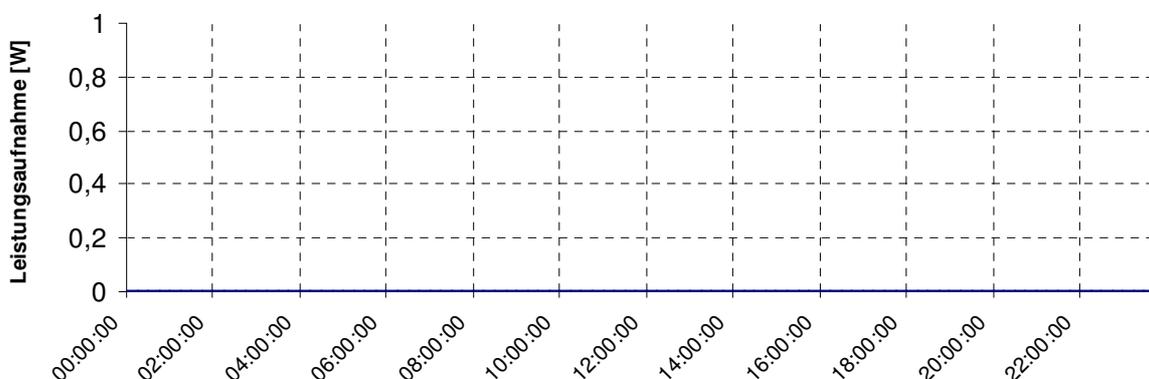


Abbildung 2.24: Theoretischer Beispiellastgang Beleuchtung Sommer (Daten aus Inschlag, 2011)

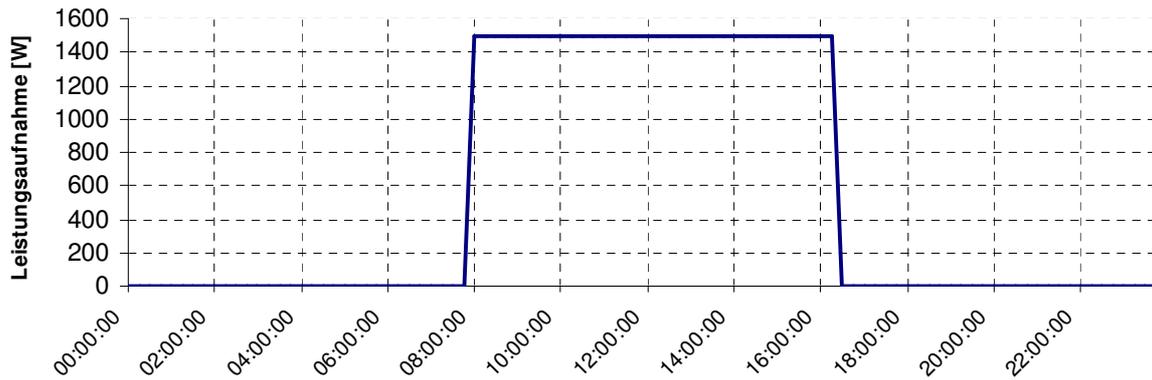


Abbildung 2.25: Theoretischer Beispiellastgang Beleuchtung Winter (Daten aus Inschlag, 2011)

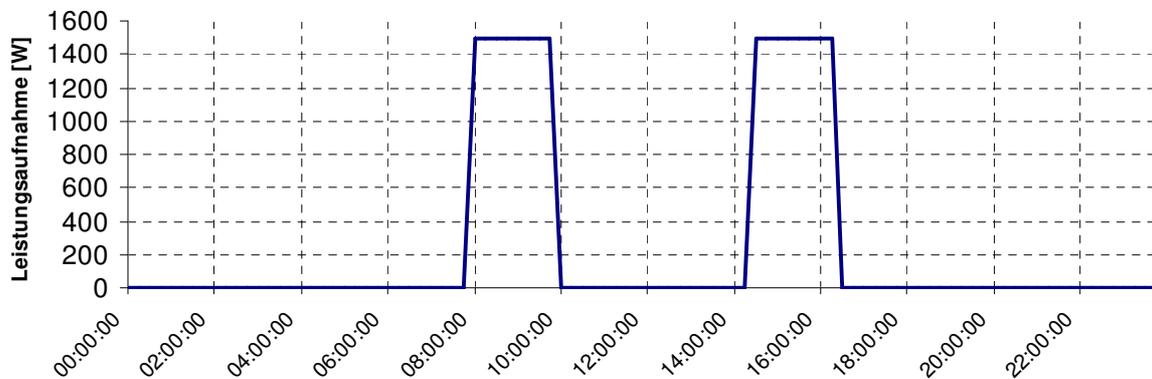


Abbildung 2.26: Theoretischer Beispiellastgang Beleuchtung Übergangszeit (Daten aus Inschlag, 2011)

Während am Sommertag keine elektrische Leistungsaufnahme durch die Beleuchtung erfolgt, ist die Beleuchtung im Winter durchgängig in Betrieb. In der Übergangszeit ist die Beleuchtung am Beginn und am Ende der Betriebszeit eingeschaltet, dazwischen ausgeschaltet.

Bei unterschiedlichen Bewölkungsgraden und somit Globalstrahlungsverhältnissen ist natürlich auch ein anderes Schaltverhalten möglich. An einem wechselhaften Sommertag ist beispielsweise für diesen Fall auch ein Tageslastgang gemäß Abbildung 2.27 möglich (Daten aus Inschlag, 2011).

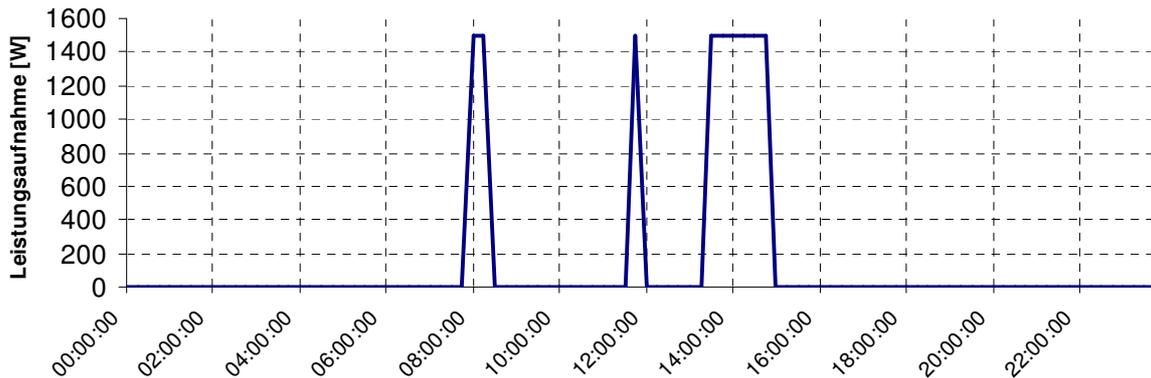


Abbildung 2.27: Beispiellastgang Beleuchtung wechselhafter Tag (Daten aus Inschlag, 2011)

Aufgrund der sich ändernden Wetterverhältnisse muss die Beleuchtung mehrmals während des Tages ein- bzw. ausgeschaltet werden.

Neben der Beleuchtung bei Betrieb der Bürogebäude wird auch die Notbeleuchtung kurz betrachtet. Die grundsätzliche Einteilung der Notbeleuchtung ist aus Abbildung 2.28 ersichtlich (ÖNORM EN 1838).

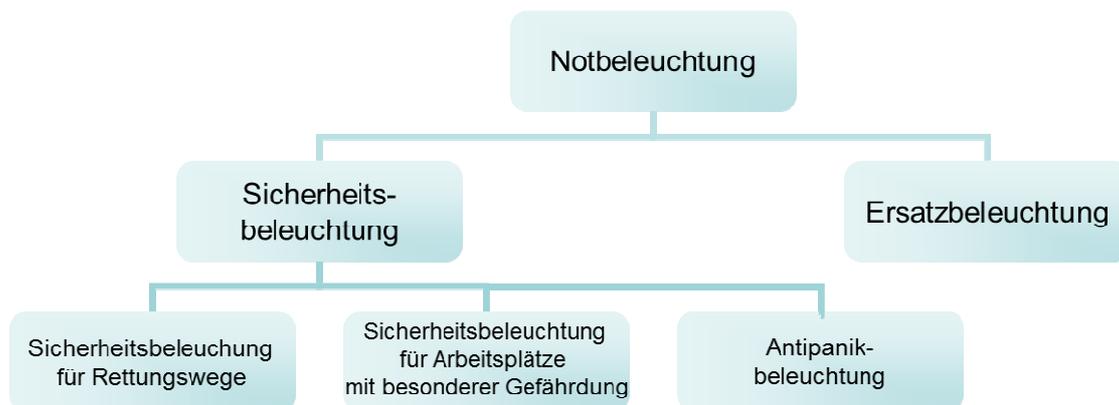


Abbildung 2.28: Einteilung der Notbeleuchtung (ÖNORM EN 1838)

Als Ersatzbeleuchtung wird dabei jene Beleuchtung bezeichnet, die das Fortsetzen der notwendigen Tätigkeiten gewährleistet (zb. Beleuchtung in Operationssälen).

Die Sicherheitsbeleuchtung ist jener Teil, der das sichere Verlassen eines Raumes oder Gebäudes ermöglichen soll bzw. der es den Personen gestatten soll, einen gefährlichen Arbeitsablauf zu beenden. In Bürogebäuden entsteht bei abrupter Unterbrechung oder Beendigung der momentanen Tätigkeit im Normalfall keine Gefahr, weswegen hier die Ersatzbeleuchtung und die „Sicherheitsbeleuchtung für Arbeitsplätze mit besonderer Gefährdung“ keine Rolle spielen. Zur Beleuchtung der Rettungswege bzw. als Antipanikbeleuchtung werden zwei verschiedene Beleuchtungsarten notwendig. Einerseits gibt es Sicherheitsleuchten als Bereitschaftslicht und Rettungszeichen als Dauerlicht. Sicherheitsleuchten müssen bei Ausfall der Normalbeleuchtung die Rettungswege während der Betriebszeiten mit mindestens 1 lx und die übrige Bodenfläche mit mindestens 0,5 lx beleuchten. Da dieser Fall im Alltag sehr selten eintreten wird, werden die Sicherheitsleuchten für die Lastgang-

analyse nicht berücksichtigt. Für Rettungszeichen gilt, dass von jedem Standort des Rettungswegs im Gebäude aus mindestens eine Rettungszeichenleuchte erkennbar sein muss. Die Ausführung der Rettungszeichenleuchten als Dauerlicht in Arbeitsstätten kann aber auch entfallen, wenn das Personal sicherheitstechnisch eingewiesen ist. Da man in Büros von diesem Fall ausgehen kann, hat auch die Rettungszeichenbeleuchtung nur bei Ausfall der Normalbeleuchtung Relevanz bezüglich des elektrischen Lastgangs und wird in der Analyse ebenfalls nicht berücksichtigt (Ruhstrat und Finke, 2010).

2.3 Peripherie

2.3.1 Allgemeines

Unter die Gruppe „Peripherie“ fallen sämtliche elektrischen Verbraucher, die in der (Warm-)Wasserversorgung und Raumluftechnik anfallen. Die Raumluftechnik wird gemäß Abbildung 2.29 eingeteilt (Schramek, 2009b).



Abbildung 2.29: Einteilung der Raumluftechnik (Schramek, 2009b)

RLT-Anlagen (Raumluftechnische Anlagen) können dabei einerseits nach der Lüftungsfunktion unterschieden werden. Bei Anlagen mit Lüftungsfunktion wird Außenluft angesaugt und nach der jeweiligen thermodynamischen Behandlung dem Raum zugeführt. Bei Anlagen ohne Lüftungsfunktion wird Luft aus dem Raum abgesaugt und diesem nach der entsprechenden Behandlung wieder zugeführt. Andererseits kann man RLT-Anlagen nach den thermodynamischen Behandlungsfunktionen einteilen. Lüftungs- oder Umluftanlagen besitzen keine oder eine der Funktionen Heizen, Kühlen, Befeuchten und Entfeuchten. Teilklima- oder Umluftteilklimaanlagen können zwei oder drei dieser Funktionen gewährleisten, während Klima- bzw. Umluftklimaanlagen alle diese Funktionen bewerkstelligen können (Schramek, 2009b).

Wenn der Luftstrom auch als Wärmetransportmedium genutzt wird, kann aufgrund der geringen spezifischen Wärmekapazität der Luft ein höherer Luftstrom notwendig sein, als für die reine Frischluftzufuhr notwendig wäre. Deshalb wird die Energie-

verteilung vieler Heiz- und Kühlsysteme mit Wasser als Energietransportmedium bewerkstelligt und die Lüftung dient nur zur Frischluftzufuhr (Hennings et al, 2000).

Bei der Verwendung von freien Lüftungssystemen muss die Wärme bzw. Kälte mit einem anderen Medium als Luft verteilt werden. Hierfür wird meist Wasser verwendet. Bei Warmwasserheizungen wird dieses (außer bei Systemen, die alleine durch den Dichteunterschied aufgrund von Temperaturunterschieden funktionieren) mit elektrischen Pumpen im Haus verteilt. Auch Kälte wird oft mit Wasser (manchmal auch mit Kältemittel) verteilt. Ist das Gebäude mit einer Raumluftechnischen Anlage ausgestattet, so erfolgt die Verteilung der Luft mit elektrisch betriebenen Ventilatoren. Wird die Energieverteilung getrennt von der Lüftung betrieben, werden sowohl Ventilatoren als auch Pumpen benötigt (Schramek, 2009b).

Elektrischer Energiebedarf muss aber nicht nur bei der Energieverteilung und Lüftung anfallen. Es gibt auch Wärme- und Kälteerzeuger, die mit elektrischer Energie betrieben werden. Neben direkten Elektroheizungen sind hier Wärmepumpen bzw. Kompressionskältemaschinen zu nennen.

2.3.2 Ventilatoren

Ventilatoren zählen zu den Strömungsmaschinen und werden zur Förderung von Gasen (meist Luft) bis zu Druckerhöhungen von etwa 30.000 Pa verwendet. Bei Druckerhöhungen von über 30.000 Pa spricht man von Verdichtern, da hier die Kompressibilität des Gases nicht mehr zu vernachlässigen ist (Schramek, 2009c).

In der Literatur sind verschiedene Varianten zur Angabe der Menge der benötigten Frischluftzufuhr in Gebäuden zu finden. Diese können sich auf den benötigten spezifischen Volumenstrom pro Person oder Fläche und Zeit (ÖNORM EN 13779, 2007) oder auf die Luftwechselzahl beziehen (ÖNORM H7500, 2006). Diese definiert sich aus Gleichung 2.48 (Schramek, 2009d):

$$n_{LW} = \frac{\dot{V}_L}{V_R} \quad (2.48)$$

n_{LW}	Luftwechselzahl [1/h]
\dot{V}_L	Luftvolumenstrom [m ³ /h]
V_R	belüftetes Volumen [m ³]

Der mittlere Außenluftvolumenstrom in gewerblichen Gebäuden wird beispielsweise im Nichtraucherbereich mit 29 m³ pro Person und Stunde angegeben (ÖNORM EN 13779, 2007). Mindestluftwechselzahlen sind in Tabelle 2.16 angeführt (ÖNORM H 7500, 2006). Der Zusammenhang ist über die Belegungsdichte und Raumhöhe gegeben.

Tabelle 2.16: Mindestluftwechselzahlen (ÖNORM H 7500, 2006)

Raumart	Luftwechselzahl [1/h]
Bewohnbarer Raum (Standardfall)	0,5
Küche mit Raumvolumen max. 20 m ³	1,0
Küche mit Raumvolumen > 20 m ³	0,5
WC oder Badezimmer	1,5
Büroraum	1,0
Lagerräume bis zu 3,0 m Raumlichte	0,5
Lagerräume über 3,0 m Raumlichte	0,33
Werkstätten privat	0,5
Werkstätten gewerblich	2,0
Verkaufsraum bis zu 30 m ²	2,0
Verkaufsraum über 30 m ²	1,0
Besprechungsraum	2,0

Die momentane Ventilatorleistung für die Lüftung errechnet sich aus Gleichung 2.49 (Hennings, 2000).

$$P_V = \frac{\dot{V}_L \cdot \Delta p_L}{\eta_V \cdot 3,6 \cdot 10^6} \quad (2.49)$$

- P_V Leistungsaufnahme Ventilator [kW]
 Δp_L Druckverlust der Lüftungsanlage, der vom Ventilator zu überwinden ist [Pa]
 η_V Wirkungsgrad Ventilator [-]

Für den Druckverlust der Lüftungsanlagen können abhängig von der Anlagenklasse die Werte laut Tabelle 2.17 angenommen werden. Zwischenwerte können interpoliert werden (Hennings, 2000).

Tabelle 2.17: Grenzwerte und Zielwerte für den Druckverlust von Lüftungsanlagen (Hennings, 2000)

Art der Anlage	Nennvolumenstrom [m ³ /h]	Grenzwert Δp [Pa]	Zielwert Δp [Pa]
Reine Abluftanlage	bis 300	250	150
	1.000	300	200
	ab 10.000	400	300
Zu- und Abluftanlage ohne Wärmerückgewinnung	1.000	600	400
	ab 10.000	800	600
Zu- und Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung	bis 300	500	300
	1.000	700	450
	ab 10.000	1000	600

Art der Anlage	Nennvolumenstrom [m ³ /h]	Grenzwert Δp [Pa]	Zielwert Δp [Pa]
Zu- und Abluftanlage mit Wärmetauschern für Kühlung bzw. Klimatisierung und Wärmerückgewinnung	3.000	1000	600
	ab 10.000	1200	900

Der Wirkungsgrad des Ventilators beinhaltet sowohl den hydraulischen Wirkungsgrad des Ventilators, als auch den Motorwirkungsgrad und den Wirkungsgrad des Antriebsstrangs. In der Literatur werden dafür Grenzwerte und Zielwerte für mittlere Wirkungsgrade abhängig vom Nennvolumenstrom gemäß Tabelle 2.18 angeführt. Zwischenwerte dürfen interpoliert werden (Hennings, 2000).

Tabelle 2.18: Grenzwerte und Zielwerte für mittlere Ventilatorwirkungsgrade (Hennings, 2000)

Nennvolumenstrom [m ³ /h]	Grenzwert η_V [-]	Zielwert η_V [-]
bis 100	0,25	0,30
300	0,30	0,40
1.000	0,50	0,55
5.000	0,55	0,60
10.000	0,60	0,65
> 15.000	0,65	0,70

Aufgrund der Teillasteigenschaften von Lüftungsanlagen mit Ventilatoren können diese mittleren Wirkungsgrade jedoch nicht grundsätzlich als konstant angenommen werden. Prinzipiell ergibt sich der Betriebspunkt des Ventilators mit dem notwendigen Volumenstrom und der Totaldruckerhöhung aus dem Schnittpunkt der Anlagen- mit der Ventilator Kennlinie. Abbildung 2.30 zeigt dies schematisch (Schramek, 2009c).

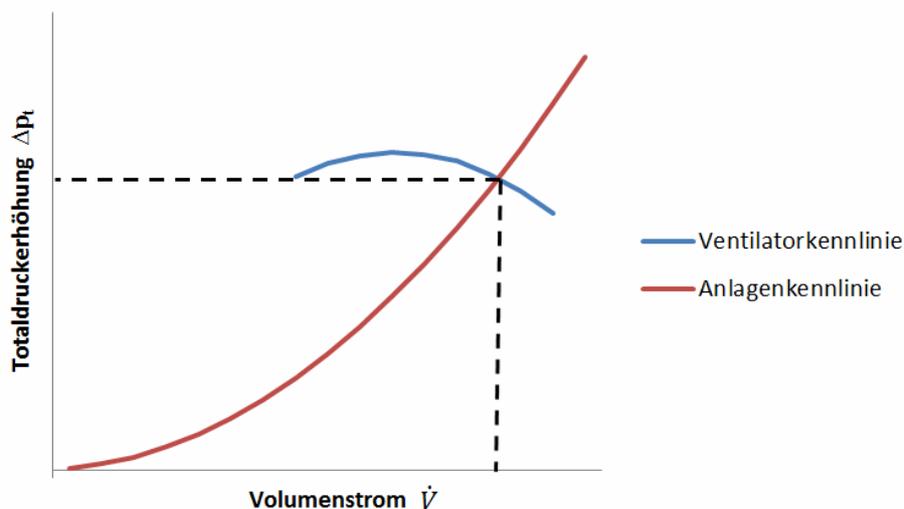


Abbildung 2.30: Betriebspunkt des Ventilators (Schramek, 2009c)

Verlängert man den Schnittpunkt zu den jeweiligen Punkten der x- oder y-Achse, so lässt sich der erforderliche Volumenstrom bzw. die erforderliche Totaldruckerhöhung ablesen. Die Ventilator Kennlinie wird hierbei vom Ventilatorhersteller ermittelt, die Anlagenkennlinie wird vom Anlagenplaner aus dem Druckverlauf der Anlage berechnet. Um den erforderlichen Nennvolumenstrom zu erreichen, muss ein Ventilator mit entsprechender Kennlinie, die sich mit der Anlagenkennlinie bei genügend großem Volumenstrom schneidet, gewählt werden (Schramek, 2009c).

Bei Teillast gibt es verschiedene Möglichkeiten, den Volumenstrom zu verringern. Je nach Möglichkeit verändert sich dann auch der Wirkungsgrad des Ventilators bei unterschiedlichen Lastbereichen (Schramek, 2009c).

Grundsätzlich kann man einen geänderten Betriebspunkt auf zwei Arten erreichen. Einerseits kann die Anlagenkennlinie, andererseits die Ventilator Kennlinie angepasst werden. Eine Änderung der Anlagenkennlinie erfolgt entweder durch Erhöhung des Widerstands mit einer verstellbaren Klappe (Drosselregelung) oder durch das Öffnen einer Klappe in einer Bypass-Leitung und die dadurch entstehende Verringerung des Widerstands (Schramek, 2009c).

Andererseits kann durch Anwendung der Drall- oder Drehzahlregelung und der Laufschaufelverstellung die Ventilator Kennlinie ständig angepasst werden. Bei der Drallregelung wird mit einem verstellbaren Vorleitrad die Anströmung auf den Ventilator so verändert, dass sich die Volumenströme und Druckerhöhungen durch den Ventilator ebenfalls ändern. Die Drehzahlregelung erfolgt über den Antriebsmotor des Ventilators entweder stufenlos mit Frequenzumformern oder in Stufen mit einem polumschaltbaren Drehstrommotor. Bei der Laufschaufelverstellung können die Schaufelwinkel des (Axial-)Ventilators synchron verstellt werden, wodurch sich ebenfalls Volumenstrom und Druckerhöhung ändern lassen. Je nach Art der Regelung ändert sich auch das Teillastverhalten von Ventilatoren. Abbildung 2.31 zeigt schematisch den Verlauf des Leistungsbedarfs von Ventilatoren in Abhängigkeit vom Volumenstrom bei verschiedenen Regelmethode(n) (Schramek, 2009c).

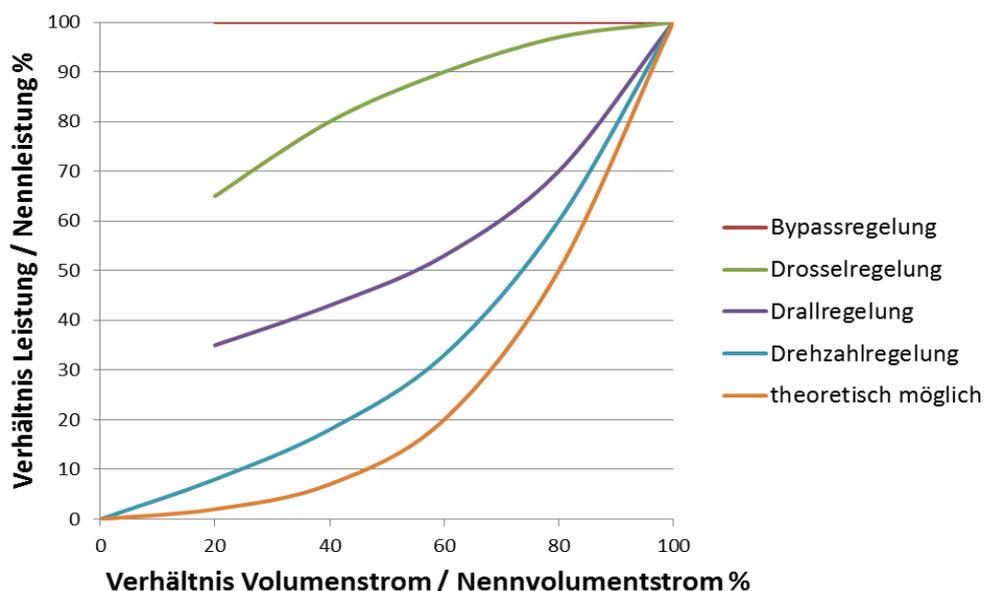


Abbildung 2.31: Leistungsbedarf bei verschiedenen Regelmethode(n) (Schramek, 2009c)

Das theoretisch mögliche Teillastverhalten wird bestimmt durch den Zusammenhang, dass die Leistung nach Bernoulli direkt proportional mit der dritten Potenz des Volumenstroms ist. Am ehesten folgt noch die Drehzahlregelung diesem theoretischen Maximum. Es sind dabei vor allem die elektrischen Verluste ausschlaggebend. Die Laufschaufelverstellregelung kann im Verlauf wie die Drehzahlregelung angenommen werden, wobei hier jedoch hydraulische Verluste entscheidend sind. Die Drallregelung ist im oberen Leistungsbereich ähnlich der Drehzahl- oder Laufschaufelregelung, zeigt darunter (unter etwa 85 % des Nennvolumenstroms) jedoch deutliche Einbußen. Die Drossel- und Bypassregelung ist wie aus dem Diagramm ersichtlich im Teillastbereich sehr verlustbehaftet und wird deswegen kaum mehr eingesetzt. Um das Teillastverhalten der jeweils eingesetzten Ventilatoren genau beurteilen zu können, ist die Kenntnis über den Leistungsbedarf im jeweiligen Leistungsbereich notwendig (Schramek, 2009c). Für die weiteren Betrachtungen des Lastgangs der Lüftung wird die Drehzahlregelung oder die Regelung mittels Laufschaufelverstellung vorausgesetzt. Es wird als hinreichend genau erachtet, für den Wirkungsgrad in Gleichung 2.49 die Grenz- oder Zielwerte für die mittleren Wirkungsgrade aus Tabelle 2.18 zu verwenden.

Die Luftwechselzahl kann laut Norm auch unabhängig von Vorgaben anhand der maximalen Konzentration der Schadstoffe im Raum bestimmt werden. Diese können verschiedenster Natur sein (zb. Tanks in Lagerräumen) (ÖNORM EN 13779, 2007). Bei Bürogebäuden ist anzunehmen, dass die Schadstoffemissionen nur vorkommen, wenn sich Menschen im Gebäude befinden (Atmung, Feuchtigkeit durch Transpiration, Kochgerüche). Dies ist während der Betriebszeiten der Fall. Deshalb kann die Lüftung zur Aufrechterhaltung der Luftqualität außerhalb dieser Zeiten ausgeschaltet werden. Wird die Luft als Wärmetransportmedium genutzt, kann trotzdem Lüftungsbetrieb außerhalb der Nutzungszeit notwendig sein. Die dann notwendige Luftmenge kann über Gleichung 2.50 errechnet werden und in Gleichung 2.49 eingesetzt werden. Über die Dichte der Luft lässt sich der notwendige Volumenstrom für die thermische Last berechnen. Dieser kann auch während des Tages größer sein als die Luftmenge, die laut Norm für Lüftungszwecke notwendig ist. Wird die Lüftungsanlage auch für den Wärmetransport verwendet, ist für jeden Zeitpunkt der größere der beiden Werte anzusetzen (Hennings, 2000).

$$\dot{V}_L = \frac{\dot{m}_L}{\rho_L} = \frac{\dot{Q} \cdot 3600}{c_{p,L} \cdot dT_L \cdot \rho_L} \quad (2.50)$$

\dot{V}_L	Luftvolumenstrom [m ³ /h]
\dot{m}_L	Massenstrom Luft [kg/s]
ρ_L	Dichte Luft im jeweiligen Zustand [kg/m ³]
\dot{Q}	Heiz- oder Kühlleistung [kW]
$c_{p,L}$	Spezifische Wärmekapazität der Luft im jeweiligen Zustand [kJ/kgK]
dT_L	Temperaturunterschied zwischen Zuluft und Raumlufte [K]

Im Folgenden wird gezeigt, wie der elektrische Lastgang für die Ventilation bei einem Gebäude, bei dem der Wärmetransport nicht über die Lüftung bewerkstelligt wird, modelliert werden kann. Es wurde von einem Bürogebäude mit einer Nutzungsfläche von 1.000 m² und einer Raumhöhe von 2,80 m ausgegangen. Somit beträgt das zu belüftende Volumen 2.800 m³. Die Luftwechselzahl für Büroräume beträgt laut

Tabelle 2.16 1,0. Somit beträgt der benötigte Volumenstrom bei Anwesenheit $2.800 \text{ m}^3/\text{h}$. Aus Tabelle 2.17 ist ersichtlich, dass der Zielwert für den Druckverlust von Zu- und Abluftanlagen mit Wärmerückgewinnung bei einem Volumenstrom von $1.000 \text{ m}^3/\text{h}$ 450 Pa und bei einem Volumenstrom von $10.000 \text{ m}^3/\text{h}$ 600 Pa beträgt. Da zwischen diesen Werten interpoliert werden darf, ergibt sich durch Anwendung der linearen Interpolation ein Druckverlust von 480 Pa beim Volumenstrom von $2.800 \text{ m}^3/\text{h}$. Durch analoge Vorgehensweise ergibt sich für den Ventilatorwirkungsgrad laut Tabelle 2.18 ein Wert von $0,5725$. Setzt man diese Werte in Gleichung 2.49 ein, so ergibt sich eine Leistungsaufnahme für den Ventilator von $\sim 652 \text{ W}$. Bei einer Anwesenheitszeit von $8,5 \text{ h}$ (Acht Stunden Arbeitszeit und eine halbe Stunde Mittagspause) ergibt sich somit ein Lastgang gemäß Abbildung 2.32.

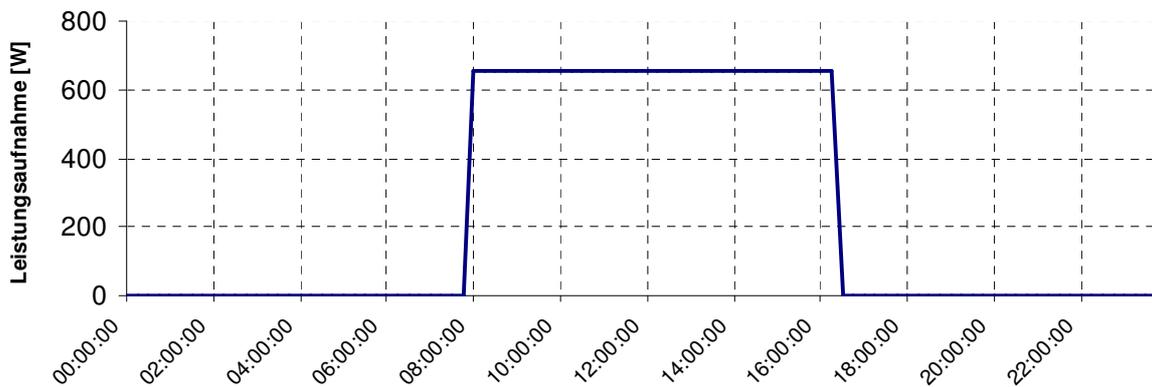


Abbildung 2.32: Theoretischer Beispiellastgang für eine Zu- und Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung (Daten aus Hennings, 2000)

Wird der Wärmetransport auch über die Lüftung bewerkstelligt, so kann sich der elektrische Lastgang des Ventilators auch anders darstellen. Für jedes Viertelstundenintervall muss die benötigte Heiz- oder Kühlleistung bekannt sein. Diese hängt von vielen Faktoren ab und wird oft durch Gebäudesimulationen ermittelt. Für den elektrischen Lastgang der Lüftung ist dann der benötigte Luftvolumenstrom zum Transport von Wärme- bzw. Kälte mit dem benötigten Frischluftvolumenstrom gemäß Tabelle 2.16 bzw. Gleichung 2.48 zu vergleichen. Durch Umformen und Einsetzen in Gleichung 2.50 lässt sich zum Beispiel feststellen, dass bei einem Temperaturunterschied von fünf Grad bei dem Volumenstrom von $2.800 \text{ m}^3/\text{h}$ folgende maximale Wärme- bzw. Kälteleistung zu erreichen ist (Hennings, 2000):

$$\dot{Q} = \frac{\dot{V}_L \cdot c_{p,L} \cdot dT \cdot \rho_L}{3600} = \frac{2800 \cdot 1,006 \cdot 5 \cdot 1,29}{3600} \approx 5 \text{ kW}$$

In der Berechnung wurde die spezifische Wärmekapazität von Luft mit $1,006 \text{ kJ/kgK}$ und die Dichte mit $1,29$ angenommen. Dies entspricht den Normbedingungen bei 0°C und $1,013 \text{ bar}$ (Schramek, 2009e). Ebenso gelten diese Werte nur für trockene Luft. Auf Grund der unterschiedlichen Stoffwerte von Luft und Wasserdampf ändern sich bei feuchter Luft sowohl die Dichte als auch die spezifische Wärmekapazität abhängig vom Wassergehalt der Luft. Bei steigendem Wassergehalt sinkt die Dichte, die spezifische Wärmekapazität steigt (Schramek, 2009f).

Übersteigt nun die momentan notwendige thermische Leistung diese 5 kW, so wäre bei diesem Beispiel der Luftvolumenstrom zu erhöhen, womit die elektrische Leistungsaufnahme gemäß Gleichung 2.49 ebenfalls steigt. Zudem treten thermische Lasten auch außerhalb der Nutzungszeit des Gebäudes auf. Deswegen ist hier auch ohne genaue Kenntnis des thermischen Lastgangs des Gebäudes anzunehmen, dass die Lüftung vor allem in der Heizperiode auch außerhalb der Nutzungszeiten im jeweilig notwendigen Ausmaß gemäß Gleichung 2.50 betrieben werden muss.

Es lassen sich somit für den Lastgang der Ventilatoren folgende Einflussfaktoren aus den angeführten Quellen identifizieren:

- Nutzungszeit des Gebäudes
- Luftwechselzahl bzw. benötigter Zuluftvolumenstrom für Frischluft oder Klimatisierung
- Druckverlust der Anlage
- Ventilatorwirkungsgrad
- Art der Regelung der Anlage

2.3.3 Pumpen

Pumpen sind ebenfalls Strömungsmaschinen, transportieren aber im Gegensatz zu den Ventilatoren nicht Gase sondern Flüssigkeiten (meist Wasser). Dies kann für Heiz- oder Kühlzwecke im Gebäude verteilt werden. Der Betriebspunkt liegt bei Pumpen ebenso wie bei Ventilatoren im Schnittpunkt zwischen Anlagenkennlinie und der Kennlinie des Geräts (hier der Pumpenkennlinie). Auf der Ordinate wird hier allerdings üblicherweise nicht die Totaldruckerhöhung, sondern die Förderhöhe im System aufgetragen. Abbildung 2.33 zeigt das Beispiel eines Diagramms für eine Pumpen-Anlagenkennlinie. In der Gebäudetechnik wird oft das Formelzeichen Q für den von Pumpen geförderten Volumenstrom verwendet. Dies trifft insbesondere auf die aus der Literatur übernommenen Abbildungen zu. Im Zuge dieser Arbeit werden für den von Pumpen geförderten Volumenstrom daher die Formelzeichen „ \dot{V}_w “ und „ Q “ gleichwertig verwendet. Diagramme, die den Betriebspunkt der Pumpe widerspiegeln werden auch als Q-H-Diagramme bezeichnet. Auf der x-Achse ist der Volumenstrom und auf der y-Achse die Förderhöhe, die proportional zum Druckverlust ist, eingezeichnet. (Skovgaard und Nielsen, 2004).

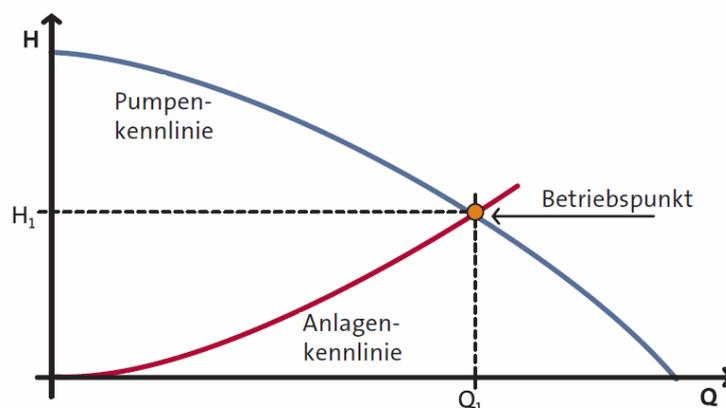


Abbildung 2.33: Betriebspunkt der Pumpe (Skovgaard und Nielsen, 2004)

Da es sich hier wie beim Ventilator ebenfalls um eine Strömungsmaschine handelt, gilt für die momentane Pumpenleistung eine um die jeweiligen Werte von Wasser ergänzte Abwandlung von Gleichung 2.49. Gleichung 2.51 zeigt die Berechnung der momentanen Leistungsaufnahme der Pumpe (Hennings, 2000).

$$P_p = \frac{\dot{V}_w \cdot \Delta p_R}{\eta_p \cdot 3,6 \cdot 10^6} \quad (2.51)$$

P_p	Leistungsaufnahme Pumpe [kW]
Δp_R	Druckverlust der Rohrleitungen, der von der Pumpe zu überwinden ist [Pa]
η_p	Wirkungsgrad Pumpe [-]
\dot{V}_w	Volumenstrom Wasser [m ³ /h]

Bei Pumpen unterscheidet man in der Gebäudetechnik im Normalfall zwischen Umwälzpumpen und Warmwasserzirkulationspumpen. Umwälzpumpen dienen dazu, das Heiz- oder Kühlmedium mit dem geforderten Volumenstrom durch die dafür vorgesehenen Einrichtungen zu transportieren. Während des Transports durch diese Einrichtungen erfolgt eine Wärmeabgabe (Heizen) oder Wärmeaufnahme (Kühlen) und das Medium kommt mit einer anderen Temperatur wieder zum Wärme- oder Kälteerzeuger zurück, wo es wieder auf die gewünschte Vorlauftemperatur gebracht wird (Hennings, 2000).

Wenn Warmwasser im Trinkwassernetz stagniert, kühlt es ab und man muss eine große Menge abgekühltes Wasser zapfen, bis das warme Wasser aus dem Wärmeerzeuger nachkommt. Um dieses Problem zu lösen, sind verschiedene Strategien möglich. Neben einer dezentralen Warmwassererzeugung ist es möglich, eine Zirkulationsleitung zu installieren. In dieser wird das Wasser in der Regel mittels elektrischen Pumpen, seltener durch natürlichen Umlauf, in Zirkulation gehalten und kommt somit immer wieder zum Wärmeerzeuger zurück und wird dort wieder erwärmt. Es ist aber auch möglich, das Wasser mit elektrischen Rohrheizungen auf Temperatur zu halten. Diese Möglichkeit wird in Kapitel 2.3.9 behandelt (Schramek, 2009g).

Anlagen, die Wasser (oder andere Flüssigkeiten) als Wärmetransportmedium verwenden (für Heizen oder Kühlen) können unterschiedlich geregelt werden. Für den benötigten Volumenstrom gilt hier wieder ähnlich wie Gleichung 2.50 bei der Lüftung die Gleichung 2.52 (Hennings, 2000).

$$\dot{V}_w = \frac{\dot{m}_w}{\rho_w} = \frac{\dot{Q} \cdot 3600}{c_w \cdot dT_w \cdot \rho_w} \quad (2.52)$$

\dot{m}_w	Massenstrom Wasser [kg/s]
ρ_w	Dichte Wasser [kg/m ³]
\dot{Q}	Heiz- oder Kühlleistung [kW]
$c_{p,w}$	Spezifische Wärmekapazität des Wassers [kJ/kgK]
dT_w	Temperaturunterschied zwischen Vorlauf und Rücklauf [K]

Unter der Voraussetzung, dass die Dichte sowie die spezifische Wärmekapazität des Wassers bei Anlagen, die Wasser als Wärmetransportmedium nutzen, konstant bleiben, lässt sich die Regelung der Anlage auf zwei Arten durchführen. Um zur gewünschten Leistung zu gelangen, kann man entweder den Volumenstrom oder die Temperatur verändern. Ändert man stets nur die Temperatur, so bleibt der Volumenstrom und somit die Leistungsaufnahme der Pumpe (Gleichung 2.51) konstant. Ändert man hingegen den Volumenstrom, so gibt es auch hier, analog zum Ventilator, verschiedene Regelstrategien, dies zu bewerkstelligen. Diese sollen anhand eines Beispiels erklärt werden. Es wird von einem Förderstrom im Ausgangspunkt von $60 \text{ m}^3/\text{h}$ und einer Förderhöhe von 70 m ausgegangen. Der Förderstrom soll anhand der jeweiligen Regelungsmethode auf $50 \text{ m}^3/\text{h}$ gesenkt und die jeweilige Leistungsaufnahme der Pumpe ermittelt werden (Skovgaard und Nielsen, 2004).

Bei einem System mit Drosselregelung wird ein Ventil in Reihe zur Pumpe geschaltet. Abbildung 2.34 zeigt die dabei entstehenden Effekte (Skovgaard und Nielsen, 2004).

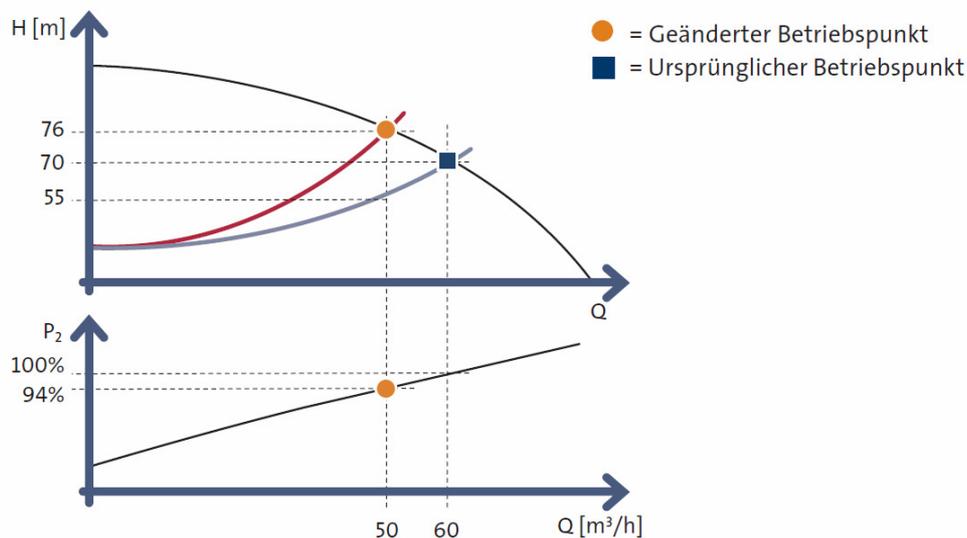


Abbildung 2.34: Leistungsaufnahme bei Drosselregelung (Skovgaard und Nielsen, 2004)

Im Q-H-Diagramm ist zu sehen, dass sich durch die Schaltung – ähnlich der Drosselregelung beim Ventilator – die Anlagenkennlinie ändert und sich ein neuer Betriebspunkt entlang der Pumpenkennlinie ergibt. Dadurch ändern sich für die Berechnung der Pumpenleistung nach Gleichung 2.51 drei Parameter. Die Förderhöhe steigt in diesem Beispiel gemäß dem neuen Schnittpunkt zwischen Pumpen- und Anlagenkennlinie auf 76 m . Das zu fördernde Volumen sinkt auf $50 \text{ m}^3/\text{h}$. Durch die hydraulischen Verluste, die durch die Drosselregelung entstehen, sinkt aber auch der Wirkungsgrad des Systems aus Pumpe und Drossel, wodurch die Leistungsaufnahme der Pumpe in diesem Fall nur auf 94% der ursprünglichen Leistung sinkt. Das heißt, die Leistungsaufnahme im Teillastbereich sinkt nur in geringem Ausmaß, der für die weiteren Betrachtungen vernachlässigt wird (Skovgaard und Nielsen, 2004).

Die Bypassregelung funktioniert nach dem gleichen Prinzip, wie beim Ventilator. Wird das Bypassventil geöffnet, wird der Volumenstrom, der durch die Pumpe gefördert wird, durch eine Absenkung der Förderhöhe erhöht. Da jedoch ein Teil des Volumenstroms über den Bypass zurück fließt, sinkt der Volumenstrom, der das System aus Pumpe und Bypass verlässt. Abbildung 2.35 zeigt diesen Effekt (Skovgaard und Nielsen, 2004).

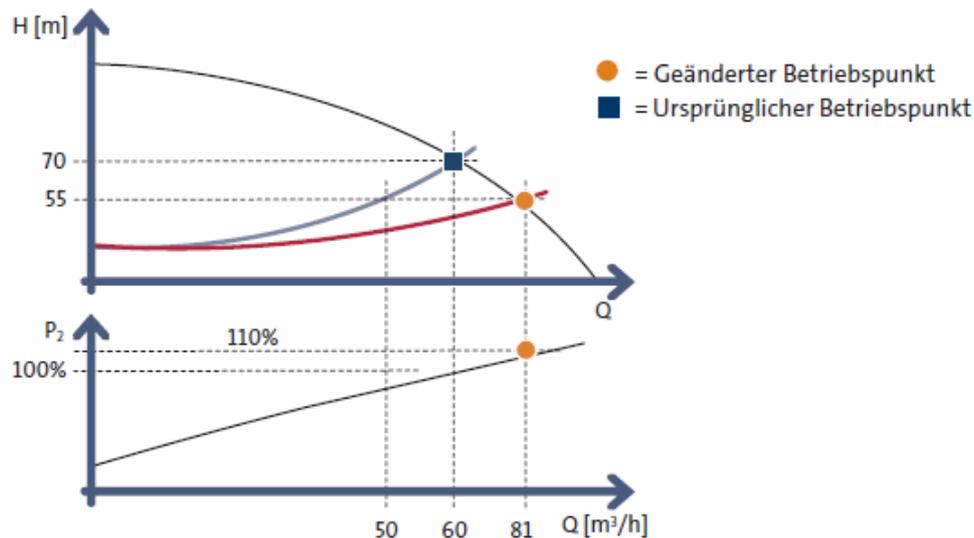


Abbildung 2.35: Leistungsaufnahme bei Bypassregelung (Skovgaard und Nielsen, 2004)

Für das gewählte Beispiel ergibt sich trotz der Absenkung des Volumenstroms eine Erhöhung der aufzunehmenden Leistung. Die Stärke des Anstiegs hängt vom Typ und Betriebspunkt der Pumpe ab. Es ist auch möglich, dass die Leistungsaufnahme bei reduziertem Volumenstrom gleich bleibt oder geringfügig sinkt (Skovgaard und Nielsen, 2004). Da eine genaue Aussage nicht möglich ist und sich keine großen Veränderungen ergeben, kann die Leistungsaufnahme bei der Bypassregelung auch als konstant angenommen werden (Skovgaard und Nielsen, 2004).

Auch bei Pumpen ist die effizienteste Regelung die Drehzahlregelung mittels Frequenzumrichter. Durch Änderung der Drehzahl ergibt sich eine neue Förderhöhe und ein neuer Volumenstrom. Bei Senkung der Drehzahl wird die Kennlinie etwas flacher, die Förderhöhe ändert sich stärker als der Förderstrom. Abbildung 2.36 zeigt die Kennlinien einer drehzahlgeregelten Pumpe bei Reduzierung des Volumenstroms von 60 auf 50 m^3/h (Skovgaard und Nielsen, 2004).

Bei der Reduktion des Volumenstroms auf 50 m^3/h sinkt die Leistungsaufnahme auf rund 65 % des ursprünglichen Wertes. Die zu überwindende Förderhöhe reduziert sich auf 55 m (Skovgaard und Nielsen, 2004).

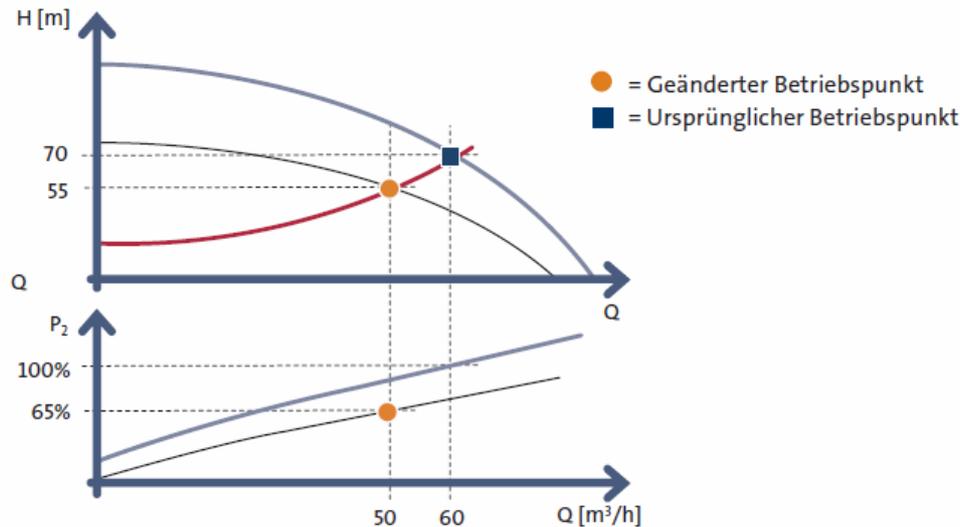


Abbildung 2.36: Leistungsaufnahme bei Drehzahlregelung (Skovgaard und Nielsen, 2004)

Generell ergibt sich ein proportionaler Zusammenhang zwischen Volumenstrom und Pumpendrehzahl. Die Förderhöhe und das Quadrat der Drehzahl sowie die Leistung und die dritte Potenz der Drehzahl sind annähernd proportional. Die Proportionalität ist nicht zu 100 % gegeben, da sich der Wirkungsgrad der Pumpe im Teillastbereich nach Gleichung 2.53 verringert (Skovgaard und Nielsen, 2004).

$$\eta_x = 1 - (1 - \eta_n) \cdot \left(\frac{\dot{V}_{W-n}}{\dot{V}_{W-x}} \right)^{0,1} \quad (2.53)$$

η_x	Wirkungsgrad bei einer Auslastung von x [-]
η_n	Wirkungsgrad bei Nennlast [-]
\dot{V}_{W-n}	Nennvolumenstrom [m ³ /h]
\dot{V}_{W-x}	Volumenstrom bei einer Auslastung von x [m ³ /h]

Bei Umwälzsystemen mit veränderlichem Volumenstrom sind drehzahlgeregelte Pumpen Standard (Schramek, 2009h). Hier kann aus Gleichung 2.52 der notwendige Volumenstrom für jeden Zeitpunkt ermittelt werden. Für jeden Viertelstundenintervall muss wieder die benötigte Heiz- oder Kühlleistung bekannt sein (zb. durch vorherige Simulation des thermischen Gebäudeverhaltens). Die Pumpenleistung jedes Viertelstundenmittelwertes kann dann aus Gleichung 2.51 ermittelt werden. Dabei ist für den Wirkungsgrad der jeweilige Wert aus Gleichung 2.53 einzusetzen, wobei der Wirkungsgrad bei Nennleistung aus dem Datenblatt der Pumpe zu entnehmen ist. Die Förderhöhe bei Nennleistung wird im Normalfall bei der Anlagenplanung errechnet. Näherungsweise können auch die Werte aus Tabelle 2.19 verwendet werden (Schramek, 2009h).

Tabelle 2.19: Mittlere Förderdrücke (Schramek, 2009h)

Kategorie	von [bar]	bis [bar]
Anlagen bis 50 kW	0,05	0,3
Anlagen von 50 bis 100 kW	0,2	0,5
Anlagen über 100 kW	0,5	1,0
Waagrechte Netzausdehnung 100 m	0,1	0,2
Waagrechte Netzausdehnung 500 m	0,4	0,6
Waagrechte Netzausdehnung 1.000 m	0,6	1,2

Bei Werten, die von der Nennleistung abweichen, kann zur Berechnung des Drucks die Proportionalität gemäß Gleichung 2.54 genutzt werden (Schramek, 2009h).

$$\left(\frac{\Delta p_n}{\Delta p_x} \right) = \left(\frac{\dot{V}_{W-n}}{\dot{V}_{W-x}} \right)^2 \quad (2.54)$$

- Δp_n Druckverlust bei Nennlast [Pa]
- Δp_x Druckverlust bei einer Auslastung von x [Pa]
- \dot{V}_{W-n} Nennvolumenstrom [m³/h]
- \dot{V}_{W-x} Volumenstrom bei einer Auslastung von x [m³/h]

Bei Umwälzpumpen in Systemen mit konstantem Volumenstrom kann hingegen von einer gleichmäßigen Leistungsaufnahme ausgegangen werden. Dabei wird die Drossel- bzw. Bypassregelung im Normalfall zum einmaligen Einstellen eines fixen Betriebspunktes oder drehzahlgergelte Pumpen, die in einem konstanten Bereich arbeiten, verwendet. Ist der Betriebspunkt eingestellt, so arbeitet die Pumpe bei Bedarf unter konstanten Bedingungen und ist ausgeschaltet, wenn kein Bedarf besteht. Da meist keine Pumpen mit genau den erforderlichen Eigenschaften hinsichtlich Förderhöhe und Fördermenge erhältlich sind, werden Pumpen stets überdimensioniert und es ist eine Leistungsbeschränkung in einer der beschriebenen Formen notwendig (Skovgaard und Nielsen, 2004). Aufgrund der zuvor beschriebenen Eigenschaften bei Drossel- und Bypassregelung wird näherungsweise davon ausgegangen, dass die Pumpen bei konstantem Volumenstrom im Bereich der Nennleistung betrieben werden.

Wärme- und Kälteverteilsysteme können unterschiedlichste Rohrführungen und hydraulische Formen annehmen. Oft gibt es dabei auch eine hydraulische Entkopplung zwischen Heizkreis und Verbraucherkreis. Dabei ist darauf zu achten, dass jeder Kreis separat zu betrachten ist. Ist zwischen den Kreisen beispielsweise ein Wärme- oder Kältespeicher geschaltet, so ist die Wärmeerzeugung vom Verbrauch zeitlich weitgehend unabhängig. Dieser Tatsache ist bei der Betrachtung der Lastgänge der Pumpen Rechnung zu tragen (Schramek, 2009h).

Der Lastgang von Umwälzpumpen hängt somit von aus vorheriger Literatur identifizierten folgenden Eigenschaften ab:

- Thermischer Lastgang des Gebäudes
- Druckverlust der Anlage (Förderhöhe)
- Pumpenwirkungsgrad
- Art der Regelung der Anlage
- Art der Regelung der Pumpe
- Hydraulische Verschaltung der Anlage
- Verwendung von Speicher

Für die Warmwasserzirkulation wird im Normalfall ebenfalls eine Pumpe verwendet. Die Leitungen für die Zirkulation werden dabei parallel zu den Warmwasserleitungen gelegt. Dabei müssen sowohl die Warmwasserleitungen als auch die Zirkulationsleitungen wärmegeämmt sein. Eine andere Möglichkeit sind Rohr-in-Rohr Systeme, bei dem sich die Zirkulationsleitung innerhalb der Warmwasserleitung befindet. Die Kennwerte für die Zirkulationsleitung und somit auch das Verhalten der Pumpe können durch verschiedene Verfahren ermittelt werden. An dieser Stelle wird das vereinfachte Verfahren verwendet (Schramek, 2009i).

Die Wärmeverluste der Warmwasserleitung werden durch die Temperatur des Warmwassers, der Umgebungstemperatur und der Wärmedurchgangszahl der Wasserleitungen bestimmt. Unter Annahme von Richtwerten (Warmwassertemperatur 60°C, Umgebungstemperatur 5°C (Keller) bzw. 25°C (Installationsschacht), Wärmedurchgangszahl 0,2 W/mK) ergibt sich ein Wärmestrom von 11 W/m für im Keller verlegte Leitungen bzw. 7 W/m für im Schacht verlegte Leitungen. Bei Leitungen im Deckenbereich kann der niedrigere Wert, bei Leitungen in Unterdecken der höhere Wert angesetzt werden. Somit ergibt sich der Wärmeverlust der Warmwasserleitungen aus der Summe der Leitungslängen multipliziert mit dem jeweils anzusetzenden Wärmestrom. Für den Gesamtumlauf (Warmwasserleitung und Warmwasserzirkulationsleitung) soll die Abkühlung nicht über 5 K liegen. Unter Berücksichtigung einer Sicherheit kann daher angenommen werden, dass alleine über die Warmwasserleitung kein größerer Temperaturunterschied als 2 K auftreten soll. Somit lässt sich der notwendige Förderstrom der Zirkulationspumpe nach Gleichung 2.55 berechnen (Schramek, 2009i).

$$\dot{V}_{ww} = \frac{\dot{m}_{ww}}{\rho_{ww}} = \frac{\dot{Q}_{ww} \cdot 3600}{c_{ww} \cdot dT_{ww} \cdot \rho_{ww}} \quad (2.55)$$

\dot{V}_{ww}	Förderstrom der Zirkulationspumpe [m ³ /h]
\dot{m}_{ww}	Massenstrom Warmwasser [kg/s]
ρ_{ww}	Dichte Wasser [kg/m ³]
\dot{Q}_{ww}	Wärmestrom der Warmwasserleitung [kW]
c_{ww}	Spezifische Wärmekapazität des Wassers [kJ/kgK]
dT_w	Abkühlung des Trinkwassers = 2 K

Der dadurch ermittelte Wert kann wiederum in die Gleichung für die Pumpenleistung (Gleichung 2.51) eingesetzt werden. Der Druckverlust zur Berechnung der Pumpenleistung wird für den ungünstigsten Zirkulationsweg (im Normalfall der längste Umlauf) angesetzt und ergibt sich aus der Summe der Druckverluste durch Reibung in den Rohren bzw. der Einzelwiderstände der Apparate in den Warmwasserleitungen und der Zirkulationsleitung. Er kann mit der Gleichung 2.56 und den entsprechenden Werten aus den Datenblättern der Installationen ermittelt werden (Schramek, 2009i).

$$\Delta p_R = 1,3 \cdot \sum l \cdot R + \Delta p_{RV} + \Delta p_{TH} + \Delta p_{Ap} \quad (2.56)$$

Δp_R	Druckverlust der Rohrleitungen, der von der Pumpe zu überwinden ist [Pa]
l	Länge einer Teilstrecke
R	Druckgefälle für die Rohrreibung [Pa/m]
Δp_{RV}	Druckverlust des Rückflussverhinderers nach Herstellerangaben [Pa]
Δp_{TH}	Druckverlust des thermostatischen Zirkulationsregulierventils nach Herstellerangaben [Pa]
Δp_{RV}	Druckverlust in den Apparaten (zb. externe Wärmeübertragung zur Deckung der Wärmeverluste im Zirkulationssystem) [Pa]

Der Wirkungsgrad der Zirkulationspumpe bei Nennleistung kann aus dem Datenblatt entnommen werden. Bei Auslegung der Pumpe in Teillast kann dann je nach Art der Regelung der Wirkungsgrad ermittelt werden (Drehzahlregelung) bzw. die Leistung als konstant bei Nennleistung angenommen werden (Drossel bzw. Bypassregelung) (Skovgaard und Nielsen, 2004). Die Leistungsaufnahme kann aufgrund der Temperaturvorgabe (Abkühlung des Wassers um maximal 2 K) und des konstanten Wärmestroms ebenfalls als konstant angenommen werden (Schramek, 2009i).

2.3.4 Elektrische Widerstandsheizungen

Elektrische Widerstandsheizungen wandeln den dafür eingesetzten Strom theoretisch zu 100 % in Wärme um. Es können lediglich Verteilungsverluste entstehen. Es gibt dabei Direktheizungen, bei denen die Wärmeenergie in dem Moment zur Verfügung steht, in dem elektrischer Strom durch den Widerstand geleitet wird. Zum anderen gibt es Speicherheizungen, die zusätzlich in der Lage sind, Wärmeenergie zu speichern. Aufgeladen werden diese Speicher meistens in der Nacht, zu Zeiten geringen Strombedarfs. Teilweise bieten Stromlieferanten eigene Nachtstromtarife für solche „Nachtspeicherheizungen“ an. Direktheizungen und Speicherheizungen haben jedenfalls die Gemeinsamkeit, dass pro eingesetzter Einheit elektrischer Energie eine Einheit thermischer Energie entsteht. Bei der Direktheizung bestimmt somit der thermische Lastgang den elektrischen Lastgang bzw. deckt sich mit diesem. Bei Speicherheizungen kommt ein Zwischenspeicher zum Einsatz. Der Einfluss von Zwischenspeichern wird in Kapitel 2.5.4 behandelt (Frey et al, 2007).

2.3.5 Wärmepumpe

Wärmepumpen dienen dazu, nicht nutzbare Umgebungswärme durch Einbeziehung von Arbeit auf ein höheres, nutzbares Temperaturniveau zu bringen. Dabei wird die in Luft, Wasser oder im Erdreich vorhandene Umgebungswärme genutzt. Je nachdem spricht man auch von Luft-, Wasser- oder Solewärmepumpen. Grundsätzlich unterscheidet man außerdem zwischen Kompressionswärmepumpen und Sorptionswärmepumpen (Schramek, 2009h).

Kompressionswärmepumpen erbringen die zur Erhöhung des Temperaturniveaus notwendige Arbeit meist in Form von elektrischer Energie (Elektromotor), seltener mit Gas- oder Dieselmotoren. Elektrisch betriebene Wärmepumpen haben naturgemäß einen Einfluss auf den elektrischen Lastgang des Gebäudes. Die Wärmemenge, die durch den Prozess nutzbar gemacht wird, beträgt im Gegensatz zur elektrischen Widerstandsheizung ein Vielfaches der elektrisch eingesetzten Energie. Der Faktor, der dieses Verhältnis beschreibt, ist die Leistungszahl und wird bei elektrisch betriebenen Kompressionswärmepumpen nach Gleichung 2.57 definiert (Schramek, 2009h).

$$\varepsilon_w = \frac{\text{Nutzwärmeabgabe}}{\text{aufgenommene elektrische Antriebsleistung}} = \frac{\dot{Q}_0 + a \cdot P}{P} = \frac{\dot{Q}_c}{P} \quad (2.57)$$

ε_w	Leistungszahl der Kompressionswärmepumpe [-]
\dot{Q}_0	Verdampferleistung bzw. Wärmeleistung, die der Umgebung entzogen wird [kW]
a	Anlagenfaktor (=0,9) [-]
P	Elektrische Antriebsleistung [kW]
\dot{Q}_c	Wärmeabgabe am Verflüssiger [kW]

Die Nutzwärmeabgabe, die dabei entsteht, entspricht, wie aus der Gleichung ersichtlich ist, der Summe der Wärme, die aus der Umgebung entzogen wird und der mit dem Anlagenfaktor multiplizierten elektrischen Antriebsleistung. Formt man die Gleichung um, so ergibt die elektrische Anlagenleistung multipliziert mit der Leistungszahl die nutzbare Wärmeleistung bzw. die benötigte Wärmeleistung dividiert durch die Leistungszahl die benötigte elektrische Leistung (Schramek, 2009h).

Somit ist, falls kein thermischer Zwischenspeicher vorhanden ist, bei Kenntnis des thermischen Lastgangs und der Leistungszahl die Ermittlung des elektrischen Lastgangs der Wärmepumpe möglich (Schramek, 2009h).

Der thermische Lastgang kann beispielsweise durch Gebäudesimulation ermittelt werden. Die Leistungszahl hängt von der Art der Wärmepumpe und den Betriebsbedingungen ab. Eine große Rolle spielen hierbei die Temperaturniveaus der Verdampfung und Verflüssigung. Abbildung 2.37 zeigt die Leistungszahl bei unterschiedlichen Verdampfungs- und Verflüssigungstemperaturen (Schramek, 2009h).

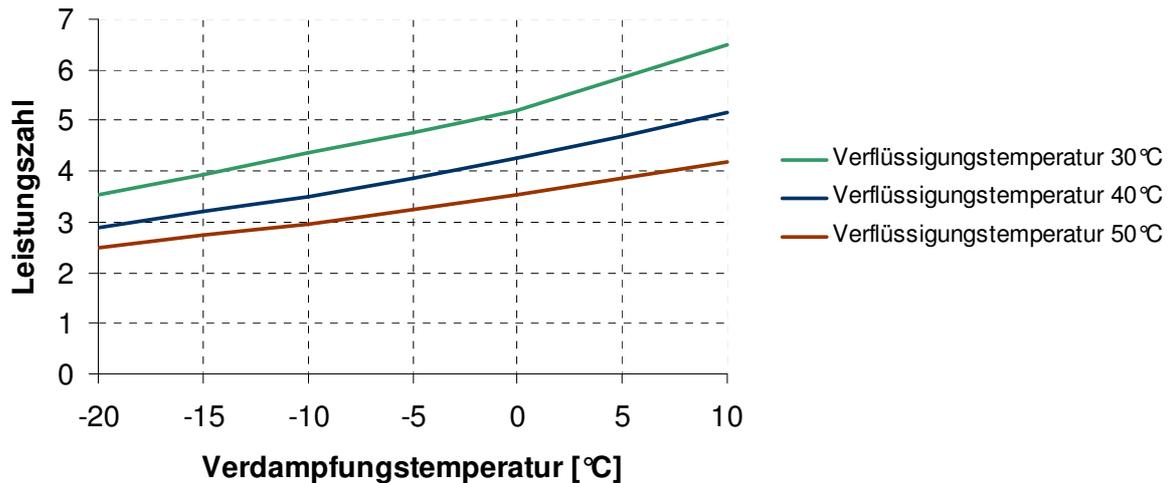


Abbildung 2.37: Leistungszahlen bei unterschiedlichen Temperaturverhältnissen (Schramek, 2009h)

Die Leistungszahlen in der Abbildung gelten für das Kältemittel R407C. Auch bei anderen gängigen Kältemitteln streuen diese Werte nur innerhalb von +/- 10 %, weswegen die Werte aus dem Diagramm für alle Wärmepumpen als hinreichend genau angesehen werden (Schramek, 2009h).

Aus den Werten aus Abbildung 2.37 können in etwa die Werte von Tabelle 2.20 für die verschiedenen Betriebsbedingungen abgelesen werden. Zwischenwerte werden interpoliert (Daten aus Schramek, 2009h).

Tabelle 2.20: Leistungszahlen bei unterschiedlichen Temperaturverhältnissen (Daten aus Schramek, 2009h)

Verdampfungstemperatur [°C]	Verflüssigungstemperatur 30°C	Verflüssigungstemperatur 40°C	Verflüssigungstemperatur 50°C
-20	3,6	2,9	2,5
-15	3,9	3,2	2,7
-10	4,3	3,5	3,0
-5	4,8	3,9	3,2
0	5,2	4,3	3,5
5	5,8	4,7	3,9
10	6,3	5,1	4,2

Es ist zu sehen, dass die Leistungszahl mit steigender Verdampfungstemperatur ebenfalls steigt, wogegen sie bei steigender Verflüssigungstemperatur abnimmt. Es ist zu beachten, dass die Verdampfertemperatur je nach Wärmequelle (Luft, Wasser, Sole) stets niedriger ist als die Austrittstemperatur der Wärmequelle. Bei Wasser bzw. Sole beträgt dieser Unterschied meist 1-5 K, bei Luft 5-10 K. Nimmt man an, dass sich diese Temperaturdifferenz zwischen Eintritt und Austritt halbiert, so kann man feststellen, dass die Eintrittstemperatur in den Verdampfer um 2-10 K (Luft 10-20 K) höher ist, als die Verdampfungstemperatur. Somit hätte bei einer Luftwärmepumpe die Außenluft bei einem Temperaturunterschied zwischen Eintritt und Verdampfung von 10 K und einer Verdampfungstemperatur von -10°C bei-

spielsweise 0°C . Umgekehrt lässt sich bei bekannter Außenlufttemperatur und gegebener Temperaturdifferenz zwischen Eintrittstemperatur und Temperatur der Verdampfung auf die jeweilige Verdampfungstemperatur schließen. Zudem ist die Verflüssigungstemperatur meist etwa 3 K höher als die Austrittstemperatur des Nutzwärmeträgers (meist Wasser). Die Temperatur des Heizmediums hätte bei einer Verflüssigungstemperatur von 40°C somit 37°C . Somit kann man bei Kenntnis der Vorlauftemperatur des Heizmediums und bekannter Temperaturdifferenz (3 K) auf die Verflüssigungstemperatur schließen (Schramek, 2009h). In Abbildung 2.38 ist zur Veranschaulichung ein Beispiel für mögliche Temperaturniveaus in der Wärmepumpe mittels Log-p-H Diagramm dargestellt (Daten aus Schramek, 2009h). Um die Darstellung zu vereinfachen, wurde hier das Kältemittel R134A gewählt, da dies im Gegensatz zu R407C bei konstanter Temperatur verdampft und kondensiert (Schramek, 2009h).

Als Wärmequelle wurde hier Luft mit einer Temperatur von 0°C gewählt. Zudem wurde eine Temperaturdifferenz von 5 K zwischen Verdampfungstemperatur und Austrittstemperatur der Wärmequelle dargestellt. Unter der Annahme, dass sich diese Differenz zwischen Eintritt und Austritt halbiert, beträgt die Temperaturdifferenz zwischen der Luft beim Eintritt (=Umgebungstemperatur) und Verdampfungstemperatur 10 K und die Verdampfungstemperatur beträgt somit -10°C . Die Temperaturdifferenz zwischen Verflüssigungstemperatur und Austritt des Heizmediums beträgt 3 K. Deswegen hat das Heizmedium bei der Verflüssigungstemperatur von 40°C eine Austrittstemperatur aus der Wärmepumpe von 37°C . Bei anderen Temperaturdifferenzen und -niveaus bzw. anderen Wärmequellen sind die Temperaturdifferenzen dementsprechend anzupassen. Zudem bestimmt vor allem die Bauart des jeweiligen Wärmetauschers die Temperaturdifferenz. Je größer die Wärmetauscherfläche, desto kleiner wird die notwendige Temperaturdifferenz um eine bestimmte Wärmemenge zu übertragen (Schramek, 2009h). Sowohl Verdampfer als auch Kondensator wurden hier im Gegenstromprinzip dargestellt.

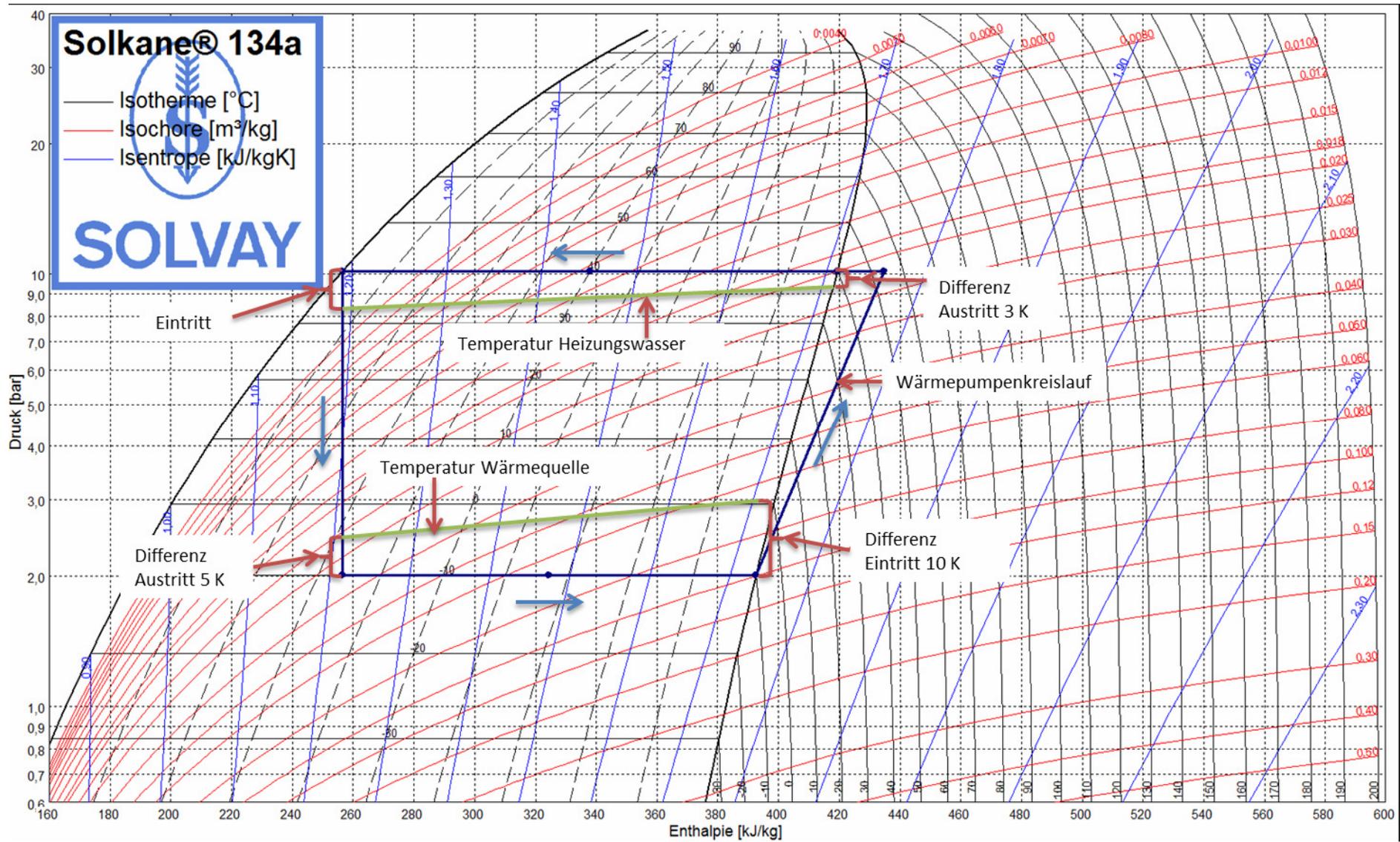


Abbildung 2.38: Temperaturniveaus Wärmepumpe (Daten aus Schramek, 2009h)

Diese unterschiedlichen Leistungszahlen sind einerseits bei der Planung von Wärmepumpenheizungen zu berücksichtigen. Meist werden solche Heizsysteme als Flächenheizungen mit möglichst niedriger Vorlauftemperatur ausgelegt. Andererseits ist dies aber auch ausschlaggebend für den elektrischen Lastgang der Anlage. So erfordert die Bereitstellung einer Kilowattstunde Wärme bei einer niedrigen Temperatur der Wärmequelle mehr elektrische Energie als bei höherer Temperatur der Wärmequelle. Die Temperatur der Wärmequelle kann dabei unterschiedlichen Schwankungen ausgesetzt sein. Abbildung 2.39 zeigt Anhaltswerte für die Temperatur der Wärmequellen abhängig von der Außentemperatur (Schramek, 2009h).

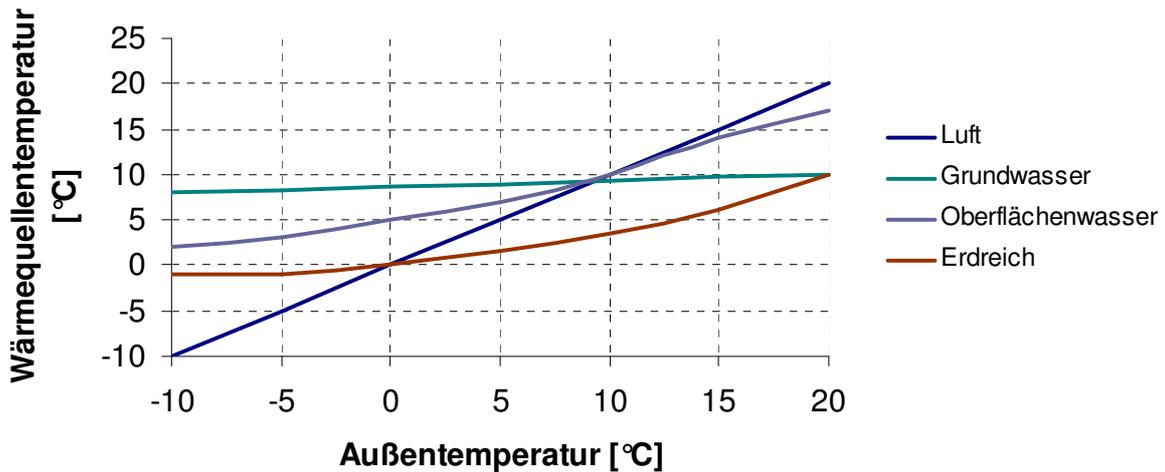


Abbildung 2.39: Anhaltswerte für die Temperatur von Wärmequellen (Schramek, 2009h)

Während bei Luftwärmepumpen die Außenlufttemperatur als Temperatur der Wärmequelle angesetzt werden kann, so muss man bei Wasserwärmepumpen unterschiedliche Fälle unterscheiden. Nutzt man die Wärme im Grundwasser, so kann man davon ausgehen, dass die Temperatur im Jahresgang meist nahezu konstant zwischen 8 und 10°C liegt. Nutzt man hingegen Oberflächenwasser, ergibt sich je nach Lufttemperatur auch eine unterschiedliche Wassertemperatur. Auch die Temperatur des Erdreichs ist nicht konstant, sondern Schwankungen unterlegen. Es muss erwähnt werden, dass es sich hier vor allem bei der Temperatur des Oberflächenwassers und des Erdreichs nur um Anhaltswerte handelt. Genauere Werte hängen von vielen Faktoren ab, die ohne Messung oder Simulation wohl nicht berücksichtigt werden können. Für die Ermittlung von Lastgängen werden deswegen die Werte aus Abbildung 2.39 verwendet (Schramek, 2009h).

Tabelle 2.21 zeigt die Werte aus Abbildung 2.39 in Tabellenform. Zwischenwerte werden interpoliert (Daten aus Schramek, 2009h).

Tabelle 2.21: Anhaltswerte für die Temperatur von Wärmequellen (Daten aus Schramek, 2009h)

Außentemperatur [°C]	Luft [°C]	Grundwasser [°C]	Oberflächenwasser [°C]	Erdreich [°C]
-10	-10	8	2	-1
-5	-5	8,33	3	-1
0	0	8,66	5	0
5	5	9	7	1,5
10	10	9,33	10	3,5
15	15	9,66	14	6
20	20	10	17	10

Somit kann der Lastgang einer Kompressionswärmepumpe mit unterschiedlichen Wärmequellen bei bekanntem thermischen Lastgang mit der umgeformten Gleichung 2.57 und den Werten für die Leistungszahl aus Tabelle 2.20 unter Berücksichtigung der Wärmequellentemperaturen aus Tabelle 2.21 ermittelt werden. Es ist noch zu erwähnen, dass für Kompressionswärmepumpen eine effiziente Regelung vorausgesetzt wird und somit deren Wirkungsgrad in Teillast nahezu auf dem Niveau bei Nennleistung bleibt (Hennings et al, 2000). Bei Luftwärmepumpen kommt noch ein weiterer Aspekt hinzu. Die tiefsten Temperaturen des Jahres kommen nur an sehr wenigen Stunden vor. Werden alle Komponenten darauf ausgelegt, so ist die Anlage für den Rest des Jahres in doppelter Weise zu groß ausgelegt. Einerseits sinkt die Leistungszahl durch die niedrige Verdampfertemperatur, andererseits muss mehr Wärme bereitgestellt und somit der Kältemitteldurchfluss erhöht werden oder die Temperatur im Verflüssiger muss steigen. Dies führt zu schlechteren Leistungszahlen bei erheblich größeren Komponenten und damit höheren Anlagenkosten. Deswegen ist es sinnvoll, die Wärmepumpe nicht auf die tiefste Temperatur auszulegen, sondern eine bivalente Heizung zu installieren. Luftwärmepumpen sind oft auch mit elektrischen Heizpatronen ausgestattet, die kältere Außenluft mit dem Prinzip einer Widerstandsheizung bis zu einer bestimmten Temperatur vorwärmen. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, mit der Fortluft von Lüftungsanlagen die Zuluft vorzuwärmen, bevor sie zur Wärmepumpe geführt wird (Schramek, 2009h). Um die benötigte Vorwärmleistung zu berechnen, kann die Gleichung 2.50 verwendet werden.

Neben Kompressionswärmepumpen ist es auch möglich, Absorptions-, oder Adsorptions-Kältemaschinen als Wärmepumpe zu betreiben. Für beide kann die Wärmebilanz nach Gleichung 2.58 gebildet werden (Schramek, 2009j).

$$\dot{Q}_0 + \dot{Q}_H + P = \dot{Q}_C + \dot{Q}_A \quad (2.58)$$

\dot{Q}_0 Verdampferleistung bzw. Wärmeleistung, die der Umgebung entzogen wird [kW]

\dot{Q}_H Wärmezufuhr im Austreiber / Desorber [kW]

P Elektrische Antriebsleistung [kW]

\dot{Q}_C Wärmeabgabe am Verflüssiger [kW]

\dot{Q}_A Wärmeabgabe am Ab- / Adsorber [kW]

Bei Ab- oder Adsorptionskältemaschinen müssen dabei nur etwa 1,5 – 3 % der Kälteleistung als elektrische Leistungsaufnahme aufgebracht werden (Pink, 2007).

Da die Wärmeleistung stets größer ist als die Kälteleistung, muss von diesen Werten auf den elektrischen Leistungsbedarf der Pumpe beim Wärmepumpenbetrieb rückgerechnet werden. Die Leistungsziffern für Ab- und Adsorptionskältemaschinen sind nach Gleichung 2.59 und 2.60 für den Kältemaschinen- bzw. Wärmepumpenbetrieb definiert. Bei Sorptionsmaschinen wird dabei meist vom Wärmeverhältnis gesprochen (Schramek, 2009j).

$$\xi_K = \frac{\dot{Q}_0}{\dot{Q}_H + P} \quad (2.59)$$

ξ_K Wärmeverhältnis für die Sorptionskältemaschine [-]

$$\xi_W = \frac{\dot{Q}_C + \dot{Q}_A}{\dot{Q}_H + P} = 1 + \xi_K \quad (2.60)$$

ξ_W Wärmeverhältnis für die Sorptionswärmepumpe [-]

Entspricht die elektrische Leistungsaufnahme also 1,5 – 3 % der Kälteleistung, so lässt sich dies auch als Gleichung 2.61 ausdrücken.

$$P = 0,015 \dots 0,03 \cdot \dot{Q}_0 \quad (2.61)$$

Bei Vorhandensein des thermischen Lastgangs kann aus dieser Gleichung jedoch nicht die elektrische Leistung für den Heizfall ermittelt werden. Daher kann aus der Energiebilanz (Gleichung 2.58) unter Zuhilfenahme der Definition für das Wärmeverhältnis der Wärmepumpe (Gleichung 2.60) bei gleichzeitiger Vernachlässigung der elektrischen Leistung in beiden Gleichungen eine Funktion für die elektrische Leistungsaufnahme im Wärmepumpenbetrieb gebildet werden (Krottil, 2011):

$$\dot{Q}_0 + \dot{Q}_H = \dot{Q}_C + \dot{Q}_A$$

$$\dot{Q}_0 = \dot{Q}_C + \dot{Q}_A - \dot{Q}_H$$

$$\xi_W = \frac{\dot{Q}_C + \dot{Q}_A}{\dot{Q}_H}$$

$$\dot{Q}_H = \frac{\dot{Q}_C + \dot{Q}_A}{\xi_W}$$

$$\dot{Q}_0 = \dot{Q}_C + \dot{Q}_A - \frac{\dot{Q}_C + \dot{Q}_A}{\xi_W}$$

$$\dot{Q}_0 = (\dot{Q}_C + \dot{Q}_A) \cdot \left(1 - \frac{1}{\xi_W} \right)$$

Da die gesamte Wärmeabgabe ($\dot{Q}_C + \dot{Q}_A$) im Wärmepumpenbetrieb von Interesse ist, kann man diesen Ausdruck noch durch \dot{Q}_{RK} ersetzen und in Gleichung 2.61 einsetzen (Gleichung 2.62).

$$P = 0,015 \dots 0,03 \cdot \dot{Q}_{RK} \cdot \left(1 - \frac{1}{\xi_W} \right) \quad (2.62)$$

\dot{Q}_{RK} Nutzbare Wärme Sorptionswärmepumpe [kW]

Zur Bestimmung des Lastgangs ist somit nur noch die Kenntnis des Wärmeverhältnisses notwendig. Tabelle 2.22 gibt eine Übersicht über das Nennwärmeverhältnis bei Absorptionskältemaschinen bei bestimmten Temperaturverhältnissen (ÖNORM H 5058, 2010).

Tabelle 2.22: Nennwärmeverhältnisse von Absorptionskältemaschinen (ÖNORM H 5058, 2010)

Heizmedieneintritts- temperatur [°C]	Kühlwasserein- / - austrittstemperatur [°C]	Kaltwasseraustrittstemper- atur [°C]	Wärmeverhältnis ξ_K [-]
80	27/33	6	Unzulässig
		14	0,71
	40/45	6	Unzulässig
		14	Unzulässig
90	27/33	6	0,69
		14	0,73
	40/45	6	Unzulässig
		14	Unzulässig
110	27/33	6	0,70
		14	0,72
	40/45	6	Unzulässig
		14	0,71
130	27/33	6	0,71
		14	0,73
	40/45	6	0,70
		14	0,72

Da sich alle Werte eng im Bereich um 0,7 bewegen, wird der Wert 0,7 für das Standardwärmeverhältnis von Absorptionskältemaschinen verwendet.

Das Wärmeverhältnis für Adsorptionskältemaschinen kann mit etwa 0,6 angesetzt werden (Schramek, 2009j). Nach Gleichung 2.60 muss man zum Wärmeverhältnis der Kältemaschinen den Wert 1 addieren, um den Wert im Wärmepumpenbetrieb zu erhalten.

Da das Teillastverhalten im Gegensatz zu Kompressionswärmepumpen bei Sorptionswärmepumpen schlechter ist, sieht die Norm zudem Zuschläge für das schlechtere Verhalten im Teillastbereich vor. Diese Zuschläge gelten allerdings nur für den Energieverbrauch in einem gewissen Zeitraum und können nicht auf die Leistungsaufnahme umgelegt werden (ÖNORM H 5058, 2010). Um diesem Effekt trotzdem Rechnung zu tragen, wird der Faktor für die elektrische Leistungsaufnahme in Gleichung 2.62 abhängig von der Last zwischen den Werten 0,015 und 0,03 interpoliert.

2.3.6 Kühlung

Gebäude können durch verschiedene Verfahren gekühlt werden. Freie Kühlung ist dann möglich, wenn die Außenluft unterhalb der Raumtemperatur liegt. Wird die freie Kühlung über ein Ventilationssystem durchgeführt, ist lediglich die Leistung für die Ventilation nach Gleichung 2.49 mit dem für die Kühlleistung bei den gegebenen Temperaturverhältnissen notwendigen Volumenstrom aus Gleichung 2.50 notwendig. Freie Kühlung kann aber auch über eine Kälteflüssigkeit (meist Wasser) und Wärmetauscher gewährleistet werden. Hierfür wäre dann die jeweilige elektrische Leistung für die Pumpen jedes Wasserkreises nach Gleichung 2.51 anzusetzen (ÖNORM EN 1946-1, 1999).

Kompressionskältemaschinen funktionieren nach demselben Prinzip wie Kompressionswärmepumpen mit dem Unterschied, dass der Nutzen hier nicht die am Verflüssiger entstehende Wärme ist, sondern die Wärme, die dem Verdampfer aus dem Raum zugeführt werden muss. Die Leistungszahl ist demnach nach Gleichung 2.63 definiert (Schramek, 2009j).

$$\varepsilon_K = \frac{\text{Nutzwärmeaufnahme}}{\text{aufgenommene elektrische Antriebsleistung}} = \frac{\dot{Q}_0}{P} \quad (2.63)$$

ε_K	Leistungszahl der Kompressionskältemaschine [-]
\dot{Q}_0	Verdampferleistung bzw. Wärmeleistung, die der Umgebung entzogen wird [kW]
P	Elektrische Antriebsleistung [kW]

Die Differenz zwischen den Leistungszahlen der Wärmepumpe und der Kältemaschine ist der Anlagenfaktor aus Gleichung 2.57 und wird generell mit 0,9 angesetzt. Bei vorhandenem thermischen Lastgang ist somit noch die Kenntnis über die Leistungszahl notwendig, um den elektrischen Lastgang bestimmen zu können. Diese kann wie bei Wärmepumpen aus der Abbildung 2.37 bzw. aus Tabelle 2.20 entnommen werden. Es sind lediglich Überlegungen bezüglich der Verflüssigungs- bzw. Verdampfungstemperaturen anzustellen. Ist das Kälteverteilmedium im Gebäude Wasser, so ist auf der Verdampferseite eine Temperaturdifferenz zwischen 1-5 K anzusetzen, bei Luft 5-10 K. Das bedeutet zum Beispiel für übliche Temperaturniveaus von Kühlwasserverteilsystemen mit 6°C Vorlauftemperatur und 12°C Rücklauftemperatur, dass die Verdampfungstemperatur 1°C betragen (=6°C - 5 K) kann. Die Vorgehensweise beim Verflüssiger ist umgekehrt, wobei es hier sowohl Wasser als auch Luftrückkühlsysteme gibt. Bei einem Luftrückkühlsystem (Temperaturdifferenz 10-20 K) beträgt die Verflüssigungstemperatur bei einer Lufttemperatur von 25°C und einer Temperaturdifferenz von 5 K zwischen Austritt und Verdampfungstemperatur beispielsweise 35°C, die Luft tritt mit 30°C wieder aus dem Verflüssiger aus. (Schramek, 2009h). Dies ist in Abbildung 2.40 dargestellt (Daten aus Schramek, 2009h).

Die Umgebungstemperatur beträgt 25°C. Der luftgekühlte Verflüssiger ist hier ähnlich zu betrachten wie der Verdampfer der Luftwärmepumpe. Zwischen Austritt des Mediums und der Verdampfungs- bzw. hier Verflüssigungstemperatur beträgt 5-10 K. Hier wurden 5 K dargestellt. Unter der getroffenen Annahme, dass sich diese über den Wärmetauscher halbiert, beträgt die Temperaturdifferenz beim Eintritt 10 K. Bei

einer Lufttemperatur von 25°C beträgt die Kondensationstemperatur also 35°C. Im Verdampfer stellt sich die Situation ähnlich dar. Hier wurde Wasser als Kälteverteilmedium im Gebäude angenommen. Die Differenz zwischen Austritt dieses Mediums aus dem Verdampfer und der Verdampfungstemperatur beträgt bei Wasser 1-5 K. Hier wurden 5 K dargestellt. Bei in der Kältetechnik üblichen Temperaturverhältnissen bei Kälteverteilungen mit 6°C Vorlauf- und 12°C Rücklaufemperatur beträgt die Verdampfungstemperatur somit 1°C. Auch hier gilt analog zur Wärmepumpe, dass bei anderen Temperaturdifferenzen und -niveaus bzw. anderen Wärmequellen die Temperaturen dementsprechend anzupassen sind. Je größer die Wärmetauscherfläche, desto kleiner wird zudem wieder die notwendige Temperaturdifferenz um eine bestimmte Wärmemenge zu übertragen (Schramek, 2009h). Sowohl Verdampfer als auch Kondensator wurden hier wieder im Gegenstromprinzip dargestellt.

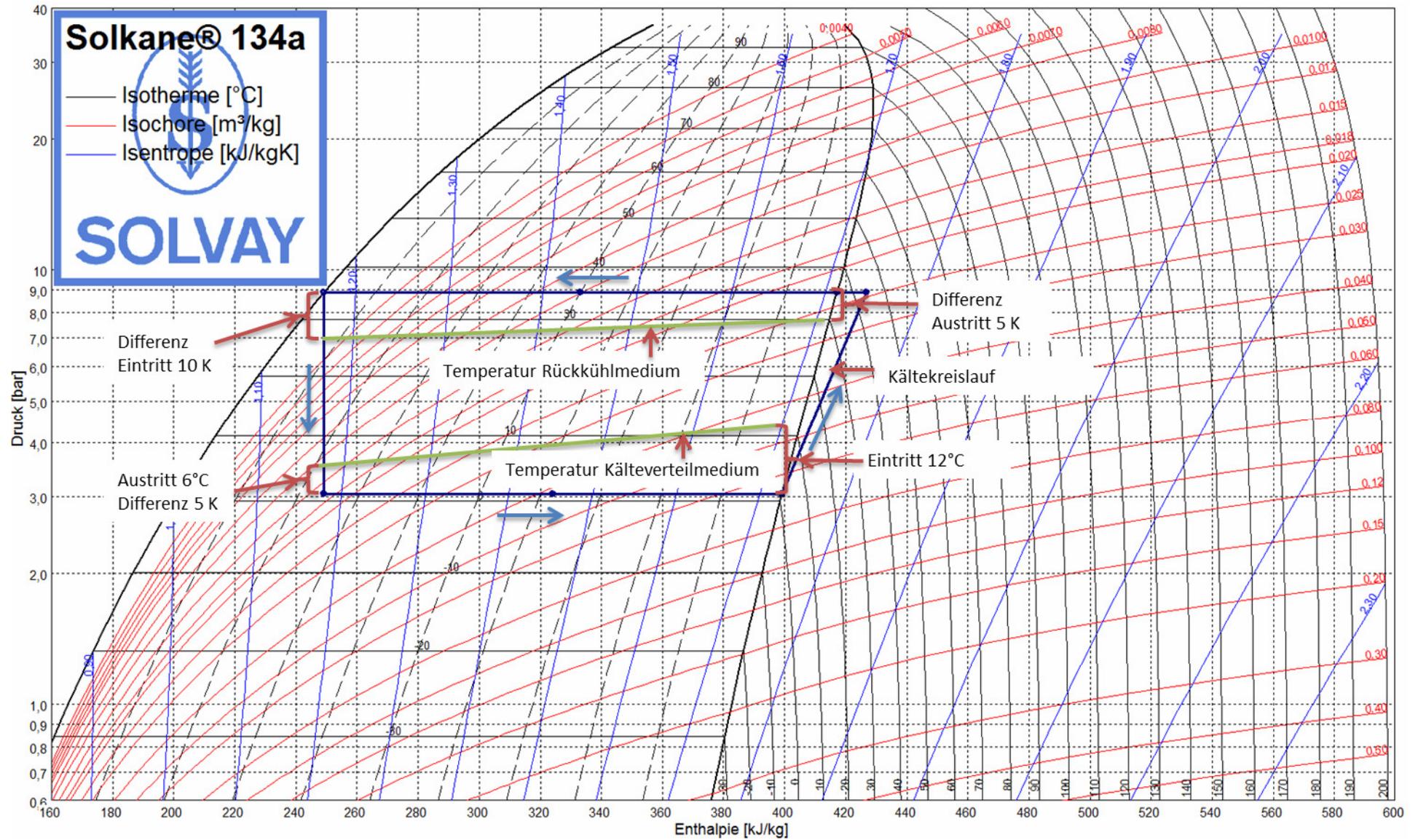


Abbildung 2.40: Temperaturniveaus Kältemaschine (Daten aus Schramek, 2009h)

Vom jeweils entnommenen Wert aus Abbildung 2.37 bzw. Tabelle 2.20 muss dann der Anlagenfaktor (0,9) abgezogen werden und man erhält die Leistungszahl für die Kompressionskältemaschine im jeweiligen Betriebspunkt (Schramek, 2009j). Es sei an dieser Stelle erwähnt, dass eine effiziente Regelung auch für Kompressionskältemaschinen vorausgesetzt wird und somit ebenfalls der Wirkungsgrad in Teillast nahezu auf dem Niveau bei Nennleistung bleibt (Hennings et al, 2000).

Die elektrische Leistungsaufnahme für Ad- oder Absorptionskältemaschinen bei vorhandenem thermischen Lastgang kann nach Gleichung 2.61 für den jeweiligen Viertelstundenmittelwert errechnet werden, wobei hier für Teillast wieder zwischen den Werten 0,015 und 0,03 interpoliert wird. Wie in Kapitel 2.3.5 erwähnt wird das Wärmeverhältnis für Absorptionskältemaschinen mit 0,7, für Adsorptionskältemaschinen mit 0,6 angesetzt.

Zur Aufnahme der im Verflüssiger vom Kältemittel abzugebenden Wärme wird eine Rückkühlmöglichkeit benötigt. Dies kann entweder durch einen zusätzlichen Wasserkreislauf (offen oder geschlossen) oder durch einen Trockenrückkühler mit Luft, meist mit Hilfe von Ventilatoren, gewährleistet werden. Hierfür ist je nach Rückkühlvariante die Leistung gemäß Tabelle 2.23 pro Kilowatt Kälteleistung aufzubringen (ÖNORM H 5058, 2010).

Tabelle 2.23: Spezifischer elektrischer Energiebedarf der Rückkühlung (ÖNORM H 5058, 2010)

Spezifischer elektrischer Energiebedarf [kW/kW]	Verdunstungskühler (einschließlich Sprühwasserpumpen)		Trockenrückkühler
	geschlossener Kreislauf	offener Kreislauf	
ohne Zusatzschalldämpfer	0,033	0,018	0,045
mit Zusatzschalldämpfer	0,042	0,021	-

Eine weitere Möglichkeit, die in Zukunft an Bedeutung gewinnen könnte, stellt die sorptionsgestützte Klimatisierung dar. Dadurch kann eine Wärmerückgewinnung im Winter und eine Kühlung im Sommer bewerkstelligt werden. Die Luftfeuchte lässt sich damit ebenfalls regeln. Als Wärmeträgermedium wird hier Luft verwendet, aufgrund der geringen spezifischen Wärmekapazität der Luft muss hier der Volumenstrom gegebenenfalls höher als der Mindestluftvolumenstrom für Lüftung sein (vgl. Kapitel 2.3.2). Dabei wird die Klimatisierung neben der Verwendung von Antriebswärme mittels Sorptionsentfeuchter und einem Wärmerückgewinnungsrad bewerkstelligt. Da es sich hier ebenfalls um einen Adsorptionsprozess handelt, können Wärmeverhältnisse von 0,6 für Kälte bzw. 1,6 für Wärme angenommen werden. Als Antriebsenergie für den Prozess wird Wärme auf einem Temperaturniveau von 80-120°C benötigt (Schramek, 2009k). Sowohl der Sorptionsentfeuchter als auch das Wärmerückgewinnungsrad werden mit Elektromotoren in Rotation versetzt. Neben der notwendigen Ventilatorleistung für den Luftstrom und der Pumpenleistung für die Heizregister fällt hier also auch elektrische Leistung für die Antriebsmotoren an. Diese Motoren gibt es je nach Größe des Rades in verschiedenen Leistungsklassen. Tabelle 2.24 zeigt diese für einen deutschen Hersteller von Energierückgewinnungssystemen (Krenski, 2011).

Tabelle 2.24: Nennleistung für Antriebsmotoren von Sorptions- und Wärmerückgewinnungsrädern (Krenski, 2011)

Raddurchmesser [cm]	Nennleistung Motor [W]
bis 140	90
bis 240	180
bis 360	370

Es handelt sich dabei in der Regel um drehzahlgeregelte Motoren, deren Leistungsaufnahme proportional zur Drehzahl angesetzt werden kann. Die Drehzahl hängt von verschiedenen Einflussparametern ab. Näherungsweise wird die Drehzahl und somit die Leistungsaufnahme jedoch anhand des momentan notwendigen Luftvolumenstroms errechnet. Beim maximal notwendigen Volumenstrom wird die Nennleistung angesetzt und linear auf den Momentanwert zurückgerechnet (Krenski, 2011). Abbildung 2.41 zeigt ein Sorptionsrad inklusive Rahmen (Wolf, 2011).



Abbildung 2.41: Sorptionsrad (Wolf, 2011)

2.3.7 Be- / Entfeuchtung

Die Befeuchtung kann durch verschiedene Mechanismen durchgeführt werden. Allen ist gleich, dass ihnen ein Wechsel des Aggregatzustands von Wasser zu Wasserdampf zugrunde liegt. Durch den zusätzlichen Apparat der Luftbefeuchtung und den dadurch höheren Druckverlust der Lüftungsanlage ist eine höhere Ventilatorleistung zu erwarten (Kapitel 2.3.2). Die Entfeuchtung kann durch Ad- bzw. Absorption oder durch Kühlung unter den Taupunkt erfolgen. Beides erhöht durch zusätzliche Apparaturen wieder den Druckverlust und bedingt wieder eine höhere Ventilatorleistung. Die für die notwendige Kühlung erforderliche Energie ist im thermischen Lastgang des Gebäudes zu berücksichtigen und bedingt je nach Art der Kühlung in dieser Kategorie einen erhöhten elektrischen Energieverbrauch. Gleiches gilt für die zusätzlich notwendige Wärme bei der Verdampfung von Wasser im Befeuchter (Schramek, 2009).

2.3.8 Warmwasser

In Bürogebäuden werden rund 0,4 kWh Nutzenergie pro Person und Tag benötigt (DIN 18599-10, 2007). Durch Division durch den Wirkungsgrad der Einrichtung zur Wassererwärmung lässt sich der dadurch notwendige Energiebedarf errechnen. Nach dem Prinzip der Erwärmung kann man hier zwischen Durchfluss-Wassererwärmern und Speicher-Wassererwärmern unterscheiden. Nach der Verteilung im Gebäude kann man zentrale und dezentrale Systeme unterscheiden.

Dezentrale Durchfluss-Wassererwärmer werden meist mit Gas oder elektrisch betrieben und benötigen die Leistung zum Zeitpunkt der Entnahme, wobei elektrische Durchfluss-Wassererwärmer natürlich auch Einfluss auf den elektrischen Lastgang haben (Schramek, 2009g). Anschlüsse von Einzelwaschbecken, Duschen und Küchenspülen gewährleisten einen Durchfluss von rund 10 l/min. Dies entspricht einem Durchfluss von 0,167 l/s oder bei der Dichte von 1.000 kg/m^3 einem Massenstrom von 0,167 kg/s. Bei einem Wirkungsgrad von 1, wie er für elektrische Widerstandsheizungen angesetzt werden kann, entspricht dies nach Gleichung 2.50 einer benötigten Heizleistung von rund 21 kW. Hierbei wurde von einer Kaltwassertemperatur von 10°C und einer Warmwassertemperatur von 40°C ausgegangen (DIN 18599-10, 2007). Dividiert man den Energieverbrauch pro Person und Tag durch die benötigte Leistung, lässt sich die Zeit bestimmen, für die jeden Tag pro Person Warmwasser gezapft wird. Bei 0,4 kWh und einer benötigten Heizleistung von 21 kW lässt sich somit die Aussage treffen, dass pro Person für rund 69 Sekunden Warmwasser entnommen wird.

Bei einem Bürogebäude mit 100 Mitarbeitern ergeben sich so beispielsweise 6.900 Sekunden. Verteilt man diese zufällig über die Nutzungszeit von 8:00 bis 16:30, so ergibt sich z.B. ein Lastgang gemäß Abbildung 2.42. Die Verteilung erfolgte auch hier wieder mittels gleichverteilten Zufallszahlen zwischen 0 und 1, die mit einem Faktor multipliziert wurden. Dieser Faktor wurde so gewählt, dass die auf null Stellen gerundeten Werte eine Tagessumme von 6.900 Sekunden ergeben (Daten aus Schramek, 2009g).

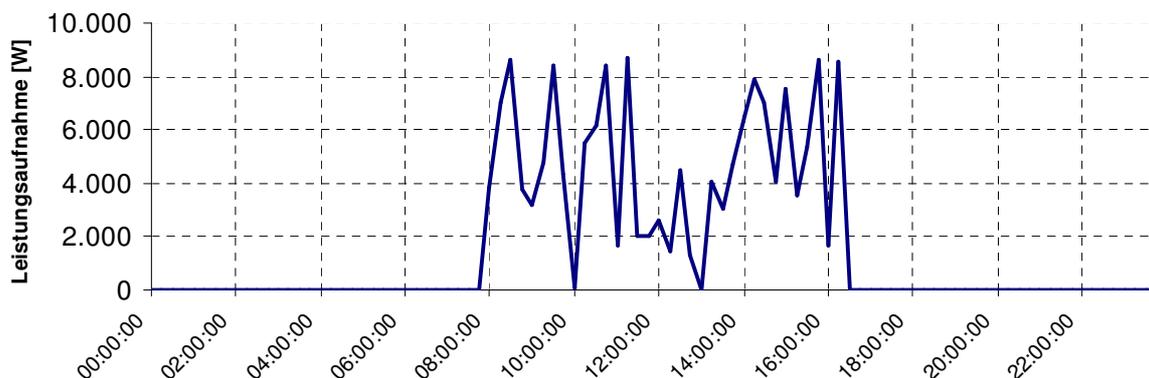


Abbildung 2.42: Theoretischer Beispiellastgang Durchlauferhitzer (Daten aus Schramek, 2009g)

Anhand der gezeigten Zusammenhänge lässt sich somit die Aussage treffen, dass der Lastgang von dezentralen Durchlauferhitzern rein von der Nutzungszeit des Gebäudes und den anwesenden Personen abhängt.

Die Situation des elektrischen Lastgangs bei zentralen Durchfluss-Warmwassererwärmern stellt sich ähnlich dar. Allerdings ist hier noch der Wärmeverlust der Wasserleitung und der Zirkulationsleitung aufzubringen. Die dafür anzusetzenden Werte können aus Kapitel 2.3.3 entnommen werden. Aufgrund der hohen benötigten Leistungen von zentralen Geräten sind zentrale elektrische Durchfluss-Warmwassererwärmer eher selten anzufinden (Schramek, 2009g).

Dezentrale Geräte werden oft auch mit einem kleinen Speicher ausgestattet. Übliche Speicherinhalte bei dezentralen Systemen betragen je nach Anschlussstelle 20 - 100 l bei Temperaturen zwischen 30 und 80°C. Durch den dadurch entstehenden Puffer kann die benötigte Heizleistung bei Betrieb reduziert werden. So muss die benötigte Heizleistung nicht während der Zapfung aufgebracht, sondern über den ganzen Tag verteilt durchgeführt werden (Schramek, 2009g). Unter der Voraussetzung, dass die Speicher während des Tages nie komplett geladen sind, lässt sich damit die Leistungsaufnahme gleichmäßig über den Tag verteilen. Bei dem Beispiel mit 100 Personen und dem Energieverbrauch von 0,4 kWh pro Person und Tag ergäbe sich bei einer Betriebszeit des Gebäudes von 8:00 - 16:30 eine gleichmäßige Leistungsaufnahme von rund 4,7 kW. Dies spiegelt jedoch nur den idealisierten Fall wider.

In der Realität ist der Idealisierungsgrad einigen Einschränkungen unterworfen. So hat jedes dezentrale Gerät in der Regel eine gewisse Heizleistung, z.B. 3,5 kW. Ist der Speicher entleert und besteht trotzdem noch Warmwasserbedarf, so können die Geräte zudem auf eine höhere Leistung (21 kW) umschalten und als Durchflusserhitzer arbeiten. Ist jedoch ein Speicher voll geladen und besteht kein Warmwasserbedarf an dieser Entnahmestelle, so ist bei diesem Gerät keine Leistungsaufnahme mehr vorhanden (Schramek, 2009g).

Dies soll anhand eines Beispiels näher erklärt werden. Betrachtet wird ein System mit zehn dezentralen Speichergeräten mit einem Speicherinhalt von je 30 l und einer Speichertemperatur von 40°C. Bei einer Entnahmerate von 10 l/min wäre der Speicher somit nach drei Minuten Dauerbetrieb leer und das Gerät würde bei weiterer Entnahme als Durchlauferhitzer bei erhöhter Leistung arbeiten. Nach Gleichung 2.44 beträgt der Wärmehalt eines Speichers bei voller Beladung rund 1,05 kWh. Bei einer Ladeleistung von 3,5 kW wäre der Speicher somit bei vollständiger Entleerung nach 18 min wieder voll geladen bzw. wäre in einem Viertelstundenintervall die Ladung für eine Entnahmemenge für 150 Sekunden wieder erwärmt. Verteilt man die Entnahmedauer von 6.900 Sekunden aus obigem Beispiel über gleichverteilte Zufallszahlen zwischen 0 und 1 multipliziert mit einem Faktor zur Erreichung der 6.900 Sekunden auf die zehn dezentralen Speichergeräte und die dabei entstehenden täglichen Entnahmen jedes Geräts wieder durch analoges Vorgehen auf jeden Viertelstundenwert während der Nutzungsdauer, so ergeben sich die Entnahmen gemäß Tabelle 2.25 (Daten aus Schramek, 2009g).

Tabelle 2.25: Entnahmen dezentrale Warmwasserspeicher (Daten aus Schramek, 2009g)

Zeit	Entnahmezeit [s]									
	Speicher 1	Speicher 2	Speicher 3	Speicher 4	Speicher 5	Speicher 6	Speicher 7	Speicher 8	Speicher 9	Speicher 10
08:00:00	11	40	10	20	5	22	31	34	38	3
08:15:00	20	19	4	29	1	3	19	4	35	27
08:30:00	16	23	5	11	3	12	30	35	24	11
08:45:00	8	21	37	25	0	12	29	34	37	14
09:00:00	5	46	36	1	4	17	24	30	47	10
09:15:00	26	4	10	26	5	14	8	22	1	34
09:30:00	2	26	20	17	2	15	21	26	8	40
09:45:00	27	7	18	2	5	26	7	34	8	31
10:00:00	29	52	41	13	4	14	48	16	22	22
10:15:00	22	42	36	20	2	11	34	33	35	30
10:30:00	9	31	34	27	1	11	7	25	35	22
10:45:00	3	26	34	11	2	7	16	28	31	13
11:00:00	3	48	7	9	4	6	12	18	8	3
11:15:00	29	7	35	19	3	37	47	8	44	40
11:30:00	15	1	30	16	4	2	59	28	34	17
11:45:00	18	49	27	13	3	38	56	37	13	17
12:00:00	25	19	19	9	5	33	17	30	41	24
12:15:00	17	3	11	11	1	23	1	22	18	20
12:30:00	1	38	36	9	4	4	32	27	27	2
12:45:00	22	7	38	24	1	33	45	27	46	36
13:00:00	27	55	40	28	3	29	50	32	52	38
13:15:00	18	3	1	8	5	23	53	11	25	34
13:30:00	21	12	13	29	5	36	26	9	15	23
13:45:00	22	21	2	26	2	5	19	33	7	14
14:00:00	18	2	26	3	1	33	34	17	12	5
14:15:00	16	53	34	21	6	34	32	0	21	28
14:30:00	5	56	14	20	4	32	5	21	22	35
14:45:00	9	3	35	1	3	13	2	16	15	27
15:00:00	15	33	20	26	4	23	43	19	14	32
15:15:00	9	44	24	22	1	39	10	16	32	29
15:30:00	15	47	37	18	4	28	1	36	13	36
15:45:00	12	21	4	29	5	29	45	19	36	23
16:00:00	28	9	24	11	3	2	32	31	49	18
16:15:00	11	12	12	10	5	28	2	20	4	22
Summe	534	880	774	564	110	694	897	798	869	780

Es ist zu sehen, dass bei in Büros üblichem Verbrauch von 0,4 kWh pro Person und Tag selbst bei kleinen Speichern mit niedrigem Temperaturniveau bei den üblichen Parametern in keinem Viertelstundenintervall das maximale Ladevermögen, das während des Intervalls ohne Umschaltung auf den Durchlaufmodus entnommen werden kann, auch entnommen wird. Lädt der Speicher also nach der Entnahme sofort wieder auf das maximale Ladevermögen auf, ändert sich bei Betrachtung der Viertelstundenintervalle nichts gegenüber dem Lastgang des Durchlauferhitzers. Im Normalfall arbeiten Speicher aber mit einer zeitlich geschalteten Regelung oder einer Regelung mit minimalem Speicherinhalt, bei dessen Unterschreitung der Speicher wieder voll beladen wird. Man kann auch eine Kombination aus beidem verwenden. So kann beispielsweise eine Regelung bei den betrachteten Speichern bei Unterschreitung von 10 l Speicherinhalt der Heizvorgang beginnen und voll aufladen. Zu einer bestimmten Zeit (meist nachts bzw. vor Beginn der Nutzungszeit des Gebäudes) werden die Speicher zudem unabhängig vom Ladezustand voll beladen (Schramek, 2009g). Da die Entnahmedauer aus einem Speicher während eines Viertelstundenintervalls nie 60 Sekunden übersteigt (entspricht einer Entnahmemenge von 10 l), wird auch hier nie der Durchlaufmodus in Anspruch genommen. Bei Wiederaufladung der Speicher um fünf Uhr früh und bei Vernachlässigung der thermischen Speicherverluste ergibt sich ein Lastgang nach Abbildung 2.43 (Daten aus Schramek, 2009g).

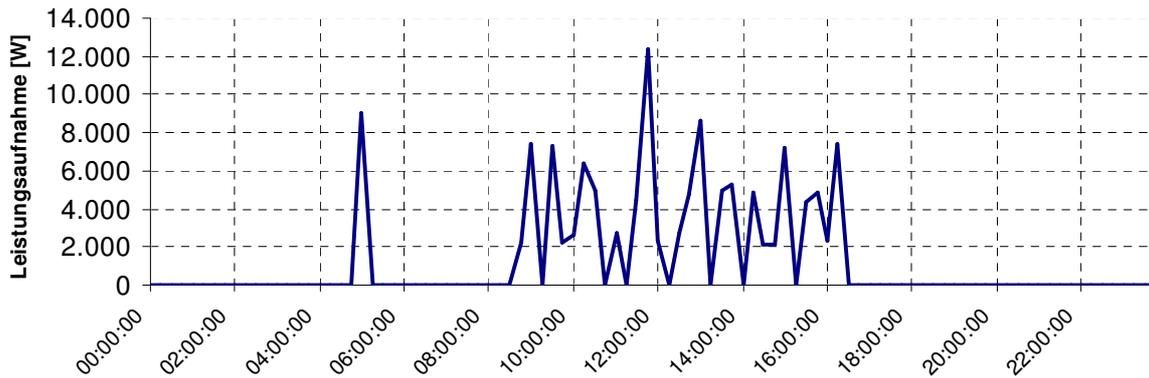


Abbildung 2.43: Theoretischer Beispiellastgang dezentrale Warmwassererwärmer mit Speicher (Daten aus Schramek, 2009g)

Der Lastverlauf ist ähnlich jenem der Durchlauferhitzer. Der merklichste Unterschied liegt darin, dass die Aufladung um fünf Uhr früh erfolgt bzw. zu einem beliebigen Zeitpunkt erfolgen kann. An dieser Stelle sei jedoch zum besseren Verständnis erwähnt, dass die große Übereinstimmung mit dem Lastgang des Durchlauferhitzers nur dadurch entsteht, dass jeweils Intervalle mit einer Viertelstunde betrachtet werden. Bei der Betrachtung kürzerer Intervalle wäre sehr wohl ein deutlicher Unterschied erkennbar. Während die Warmwassererwärmer mit Speicher während der Dauer der Wiederaufladung des Speichers gleichmäßig eine Leistung von 3,5 kW aufnehmen, verursacht der Durchlauferhitzer kurze, jedoch hohe Lastspitzen mit 21 kW.

Eine weitere Möglichkeit der Warmwassererwärmung sind zentrale Geräte mit Speicher. Oft sind diese auch in das Heizungssystem integriert bzw. werden mit denselben Wärmebereitstellungsanlagen gewährleistet, wie die Warmwasserheizung. Zentrale Warmwasserspeicher werden im Normalfall ähnlich wie dezentrale Speicher betrieben. Bei Unterschreitung eines bestimmten Inhalts an thermischer Energie wird meist bis zur vollen Beladung nachgeladen. Zu einem bestimmten Zeitpunkt bzw. bei der nächsten Unterschreitung dieses Inhalts wird dann wieder nachgeladen. Bei vorhandener Abwärme, die an anderen Stellen nicht benötigt wird, kann ebenfalls eine Nachladung erfolgen. Die Berechnung des jeweiligen Speicherinhalts bzw. der Entnahmen kann auch analog zu den dezentralen Speichern erfolgen. Je nachdem, wie die Wärme bereitgestellt wird, kann dies ebenfalls Auswirkungen auf den elektrischen Lastgang haben. Bei den jeweiligen Entnahmen müssen sowohl der Wärmeinhalt des entnommenen Warmwassers, als auch die Zirkulationsverluste berücksichtigt werden. Ebenso ist bei so einem Fall der elektrische Lastgang der Zirkulationspumpe zu berücksichtigen (Schramek, 2009g).

2.3.9 Sonstige Hilfsenergie

Unter „Sonstige Hilfsenergie“ werden einige Verbraucher betrachtet, deren Auswirkungen auf den Lastgang des Gebäudes zwar sehr gering erscheint, die jedoch der Vollständigkeit halber ebenfalls grob abgehandelt werden sollen. Diese Komponenten sind folgende:

- Warmwasserrohrbegleitheizung
- Elektrische Jalousien
- Sensoren / Aktoren

Warmwasserrohrbegleitheizungen sind stets als Widerstandsheizung ausgeführt. Hier kann ein Wirkungsgrad von 1 angenommen werden. Somit ist für den elektrischen Lastgang hier durchgehend jener Wert anzusetzen, der bei den Zirkulationspumpen (Kapitel 2.3.3) als Wärmeverlust der Warmwasserleitungen ermittelt wurde (Schramek, 2009i).

Antriebe für elektrische Jalousien gibt es je nach Bedarf für verschiedene Ausführungen und Leistungen, die sich unter anderem am Gewicht der Jalousien orientieren. Die Antriebe werden entweder manuell oder durch ein Gebäudeautomationssystem bei Erreichen gewisser Bedingungen in Betrieb genommen. Der Zeitpunkt, die Dauer der Inbetriebnahme und die Leistungsaufnahme im Betrieb bestimmen den Lastgang dieser Geräte. Bei Kenntnis der für die Jalousietechnik relevanten Werte lässt sich ein Diagramm gemäß Abbildung 2.44 erstellen. Aus diesem Diagramm lässt sich ablesen, welches die maximalen Einsatzmaße bei bestimmten Jalousieantrieben sind (Alcatel, 2011).

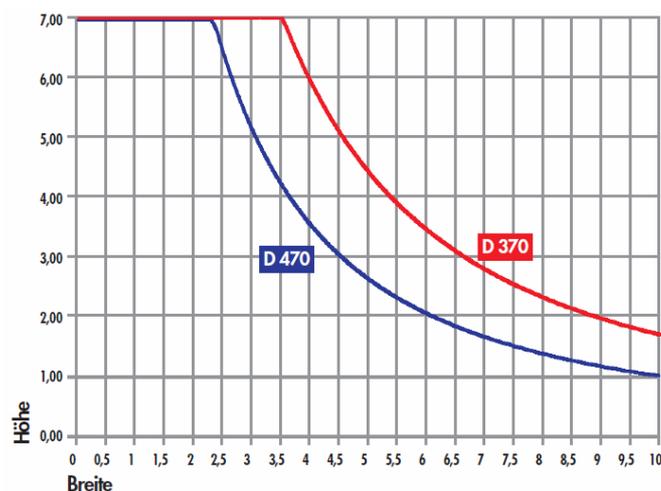


Abbildung 2.44: Parameter-Diagramm Jalousie (Alcatel, 2011)

Das Gerät D470 weist laut Datenblatt eine elektrische Leistungsaufnahme von 80,5 W, das Gerät D370 von 138 W auf. Betrachtet man den Schnittpunkt der Kennlinie des Geräts D470 mit der Höhe von zwei Metern und der Breite von sechs Metern, so lassen sich mit diesem Gerät maximal zwölf Quadratmeter Jalousiefläche bewegen. Dies entspricht rund sieben Watt pro Quadratmeter. Betrachtet man beim Gerät D370 den Schnittpunkt mit der Höhe von drei Metern und einer Breite von 6,5 m, so ergibt sich daraus eine Fläche von 19,5 m². Bei der Leistung von 138 W entspricht dies ebenfalls einer Leistung von rund sieben Watt pro Quadratmeter (Alcatel, 2011). Deswegen wird bei den weiteren Betrachtungen generell mit diesem Wert gerechnet. Diese Leistung ist somit bei Änderung der Jalousiestellung aufzubringen. Die Dauer, für die diese Leistung anfällt, hängt einerseits davon ab, über welche Strecke die Jalousie bewegt wird und andererseits von der Geschwindigkeit, mit der dies geschieht. Zu diesem Zweck wurde eine Messung bei der Jalousieanlage

der FH Burgenland am Campus Pinkafeld durchgeführt. Über eine Strecke von 145 cm wurde beim Herablassen der Jalousie eine Einschaltdauer des Antriebes von 37,84 Sekunden und beim Öffnen von 38,59 Sekunden gemessen. Rundet man den Mittelwert der Einschaltdauer auf 38 Sekunden, so ergibt sich eine Geschwindigkeit der Jalousie von $\sim 0,038$ m/s. Dieser Wert wird neben den 7 W/m^2 für die Leistungsaufnahme im Betrieb für die weiteren Betrachtungen herangezogen. Die automatischen Änderungen der Jalousiestellungen können zum Beispiel aus Gebäudesimulationstools ermittelt werden.

Der elektrische Lastgang von Sensoren und Aktoren in einem Gebäudetechniksystem ist aufgrund der Komplexität und der individuellen Systeme schwer zu schätzen. Deshalb wird hier ein vereinfachter Ansatz gewählt. Die Spannungsversorgung bei Gebäudebussystemen erfolgt meist über eigene Spannungsversorgungseinheiten, die bei einer maximalen Stromaufnahme von 640 mA bis zu 64 Teilnehmer versorgen können. Geräte mit einer maximalen Stromaufnahme von 320 mA können bis zu 32 Teilnehmer versorgen. Dies bedeutet eine Stromaufnahme von 10 mA je Teilnehmer. Bei einer nominalen Spannung von 24 V bei EIB-Bussystemen entspricht dies einer Leistungsaufnahme von $0,24 \text{ W}$ je Teilnehmer. Somit wird die Anzahl der Aktoren und Sensoren im Gebäude mit diesem Wert multipliziert und als gleichmäßige Last auf den Lastgang im Gebäude aufgeschlagen. Da die Leistungsaufnahme dieser Geräte so gering ist, wird dies als hinreichend genau erachtet (Merz et al, 2007).

2.4 Übersicht der getroffenen Annahmen Lastverhalten

Zum Zwecke der Übersichtlichkeit soll an dieser Stelle einer Zusammenfassung aller getroffenen Annahmen und Vereinfachungen bei der Betrachtung des Lastverhaltens ohne Optimierung der einzelnen Verbraucher eingefügt werden. Diese wurden zwar in den Kapiteln 2.1 bis 2.3 ebenfalls abgehandelt, werden hier aber nochmals komprimiert in tabellarischer Form dargestellt (Tabelle 2.26).

Tabelle 2.26: Annahmen und Vereinfachungen

Kategorie	Annahme / Vereinfachung
Infrastruktur	
-PC	<ul style="list-style-type: none"> • Leistungsaufnahme im Aktiven Modus = Leistungsaufnahme im Idle-Modus • Leistungsaufnahme entspricht dem Durchschnitt der jeweils in der Datenbank von Energystar gelisteten Geräte • Automatische Schaltung in den Sleep-Modus nach einer halben Stunde Inaktivität des Users
-Monitor	<ul style="list-style-type: none"> • Leistungsaufnahme entspricht dem Durchschnitt der jeweils in der Datenbank von Energystar in Kategorie 2 gelisteten Geräte • Automatische Schaltung in den Sleep-Modus nach 15 Minuten Inaktivität des Users
-Notebook	<ul style="list-style-type: none"> • Leistungsaufnahme im Aktiven Modus = Leistungsaufnahme im Idle-Modus • Geräte sind im Büro immer an die externe Stromversorgung angeschlossen • Dynamische Prozessorregelung gleicht sich über den Viertelstundenmittelwert aus • Automatische Schaltung des Prozessors in den Sleep-Modus nach einer halben Stunde, des Monitors nach 15 Minuten Inaktivität des Users • Leistungsaufnahme bei ausgeschaltetem Display halbiert sich • Nutzung im Akkubetrieb vernachlässigbar
-Thin Client	<ul style="list-style-type: none"> • Leistungsaufnahme entspricht dem Durchschnitt der jeweils in der Datenbank von Energystar gelisteten Geräte • Automatische Schaltung in den Sleep-Modus nach einer halben Stunde Inaktivität des Users
-Bildgebende Geräte	<ul style="list-style-type: none"> • Zeit am Schluss wird bei Berechnung vernachlässigt • Zeit im Idle-Modus vom letzten Druckauftrag plus 15 Minuten wird vernachlässigt • Die Anzahl der Aufträge pro Tag und der Seiten pro Auftrag hängen allein von der Geschwindigkeit des Geräts ab und sind konstant. • Leistungsaufnahme im Sleep-Modus entspricht dem Durchschnitt der jeweils in der Datenbank von Energystar gelisteten Geräte • Leistungsaufnahme pro Auftrag wird über eine Trendlinie der in der Datenbank gelisteten Geräte ermittelt • Außerhalb der Viertelstundenintervalle der Auftragsverarbeitung entspricht die Leistungsaufnahme immer jener im Sleep-Modus

Kategorie	Annahme / Vereinfachung
	<ul style="list-style-type: none"> • Verteilung der Druckaufträge erfolgt zufällig über die jeweilige Arbeitszeit • Die Mittagspause wird nicht von allen Mitarbeitern zeitgleich gehalten, deswegen ist auch zur Mittagszeit keine Zeit für mögliche Druckaufträge ausgenommen • Maximal ein Auftrag pro Viertelstundenintervall
-Server	<ul style="list-style-type: none"> • Leistungsaufnahme ist abhängig von der Anzahl der Prozessorsocket • Leistungsaufnahme zwischen 0 % Auslastung und 100 % Auslastung linearisiert • Auslastungszustände werden zufällig über 24 Stunden verteilt
-Beamer	<ul style="list-style-type: none"> • Leistungsaufnahmen gemäß dem Durchschnitt der in der Datenbank von „Topprodukte“ gelisteten Geräte • Bei Fixmontage erfolgt keine komplette Abschaltung – Leistung im Standby-Modus fällt immer an • Betrieb nur während der Büronutzungszeit
-Aufzug	<ul style="list-style-type: none"> • Leistungsaufnahme bei Stillstand fällt zusätzlich zur Leistungsaufnahme der Fahrt auch während der Fahrt an • Fahrten nur während der Betriebsdauer des Büros • Anzahl der Fahrten wird zufällig über die Anwesenheitszeit im Büro verteilt • Energieverbrauch wird auf Referenzfahrten aufgeteilt
-Mikrowellenherd	<ul style="list-style-type: none"> • Betrieb während der ersten Stunde sowie während der Mittagszeit • Während dieser Zeit zufällige Verteilung des Jahresverbrauchs
-Elektroherd	<ul style="list-style-type: none"> • Betrieb am Morgen und während der Mittagszeit • Maximalleistung = Anschlussleistung multipliziert mit Gleichzeitigkeitsfaktor
-Kaffeemaschine	<ul style="list-style-type: none"> • Leistungsaufnahme im Standby- und Bereitschaftsmodus gemäß Vorgabe „Topprodukte“ • Automatische Schaltung in den Standby- Modus nach einer Stunde • Betrieb am Morgen und während der Mittagszeit
-Kühlschrank	<ul style="list-style-type: none"> • Leistungszahl Kompressor = 1,5 • Thermische Masse = 15,97 kWh/°C • Isolierung = 1,84 W/°C • Keine Zwischenzustände zwischen dauernder Leistungsaufnahme im Viertelstundenintervall und keiner Leistungsaufnahme • Einlagerung warmer Lebensmittel wird vernachlässigt • Kühlschrankbeleuchtung wird vernachlässigt • Kälteverlust bei Öffnung des Kühlschranks wird vernachlässigt
-Geschirrspüler	<ul style="list-style-type: none"> • Übernahme der jeweiligen Verbrauchswerte aus der Plattform „Topprodukte“ • 85 % der Energie fällt in den Heizphasen an • Programmablauf in 6 Phasen zu je 15 Minuten
-Wasserkocher	<ul style="list-style-type: none"> • Wirkungsgrad 85 %
-Telefon	<ul style="list-style-type: none"> • Leistungsaufnahme konstant
-Sonstige Geräte	<ul style="list-style-type: none"> • Sonstige Geräte der Büroangestellten werden nicht betrachtet

Kategorie	Annahme / Vereinfachung
Beleuchtung	<ul style="list-style-type: none"> Abwesenheitszeiten während der Nutzungszeit zufällig und jeweils 15 Minuten oder ein Vielfaches davon Notbeleuchtung wird nicht berücksichtigt, da sicherheitstechnische Einweisung des Personals vorausgesetzt wird
Peripherie	
-Ventilatoren	<ul style="list-style-type: none"> Lüftungsbedarf nur während der Nutzungszeit des Gebäudes Spezifische Wärmekapazität und Dichte entspricht der trockeneren Luft bei Normbedingungen Drehzahlgeregelte Ventilatoren mit idealem Teillastverhalten
-Pumpen	<ul style="list-style-type: none"> Dichte und Wärmekapazität Warmwasser = konstant Drehzahlgeregelte Pumpen bei Systemen mit veränderlichem Volumenstrom Arbeit bei Nennleistung bei Systemen mit konstantem Volumenstrom Konstante Leistungsaufnahme der Zirkulationspumpe
-Widerstandsheizung	<ul style="list-style-type: none"> Wirkungsgrad = 100 %
-Wärmepumpe	<ul style="list-style-type: none"> Drehzahlgeregelter Kompressor – Ideales Teillastverhalten Wärmeverhältnis Absorptionswärmepumpe = 1,7 Teillastverhalten Absorptionswärmepumpe wird durch Interpolation des Faktors für den elektrischen Leistungsbedarf nach der Auslastung berücksichtigt
-Kühlung	<ul style="list-style-type: none"> Drehzahlgeregelter Kompressor – Ideales Teillastverhalten Teillastverhalten Ad- oder Absorptionskältemaschinen wird durch Interpolation des Faktors für den elektrischen Leistungsbedarf nach der Auslastung berücksichtigt Wärmeverhältnis Absorptionskältemaschine = 0,7 Wärmeverhältnis Adsorptionskältemaschine = 0,6 Freie Kühlung möglich wenn Außentemperatur < Raumtemperatur Leistungsaufnahme Motoren für Sorptions- bzw. Wärmerückgewinnungsräder bei sorptionsgestützter Klimatisierung wird proportional zum Luftvolumenstrom zwischen keiner Leistungsaufnahme und Nennleistung interpoliert
-Be / Entfeuchtung	<ul style="list-style-type: none"> Notwendige thermische Energie ist im thermischen Lastgang aus Gebäudesimulation enthalten
-Warmwasser	<ul style="list-style-type: none"> Warmwasserentnahmen mit der Entnahmerate von 10 l/min Kaltwassertemperatur 10°C, Warmwassertemperatur 40°C Heizleistung dezentrale Wassererwärmung mit Speicher: 3,5 kW Zirkulationsverluste nur bei zentralen Systemen Warmwasserentnahmen zufällig über die Nutzungszeit des Gebäudes verteilt Keine Berücksichtigung der Speicherverluste bei dezentralen Geräten Wirkungsgrad elektrische Widerstandsheizung = 1
-Sonstige Hilfsenergie	<ul style="list-style-type: none"> Wirkungsgrad Warmwasserrohrbegleitheizung = 1 Leistungsbedarf Jalousie = 7 W/m² Geschwindigkeit Jalousie = 0,038 m/s

Kategorie	Annahme / Vereinfachung
	<ul style="list-style-type: none"> • Betriebszeiten der Jalousien können aus Gebäudesimulation übernommen werden • Pro Sensor oder Aktor fällt eine Bandlast von 0,24 W an

2.5 Potential Lastmanagement

Hinsichtlich der Eignung zum elektrischen Lastmanagement, auch als Demand Side Management (DSM) bezeichnet, werden elektrische Verbraucher in drei Kategorien eingeteilt. Das höchste Potential weisen Verbraucher auf, die intern oder extern thermisches (in Einzelfällen elektrisches) Speicherpotential nutzen können, um elektrische Lasten zu verschieben. Dazu zählt neben Kühlschränken und Warmwasserspeichern auch das Speichervermögen des Gebäudes selbst. Abhängig von der Art der Heizung kann hier elektrische Leistungsaufnahme von Pumpen und Ventilatoren, bei elektrischen Heiz- oder Kühlanlagen auch der Wärme- bzw. Kältebereitstellung selbst zeitlich verschoben werden. Ein Merkmal hier ist zudem, dass der Nutzer meist nicht realisiert, dass überhaupt aktives Lastmanagement stattfindet.

In die zweite Kategorie werden Verbraucher ohne Speichervermögen eingeteilt, bei denen der Zeitpunkt des Betriebs nicht vordergründig ist. Als Beispiel sei hierfür der Geschirrspüler genannt. Die Beurteilung der Wichtigkeit des Zeitpunktes kann hier für den gleichen Verbrauchertyp unterschiedlich sein. So wird beispielsweise ein Geschirrspüler in einem Gastronomiebetrieb aufgrund der Auslastung zu Stoßzeiten nahezu durchlaufen und es besteht kaum Potential zur Lastverschiebung. In Teeküchen von Büros werden Geschirrspüler oft nur einmal pro Tag eingeschaltet und der Zeitpunkt des Einschaltens ist nicht vordergründig. Der Nutzer bemerkt hier zwar das Lastmanagement, der dadurch entstehende Komfortverlust ist aber in einem akzeptablen Bereich.

Die dritte Kategorie betrifft Verbraucher, die nicht für DSM geeignet sind. Hier ist der Zeitpunkt des Betriebs für die Nutzung überaus ausschlaggebend, andere Betriebszeiten würden für die Nutzer einen hohen Komfortverlust bedeuten. Beispielsweise kann die Betriebszeit eines PCs in Büros nicht von der Normalarbeitszeit in die Nacht verschoben werden, um dadurch die elektrische Leistungsaufnahme zeitlich zu verschieben. Abgesehen von der Lastgangoptimierung durch Verschiebung der elektrischen Leistungsaufnahme haben Effizienzmaßnahmen allerdings in allen drei Kategorien direkte Auswirkung auf den elektrischen Lastgang des Gesamtsystems. So kann die Tageslichtnutzung beispielsweise den Leistungsbedarf während des Tages senken und somit den Energiebedarf zu Hochtarifzeiten reduzieren. Im Gegensatz zur Lastverschiebung ist bei solchen Effizienzmaßnahmen allerdings keine Leistungsaufnahme zu einem anderen Zeitpunkt notwendig (Brauner et al, 2007). In Tabelle 2.27 werden die in den Kapiteln 2.1 bis 2.3 vorgestellten Verbraucher anhand der gezeigten Zusammenhänge nach diesen Kriterien eingeteilt. In Kategorie 1 (K1) werden dabei Geräte eingeteilt, die Speicher zur Lastverschiebung nutzen können. Kategorie 2 (K2) sind die Geräte, deren Zeitpunkt der Leistungsaufnahme ohne wesentlichen Komfortverlust verschoben werden kann. Die restlichen Verbraucher, deren Leistungsaufnahme nicht ohne große Einschränkungen für die Nutzer zeitlich verschoben werden kann, werden in Kategorie 3 (K3) eingeteilt. Die Einteilung in die Kategorien, vor allem aber die Entscheidung darüber, ob die Verschiebung von

Betriebszeiten für den Nutzer zumutbar ist und das jeweilige Gerät ohne Speicher somit in Kategorie 2 angesiedelt werden kann, wird vom Autor getroffen. In der Realität ist es natürlich möglich, dass der Nutzer diesbezüglich andere Prioritäten hat, für diese Untersuchung wird hier aber die Einteilung des Autoren vorausgesetzt.

Tabelle 2.27: Kategorisierung der Verbraucher nach Lastverschiebungspotential

Verbraucher	K1	K2	K3
Infrastruktur			
PC			■
Monitor			■
Notebook	■		
Thin Client			■
Bildgebende Geräte			■
Server			■
Beamer			■
Aufzug			■
Mikrowellenherd			■
Elektroherd			■
Kaffeemaschine			■
Kühlschrank	■		
Geschirrspüler		■	
Wasserkocher			■
Telefon			■
Beleuchtung			■
Peripherie			
Ventilatoren	■		
Pumpen	■		
Elektrische Heizung	■		
Wärmepumpe	■		
Kühlung	■		
Be / Entfeuchtung	■		
Warmwasser	■		■
Warmwasserrohrbegleitheizung			■
Jalousiemotor			■
Sensoren / Aktoren			■

Um die Arbeitsabläufe nicht zu beeinflussen, müssen die meisten Bürogeräte in Bürogebäuden während der Nutzungszeit des Gebäudes natürlich bei Bedarf jederzeit verfügbar sein. Außer der Nutzung von effizienten Geräten und diversen Einstellungen zur Senkung des Energiebedarfs sind hier keine Möglichkeiten gegeben, den Lastgang zu beeinflussen. Als energiesparende Maßnahmen können beispielsweise in den Energieoptionen von PCs Einstellungen vorgenommen werden, die die Zeit, nach denen sich die Geräte (und andere daran angeschlossene Geräte) automatisch in einen Status geringerer Leistungsaufnahme schalten, verkürzen. Hierzu gehören PC, Monitor, Thin Client, bildgebende Geräte, Server und Beamer. Andere, von der EDV unabhängige Verbraucher der Infrastruktur sind Aufzug, Mikrowellenherd, Kaffee-

maschine und Wasserkocher. Hier bestimmt vor allem der Nutzer, wann ein Gerät in Betrieb geht. Auswirkungen auf den Lastgang mit akzeptabler Einschränkung der Nutzer sind hier nur über die Effizienz der Geräte zu erzielen. Eine Lastverschiebung wird hier nicht als sinnvoll erachtet. Innerhalb der Infrastruktur konnten zwei Geräte identifiziert werden, die Speicher zur Lastverschiebung nutzen können. Der Laptop hat einen Akku eingebaut, der über die Umwandlung von elektrischer in chemische Energie und umgekehrt zur Lastverschiebung genutzt werden kann. Der Kühlschrank stellt einen thermischen Speicher dar, mit deren aktiver Nutzung Einfluss auf den Lastgang genommen werden kann. Zudem ist mit dem Geschirrspüler ein Gerät vorhanden, dessen Einschaltzeitpunkt im Bürogebäude unter akzeptablem Komfortverlust frei gewählt werden und so ein Beitrag zum Lastmanagement geleistet werden kann.

Die Beleuchtung kann weder Speichermöglichkeiten nutzen, um die Leistungsaufnahme zu verschieben, noch ist der Zeitpunkt des Betriebs der Beleuchtung unabhängig von der Tageszeit. Mit effizienten Beleuchtungsmitteln und intelligenten Regelstrategien ist jedoch auch hier Effizienzpotential vorhanden, dass auch Einfluss auf den elektrischen Lastgang hat.

Einsatzzeiten von Geräten der Wärmebereitstellung und Verteilung innerhalb der Peripherie können durch Nutzung thermischer Speicherkapazitäten zur Verschiebung elektrischer Lasten genutzt werden. Hierzu zählen sowohl Ventilatoren, Pumpen, elektrische Widerstandsheizungen als auch Wärmepumpen und Kühlgeräte. Innerhalb vorgegebener Parameter können auch Be- und Entfeuchtungsgeräte zeitlich unabhängig eingesetzt werden. Bei mechanischer Belüftung unterliegen die Ventilatoren jedoch der Einschränkung, dass die Frischluftzufuhr gewährleistet sein muss. Bei der Bereitstellung von Warmwasser ist es abhängig vom System, ob Lastverschiebungspotential besteht. Während Geräte mit Speicher geeignet sind, ist bei Durchlauferhitzern kein Lastverschiebungspotential erkennbar. Beim Betrieb von Warmwasserrohrbegleitheizungen, Zirkulationspumpen, Jalousiemotoren, Sensoren und Aktoren ist ebenfalls kein Potential für DSM erkennbar.

Ein mögliches Aufbauschema der Kommunikation eines optimierten Gesamtsystems ist in Abbildung 2.45 zu sehen (Rössel et al, 2011).

In einer Managementzentrale fließen sämtliche Informationen zusammen. Sensoren erfassen das Wetter sowie den Raumluftzustand und die Beleuchtungsstärke im Inneren des Gebäudes. Informationen über den Strompreis können von extern in das System gebracht werden. Der momentane Betriebszustand der Verbraucher ist ebenso wie der Status von eventuellen Speichern bekannt. Bei Vorhandensein einer dezentralen Energieerzeugungsanlage liefert diese ebenfalls den Wert der momentanen Erzeugung an das System (Rössel et al, 2011).

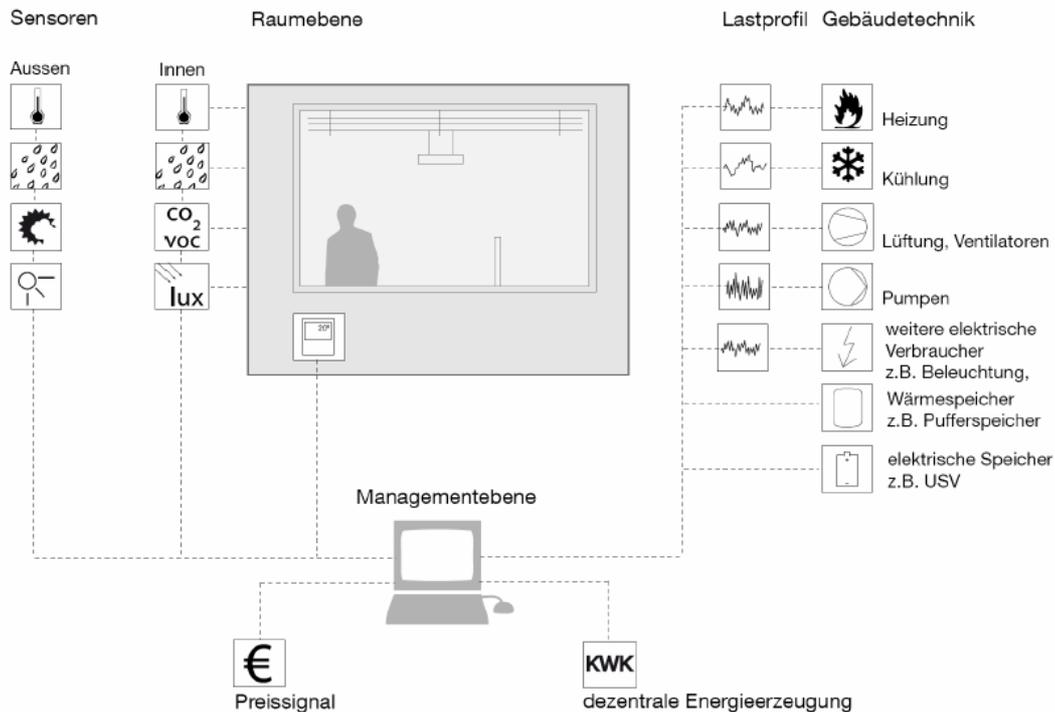


Abbildung 2.45: Kommunikation Lastmanagement (Rössel et al, 2011)

Anhand der Daten lassen sich für die wetterunabhängigen Verbraucher bereits Lastgänge vorhersagen. (Rössel et al, 2011) Ergänzt man dieses Schema noch um eine Wettervorhersage, so lassen sich die Lastgänge aller Verbraucher nach den in Kapitel 2.1 bis 2.3 gezeigten Zusammenhängen vorhersagen. Auch die Lastgänge der Erzeugungsanlagen (vgl. Kapitel 2.6) lassen sich damit im Voraus bestimmen. Im Folgenden werden nun die Verbraucher mit Lastverschiebungspotential (Kategorie 1 und 2) näher betrachtet. Zudem wird gezeigt, wie der Beleuchtungsenergiebedarf gesenkt werden kann, was ebenfalls Auswirkungen auf den elektrischen Lastgang des Gebäudes hat.

2.5.1 Infrastruktur

Als Geräte mit Speicherpotential wurden bei der Infrastruktur Notebooks und Kühlschränke identifiziert. Zudem wird angenommen, dass Geschirrspüler in Bürogebäuden einmal täglich in Betrieb genommen werden und der Einschaltzeitpunkt somit frei gewählt werden kann.

Notebooks eignen sich aufgrund des integrierten Akkus zur Verschiebung elektrischer Lasten. Die Zeit, die ein Notebook ohne Stromversorgung überbrücken kann, hängt von der Kapazität des Akkus und von der Leistungsaufnahme des Geräts ab. Oft wird die Kapazität von Akkus in Amperestunden oder Milliamperestunden angegeben. Um den jeweiligen Energieinhalt ermitteln zu können, muss dieser Wert dann noch mit der Spannung in Volt multipliziert werden. Da in der Betrachtung das Spannungsniveau jedoch keine Rolle spielt, wird von Angaben dieser Art abgesehen und der Energieinhalt von Akkus in Wattstunden betrachtet. Die Zeit, die mit dem Akku ohne Stromaufnahme überbrückt werden kann, lässt sich somit aus Gleichung 2.64 errechnen. Von der gesamten Akkukapazität ist hierbei jene Kapazität abzuziehen, die zur Schonung des Akkus bei der Entladung nicht entladen werden darf. Aus dieser Differenz ergibt sich die nutzbare Akkukapazität (Jossen und Weydanz, 2006).

$$t_E = \frac{C_A}{P_E} \quad (2.64)$$

t_E	Entladedauer [h]
C_A	Nutzbare Akkukapazität [Wh]
P_E	Entnahmeleistung [W]

Die Entnahmeleistung der Notebooks kann aus Kapitel 2.1.3 übernommen werden. Typische Akkukapazitäten betragen um die 70 Wh, wobei die Streuung unterschiedlicher Modelle von rund 40 Wh bis 110 Wh beträgt (notebookakkus, 2011). Dies bedeutet zum Beispiel, dass ein Notebook der Kategorie C mit einer Leistungsaufnahme im Idle-Modus von 26,73 W (vgl. Tabelle 2.4) bei einer nutzbaren Akkukapazität von 90 Wh rund 3 h und 15 min ohne externe Stromversorgung betrieben werden kann. Da in Notebooks im Normalfall Lithium-Ionen Akkus verwendet werden, kann deren Ladewirkungsgrad mit 0,95 angenommen werden. Für die Akkuladung von 0,95 Wh muss also eine Wattstunde Netzstrom verwendet werden. Mit einer Netzleistung von einem Watt kann man den Akku mit einer Leistung von 0,95 W beladen. Wird der Laptop vom Akku mit Strom versorgt, muss dieser aber in einem anderen Zeitraum wieder geladen werden. Nimmt man an, dass die Ladung mit gleicher Leistung erfolgt wie die Entladung (=1 C), müssen für die Ladung die in den Akku eingespeicherte Energie und zusätzlich die Verluste aufgebracht werden. So erhöht sich während der Zeit der Ladung die Leistungsaufnahme um 26,73 W dividiert durch den Ladewirkungsgrad (0,95). Wenn die Ladung erfolgt, wenn das Notebook ausgeschaltet ist, ist für diesen Zeitraum die jeweilige Leistung im Idle-Modus dividiert durch den Ladewirkungsgrad anzusetzen (Jossen und Weydanz, 2006).

Das Lastmanagement unter Ausnutzung des Akkus kann nun auf verschiedene Arten erfolgen. Am einfachsten ist die Vorgehensweise bei einem Strompreismodell, das abhängig von der Zeit einen Hoch- und einen Niedrigtarif beinhaltet. Ist die Zeitspanne für den teureren Tarif 6:00 bis 22:00, so ist der gesamte Nutzungszeitraum des Bürogebäudes (8:00 bis 16:30) innerhalb dieser Zeitspanne. Eine kostenwirksame Lastverschiebung kann also nur erfolgen, wenn der Akku außerhalb der Hochtarifzeit an die Stromversorgung angeschlossen wird und das Energiemanagement automatisiert einen Befehl für die Beladung gibt. Mit dieser Vorgehensweise lässt sich eine Stromaufnahme in der Höhe der Akkukapazität von der Hochtarifzeit in die Niedrigtarifzeit verschieben. Um dies zu bewerkstelligen ist es allerdings auch notwendig, beim Notebook zu gewährleisten, dass der Betrieb auch bei nicht vollem Akku ohne gleichzeitige Ladung des Akkus möglich ist. Bei dieser Vorgehensweise muss bei dem Ladewirkungsgrad von 0,95 in der Zeit niedriger Strompreise somit rund das 1,053fache (=1/0,95) an Strom zur Beladung des Akkus aufgewendet werden, als in der Hochtarifzeit eingespart werden kann. Die Lastverschiebung lohnt sich somit nur, wenn das Verhältnis vom Strompreis in der Hochtarifzeit zum Preis in der Niedertarifzeit höher als 1,053 ist.

Bei einem Strompreismodell mit variablem Tarif analog zum Börsenpreis gibt es verschiedene Möglichkeiten, die anhand der Börsenpreise von 2008 beurteilt werden sollen (EXAA, 2011). Es wird hierbei von einer durchgehenden Anwesenheitszeit von 8:00 bis 16:30 ausgegangen. An Feiertagen und Wochenenden besteht keine Anwe-

senheit. Die Leistungsaufnahme für Notebooks der Kategorie C im ausgeschalteten aber an die Stromversorgung angeschlossenen Zustand beträgt 1,06 W (vgl. Tabelle 2.4), im Idle-Modus 26,73 W. Wird der Akku außerhalb der Nutzungszeiten geladen, beträgt die Leistungsaufnahme 28,14 W, während der Nutzungszeit 53,46 W (26,73 W für Betrieb im Idle-Modus und 28,14 W für die Ladung des Akkus). Die Akkukapazität beträgt laut oben genannten Beispiel 90 Wh, was einen Akkubetrieb von rund dreieinviertel Stunden, das sind 13 Viertelstundenintervalle, möglich macht.

Der erste Fall geht davon aus, dass das Notebook außerhalb der Nutzungszeit des Bürogebäudes nicht an die externe Stromversorgung angeschlossen ist. Eine Lastverschiebung kann also nur zwischen 8:00 und 16:30 erfolgen. Für diesen Zeitraum wird täglich der maximale und minimale Strompreis ermittelt. Nun werden drei Fälle unterschieden. Liegt der momentane Strompreis im oberen Drittel dieser Preisspanne, so erfolgt, wenn noch Akkukapazität vorhanden ist, eine Stromversorgung über den Akku, wenn nicht über das Netz. Der Akku wird nicht geladen. Liegt der Preis im mittleren Drittel dieser Spanne, so wird der Laptop unabhängig vom Ladezustand des Akkus mit Netzstrom betrieben, es erfolgt ebenfalls keine Ladung des Akkus. Ist der Momentanpreis im günstigsten Preisdrittel des Tages anzufinden, erfolgt ein Betrieb des Laptops mit Netzstrom und die Ladung des Akkus bis zur vollen Kapazität. Es ist zu beachten, dass in diesem Fall außerhalb der Nutzungszeit keine Stromaufnahme erfolgt. Auch die 1,06 W für den Off-Modus sind hier nicht zu berücksichtigen. Abbildung 2.46 stellt dieses Prinzip grafisch dar.

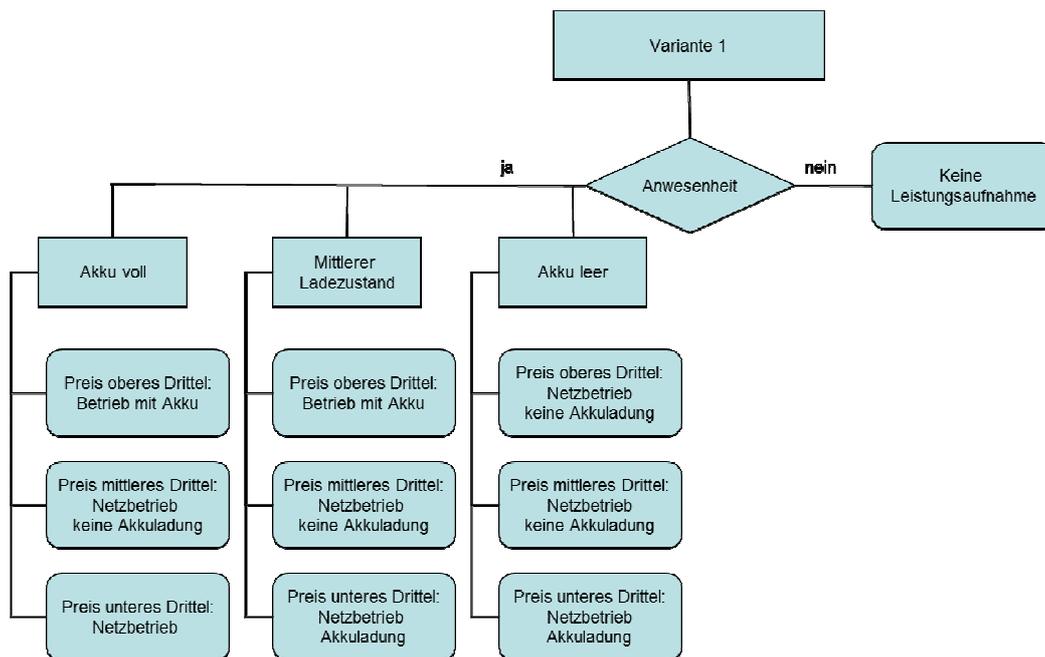


Abbildung 2.46: Notebook Optimierungsvariante 1

Beim den anderen Fällen bleiben die Notebooks über Nacht mit dem Stromnetz verbunden. Damit können zusätzlich zu den jeweils günstigsten Strompreisen während der Nutzungszeit die günstigsten Strompreise außerhalb der Nutzungszeit zur einmaligen Beladung des Akkus genutzt werden. Beim zweiten Fall bleibt somit die Strategie während der Nutzungszeit gleich, außerhalb der Nutzungszeit wird der Akku jedoch zusätzlich voll aufgeladen, während der Strom günstig ist. Als Kriterium für die Beladung wird wieder das günstigste Preisdrittel zwischen Höchst- und Tiefstpreis während der Abwesenheitszeit herangezogen. Abbildung 2.47 zeigt dieses Schema.

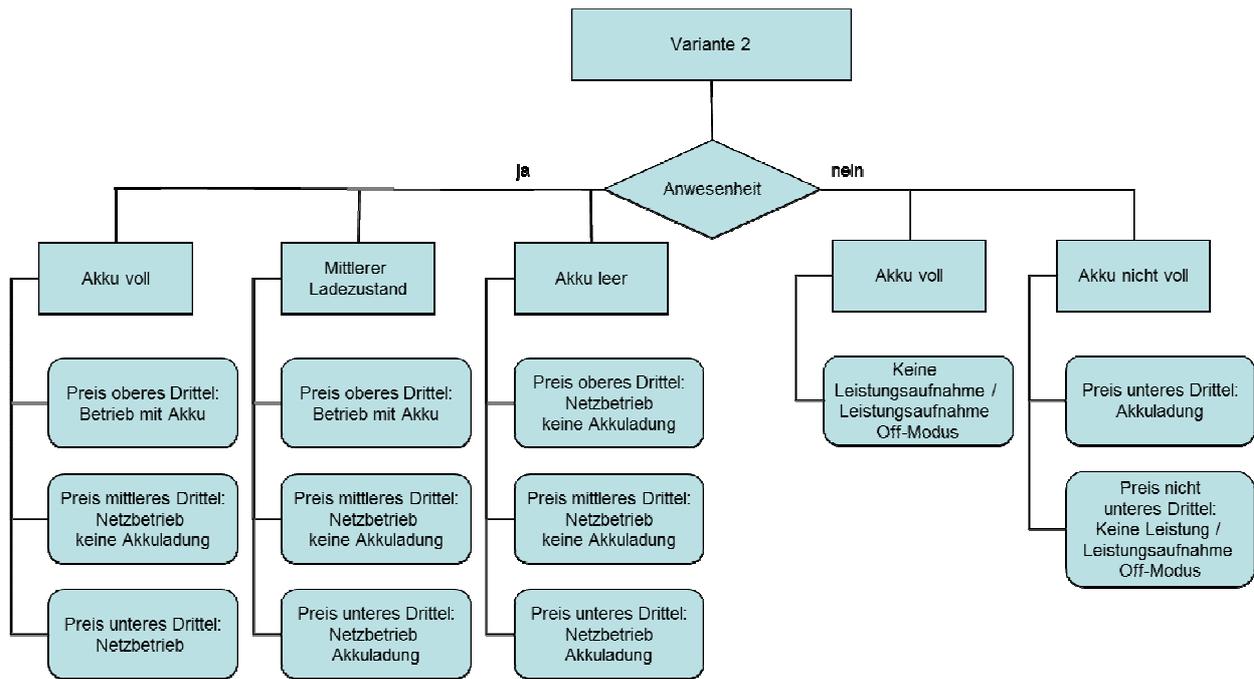


Abbildung 2.47: Notebook Optimierungsvariante 2

Die dritte Strategie deckt sich mit der zweiten weitgehend. Da Strompreise derzeit nachts tendenziell aber günstiger sind als während der Bürozeiten, wird abweichend von der zweiten Strategie versucht, den Ladezustand in den letzten Stunden der Anwesenheitszeit so weit wie möglich zu senken, so dass (nahezu) die volle Kapazität nachts wieder nachgeladen werden kann. Dies wird dadurch erreicht, dass der Akku in den letzten dreizehn Viertelstundenintervallen der jeweiligen Nutzungszeit nicht mehr nachgeladen wird. Zudem wird je nach Restkapazität im Akku zum jeweiligen Zeitpunkt, ab dem der Tagesbedarf noch mit dem Akku gedeckt werden kann, auf Akkubetrieb umgeschaltet. Abbildung 2.48 zeigt dieses Schema.

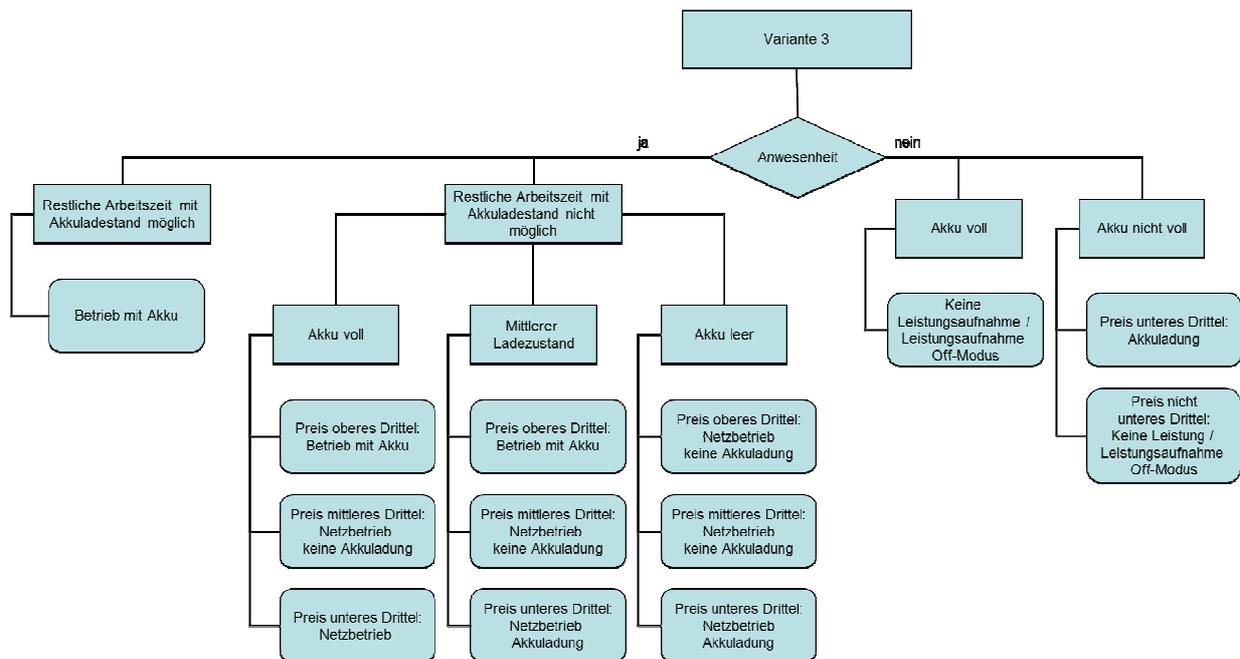


Abbildung 2.48: Notebook Optimierungsvariante 3

Bei der zweiten und dritten Strategie ist zu beachten, dass außerhalb der Nutzungszeiten der Verbrauch von 1,06 W im Off-Modus angesetzt werden muss. Dies kann jedoch auch verhindert werden, in dem die jeweilige Steckdose bei Nichtverwendung automatisch spannungsfrei geschaltet wird. Ein Signal für die Steckdose, sich spannungsfrei zu schalten, könnte hier beispielsweise sein, dass die Leistungsaufnahme unter einen gewissen Wert fällt und die Steckdose so erkennt, dass es sich lediglich um Verbrauch im Off-Modus handelt. Man muss hier die Grenzen jedoch relativ eng wählen, damit sich die Steckdose nicht schon ausschaltet, wenn das Notebook in den Standby-Modus wechselt. Die Leistungsaufnahme dafür beträgt bei Notebooks der Kategorie C 2.64 W (vgl. Tabelle 2.4).

Multipliziert man die Leistung der verschiedenen Varianten mit dem Strompreis der jeweiligen Stunde (EXAA, 2011) und setzt die Summe der Werte mit der Summe aus dem Standardlastgang ins Verhältnis, so ergeben sich die Ergebnisse gemäß Tabelle 2.28.

Tabelle 2.28: Vergleich Varianten Notebooks (Daten aus EXAA, 2011)

Variante	Jährliche Energiekosten [-]
Standardlastgang	100,00
Variante 1	96,46
Variante 2, kein Verbrauch Off-Modus	92,56
Variante 2, Verbrauch Off-Modus	100,89
Variante 3, kein Verbrauch Off-Modus	82,67
Variante 3, Verbrauch Off-Modus	89,70

Es ist zu erkennen, dass die jährlichen Energiekosten bei Variante 3 am niedrigsten sind. Dies ist vor allem auf die durchschnittlich niedrigeren Strompreise in der Nacht zurückzuführen. Auffällig ist auch, dass der Verbrauch im Off-Modus bei Variante 2 zu höheren Stromkosten als beim Standardlastgang führen würde. Diese Variante wäre nur sinnvoll, wenn die Steckdosen außerhalb der Ladezeit in der Nacht spannungsfrei geschaltet werden können. Vor allem die Variante 3 verspricht bei Spannungsfreischaltung der Steckdose mit über 17 % ein hohes Einsparungspotential. Abbildung 2.49 bis Abbildung 2.51 zeigen den Lastgang je eines Tages und den Akkustatus in den verschiedenen Optimierungsvarianten sowie den Strompreis jeder Stunde. Bei den Varianten 2 und 3 wurde die Darstellung mit Spannungsfreischaltung der Steckdose gewählt (Daten aus EXAA, 2011).

Zur besseren Übersichtlichkeit wurde hier der Lastgang jeweils für einen Intervall von 24 h von Arbeitsbeginn eines Tages bis zum Arbeitsbeginn des nächsten Tages dargestellt. Während bei Variante 1 nur Leistung während der Nutzungszeit verschoben wird, wird bei den anderen Varianten auch Leistungsaufnahme von der Nutzungszeit in die Nacht verschoben. Ein weiterer wesentlicher Unterschied zwischen den Varianten besteht darin, dass bei Variante 2 und 3 der Akku am Ende der dargestellten Periode jeweils voll beladen ist, während dies bei der Variante 1 nicht der Fall ist.

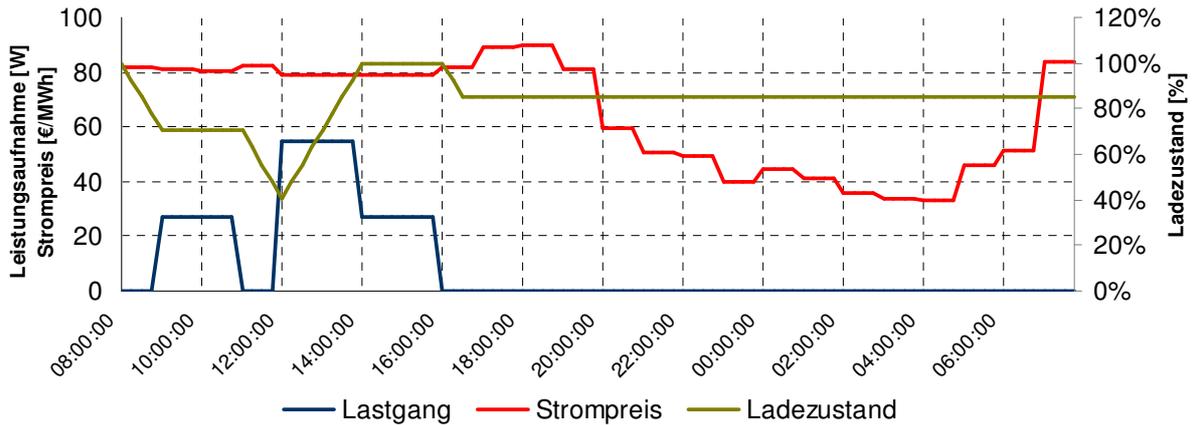


Abbildung 2.49: Lastgang Notebook Optimierungsvariante 1 (Daten aus EXAA, 2011)

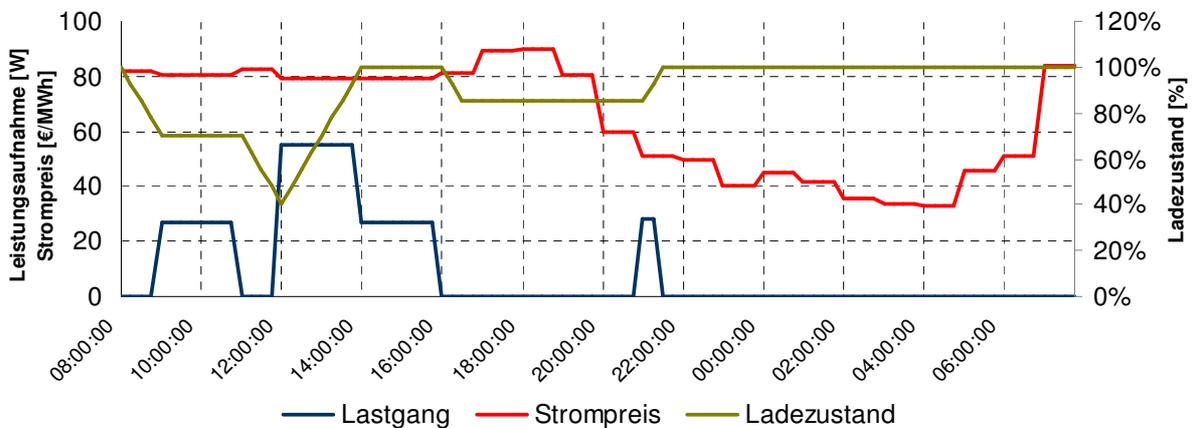


Abbildung 2.50: Lastgang Notebook Optimierungsvariante 2 (Daten aus EXAA, 2011)

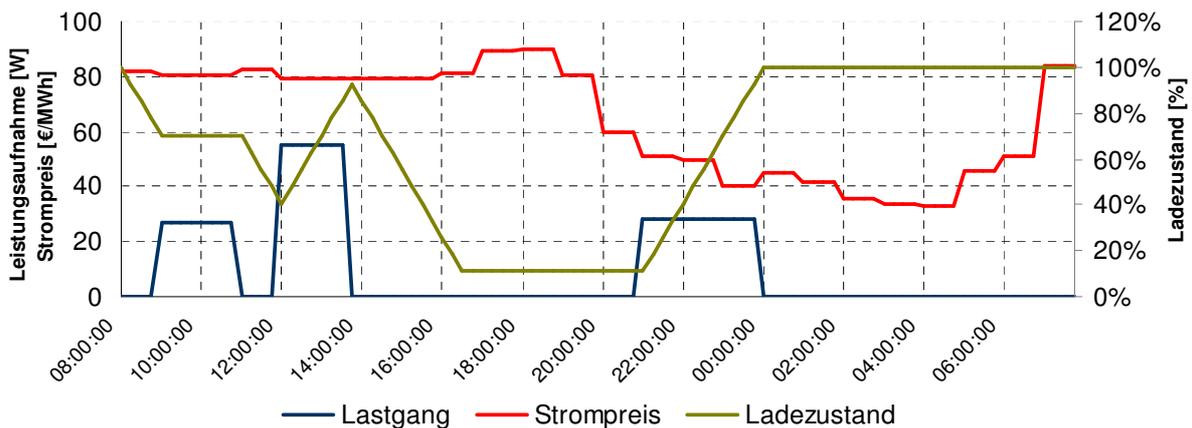


Abbildung 2.51: Lastgang Notebook Optimierungsvariante 3 (Daten aus EXAA, 2011)

Aufgrund der in Tabelle 2.28 gezeigten Werte erscheint die Variante 3 sowohl mit, als auch ohne Spannungsfreischaltung der Steckdosen als effizienteste Variante. Verbleiben die Notebooks nicht im Büro sondern werden von den Mitarbeitern nach Dienstschluss mitgenommen, so ist ohnehin nur Variante 1 möglich. Variante 2 scheint ohne Spannungsfreischaltung der Steckdosen nicht sinnvoll, da sich in diesem Fall die Stromkosten sogar erhöhen.

Basierend auf der dritten Variante wird nun eine weitere Optimierung vorgenommen. Da in den Strompreisen ersichtlich ist, dass die Preise auch in der Abwesenheitszeit meist nach Mitternacht niedriger sind als vor Mitternacht, erfolgt die Nachladung bei der optimierten Variante 3 nur nach Mitternacht. Die restlichen Bedingungen bleiben gleich. Abbildung 2.52 zeigt dazu das Beispiel eines Lastganges für einen Tag (Daten aus EXAA, 2011).

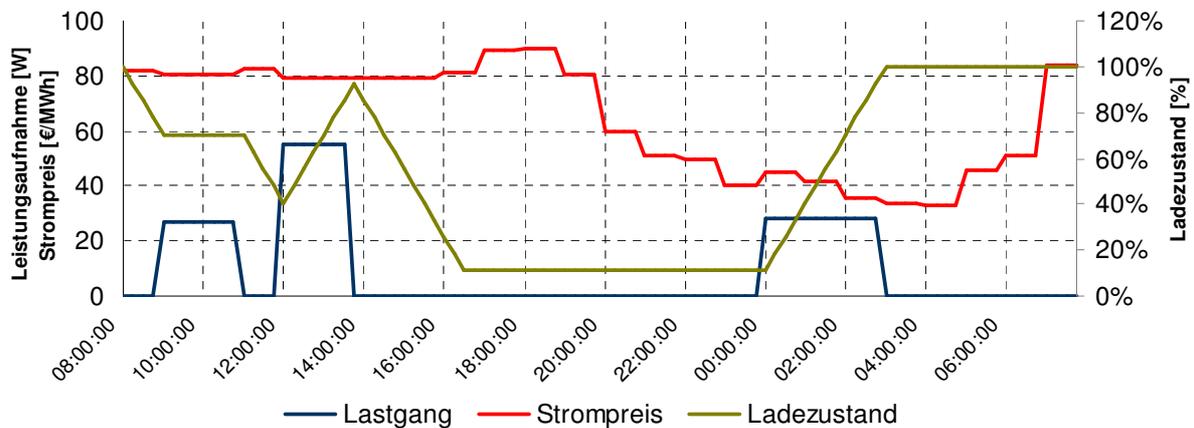


Abbildung 2.52: Lastgang Notebook Optimierungsvariante 3 erweitert (Daten aus EXAA, 2011)

Mit dieser Variante ergibt sich gegenüber dem Standardlastgang ein weiteres Einsparungspotential und die Energiekosten sinken auf 88,69 % (ohne Spannungsfreischaltung) bzw. auf 80,89 % (mit Spannungsfreischaltung) (Daten aus EXAA, 2011). Auch hier ist zu beobachten, dass der Akku am Beginn des Arbeitstages um 8:00 wieder voll beladen ist. Unter den betrachteten Varianten erscheint diese nun als am geeignetsten für Notebooks, die während der Abwesenheitszeit mit dem Stromnetz verbunden bleiben. Deshalb wird sie auch bei der Optimierung des Lastganges eines Bürogebäudes mit Notebooks in Kapitel 3.3 verwendet.

Der Kühltisch stellt das zweite Gerät innerhalb der Gruppe der Infrastruktur dar, bei dem mit einem Energiespeicher Lastverschiebungspotentiale vorhanden sind. Wie in Kapitel 2.1.12 gezeigt, arbeiten Kühltische im Normalfall innerhalb gewisser Temperaturgrenzen. Die Energie, die nötig ist, um die Temperatur im Kühltisch von einem Ende des zulässigen Bereichs zum anderen Ende zu verändern, ist dabei mit der thermischen Speicherkapazität gleichzusetzen. Eine Lastverschiebung kann nun durch eine Variation der Temperaturgrenzen abhängig von den jeweiligen Bedingungen erfolgen (Stadler et al, 2007). Als Kriterium hierfür wird wieder der Strompreis verwendet. Auch hier werden mehrere Varianten untersucht. Beim Tarif mit Hoch- und Niedrigtarifzeit wird der Kühltisch während der Hochtarifzeit so betrieben, dass die obere Temperaturgrenze (8°C) gerade nicht überschritten wird. In der Niedrigtarifzeit wird hingegen so gekühlt, dass die untere Temperaturgrenze gerade nicht unterschritten wird. Beim Standardlastgang (vgl. Kapitel 2.1.12) werden vom Gesamtverbrauch von 150 kWh nur 50 kWh während der Niedertarifzeit, 100 kWh während der Hochtarifzeit bezogen. Beim optimierten Lastgang beträgt die Leistungsaufnahme in der Hochtarifzeit nur noch 82,1 kWh, während in der Niedertarifzeit 68,5 kWh bezogen werden. Der Jahresverbrauch erhöht sich durch die Optimierung leicht auf 150,6 kWh.

Auch bei variablen Stromtarifen wurden unterschiedliche Möglichkeiten untersucht. Für den Strompreis werden jeweils Tageshöchst und Tagestiefstpreise ermittelt. Bei Variante 1 wird unterschieden, ob der momentane Strompreis oberhalb oder unterhalb des arithmetischen Mittelwerts zwischen Tageshöchstpreis und -tiefstpreis liegt. Liegt der momentane Strompreis oberhalb, wird mit der Kühlung lediglich verhindert, dass die obere Temperaturgrenze überschritten wird. Liegt der momentane Strompreis unter dem Mittelwert, so wird bis an die untere Temperaturgrenze gekühlt.

Die zweite Variante teilt die Spanne zwischen Tageshöchst- und -tiefstwert in drei Kategorien. Liegt der Preis im oberen Drittel, so wird ebenfalls nur verhindert, dass die obere Temperaturgrenze überschritten wird. Liegt der Preis im unteren Drittel, so wird so nahe wie möglich an die untere Temperaturgrenze gekühlt. Bei Preisen im mittleren Drittel wird die Standardregelung gemäß Kapitel 2.1.12 beibehalten. Vergleicht man die bei den Varianten entstehenden Stromkosten wiederum auf mit Standardlastgang, so ergeben sich die Ergebnisse gemäß Tabelle 2.29 (Daten aus EXAA, 2011).

Tabelle 2.29: Vergleich Varianten Kühlschrank (Daten aus EXAA, 2011)

Variante	Jährliche Energiekosten [-]
Standardlastgang	100,00
Variante 1	98,39
Variante 2	98,31

Es ist zu sehen, dass die Einsparungen beim betrachteten Beispiel zwar gering, aber dennoch vorhanden sind, wobei diese bei der Variante 2 geringfügig höher sind. Deswegen werden die weiteren Betrachtungen mit dieser Variante durchgeführt. Abbildung 2.53 und Abbildung 2.54 zeigen als Vergleich einen Tag des Standardlastgangs des Kühlschranks mit der Optimierungsvariante 2. Dargestellt sind auch der Strompreis sowie die Temperatur im Kühlschrank. In diesem Fall wurde wieder die Darstellungsvariante mit der Zeitspanne von 00:00 bis 24:00 gewählt (Daten aus EXAA, 2011).

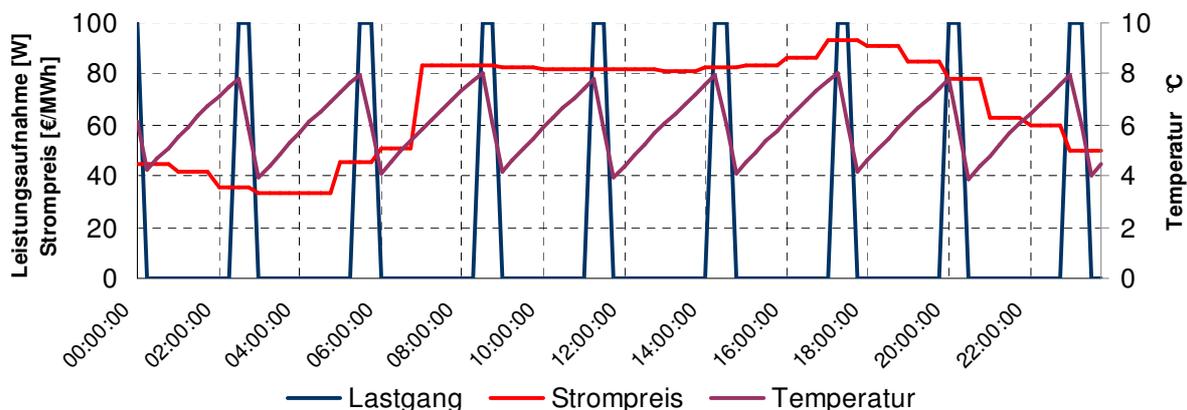


Abbildung 2.53: Standardlastgang Kühlschrank (Daten aus EXAA, 2011)

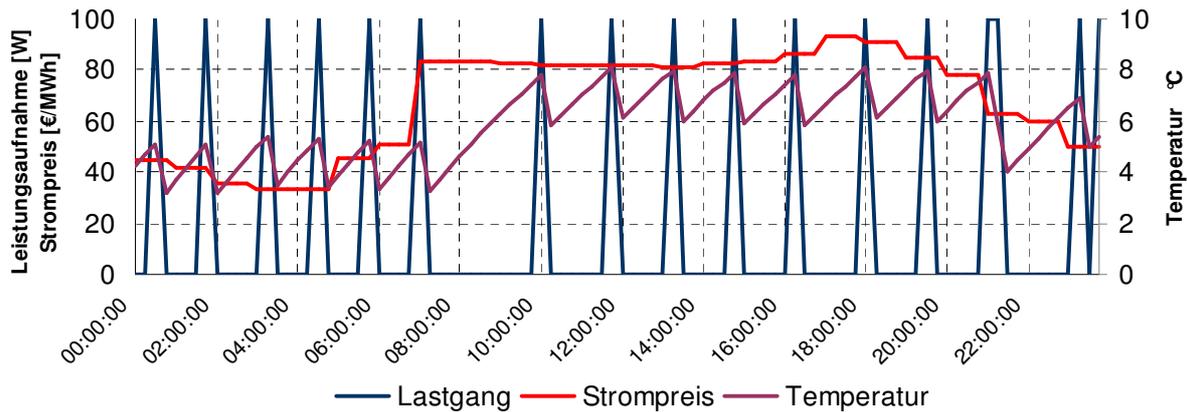


Abbildung 2.54: Optimierungsvariante 2 Kühlschrank (Daten aus EXAA, 2011)

Es ist zu sehen, dass sich die Temperatur nachts an der unteren und tagsüber an der oberen Temperaturgrenze orientiert. In den Intervallen, in denen der Übergang von der unteren zur oberen Temperaturgrenze erfolgt, wird für längere Zeit keine Leistung benötigt. Beim Übergang von der oberen zur unteren Temperaturgrenze erfolgt hingegen für längere Zeit als sonst ein Betrieb des Kühlaggregats. Die Schaltintervalle während des Betriebs an der oberen bzw. unteren Temperaturgrenze haben jedoch den gleichen Abstand. Es lässt sich feststellen, dass der Kostensenkungseffekt nur durch die Übergangsvorgänge von oberer zu unterer (und umgekehrt) Temperaturgrenze erfolgt. Es ist erkenntlich, dass die Temperatur im Kühlschrank zu schnell steigt, um die Leistungsaufnahme über den Zeitraum des Tages, an dem der Strompreis im oberen Bereich liegt, zu vermeiden. Deswegen wurde versucht, auch die während dieser Perioden günstigeren Preise auszunutzen. Aus dem Standardlastgang ist erkennbar, dass die Erwärmung von der unteren bis zur oberen Temperaturgrenze neun bis zehn Zeitintervalle dauert. Deswegen wird für die weitere Optimierung der jeweilige Höchst- und Tiefstpreis aus drei Stunden (zehn Intervalle Pause, zwei Intervalle Betrieb) ermittelt. Zu jeder vollen Stunde wurde damit überprüft, ob der jeweilige Preis für die aktuelle Stunde dem günstigsten Preis des Dreistundenintervalls entspricht. Ist dies der Fall und wird bei Kühlung die untere Temperaturgrenze nicht unterschritten, so wird dann für einen Viertelstundenintervall gekühlt. Ist der aktuelle Stundenpreis nicht der günstigste im Dreistundenintervall oder würde durch Kühlung die Temperaturgrenze unterschritten werden, so erfolgt keine Kühlung. Für alle Zeitintervalle, die nicht zu vollen Stunden beginnen, bleibt die Regellogik gleich wie bei der Optimierungsvariante 2. Betrachtet man denselben Tag wie in Abbildung 2.53 und Abbildung 2.54, so ergibt sich der Lastgang gemäß Abbildung 2.55 (Daten aus EXAA, 2011).

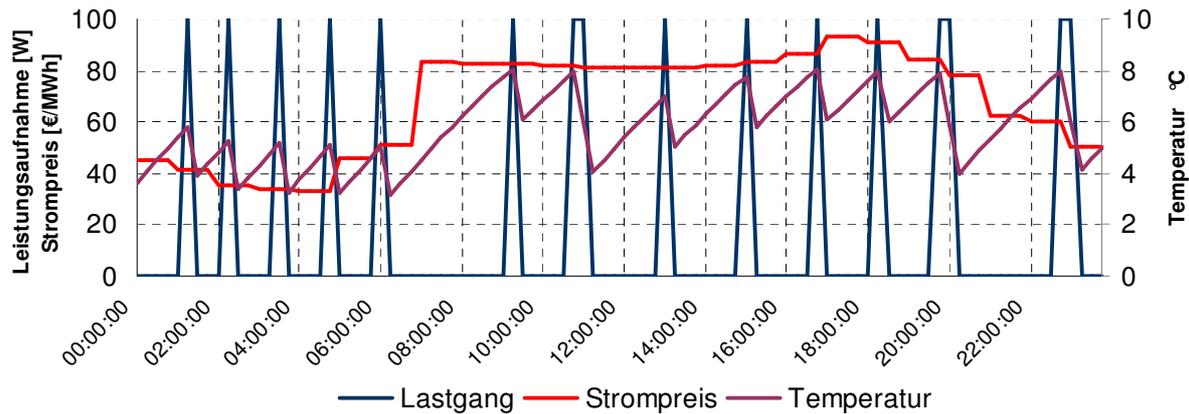


Abbildung 2.55: Optimierungsvariante 2 Kühlschrank – erweitert (Daten aus EXAA, 2011)

Der Lastgang ist ähnlich dem der Optimierungsvariante 2 ohne Erweiterung. Lediglich zu Mittag und einmal in der Nacht ergibt sich eine längere Kühlphase. Vergleicht man die Stromkosten, die dabei über das Jahr entstehen, lassen sich gegenüber dem Standardlastgang bei der erweiterten Optimierungsvariante 2 nur 0,51 % (gegenüber 1,69 % bei der nicht erweiterten Variante) einsparen. Für die weiteren Betrachtungen wird daher die Variante mit dem höheren Einsparungspotential verwendet (nicht erweiterte Optimierungsvariante 2).

In der Kategorie Infrastruktur gibt es neben den Geräten, die einen Energiespeicher nutzen können (Laptop und Kühlschrank), noch den Geschirrspüler, der im Hinblick auf das Lastverschiebungspotential in Kategorie 2 eingeteilt wurde (vgl. Tabelle 2.27). Nimmt man an, dass Geschirrspüler in Teeküchen von Bürogebäuden einmal täglich verwendet werden, so lässt sich mit geeigneter Automatik der Einschaltzeitpunkt frei wählen. Beim Standardlastgang wird davon ausgegangen, dass der Geschirrspüler beim Verlassen des Gebäudes eingeschaltet wird und sein Programm von 16:30 bis 18:00 abspult. Diese Zeit befindet sich durchwegs in der Hochtarifzeit. Bei einer Verlagerung des Einschaltzeitpunkts in die Niedertarifzeit lässt sich die Aussage treffen, dass auch die gesamte Leistungsaufnahme während des Waschvorgangs in diese Zeit verschoben werden kann. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass außerhalb des Waschvorgangs immer die Leistungsaufnahme von 2,71 W im Standby-Betrieb erfolgt (vgl. 2.1.13). Beim Standardlastgang werden somit 252,8 kWh während der Hochtarif- und 7,9 kWh während der Niedertarifzeit verbraucht. Beim optimierten Lastgang werden nur 15,8 kWh während der Hochtarif- und 244,9 kWh während der Niedertarifzeit bezogen.

Für die Optimierung bei variablen Stromtarifen wird der Waschvorgang zur Stunde mit dem niedrigsten Preis zwischen Ende des jeweiligen Arbeitstags (Mo-Fr 16:30) bis zu Beginn des nächsten Arbeitstags (Mo-Fr 08:00) gestartet. Da günstige Stunden beim Strompreis meist beieinander liegen, ist damit auch der Strompreis in der letzten halben Stunde der Waschdauer, die in die jeweils nächste Stunde fällt stets niedriger als während der Waschzeit beim Standardlastgang (EXAA, 2011). Es ergibt sich damit eine Einsparung bei den Stromkosten von 53,24 % (Tabelle 2.30). Auffällig ist dabei, dass jeder Waschgang der optimierten Variante zwischen 01:00 und 07:30 stattfindet.

Tabelle 2.30: Einsparung Geschirrspüler (Daten aus EXAA, 2011)

Variante	Jährliche Energiekosten [-]
Standardlastgang	100,00
Optimierter Lastgang	46,76

Tabelle 2.31 zeigt nochmals zusammengefasst die Kosteneinsparungspotentiale der Verbraucher der Kategorien 1 und 2 im Bereich Infrastruktur gegenüber dem Standardlastgang. Während das Potential beim Kühlschrank gering ist, ergeben sich beim Notebook und beim Geschirrspüler Einsparungen im zweistelligen Prozentbereich.

Tabelle 2.31: Einsparung Infrastruktur (Daten aus EXAA, 2011)

Gerät	Kosteneinsparungspotential [%]
Notebook	19,11
Kühlschrank	1,69
Geschirrspüler	53,24

Um das Kostensenkungspotential der Optimierung bezogen auf den Standardlastgang für die gesamte Infrastruktur zu ermitteln, ist die Kenntnis über alle Geräte (auch jene der Kategorie 3) notwendig. Beispiele hierfür werden in Kapitel 3 gezeigt. Es ist natürlich zu beachten, dass auch hier neben Geräten mit Lastverschiebungspotential energiesparende Geräte Kostensenkungen erwirken können. Deshalb ist bei der Planung und Beschaffung von Komponenten auch hierauf Rücksicht zu nehmen.

2.5.2 Beleuchtung

Für den Standardlastgang der Beleuchtung (vgl. Kapitel 2.2) wurde angenommen, dass die Beleuchtung abhängig vom Tageslichtquotienten, der Globalstrahlung und vom Präsenzfaktor entweder ein- oder ausgeschaltet ist. Zwischenzustände (gedimmtes Licht) wurden nicht berücksichtigt. Es gibt aber auch Regelsysteme, die die Beleuchtung abhängig von der natürlichen Beleuchtungsstärke im Raum dimmen können und so nur den Rest auf die geforderte Beleuchtungsstärke bereitstellen müssen (DIN 18599-4, 2007). Aus diesem Zusammenhang lässt sich die Gleichung 2.65 ableiten.

$$B_{\text{erf},x} - B_{\text{nat},x} = B_{\text{kunst},x} \quad (2.65)$$

$B_{\text{erf},x}$	Erforderliche Beleuchtungsstärke im Punkt x im Raum [lx]
$B_{\text{nat},x}$	Natürliche Beleuchtungsstärke im Punkt x im Raum [lx]
$B_{\text{kunst},x}$	Künstliche Beleuchtungsstärke im Punkt x im Raum [lx]

Dabei lässt sich die natürliche Beleuchtungsstärke im jeweiligen Punkt über den Tageslichtquotienten bestimmen (vgl. Kapitel 2.2). Die erforderliche Beleuchtungsstärke für verschiedene Verwendungszwecke ist in Normen geregelt. Die für Bürogebäude relevanten Beleuchtungsstärken sind in Tabelle 2.32 aufgelistet (DIN 18599-10, 2007).

Tabelle 2.32: Beleuchtungsstärken Bürogebäude (DIN 18599-10, 2007).

Verwendungszweck	Erforderliche Beleuchtungsstärke [lx]
Büroräume	500
Kantine	200
Küche in Nichtwohngebäuden	300
WC und Sanitärräume	100
Verkehrsfläche	100
Lager	100
Serverraum	500

Da die erforderliche Beleuchtungsstärke auch wenn kein Tageslicht vorhanden ist, mit Kunstlicht erreicht werden muss, kann man davon ausgehen, dass die elektrische Bewertungsleistung der Beleuchtung die erforderliche Beleuchtungsstärke abdecken kann (DIN 18599-4, 2007). Somit kann man aus Gleichung 2.65 die Gleichung 2.66 ableiten.

$$\frac{B_{kunst,x}}{B_{erf,x}} = f_{kunst,x} \quad (2.66)$$

$f_{kunst,x}$ Betriebsfaktor der künstlichen Beleuchtung [-]

Davon ausgehend kann man durch Multiplikation des Betriebsfaktors der künstlichen Beleuchtung für jeden Zeitpunkt mit der jeweiligen spezifischen Bewertungsleistung der Beleuchtung und der Fläche der jeweiligen Zone die momentan notwendige Beleuchtungsleistung für die Zone errechnen (Gleichung 2.67) (DIN 18599-4, 2007).

$$P_{Bel,x} = f_{kunst,x} \cdot P_{Bew,x} \cdot A_x \quad (2.67)$$

$P_{Bel,x}$ Beleuchtungsleistung der Zone x im jeweiligen Zeitintervall [W]

$P_{Bew,x}$ Spezifische elektrische Bewertungsleistung der Zone x [W/m²]

A_x Fläche der Zone x [m²]

Bei der Planung der Beleuchtung wird auf die zur Beleuchtung notwendige Bewertungsleistung noch ein Wartungsfaktor aufgeschlagen. Da die Beleuchtungsleistung durch Verschmutzung und Alterung abnehmen kann, wird dadurch für die Bewertungsleistung ein höherer Wert, als er bei neuen Anlagen notwendig wäre, ermittelt (DIN 18599-4, 2007). Misst man nun jeweils die Beleuchtungsstärke im Raum (in jeder Zone) und dimmt das Licht auf den jeweils notwendigen Wert, um die vorgegebene Beleuchtungsstärke zu erreichen, ergeben sich bei neuen bzw. frisch gewarteten Anlagen zusätzliche, vom Wartungsfaktor abhängige Einsparungspotentiale. Für Büroräume wird der Wartungsfaktor von 0,67 empfohlen. Das bedeutet, dass bei neuen Anlagen für die Beleuchtung nur die mit diesem Faktor multiplizierte Leistung zum jeweiligen Zeitpunkt aufzuwenden ist. Da im Verlauf der jeweiligen Periode bis zur nächsten Wartung allerdings Verschmutzung und Alterung zunehmen, ist am Ende der Wartungsdauer jeweils die volle Leistung anzusetzen. Als Wartungsintervall werden meistens drei Jahre angesetzt. (Fördergemeinschaft Gutes Licht,

2008). Linearisiert man den Effekt, der sich durch den Wartungsfaktor ergibt über drei Jahre, so ergibt sich folgendes Bild (Abbildung 2.56).

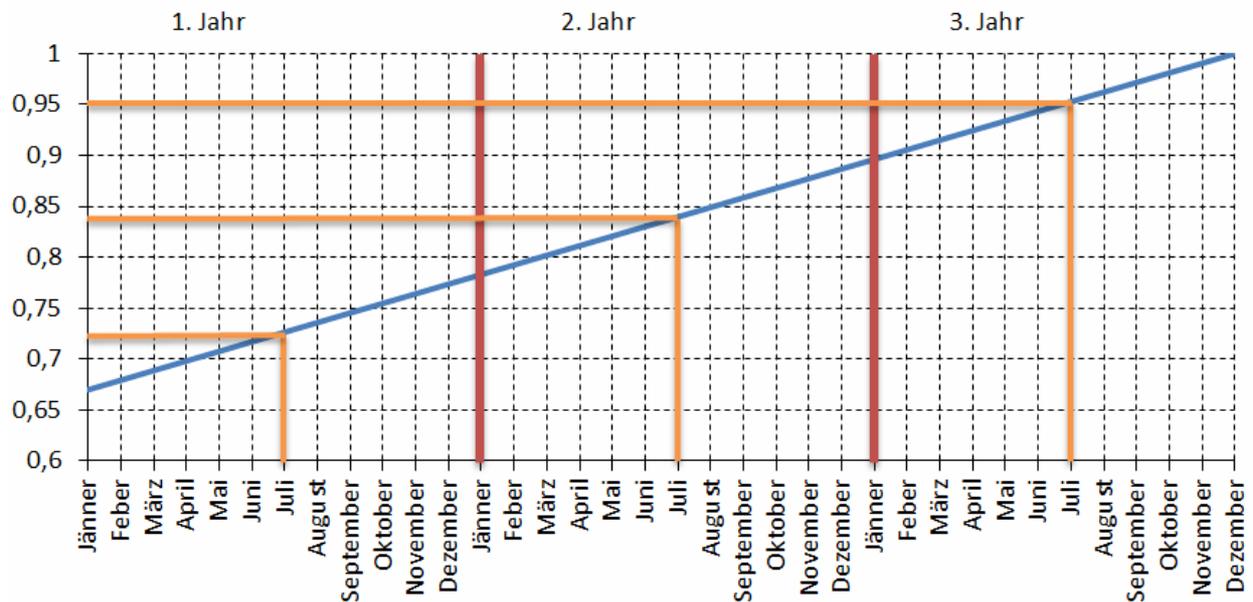


Abbildung 2.56: Verlauf Wartungsfaktor Beleuchtung (Daten aus DIN 18599-4, 2007).

Berechnet man den Lastgang für jedes Jahr näherungsweise mit dem Durchschnitt des jeweiligen Jahres, so ist dafür der arithmetische Mittelwert aus dem Wert zu Beginn und am Ende des Jahres zu verwenden. Abgeleitet aus der Darstellung in Abbildung 2.56 lässt sich der Wartungsfaktor nach dem jeweiligen Zeitschritt durch Gleichung 2.68 errechnen.

$$WF_x = WF_0 + \frac{WF_E - WF_0}{n_{Per}} \cdot x \quad (2.68)$$

WF_x	Wartungsfaktor am Ende des Zeitschritts x [-]
WF_0	Wartungsfaktor am Beginn der Wartungsperiode [-]
WF_E	Wartungsfaktor am Ende der Wartungsperiode (meist 1) [-]
n_{Per}	Anzahl der Zeitschritte einer Wartungsperiode [-]
x	Zeitschritt, für dessen Ende der Wartungsfaktor berechnet wird [-]

Berechnet man anhand dieser Gleichung nun beispielsweise den Wartungsfaktor nach dem ersten Jahr, ergibt sich der Wert von $\sim 0,78$. Der Mittelwert zu Beginn (0,67) und Ende (0,78) des ersten Jahres beträgt 0,725. Für die Berechnung des Lastgangs einer Beleuchtungsanlage im ersten Jahr nach der Wartung wird nun dieser Wert verwendet. Gleichung 2.67 ist somit noch um diesen Faktor zu erweitern und es ergibt sich die Gleichung 2.69 für die notwendige Beleuchtungsleistung einer Zone im jeweiligen Viertelstundenintervall.

$$P_{Bel,x} = f_{kunst,x} \cdot P_{Bew,x} \cdot A_x \cdot WF_m \quad (2.69)$$

WF_m	Mittlerer Wartungsfaktor des jeweiligen Zeitschritts [-]
--------	--

Zuletzt gilt es noch zu berücksichtigen, dass die Leistungsaufnahme beim Dimmen der Beleuchtung nicht über den gesamten Bereich linear ist. Abbildung 2.57 zeigt das Verhalten von modernen Lampen beim Dimmen (Osram, 2011).

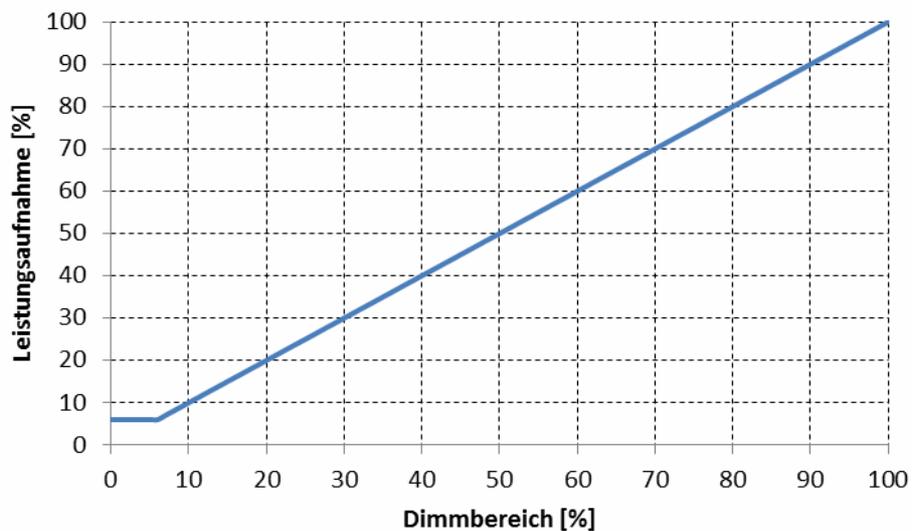


Abbildung 2.57: Vergleich Energieverbrauch – Dimmbereich (Osram, 2011)

Liegt der Faktor für das Kunstlicht aus Gleichung 2.67 unter 0,06, so ist trotzdem eine Leistungsaufnahme von 6 % der Bewertungsleistung notwendig. Oberhalb dieses Wertes kann das Verhalten linear angenommen werden (Osram, 2011)

Der Lastgang für das gesamte Gebäude ergibt sich dann aus der Summe der Beleuchtungsleistungen der einzelnen Zonen (DIN 18599-4, 2007).

2.5.3 Peripherie

Wie bereits in Kapitel 2.3 gezeigt wurde, kann die Zusammensetzung und Konfiguration der Geräte der Warmwasserversorgung und der Raumluftechnik unterschiedlich sein. Letztendlich ist deren Betriebsweise jedoch eng mit dem thermischen Lastgang des Gebäudes verbunden. Somit kann eine Veränderung des thermischen Lastgangs je nach Art der Bereitstellung und Verteilung der Energie für Raumluftechnik im Gebäude auch unterschiedliche Auswirkungen auf den elektrischen Lastgang im Gebäude bewirken.

Die Ermittlung des thermischen Lastgangs eines Gebäudes unter gewissen Voraussetzungen wird aufgrund der Komplexität der Zusammenhänge meist mit EDV-gestützten numerischen Simulationsmodellen bewerkstelligt. Dabei erfolgt bei der Simulation stark vereinfacht der Informationsfluss gemäß Abbildung 2.58 (Leimer, 2011).

Es ist zu erkennen, dass zeitvariable Outputs gleichzeitig wieder Inputs für den nächsten Zeitschritt sein können. So ist zum Beispiel die Lufttemperatur im Raum nach einem gewissen Zeitraum gleichzeitig wieder der Ausgangswert für die Lufttemperatur des nächsten Zeitschritts (Leimer, 2011).

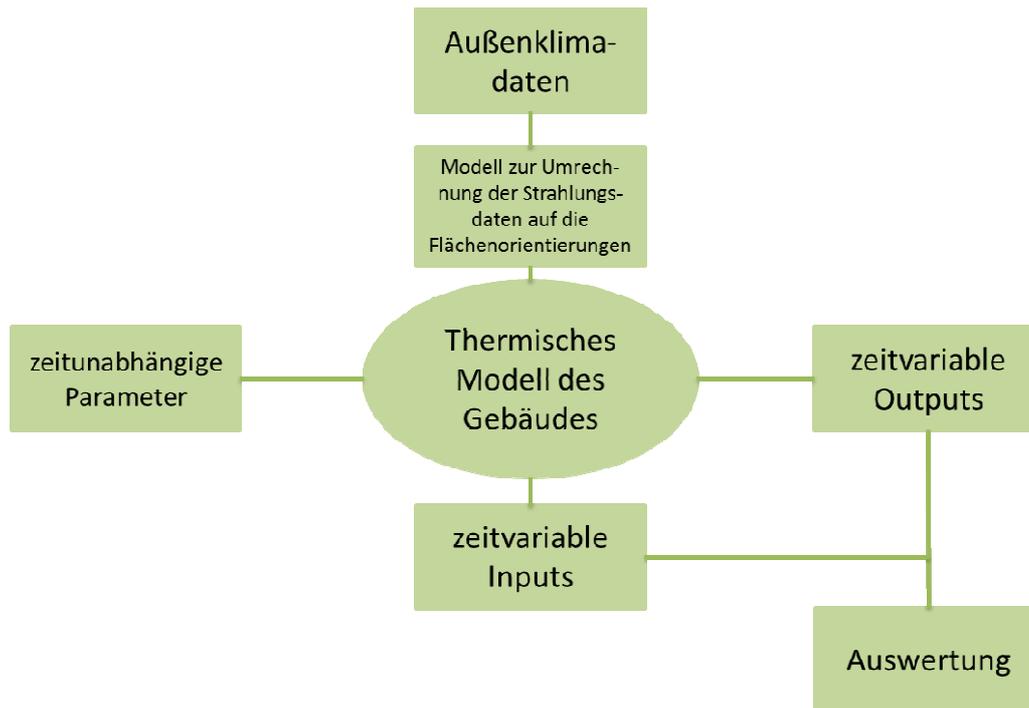


Abbildung 2.58: Informationsfluss bei der Gebäudesimulation (Leimer, 2011)

Als zeitaufgelöste Klimadaten werden üblicherweise die jeweilige Außentemperatur, die Außenluftfeuchte sowie die Globalstrahlung und die Windgeschwindigkeit verwendet. Aufgrund der astronomischen Randbedingungen muss dabei die Sonneneinstrahlung auf die jeweiligen, eventuell geneigten Flächen umgerechnet werden. Ebenso erfolgt meist eine Aufteilung in direkte und diffuse Strahlung (Leimer, 2011).

Im thermischen Modell des Gebäudes sind die Informationen enthalten, die zur Bilanzierung der Wärmeübertragungsmechanismen (Konvektion, Strahlung und Wärmeleitung) notwendig sind. Beispiele hierfür sind die Wärmewiderstandswerte der Wände sowie die Fensterflächenanteile. In dieses Modell fließen auch die zeitunabhängigen Parameter (zb. Stoffkennwerte der Baustoffe) mit ein (Leimer, 2011).

Zusätzlich zu den Außenklimadaten sind oft nutzungsbedingte Lastgänge für das thermische Verhalten des Gebäudes relevant. So können bei den zeitvariablen Inputs beispielsweise innere Lasten, Luftwechselzahlen, Sonnenschutz oder sich ändernde Temperaturvorgaben berücksichtigt werden (Leimer, 2011).

Ist die Simulation durchgeführt, erhält man ein Ausgabefile mit den vom Simulationsprogramm des Gebäudes ermittelten Daten ebenfalls in zeitlicher Auflösung. Auf diese Weise lässt sich der thermische Lastgang inklusive der thermischen Lasten für Be- und Entfeuchtung ermitteln (Leimer, 2011).

Zentrale Rolle bei der Verschiebung thermischer Lasten spielt die Nutzung der Gebäudestruktur als thermischen Speicher. Dies soll anhand eines Beispiels erklärt werden. Da der Energiefluss grundsätzlich größer wird, je größer der Temperaturunterschied zwischen zwei Körpern ist, erfolgt zum Zwecke der Energieeinsparung außerhalb der Nutzungszeit während der Heizperiode oft eine Temperaturabsenkung im Gebäude. Dadurch kühlt das Gebäude nach und nach aus und muss morgens wieder aufgeheizt werden. Bei fixen Strom- und Energiepreisen zu jeder Tages- und Nachtzeit ist diese Vorgehensweise auch die kostengünstigste. Ein möglicher Verlauf

der Heizleistung, der Temperaturvorgabe, der Innentemperatur sowie des Strompreises während der Heizperiode ist in Abbildung 2.59 dargestellt (Daten aus Inschlag, 2011 und EXAA, 2011).

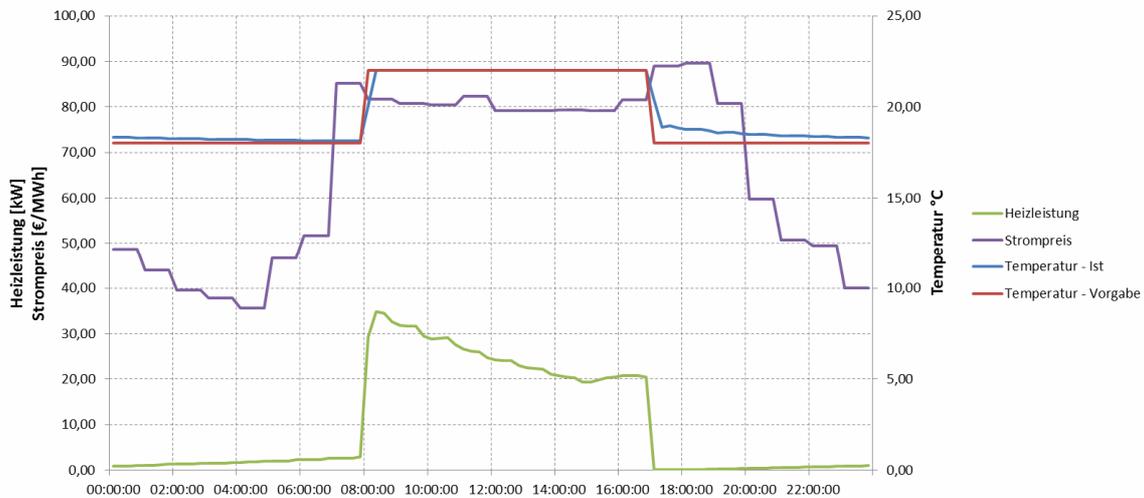


Abbildung 2.59: Standardlastgang Gebäude (Daten aus Inschlag, 2011 und EXAA, 2011)

Vorerst soll dabei nicht auf die Details, sondern auf den grundsätzlichen Verlauf geachtet werden. Während nachts, bei niedrigem Strompreis, aufgrund der Temperaturabsenkung kaum Heizleistung notwendig ist, ergibt sich morgens eine Spitze, die dann kontinuierlich bis zum Ende der Nutzungszeit absinkt. Es ist zu sehen, dass der Bezug der Heizleistung mit der Zeit des hohen Strompreises korreliert.

Bei variablen Stromtarifen bzw. Stromtarifen mit Hoch- und Niedertarifzeiten liegt also die Vermutung nahe, dass eine Änderung dieser Strategie zwar zu einem höheren Energieverbrauch, bei Heizungen mit hohem Stromanteil allerdings zu Kosteneinsparungen führen könnte. Setzt man diesen Gedankengang fort, so scheint sogar eine Erhöhung der Temperaturvorgabe in den Zeiten billiger Energie sinnvoll, da dies den Heizenergiebedarf während der Hochtarifzeit aufgrund der Speichereffekte des Gebäudes senken kann (Bukvic-Schäfer, 2007). Auch hierfür sollen vorerst schematische Lastgänge von Heizleistung, Temperaturvorgabe, Innentemperatur und Strompreis gezeigt werden (Abbildung 2.60). Es wurden dabei alle Inputparameter wie im Standardlastgang (Abbildung 2.59) beibehalten. Lediglich die Temperaturvorgaben wurden variiert (Daten aus Inschlag, 2011 und EXAA, 2011).

Es ist zu erkennen, dass durch die nächtliche Vorheizung des Gebäudes während niedriger Strompreise die benötigte Heizleistung während der Zeit hoher Strompreise in großem Ausmaß sinkt.

In der Kühlperiode ist diese Überlegung umgekehrt anzustellen. Eine Vorkühlung des Gebäudes zu Zeiten niedriger Energiekosten könnte den Kühlbedarf zu Zeiten teurer Energie senken (Bukvic-Schäfer, 2007).

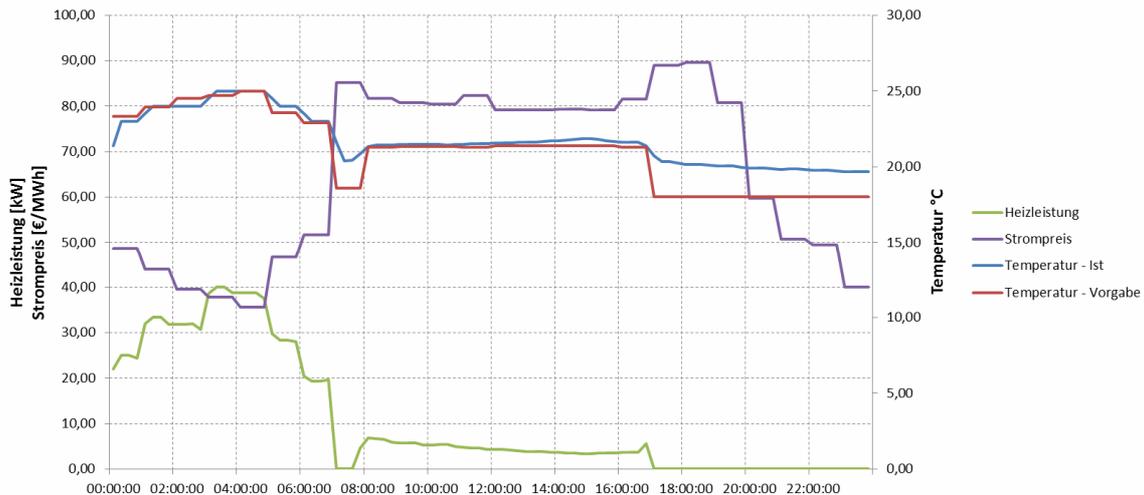


Abbildung 2.60: Lastgang mit Vorheizstrategie Gebäude (Daten aus Inschlag, 2011 und EXAA, 2011)

Beim Einsatz solcher Vorheiz- und Vorkühlstrategien ist auch zu berücksichtigen, dass verschiedene Heiz- bzw. Kühlsysteme bei unterschiedlichen Außenklimaverhältnissen unterschiedliches Betriebsverhalten aufweisen. So kann man aufgrund der in Kapitel 2.3 gezeigten Zusammenhänge beispielsweise davon ausgehen, dass aufgrund der niedrigeren Temperaturen in der Nacht die Effizienz von Kompressionskältemaschinen steigt, die von Luftwärmepumpen jedoch sinkt. Unter Umständen ist sogar freie Kühlung möglich, wenn die Temperatur nachts unter die jeweilige Raumlufttemperatur sinkt. Dabei muss kein Strom zur Kältebereitstellung mehr berücksichtigt werden. Ebenfalls zu berücksichtigen sind die entstehenden Änderungen der Lastgänge für Ventilatoren und Pumpen, die sich durch den geänderten thermischen Lastgang ergeben. Man kann feststellen, dass allgemeingültige Berechnungen bezüglich des Lastverschiebungspotentials der Kategorie Peripherie schwer anzustellen sind. Deswegen wird in Kapitel 3 versucht, mittels detaillierten thermischen Lastgängen, die vom Gebäudesimulationstool TRNSYS ausgegeben wurden, Beispiele für das elektrische Lastverschiebungspotential durch die Verschiebung der thermischen Lasten zu ermitteln.

Neben der Verschiebung thermischer Lasten sind innerhalb der Kategorie Peripherie jedoch noch weitere Optimierungsmaßnahmen möglich. So kann die mechanische Lüftung mit Anwesenheitssensoren dahingehend optimiert werden, dass die Lüftung eines Raums bei Abwesenheit während der Nutzungszeit ähnlich wie die Beleuchtung deaktiviert wird. Dies hat aber ebenfalls Auswirkungen auf die Wärmebilanz und somit auf den thermischen Lastgang von Gebäuden. Muss bei kühlen Außentemperaturen keine Frischluft zugeführt werden, so muss diese auch nicht auf Raumtemperatur erwärmt werden bzw. verursacht keinen Kälteeintrag ins Gebäude. Umgekehrt muss bei heißen Außentemperaturen die Frischluft nicht auf Raumlufttemperatur gekühlt werden bzw. verursacht keinen Wärmeeintrag (Ranft et al, 2007).

Ebenso haben Untersuchungen gezeigt, dass die Frischluftzufuhr durch Messung der Schadstoffe und Optimierung der mechanischen Lüftung auf Einhaltung der jeweiligen Grenzwerte niedriger sein kann, als in den Normen angegeben. So kann der Frischluftvolumenstrom pro Person und Stunde beispielsweise auf etwa $20 \text{ m}^3/\text{h}$ reduziert werden (Ranft et al, 2007).

2.5.4 Energiespeicher

Eine weitere Möglichkeit, sowohl thermische als auch direkt elektrische Lasten (Netzbezug) zeitlich zu verschieben, besteht in der Nutzung von Speichern. Damit kann zu Zeiten niedriger Preise Energie zum Zweck der späteren Nutzung in Hochtarifzeiten vorgehalten werden (Radgen, 2007).

Man unterscheidet zwischen thermischen und elektrischen Speichern. Beiden ist gemeinsam, dass der Zyklus gesamt gesehen (Einspeichern, Speichern, Entladen) verlustbehaftet ist. Eine Verschiebung von Lasten auf einen anderen Zeitpunkt unter Ausnutzung von Speichern bedingt somit insgesamt einen höheren Energiebedarf, als beim ursprünglichen Lastgang notwendig wäre. Dies wurde ansatzweise schon beim Lastverschiebungspotential der Laptops und unter Ausnutzung des Gebäudes als Speicher gezeigt. Abbildung 2.61 soll dies nochmals verdeutlichen (nach Radgen, 2007, modifiziert).

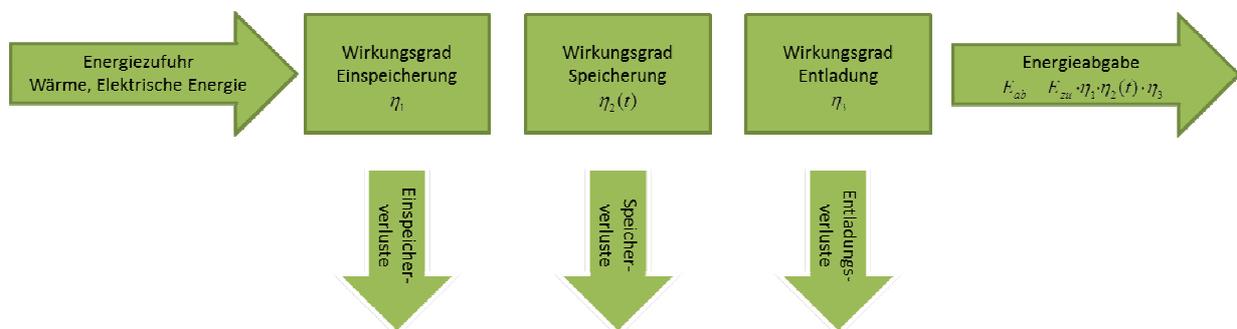


Abbildung 2.61: Speicherverluste (nach Radgen, 2007, modifiziert)

Die jeweiligen Verluste jedes Schrittes sind dabei abhängig von der Art des Speichers. Während bei elektrischen Speichern die Einspeicher- und Entladeverluste erheblich sein können (Radgen, 2007), spielen diese bei thermischen Speichern eine untergeordnete Rolle und werden hier deshalb vernachlässigt (Schramek, 2009m).

Berechnet man die Wärmeverluste eines thermischen Speichers, so sind die Speicherverluste nach Gleichung 2.70 zu bestimmen (Schramek, 2009m).

$$\dot{Q}_{S,V} = U_S \cdot V_S \cdot (t_{S,i} - t_{S,a}) \quad (2.70)$$

$\dot{Q}_{S,V}$	Verlustleistung des Speichers [W]
U_S	Volumenbezogener Wärmedurchgangskoeffizient [W/m ³ K]
V_S	Speichervolumen [m ³]
$t_{S,i}$	Temperatur im Speicher [°C]
$t_{S,a}$	Umgebungstemperatur [°C]

Die Innentemperatur schwankt dabei je nach Ladestatus des Speichers. Ist der Speicher beispielsweise auf eine Temperatur von 60°C ausgelegt und beträgt die Temperatur im Inneren des Speichers auch 60°C, so wird der Speicher als voll im Hinblick auf den möglichen Energieinhalt betrachtet. Die in einem thermischen Speicher enthaltene Energiemenge kann dabei durch eine abgewandelte Form der Gleichung 2.50 ermittelt werden. Dies ist in Gleichung 2.71 dargestellt (Hennings, 2000).

$$Q_S = \frac{V_S \cdot c_{p,M} \cdot dT_S \cdot \rho_M}{3600} \quad (2.71)$$

Q_S	Wärmeinhalt des Speichers [kWh]
V_S	Volumen des Speichers [m ³]
ρ_M	Dichte des Speichermediums [kg/m ³]
$c_{p,M}$	Spezifische Wärmekapazität des Speichermediums [kJ/kgK]
dT	Temperaturunterschied zwischen Speicherinhalt tiefstmöglicher Nutzungstemperatur [K]

Entnimmt man dem Speicher Energie oder belädt ihn mit einer bestimmten Energiemenge bzw. treten Speicherverluste auf, so ändert sich der Wärmeinhalt des Speichers und bei gleichbleibenden anderen Parametern kann durch Umformen der Gleichung 2.71 die neue Speichertemperatur errechnet werden (Hennings, 2000).

Als Umgebungstemperatur kann je nach Aufstellungsort die jeweilige Raumtemperatur oder bei Aufstellung im Freien die Außentemperatur verwendet werden. Das Speichervolumen ergibt sich aus der Auslegung des Speichers und ist im Normalfall bekannt bzw. im Datenblatt ersichtlich. Der volumenbezogene Wärmedurchgangskoeffizient kann abhängig vom Speichervolumen gemäß Abbildung 2.62 angenähert werden (Schramek, 2009m).

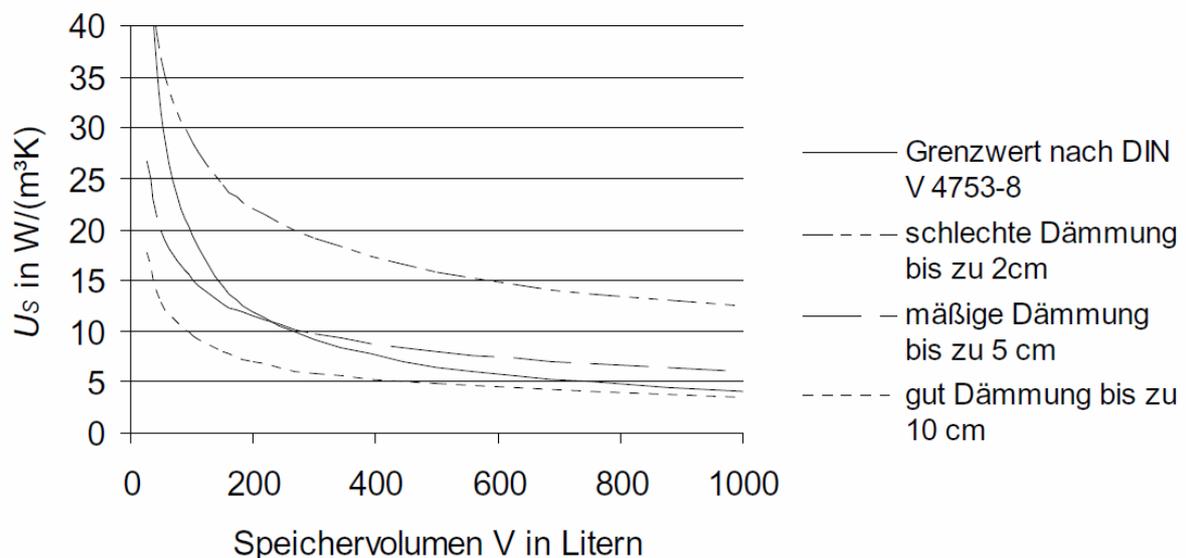


Abbildung 2.62: Volumenbezogener Wärmedurchgangskoeffizient für Speicher je nach Speichervolumen (Schramek, 2009m)

Der Energieinhalt zum Ende jedes Viertelstundenintervalls ergibt sich aus dem Energieinhalt zu Beginn abzüglich der Speicherverluste und der aus dem Speicher entnommenen thermischen Energie. Bei Wärmeerzeugung während des Intervalls bei gleichzeitiger Einspeicherung erhöht sich der Energieinhalt. Die aus dem Speicher entnommene Energie ergibt sich wiederum aus dem Teil des thermischen Lastgangs des Gebäudes, der durch den Speicher gedeckt wird. Diese Methode funktioniert auch bei Speichern für Kälte. Es ist lediglich zu berücksichtigen, dass hier die Umgebungstemperatur bzw. das Temperaturniveau der Nutzung höher ist als die Speichertemperatur und die beiden Temperaturen in den Gleichungen 2.70 und 2.71

vertauscht werden müssen. Zudem handelt es sich dann bei Gleichung 2.71 um die Temperaturdiffenz zwischen höchstmöglicher Nutzungstemperatur und Temperatur des Speicherinhalts (Schramek, 2009m).

Diese Art der Berechnung unterliegt jedoch der Beschränkung, dass das Speichermedium während des gesamten Prozesses keinen Phasenwechsel durchlaufen darf. So wäre beispielsweise bei einem Kältespeicher mit Eis die Schmelzenthalpie bei konstanter Temperatur zu berücksichtigen und die Gleichungen dementsprechend anzupassen (Schramek, 2009m). Im Zuge der Untersuchungen wird davon ausgegangen, dass es sich bei den thermischen Speichern stets um Geräte ohne Phasenwechsel handelt und somit die Gleichungen 2.70 und 2.71 bzw. die beschriebene Vorgehensweise allgemeine Gültigkeit hat.

Als Möglichkeiten, elektrische Energie zu speichern, werden hier elektrochemische Speicher betrachtet. Hier können die Lade- und Entladeverluste nicht wie bei thermischen Speichern vernachlässigt werden. Beide Verlustarten fließen in den Zykleneffizienzgrad ein. Ebenfalls zu berücksichtigen sind hier die Speicherverluste, die ebenso wie bei thermischen Speichern von der Zeit abhängen. Bei chemischen Speichern spricht man hier von der Selbstentladungsrate. Tabelle 2.33 gibt eine Übersicht über die Zykleneffizienzgrade (= Produkt aus Lade- und Entladeeffizienzgrad) und Selbstentladungsraten verschiedener Akkumulatortypen. Diese sind meist von verschiedenen Parametern wie Temperatur sowie Lade- und Entladerate abhängig. In der Tabelle sind die Werte für 20°C dargestellt. Da anzunehmen ist, dass die geforderten Lade- und Entladeraten aufgrund der Einsatzcharakteristik zeitlich schwanken, werden diese Werte als Mittelwerte gesehen und für die Berechnungen als konstant herangezogen (Jossen und Weydanz, 2006).

Tabelle 2.33: Zykleneffizienzgrade und Entladungsraten chemischer Speicher (Jossen und Weydanz, 2006)

Speicherart	Zykleneffizienzgrad [-]	Selbstentladungsrate [%/Monat]
Bleiakkumulator	0,8	3
NiCd Akkumulator	0,65	20
NiMH Akkumulator	0,65	25
Lithium-Ionen Akkumulator	0,95	4

Aufgrund der schlechten Zykleneffizienzgrade werden die Umwandlung und Speicherung in Form von Wasserstoff bzw. Methan und die Rückverstromung nicht betrachtet. Diese Möglichkeiten solcher Systeme werden eher in der Langzeitspeicherung von Energie gesehen. Hier wäre es beispielsweise möglich, überschüssigen Strom aus den Sommermonaten umzuwandeln und im Winter zu nutzen (Rummich, 2009). Diese Möglichkeit soll hier Erwähnung finden, ist aber nicht Teil der Untersuchungen.

Der Zusammenhang zwischen nutzbarer Akkukapazität, Entladedauer und Entladeleistung wurde bereits in Gleichung 2.64 gezeigt. Als nutzbare Akkukapazität wird in dieser Untersuchung jene Kapazität verstanden, die nach Abzug der Entladeverluste verwendet werden kann. Bei der Auslegung des Akkus wäre somit je nach Akkutyp noch ein Aufschlag für Entladeverluste und die Selbstentladungsrate zu berücksichtigen. Abhängig von den Technologien ist zudem zu berücksichtigen, dass nicht die

volle Akkukapazität genutzt werden soll, um Tiefentladungen zu vermeiden. Ebenso wird der Kapazitätsverlust durch Alterung der Akkumulatoren vernachlässigt. Dies ist gegebenenfalls auch bei der Auslegung zu berücksichtigen (Jossen und Weydanz, 2006).

Anhand der gezeigten Zusammenhänge kann man für elektrische Speicher folgende Energiebilanz gemäß Gleichung 2.72 aufstellen.

$$E_{S,i+1} = E_{S,i} + E_B \cdot \eta_Z - E_E - E_V \quad (2.72)$$

$E_{S,i+1}$	Im Speicher vorhandene nutzbare Kapazität zum Zeitpunkt t_{i+1} [kWh]
$E_{S,i}$	Im Speicher vorhandene nutzbare Kapazität zum Zeitpunkt t_i [kWh]
E_B	Energie, die im Zeitraum zum Laden des Speichers verwendet wird [kWh]
E_E	Energie, die dem Speicher im Zeitraum entnommen wird [kWh]
η_Z	Zykluswirkungsgrad [-]
E_V	Verluste durch Selbstentladung im jeweiligen Zeitraum [kWh]

Dabei wird die Selbstentladerate ausgehend von Tabelle 2.33 nach Gleichung 2.73 berechnet.

$$E_V = \frac{E_{S,i} \cdot f_{SE}}{2.880} \quad (2.73)$$

f_{SE} Selbstentladerate pro Monat [%/Monat]

Die Division durch 2.880 erfolgt aufgrund der linearen Aufteilung der Selbstentladungsrate pro Monat auf die Viertelstundenwerte. Dabei wird von 30 Tagen pro Monat ausgegangen.

Sowohl bei thermischen als auch elektrischen Speichern muss bei der Berechnung der Speicherinhalte natürlich auf die jeweiligen Kapazitätsober- und -untergrenzen Rücksicht genommen werden. Ist der Speicher voll, so kann er nicht zusätzlich weiter beladen werden, ist der Speicher leer, so kann keine Entladung mehr erfolgen. Eine Empfehlung für die Vorgehensweise bei der Ermittlung der optimalen Speichergröße wird in Kapitel 3.4.2 gezeigt.

2.6 Erzeugungsanlagen

Auch dezentrale Erzeugungsanlagen erzeugen abhängig von ihrer Betriebscharakteristik einen bestimmten Lastgang. Bezüglich der Verwendung der dabei erzeugten Energie kann man dabei grob zwei Fälle unterscheiden. Gibt es einen geförderten Einspeisetarif, so wird meist der gesamte erzeugte elektrische Strom ins öffentliche Netz eingespeist. Auf den Netzbezug des Gebäudes hat dies keine Auswirkungen, weshalb solche Anlagen in diesem Zuge nicht betrachtet werden müssen. Erfolgt die Einspeisung jedoch nach dem Prinzip der Überschusseinspeisung, so wird nur der Strom, der im Gebäude nicht anderweitig verbraucht werden kann, ins öffentliche Netz eingespeist (Schuster, 2008).

Im Speziellen werden hier drei Arten von dezentralen Erzeugungsanlagen betrachtet. Photovoltaik und Kleinwindanlagen sind in Ihrer Erzeugung vom Wetter abhängig. Der Lastgang kann dabei kaum beeinflusst werden. Miniblockheizkraftwerke können sehr wohl aktiv geregelt werden. Die Auslegung erfolgt üblicherweise entweder wärme- oder stromgeführt.

Der Erzeugungslastgang von Photovoltaikanlagen lässt sich mittels geeigneter Software und bekannter Anlagenkonfiguration simulieren. Im Zuge der Untersuchungen wurde mittels der Software Greenius 3.6.0 eine Photovoltaikanlage simuliert. Als Grundlage wurde dabei der Wetterdatensatz aus dem Gebäudesimulationstool TRNSYS verwendet (Inschlag, 2011). Die Simulation erfolgte hier abweichend von den anderen Untersuchungen lediglich auf Stundenbasis, da die Software Greenius keine höhere Auflösung unterstützt. Die Umrechnung des Wetterdatensatzes auf Stundenwerte erfolgte noch in TRNSYS (Inschlag, 2011). Es wurde eine Anlage mit einer Gesamtmodulleistung von 5,76 kWp simuliert. Dabei wurden polykristalline Siliziummodule des Typs Solon Blue 230/07 mit einer Nennleistung von je 240 W verwendet (Solon, 2011). Je zwölf Module wurden zu einem String verschaltet. Am Wechselrichter des Typs Sunny Mini Central 5000A wurden zwei solche Strings angeschlossen (SMA, 2011). Die Module wurden mit 0° Süd bzw. einem Aufstellwinkel von 30° ausgerichtet. Bei der Simulation ergibt sich ein jährlicher Energieertrag von ~5.383 kWh für die Gesamtanlage. Dies entspricht einem Ertrag von ~935 kWh/kWp. Der bei dieser Simulation entstandene Lastgang wurde mittels Division durch die Anlagenleistung auf eine Anlagengröße von 1 kWp bzw. einen spezifischen Lastgang normiert. Im nächsten Schritt wurden die Stundenwerte der Erzeugung im Verhältnis der Globalstrahlung während der jeweiligen Stunde wieder auf Viertelstundenwerte umgerechnet. Der dabei entstandene Lastgang wird im weiteren Verlauf der Betrachtungen als Standardlastgang verwendet. Die einzelnen Viertelstundenwerte der Erzeugung werden dabei mit der jeweils betrachteten Anlagenleistung multipliziert. Dadurch ergibt sich ein Lastgang in Viertelstundenaufösung mit der Einheit W bzw. kW. Abbildung 2.63 und Abbildung 2.64 zeigen je eine Woche dieses Lastgangs im Winter und im Sommer. Zusätzlich ist der Zeitverlauf des Strompreises der jeweiligen Woche dargestellt (Daten aus Inschlag, 2011 und EXAA, 2011).

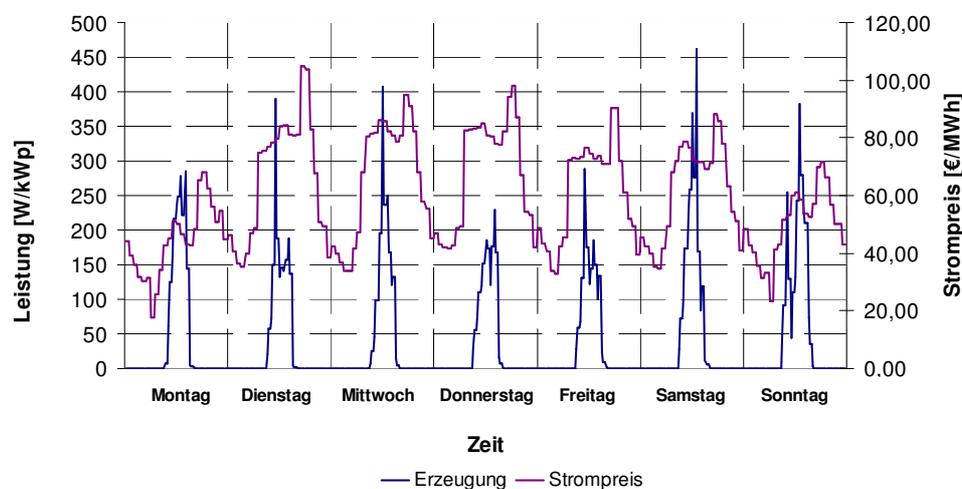


Abbildung 2.63: Spezifischer Lastgang Photovoltaik Winter (Daten aus Inschlag, 2011 und EXAA, 2011)

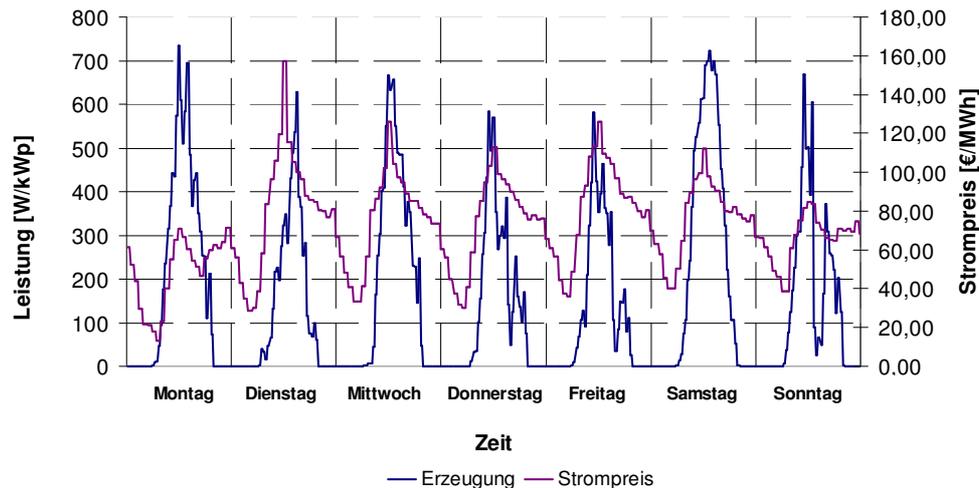


Abbildung 2.64: Spezifischer Lastgang Photovoltaik Sommer (Daten aus Inschlag, 2011 und EXAA, 2011)

Es ist eine Korrelation der beiden Kurven erkennbar. Die Zeiten der Erzeugung stimmen weitgehend mit Zeiten hoher Strompreise überein.

Der Erzeugungslastgang für Windenergieanlagen ist direkt abhängig von der Windgeschwindigkeit. Um die jeweilige Erzeugung bei der gegebenen Windgeschwindigkeit bestimmen zu können, gibt es Kennlinien für Windenergieanlagen. Abbildung 2.65 zeigt die Kennlinie einer Kleinwindanlage mit 6 kW Nennleistung (Braun, 2011).

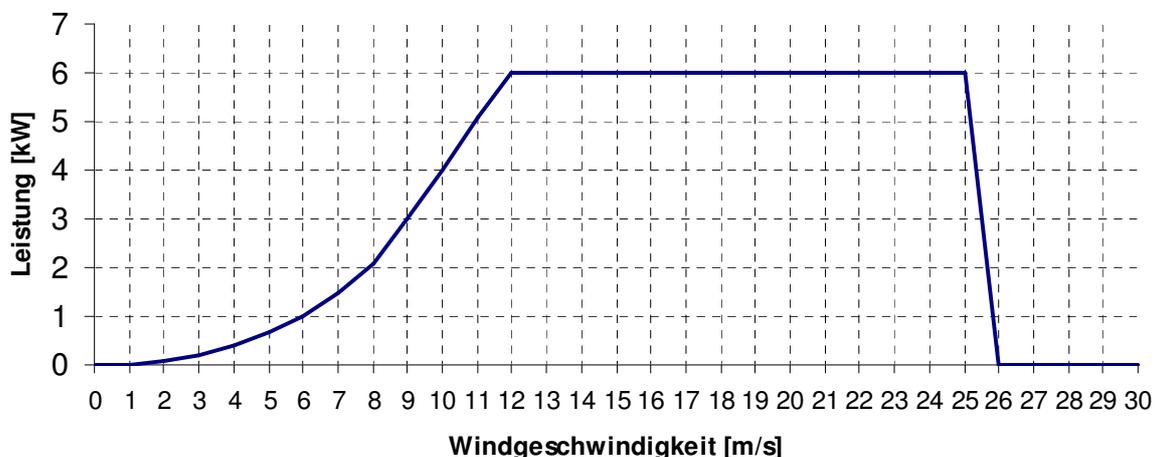


Abbildung 2.65: Kennlinie Kleinwindanlage (Braun, 2011)

Die Einschaltgeschwindigkeit beträgt hier 1,8 m/s, ab 12 m/s wird die Nennleistung erreicht. Bei über 25 m/s wird der Rotor aus Sicherheitsgründen aus dem Wind gedreht, es erfolgt keine Stromproduktion mehr (Braun, 2011).

Die Anlagenkennlinie wird nun für die weiteren Betrachtungen in Sektionen unterteilt. Unterhalb von 1,8 m/s fällt keine Leistung an, zwischen 12 und 25 m/s beträgt die Leistung 6 kW, über 25 m/s fällt wiederum keine Leistung an. Für die Spanne zwischen 1,8 und 12 m/s wird wieder die Trendlinienfunktion des Tabellenkalkulationsprogramms verwendet. Dies ist in Abbildung 2.66 dargestellt.

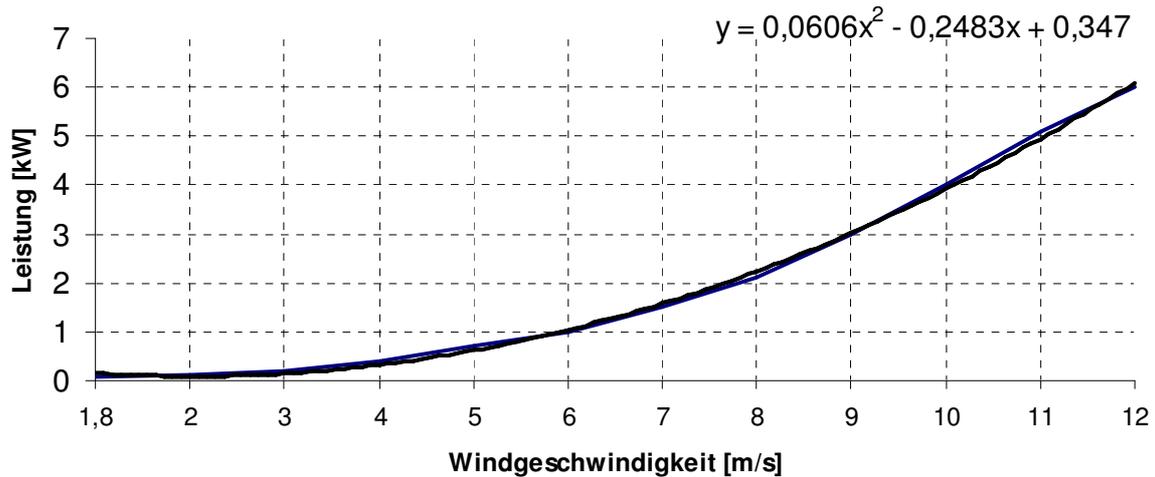


Abbildung 2.66: Kennlinie Kleinwindanlage (Braun, 2011)

Es ist zu sehen, dass sich die Kennlinie zwischen der Einschaltgeschwindigkeit und der Nenngeschwindigkeit mit Gleichung 2.74 gut annähern lässt.

$$P_W = 0,0606 \cdot v_W^2 - 0,2483 \cdot v_W + 0,347 \quad (2.74)$$

P_W Leistung der Windenergieanlage [kW]
 v_W Windgeschwindigkeit [m/s]

Die Windgeschwindigkeit des Wetterdatensatzes bezieht sich auf 10 m Höhe über dem Boden (Inschlag, 2011). Da die mittlere Windgeschwindigkeit mit zunehmender Höhe steigt und Windräder meist auf einem Mast oder am Dach montiert sind, muss diese auf die Nabenhöhe der Windenergieanlage umgerechnet werden. Dies kann näherungsweise mittels Gleichung 2.75 erfolgen (Hiller et al, 2007).

$$\frac{v_W(h_2)}{v_W(h_1)} = \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^{\frac{1}{7}} \quad (2.75)$$

h Höhe über dem Boden [m]

Anhand der Kennlinie der Windenergieanlage und Kenntnis der Windgeschwindigkeit in der jeweiligen Höhe kann also der Lastgang der Windenergieanlage bestimmt werden. Dividiert man den jeweiligen Viertelstundenwert durch die Anlagenleistung (6 kW), so erhält man wiederum einen spezifischen Lastgang in kW/kW oder W/kW. Abbildung 2.67 und Abbildung 2.68 zeigen spezifische Lastgänge für eine windreiche und eine windarme Woche mit den jeweiligen Strompreisen (Daten aus Inschlag, 2011 und EXAA, 2011). Es wurde hierbei eine Nabenhöhe von 20 m verwendet. Da Wind sowohl am Tag als auch nachts auftreten kann, ist hier keine Korrelation zwischen den beiden Kurven erkennbar.

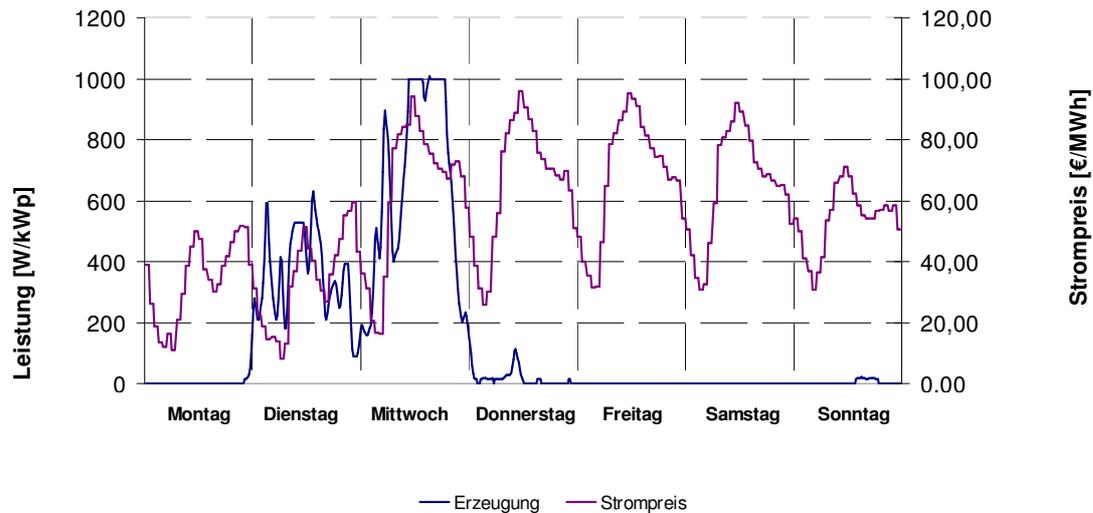


Abbildung 2.67: Spezifischer Lastgang Kleinwindanlage windreich (Daten aus Inschlag, 2011 und EXAA, 2011)

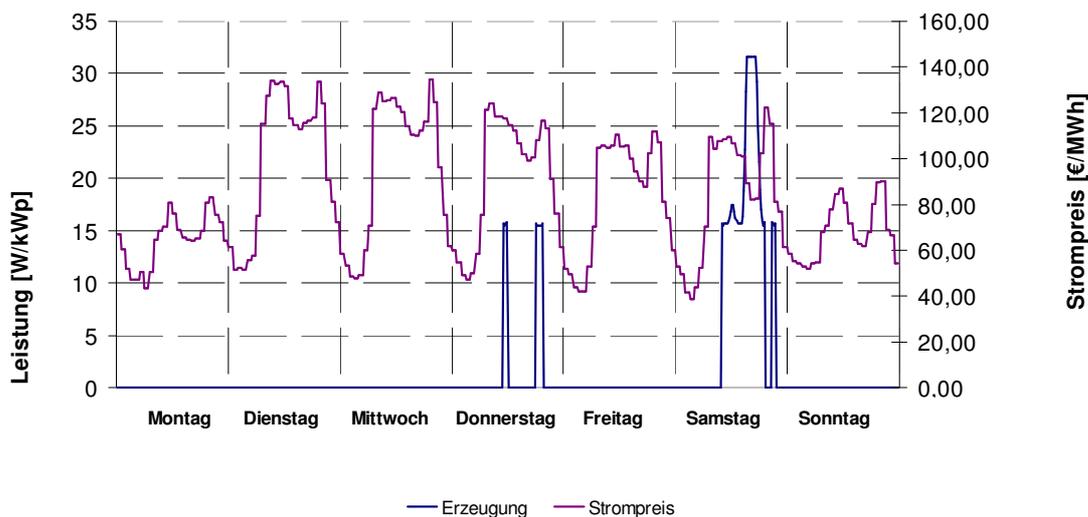


Abbildung 2.68: Spezifischer Lastgang Kleinwindanlage windarm (Daten aus Inschlag, 2011 und EXAA, 2011).

Miniblockheizkraftwerke können sowohl Wärme als auch elektrische Energie bereitstellen. Der Begriff „Blockheizkraftwerk (BHKW)“ ist dabei darauf zurückzuführen, dass sowohl Wärme als auch elektrische Energie aus einem Block bereitgestellt werden kann. Man unterscheidet dabei grundsätzlich zwei Betriebsweisen. Ist der Betrieb wärmegeführt, so dient das BHKW ähnlich wie ein konventioneller Heizkessel primär zur Deckung des Wärmebedarfs. Die abgegebene Wärme kann im Zusammenhang mit einer Sorptionskältemaschine auch als Antriebsenergie für die Kühlung dienen. Die dabei erzeugte elektrische Energie kann bei Bedarf selbst genutzt oder ins öffentliche Stromnetz eingespeist werden. Stromgeführte BHKWs dienen primär dazu, Strombezug zu Spitzenlastzeiten zu reduzieren bzw. Strombezug aus dem Netz ganz zu vermeiden. Die dabei anfallende Abwärme kann bei Bedarf direkt verwertet werden. Es wird in der Literatur jedoch auch empfohlen, bei dieser Betriebsweise einen Wärmespeicher in das System zu integrieren, um den Ausnutzungsgrad der

Abwärme erhöhen zu können. Bezüglich der Regelmöglichkeiten unterscheidet man zudem zwischen modulierbaren und nicht modulierbaren BHKWs. Nichtmodulierbare Systeme können im Betrieb nur auf Nennlast fahren. Modulierbare Systeme können auch im Teillastbetrieb arbeiten (Thomas, 2007).

Neben den Wirkungsgraden (thermisch und elektrisch) gibt es bei BHKWs mit der Stromkennzahl eine weitere Kennzahl, die das Verhältnis aus elektrischer Leistung zu thermischer Leistung bzw. elektrischem Wirkungsgrad zu thermischem Wirkungsgrad angibt. Dies ist in Gleichung 2.76 dargestellt (Thomas, 2007).

$$S_B = \frac{P_{B,el}}{\dot{Q}_{B,th}} = \frac{\eta_{B,el}}{\eta_{B,th}} \quad (2.76)$$

S_B	Stromkennzahl des BHKWs [-]
$P_{B,el}$	Elektrische Leistung des BHKWs [kW]
$\dot{Q}_{B,th}$	Thermische Leistung des BHKWs [kW]
$\eta_{B,el}$	Elektrischer Wirkungsgrad des BHKWs [-]
$\eta_{B,th}$	Thermischer Wirkungsgrad des BHKWs [-]

Auf dem derzeitigen Stand der Technik kann man bei BHKWs von elektrischen Wirkungsgraden zwischen 24 und 27 % und Gesamtwirkungsgraden zwischen 85 und 100 % ausgehen. Nimmt man den elektrischen Wirkungsgrad von 25 % und den Gesamtwirkungsgrad von 90 %, so beträgt der thermische Wirkungsgrad 65 % und die Stromkennzahl $\sim 0,385$. Vereinfachend werden diese Kennzahlen für alle BHKWs als konstant angenommen. Bei genauerer Betrachtung wären hier die in den Datenblättern enthaltenen Informationen zu verwenden (Thomas, 2007).

Da es sich bei BHKWs um Anlagen mit vielen bewegten Teilen handelt, ist ein kontinuierlicher Betrieb mit möglichst wenigen veränderlichen Parametern anzustreben. Wärmegeführte Systeme werden daher häufig ausgelegt, um die thermische Grundlast zu decken, während die Spitzenlasten von einem eigenen Spitzenlastkessel gedeckt werden. Auch hier kann die Einbindung von Pufferspeichern die Laufzeit eines BHKWs erhöhen. Dadurch kann das wärmegeführte BHKW oft auch dann in Nennlast weiterlaufen, wenn der thermische Bedarf unter die Wärmeleistung des BHKWs fällt. Stromgeführte BHKWs werden hingegen oft auf die elektrische Grundlast ausgelegt. Hier ist jedoch im Auge zu behalten, dass auch die Abwärme des BHKWs stets genutzt bzw. gespeichert werden sollte. Aufgrund der Tatsache, dass elektrische Energie nur mit höherem Aufwand speicherbar ist als thermische Energie, werden stromgeführte BHKWs meistens modulierbar ausgeführt (Thomas, 2007).

Als Hauptkriterium zur Auslegung für BHKWs (sowohl wärme- als auch stromgeführt) werden Jahresdauerlinien des thermischen bzw. elektrischen Lastgangs verwendet. Ein Beispiel hierfür ist in Abbildung 2.69 dargestellt. Dabei wird der jeweilige Leistungsbedarf geordnet vom höchsten bis zum niedrigsten Wert auf der Y-Achse, die Anzahl der Stunden im Jahr auf der X-Achse aufgetragen. Diese Kennlinie kann sowohl für elektrische, als auch für thermische Lasten dargestellt werden. In diesem Beispiel wurde das BHKW dann anhand des Zielwertes für Vollaststunden auf eine Größe von 210 kW thermischer Leistung ausgelegt (Ressourcenschutz, 2011).

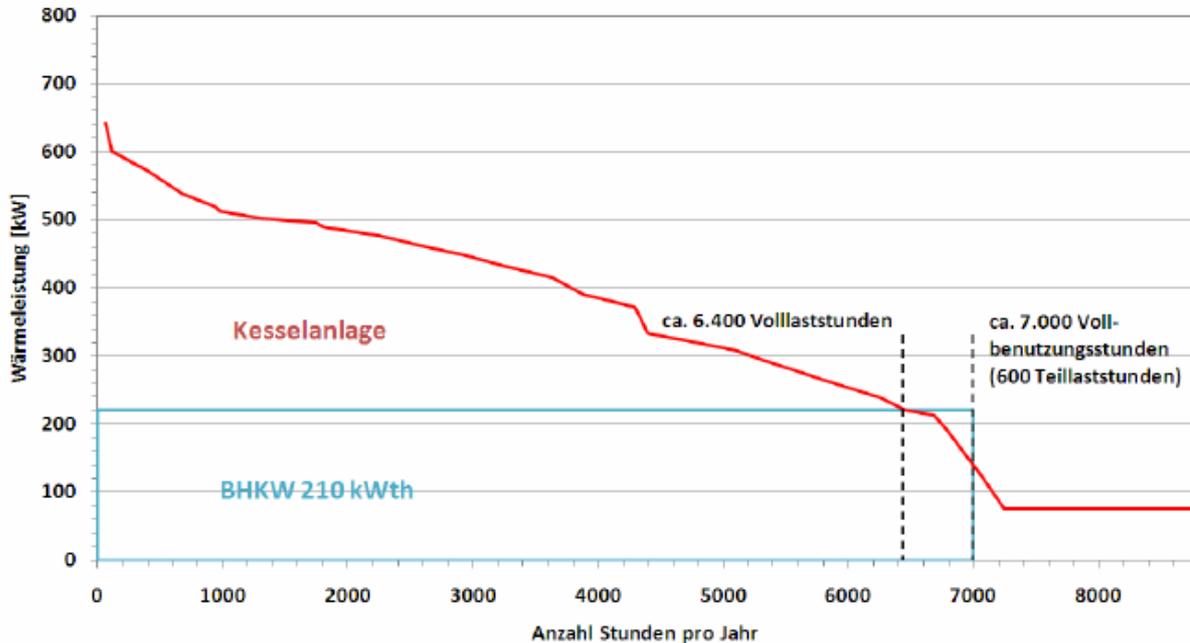


Abbildung 2.69: Jahresdauerlinie (Ressourcenschutz, 2011)

Unter Einbeziehung des Teillastbetriebs ergeben sich dementsprechend mehr Vollbenutzungsstunden (=Wärme- oder Stromerzeugung dividiert durch die thermische bzw. elektrische Nennleistung) (Ressourcenschutz, 2011).

Bei variablen Stromtarifen kommt hier jedoch noch der Aspekt dazu, dass die erzeugte elektrische Energie zu unterschiedlichen Zeiten monetär unterschiedlich zu bewerten ist. Deswegen ist bei der Auslegung eines BHKWs auch darauf zu achten, dass vor allem Stunden zu Hochtarifzeiten damit abgedeckt werden können. Da ein BHKW sowohl Wärme als auch elektrische Energie liefert, ist ebenso zu beachten, dass eine Gleichzeitigkeit beim Bedarf von Strom und Wärme für das BHKW von Vorteil ist bzw. die benötigte Speicherkapazität senken kann.

Für den elektrischen Erzeugungslastgang von BHKWs können nun anhand der aus der Literatur abgeleiteten Zusammenhänge folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Das nicht modulierbare wärmegeführte BHKW ist in Betrieb, wenn der thermische Bedarf (inklusive Einspeicherung) die Nennleistung des BHKWs überschreitet.
- Das modulierbare wärmegeführte BHKW ist in der jeweiligen Stufe im Betrieb, die vom thermischen Lastgang (inklusive Einspeicherung) überschritten wird. Die jeweiligen Leistungsstufen sind aus den technischen Daten des BHKWs zu entnehmen.
- Das stromgeführte BHKW ist in der jeweiligen Stufe im Betrieb, die vom elektrischen Lastgang überschritten wird. Auch hier sind die jeweiligen Leistungsstufen aus den technischen Daten zu übernehmen. Je nach der gewünschten Betriebsweise kann hier auch eine Einspeisung ins Öffentliche Netz gewünscht sein. Dann ist das BHKW auch im Betrieb, wenn die erzeugte Leistung den Bedarf übersteigt. Es sollte jedoch darauf geachtet werden, dass die Wärme auch verwertet werden kann.

3 UNTERSUCHUNG LASTGÄNGE

3.1 Standardgebäude

An dieser Stelle sollen einige grundlegende Voraussetzungen, die für alle Lastgangvarianten gelten, abgehandelt werden. Für die Erstellung der Lastgänge wurde ein Standardgebäude definiert. Die einzelnen Lastgangvarianten beruhen auf diesem. Durch Variation der Gebäudeausstattung, Regelstrategien, Fensterflächenanteile und der Wärmedämmung werden hier unterschiedliche Lastgänge für das gesamte Gebäude ermittelt. Anschließend wird das theoretische Optimierungspotential anhand der in Kapitel 2 gezeigten Zusammenhänge gezeigt.

Das Gebäude besteht aus drei gleich aufgebauten Ebenen. Abbildung 3.1 zeigt den Grundriss einer Ebene inklusive Abmessungen (Stumpf, 2011).

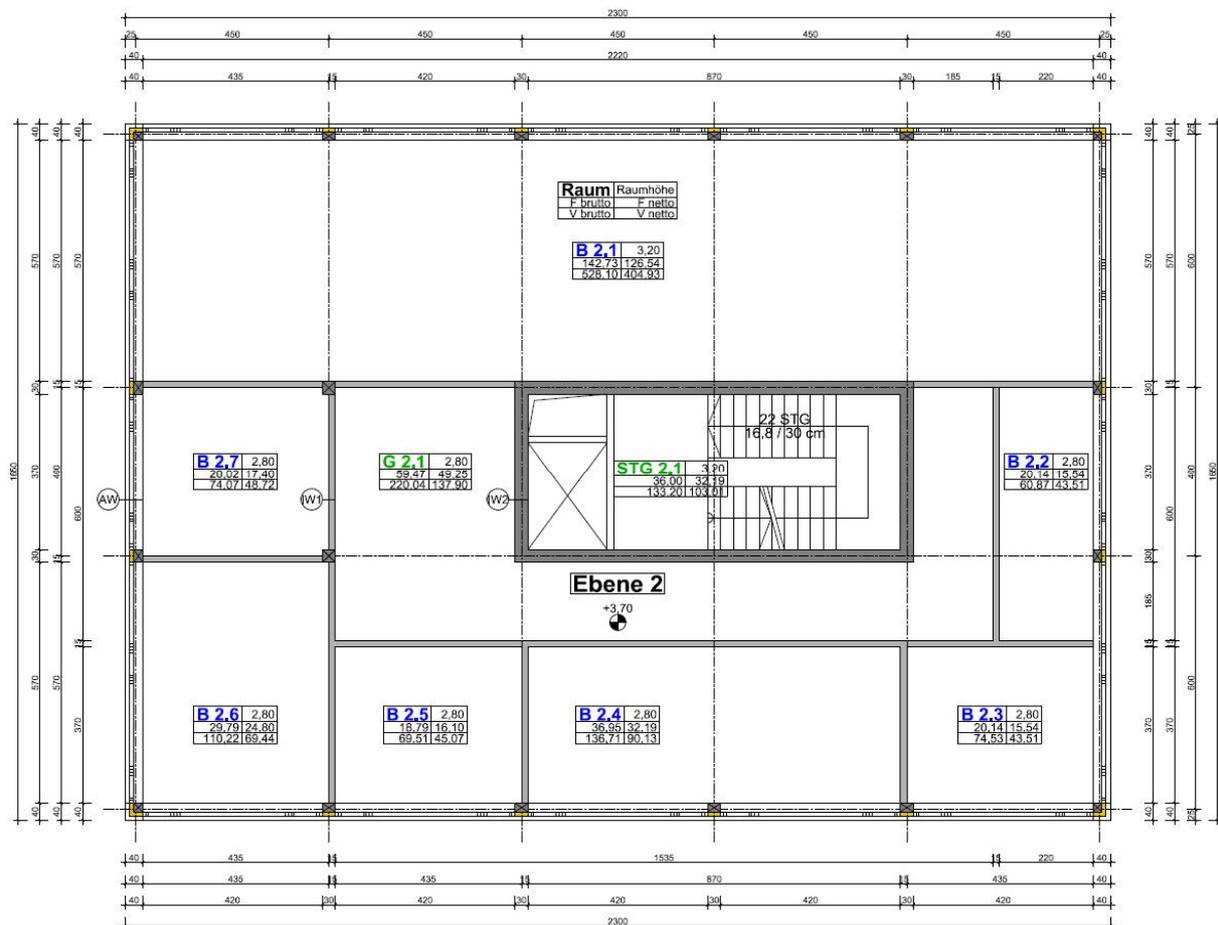


Abbildung 3.1: Grundriss Gebäude (Stumpf, 2011)

Dabei wurde das Modell so gewählt, dass das Gebäude sowohl Einzelbüros, Gruppenbüros als auch Großraumbüros aufweist. Zudem sind pro Ebene je ein Gang und ein Stiegenhaus vorhanden. Es wurden drei Ebenen gewählt, damit der thermische Lastgang für eine erdberührende Ebene, eine Ebene in der Mitte des Gebäudes und eine unter dem Dach vorhanden ist. Das Gebäude ist zudem so ausgerichtet, dass die obere Seite des Plans nach Norden zeigt. Das Großraumbüro befindet sich also an der Nordseite des Gebäudes. Die Raumbezeichnungen wurden dabei stets nach dem

Prinzip gewählt, dass die erste Zahl die jeweilige Ebene beschreibt. Dabei ist die Ebene 1 die untere, erdberührende Ebene. Die zweite Zahl bezeichnet die Raumnummer. Die Buchstaben vor der Raumnummer beschreiben den Verwendungszweck. Der Buchstabe „B“ beschreibt einen Büroraum, „G“ einen Gang und „STG“ ein Stiegenhaus. So ist beispielsweise der Raum B 2.2 das Büro Nummer 2 in der mittleren Ebene (Stumpf, 2011). Für die Lastgangbetrachtungen wurden leichte Abweichungen vom Plan definiert. Am Plan nicht eingezeichnet, in den Lastgangbetrachtungen der Beleuchtung jedoch berücksichtigt, ist je eine Toilette pro Ebene (Fläche je 10 m² ohne Fenster). Zudem werden die Räume B 1.5, B 2.5 und B 3.5 als Teeküchen verwendet. Inklusive Toiletten hat eine Ebene also eine Nettofläche von 339,55 m², alle drei Ebenen zusammen 1.018,65 m². Zudem gibt es pro Ebene 19, im gesamten Bürogebäude also 57 Computerarbeitsplätze.

Bei der Ermittlung des thermischen Lastgangs in TRNSYS wurden einige Parameter bei allen Simulationen gleich beibehalten. Dies ist einerseits darin begründet, dass die Vergleichbarkeit gegeben sein muss. Beispielsweise wurde für alle Simulationen der gleiche Wetterdatensatz verwendet. Andererseits wurden Vereinfachungen getroffen, um den Simulationsaufwand in TRNSYS zu minimieren. Tabelle 3.1 zeigt eine Übersicht über die Eingabewerte, die bei den Simulationen konstant sind. Es ist auch angeführt, ob die jeweiligen Werte bei allen Simulationen gleich bleiben oder jeweils nur für die Ermittlung eines Standardlastgangs oder optimierten Lastgangs verwendet wurden (Inschlag, 2011). Dies gilt jedoch nur für die Simulation des thermischen Lastgangs in TRNSYS. Bei der Erstellung der elektrischen Lastgänge wurden diese Werte gegebenenfalls variiert.

Tabelle 3.1: Gleichbleibende Eingaben bei Simulationen in TRNSYS (Inschlag, 2011)

Parameter	Wert	Standard	Optimiert
Außentemperatur	Aus Wetterdatensatz TRNSYS		
Windgeschwindigkeit	Aus Wetterdatensatz TRNSYS		
Windrichtung	Aus Wetterdatensatz TRNSYS		
Solare Einstrahlung	Aus Wetterdatensatz TRNSYS		
Relative Luftfeuchte außen	Aus Wetterdatensatz TRNSYS		
Jalousie	Innen liegend		
Jalousie schließt bei	Einstrahlung > 200 W/m ² auf jeweilige Fassadenfläche		
Jalousie öffnet bei	Einstrahlung < 120 W/m ² auf jeweilige Fassadenfläche		
Abschattung durch Jalousie	Minderung der Strahlungsdurchlässigkeit der jeweiligen Fenster um 70 %		
Wärmerückgewinnung Lüftung	Wirkungsgrad 75 %		
Luftwechselzahl Lüftung	1/h bei Anwesenheit		
Luftwechselzahl durch Gebäudeundichtheit	0,05/h permanent		
Solltemperatur Heizfall Büros und Küche	Anwesenheitstage 8:00 bis 17:00: 22°C Alle anderen Zeiten: 18°C		
Solltemperatur Heizfall Gang und Stiegenhaus	Anwesenheitstage 8:00 bis 17:00: 20°C Alle anderen Zeiten: 18°C		

Parameter	Wert	Standard	Optimiert
Solltemperatur Kühlfall alle Räume	Anwesenheitstage 8:00 bis 17:00: 26°C Alle anderen Zeiten: 35°C		
Solltemperaturen Heizfall Büros und Küche	Variabel – Abhängig von Strompreis und Tageszeit		
Solltemperatur Kühlfall alle Räume	Variabel – Abhängig von Strompreis und Tageszeit		
Heiz- und Kühlleistung	Keine Beschränkung		
Innere Lasten - Licht	Licht aus bei Globalstrahlung > 200 W/m ² Licht ein bei Globalstrahlung < 120 W/m ²		
Innere Lasten - Sonstige	Menschen, Computer: Anwesenheitstage 8:00 bis 16:30		

Die jeweilige Ermittlung der erforderlichen Heiz- oder Kühlleistung erfolgt dabei bilanziert über das gesamte Gebäude. Gibt es beispielsweise Räume, die gekühlt werden müssen, während andere Heizleistung erfordern, so wird lediglich die Differenz dieser Leistungen als Heiz- oder Kühlleistung bereitgestellt und auch für die Ermittlung des elektrischen Lastmanagements herangezogen.

Die Simulation der Tageslichtquotienten zur Ermittlung des Lastgangs der Beleuchtung wurde mit der Lichtsimulationssoftware Dialux 4.9 durchgeführt. Dabei wurde ein Modell jedes Raumes einer Ebene im Gebäude inklusive Einrichtung erstellt. Die Anzahl der Büroarbeitsplätze orientiert sich dabei nach der Belegungsdichte für Einzel-, Gruppen- und Großraumbüros (DIN 18599-10, 2007). Abbildung 3.2 bis Abbildung 3.4 zeigen je ein Beispiel pro Bürotyp für das mit Dialux erstellte Modell.



Abbildung 3.2: Einzelbüro B 1.7



Abbildung 3.3: Gruppenbüro B 1.6



Abbildung 3.4: Großraumbüro B 1.1

Durch Simulation der Tageslichtquotienten erhält man eine auf die Nutzfläche projizierte Verteilung der Tageslichtquotienten. Ein Beispiel hierfür ist in Abbildung 3.5. dargestellt.

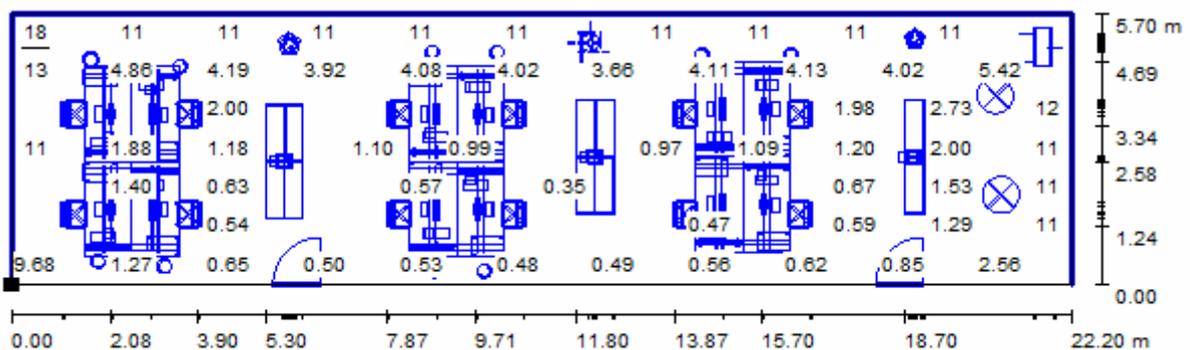


Abbildung 3.5: Beispiel Wertegrafik B 1.1

Diese Werte können vom Programm auch in Tabellenform angegeben und ins Tabellenkalkulationsprogramm übernommen werden. Nach einer Einteilung nach Tageslichtquotienten ergibt sich dann beispielsweise für den Raum B 1.1 das Bild gemäß Abbildung 3.6.

Bl	Gut	7,854 Mittel	1,129	Schlecht	0,446																	
5.293	18	12	11	11	11	12	11	11	11	11	11	10	10	11	11	11	11	11	10	11	11	14
4.479	13	6,19	4,86	4,35	4,19	3,44	3,92	4,08	4,08	4,07	4,02	3,43	3,66	4,02	4,11	4,14	4,13	4,14	4,02	4,49	5,42	12
3.664	12	4,25	2,63	2,11	2	0,19	1,8	1,91	1,92	1,92	1,27	1,5	0,62	1,57	1,89	1,87	1,92	1,98	1,01	2,73	4,14	12
2.850	11	3,54	1,88	1,39	1,18	0,2	0,89	1,1	0,99	0,99	0,99	0,71	0,66	0,97	1,06	1,09	1,11	1,2	0,7	2	3,65	11
2.036	11	3,06	1,4	0,85	0,63	0,17	0,42	0,57	0,57	0,56	0,56	0,35	0,36	0,5	0,61	0,63	0,62	0,67	0,42	1,53	3,13	11
1.221	11	2,8	1,15	0,66	0,54	0,32	0,43	0,42	0,44	0,44	0,4	0,35	0,34	0,34	0,47	0,51	0,51	0,59	0,75	1,29	2,85	11
0.407	9,68	2,57	1,27	0,79	0,65	0,49	0,5	0,53	0,53	0,53	0,48	0,46	0,49	0,5	0,56	0,61	0,62	0,69	0,85	1,29	2,56	9,64
m	0.505	1.514	2.523	3.532	4.541	5.550	6.559	7.568	8.577	9.586	10.595	11.605	12.614	13.623	14.632	15.641	16.650	17.659	18.668	19.677	20.686	21.695

Abbildung 3.6: Tageslichtquotienten und Regelbereiche B 1.1

Durch Zusammenfassung von Bereichen mit ähnlichen Tageslichtquotienten wurden dann Regelbereiche definiert. Je nach Raumgröße gibt es zwei bis drei Regelbereiche. So wurden beispielsweise für das Großraumbüro drei Regelbereiche geschaffen. Der grüne Bereich ist der Bereich entlang der Fenster. Dieser hat im Schnitt den höchsten Tageslichtquotienten. Der gelbe Bereich liegt bezüglich der Tageslichtversorgung in der Mitte, der rote Bereich weist die niedrigsten Quotienten auf. Im nächsten Schritt wurden die arithmetischen Mittelwerte der Tageslichtquotienten der einzelnen Bereiche errechnet. Im gezeigten Beispiel betragen die mittleren Tageslichtquotienten im gut mit Tageslicht versorgten Bereich 7,854 %, im mittleren Bereich 1,129 % und im schlecht versorgten Bereich 0,446 %.

Diese Vorgehensweise wurde für alle Räume mit Tageslichtversorgung bei den Fensterflächenanteilen von 30, 60 und 90 % wiederholt. Die Fensterfläche wurde dabei über die gesamte Raumbreite verteilt, die Fensterhöhe entspricht also 30, 60 oder 90 % der Raumhöhe. Dies ist auch in Abbildung 3.2 bis Abbildung 3.4 ersichtlich. Somit konnten alle Bereiche und mittlere Tageslichtquotienten für diese ermittelt werden. Die Aufteilung der einzelnen Bereiche wurden dabei unabhängig vom jeweiligen Fensterflächenanteil gleich getroffen.

Um auch die Abdunkelung durch die Jalousieschließungen berücksichtigen zu können, wurde zudem jeder Raum mit offenen sowie geschlossenen und Räume, die an mehr als eine Außenwand des Gebäudes grenzen, auch mit teilweise geschlossenen Jalousien simuliert. Die dabei entstehenden Werte für freie Aufstellung eines Gebäudes sind im Anhang A.1 zu finden. Die Bereiche für die Regelung bleiben jedoch wieder gleich, da auch in echten Beleuchtungssystemen keine Änderung der Regelbereiche in Abhängigkeit von den Randbedingungen wahrscheinlich ist.

Um auch Aussagen über Gebäude in verbautem Gebiet treffen zu können, wurden dieselben Betrachtungen auch hierfür angestellt. Es wurde davon ausgegangen, dass gegenüber jeder Seite des Standardbürogebäudes im Abstand von fünf Metern ein Gebäude in gleicher Höhe und Größe steht. Dafür wurde in Dialux für jeden Raum eine dementsprechende Außenszene erstellt. Dabei ergeben sich für jede Etage unterschiedliche Außenszenen. So wird zum Beispiel die unterste Etage des Standardbürogebäudes um zwei Etagen überragt, während die oberste Etage gleich mit der Verbauung abschließt. Aufgrund der Verbauung wurde angenommen, dass die Jalousiensteuerung aus der Version ohne Verbauung nur für das oberste Stockwerk gilt und die unteren Stockwerke soweit im Schatten liegen, dass keine Jalousien notwendig sind. Bei der Verbauung wurde zudem davon ausgegangen, dass die angren-

zende Verbauung gleiche Seitenlängen hat, wie das Standardbürogebäude. Somit haben die Ecken des Bürogebäudes weiterhin freie Sicht nach außen. Zur besseren Veranschaulichung ist dies in Abbildung 3.7 für den Raum 1.1 dargestellt.

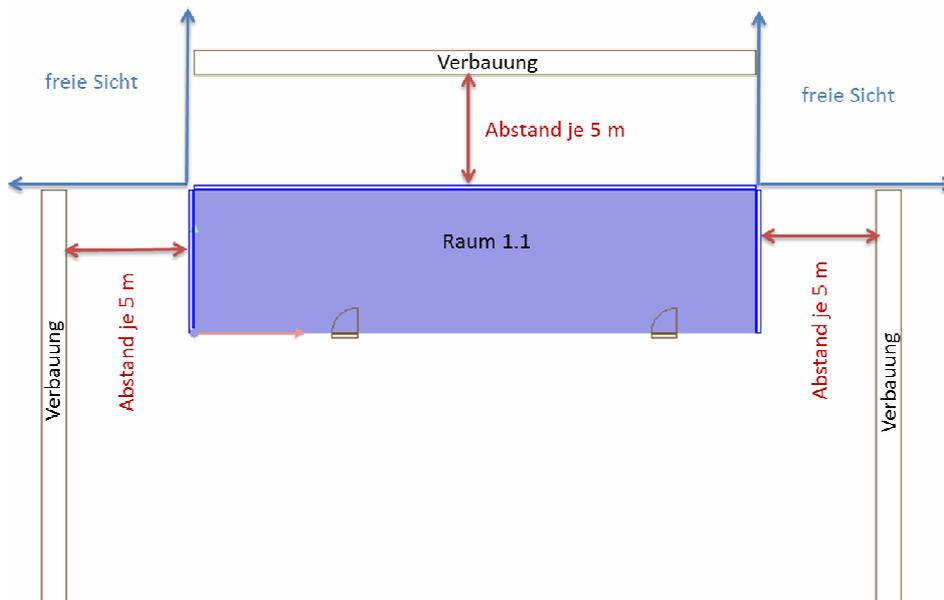


Abbildung 3.7: Draufsicht Verbauung Raum 1.1

Abbildung 3.8 bis Abbildung 3.10 zeigen je eine Außenszene für den Raum 1.1 in 3-D Ansicht für die untere, mittlere und obere Etage. Dabei ist zu sehen, dass sich durch die Verbauung für unterschiedliche Etagen unterschiedliche Verschattungseffekte ergeben müssen. Dies wird auch an den im Anhang A.2 gezeigten Werten für die Tageslichtquotienten bei Verbauung deutlich.

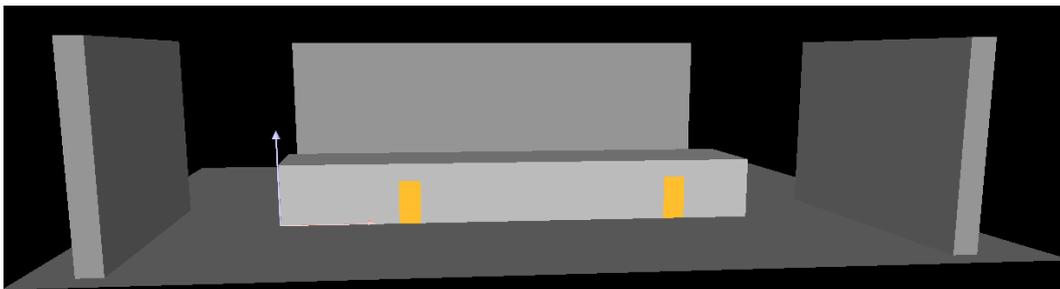


Abbildung 3.8: Verbauung B 1.1 unten

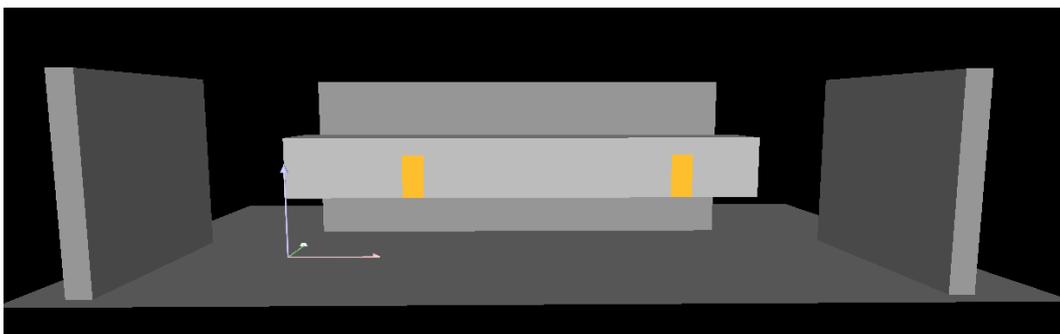


Abbildung 3.9: Verbauung B 1.1 Mitte

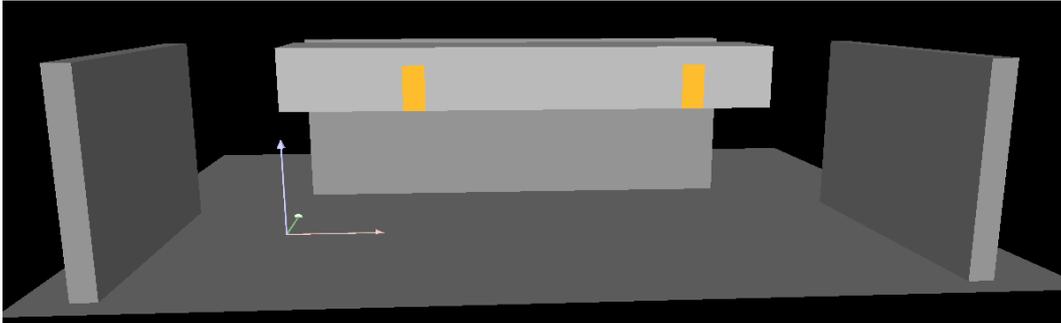


Abbildung 3.10: Verbaugung B 1.1 oben

Sowohl die in Tabelle 3.1 dargestellten gleich bleibenden Eingabewerte als auch die Tageslichtquotienten für die Beleuchtung werden nun als Grundlage für die Modellierung der Lastgänge verwendet. Die variable Temperaturvorgabe bei der Simulation des optimierten thermischen Lastgangs mittels TRNSYS wird in Kapitel 3.3 dargestellt.

Damit die Modellierung und Analyse der Lastgänge modular aufgebaut werden kann, wird noch versucht, Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Lastgängen zu identifizieren. Dabei werden die in Kapitel 2 gezeigten Mechanismen zur Ermittlung der Lastgänge der einzelnen Verbraucher sowie die dabei getroffenen Vereinfachungen (vgl. Tabelle 2.26) ebenso wie die Vereinfachungen in den Simulationen mittels TRNSYS (vgl. Tabelle 3.1) beibehalten. So werden beispielsweise die inneren Lasten in den TRNSYS-Simulationen immer gleich modelliert, obwohl sich durch die Änderung der Lastgänge von Verbrauchern (z.B. effizientere Beleuchtung) hier auch Auswirkungen auf den thermischen Lastgang und somit wieder auf den elektrischen Lastgang einer Wärmepumpe ergeben können. Geht man die einzelnen Verbraucher durch, so ergeben sich die für diese Arbeit berücksichtigten Wechselwirkungen gemäß Tabelle 3.2.

Tabelle 3.2: Wechselwirkungen zwischen Verbrauchern

Einfluss von	Einfluss auf	Anmerkung
Verbraucher der Wärmeerzeugung und -verteilung	Kühlschrank, thermische Speicher	Umgebungstemperatur [°C] beeinflusst Lastgang Kühlschrank (Gleichung 2.42) und Speicherverluste (Gleichung 2.70).
Jalousie	Beleuchtung	Unterschiedliche Steuerung zwischen verbautem und freistehenden Gebäude beeinflusst Tageslichtquotient (Gleichung 2.45)
Beleuchtung	Ventilator, PC, Monitor, Notebook, Thin Client	Präsenzmeldung der Beleuchtung gilt auch zur Feststellung der Präsenz für die Lüftung. Dies gilt jedoch nur, wenn die thermischen Lasten nicht durch die Lüftung abgedeckt werden. Die Leistungsaufnahme von PC, Monitor, Notebook und Thin Client ist ebenfalls von der Präsenz abhängig.

Einfluss von	Einfluss auf	Anmerkung
Thermische Speicher	Elektrische Widerstandsheizung, Wärmepumpe, Kühlung, Pumpen, Ventilator	Thermische Erzeugung kann durch den Einsatz von Speichern verschoben werden. Dabei ändern sich auch die Einsatzzeiten der Pumpen und Ventilatoren

Lastgänge für einzelne Verbraucher können somit modular zu einem Lastgang für das gesamte Gebäude zusammengeführt werden. Lediglich die in der Tabelle gezeigten Verbraucher bzw. deren Lastgänge, die durch andere Verbraucher beeinflusst werden, müssen dazu modifiziert werden.

Der Abwesenheitsfaktor für Einzel- und Gruppenbüros bei der Beleuchtung beträgt dabei 0,3 (vgl. Kapitel 2.2). Da sich dieser Faktor auch auf Büros für einen Arbeitsplatz bezieht, wird dieser Faktor auch für die Anwesenheit am Computerarbeitsplatz verwendet, deren Geräte sich nach einer gewissen Zeit in den Standby-Modus schalten müssen (vgl. Kapitel 2.1). Die Verteilung erfolgt hier zufällig für jeden Viertelstundenwert. Es wird wieder eine gleichverteilte Zufallszahl für jedes Viertelstundenintervall generiert. Ist diese Zahl kleiner als 0,3, so ist keine, ist die Zahl größer, so ist Anwesenheit gegeben. Bei Einzel- und Gruppenbüros bestimmt hierbei die Anwesenheit der Beleuchtung ebenfalls die Anwesenheit an Computerarbeitsplätzen. Bei Großraumbüros mit einem Abwesenheitsfaktor der Beleuchtung von 0,0 wird diese Vorgehensweise für jeden Arbeitsplatz extra durchgeführt und anhand dessen die Anwesenheit bestimmt (DIN 18599-10, 2007). Um die Vergleichbarkeit der Lastgänge zu gewährleisten, wird der zufällig generierte Anwesenheitsverlauf hier für alle Varianten gleich beibehalten. Der Abwesenheitsfaktor für ein WC beträgt 0,9 (DIN 18599-10, 2007). Für die Küchen wird angenommen, dass in der jeweils ersten Stunde eines Arbeitstages und während der Mittagszeit von 11:30 bis 13:00 Anwesenheit vorhanden ist, außerhalb dieser Zeiten wird keine Anwesenheit vorausgesetzt.

In Kapitel 3.2 werden nun zwei Lastgangvarianten erstellt. Variante A repräsentiert ein Gebäude mit niedrigem Lastverschiebungspotential, Variante B ein Gebäude mit hohem Lastverschiebungspotential. Variante C ist ähnlich wie Variante B, allerdings werden hier bereits diverse Energieeinsparpotentiale ausgeschöpft. **Die dahinter liegenden Daten und Zusammenhänge wurden in den Kapiteln 2 und 3.1 gezeigt und werden für die weiteren Betrachtungen vorausgesetzt.** Eine Übersicht der untersuchten Varianten mit den wichtigsten Eckdaten befindet sich in Anhang A.3. Zudem ist in Anhang A.4 der grundsätzliche Aufbau einer Datei zur Lastgangmodellierung gezeigt.

3.2 Modellierung der Lastgänge

3.2.1 Variante A

Die Gebäudevariante A repräsentiert ein Bürogebäude, bei denen im Zweifelsfall Verbraucher ohne Lastverschiebungspotential verwendet werden. So werden beispielsweise Desktops statt Laptops verwendet. Die Wärmeerzeugung erfolgt über einen nicht elektrisch betriebenen Wärmeerzeuger.

Infrastruktur

Die Arbeitsplätze sind mit Desktops der Kategorie D und Bildschirmen der Kategorie 2 ausgestattet. Pro Arbeitsplatz gibt es zudem ein Telefon. Es gibt je einen Schwarzweißdrucker pro Einzel- und Gruppenbüro und einen je vier Arbeitsplätze im Großraumbüro. Insgesamt gibt es im Gebäude somit 24 Drucker in den Büros. Die Drucker haben eine Druckgeschwindigkeit von 25 Seiten pro Minute. Zusätzlich gibt es pro Etage ein farbfähiges Mehrzweckgerät mit einer Verarbeitungsgeschwindigkeit von 50 Seiten pro Minute. Als Server wurde ein verwaltetes Gerät mit zwei Sockeln simuliert. Dessen Auslastung wurde für jedes Viertelstundenintervall des Jahres mit einer gleichverteilten Zufallszahl zwischen 0 und 1 angesetzt. Im Gebäude gibt es einen fix aufgestellten LCD-Beamer, der außerhalb der Nutzungszeiten mit dem Stromnetz verbunden ist, also eine Leistungsaufnahme im Standby-Modus aufweist. Der Beamer wird während 10 % der Anwesenheitszeit im Gebäude genutzt. Die Zeiten der Nutzung werden wieder über gleichverteilte Zufallszahlen ermittelt.

Jede Teeküche ist mit einem Mikrowellenherd, einem Elektroherd, einer Kaffeemaschine, einem Kühlschrank und einem Geschirrspüler ausgestattet. Jeder Mikrowellenherd hat einen Jahresverbrauch von 109 kWh/a. Es wird hier der Standardlastgang (vgl. Kapitel 2.1.9) verwendet. Die Elektroherde werden mit einer elektrischen Anschlussleistung von 11 kW und fünf Stromabnehmern (vier Kochplatten und das Backrohr) simuliert. Es handelt sich um Herde der Effizienzklasse A mit einem Volumen zwischen 35 und 65 l. Die Vorgaben der Kaffeemaschine, insbesondere die Nutzungszeiten, entsprechen jenen in Kapitel 2.1.11. Die Kühlschränke arbeiten innerhalb der Temperaturgrenzen zwischen 4 und 8°C und wurden mit einer Leistung des Kühlaggregats von 100 W bei einer Leistungszahl von 1,5 modelliert. Als Umgebungstemperatur wurden vorerst konstant 20°C angenommen. Wie in Tabelle 3.2 gezeigt, ist hier jedoch eine Wechselwirkung mit der Umgebungstemperatur gegeben. Beim Zusammenfügen der Lastgänge wird dies berücksichtigt und der Lastgang für die Kühlschränke wird mit den jeweiligen Umgebungstemperaturen erneut berechnet. Da alle anderen Werte wie in Kapitel 2.1.12 beibehalten wurden, wurde für jeden Kühlschrank eine andere Starttemperatur (4, 6, und 8°C) gewählt, damit nicht alle drei Lastgänge deckungsgleich verlaufen. Jeder Geschirrspüler wird bei Dienstschluss in Betrieb genommen und führt das Waschprogramm zwischen 16:30 und 18:00 durch. Außerhalb dieser Zeit erfolgt die Leistungsaufnahme im Standby-Betrieb. Pro Teeküche gibt es noch einen Wasserkocher. Deren Inbetriebnahme erfolgt zufällig je einmal während der ersten Anwesenheitsstunde des Tages und einmal in der Mittagszeit (zwischen 11:30 und 13:00). Dabei wird jeweils ein Liter Wasser von 15°C auf 100°C erhitzt. Die Verteilung der Zufallszeiten erfolgt hier wieder mittels gleichverteilter Zufallszahlen, die mit dem Tabellenkalkulationsprogramm generiert wurden. Es ergibt sich dabei ein Jahresverbrauch für die Infrastruktur von 18.145 kWh/a. Zieht man die Börsenpreise als Kosten heran, so ergeben sich Kosten von rund 1.442 Euro. Da es sich bei den Börsenpreisen um Großhandelspreise und auch hier nur um den reinen Arbeitspreis handelt, kann dieser Wert jedoch nur als Vergleichswert für Lastoptimierungen herangezogen werden. Eine Aussage über die tatsächlichen Stromkosten des Bürogebäudes lässt sich anhand dieses Wertes – wie bei allen anderen Kostenangaben innerhalb dieser Arbeit - nicht treffen. Es lässt sich allerdings eine Abschätzung treffen, welchen Anteil der Kosten man einsparen kann. Abbildung 3.11 zeigt die Aufteilung des Jahresverbrauchs von 18.145 kWh/a auf die einzelnen Verbraucher bzw. Verbraucherguppen.

Es ist zu erkennen, dass die EDV (PCs, Telefone, Bildschirme, Bildgebende Geräte, Server und Beamer) den weitaus größten Anteil am Stromverbrauch der Infrastruktur aufweist. Die Küchengeräte machen hingegen nur etwa 15 % des Verbrauchs aus.

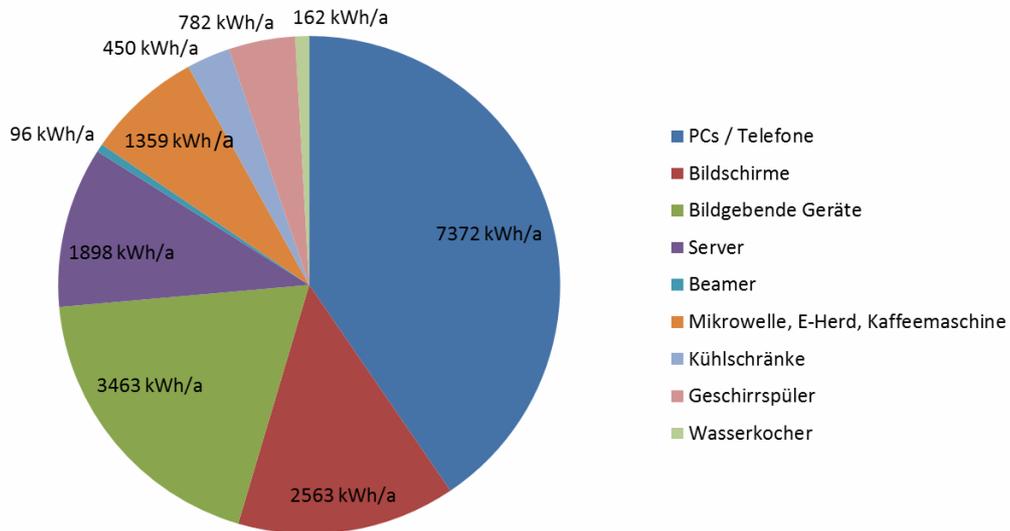


Abbildung 3.11: Aufteilung Jahresverbrauch Infrastruktur Variante A

Abbildung 3.12 zeigt sowohl den Anteil der Verbraucher am Jahresstromverbrauch als auch an den Stromkosten des Jahres.

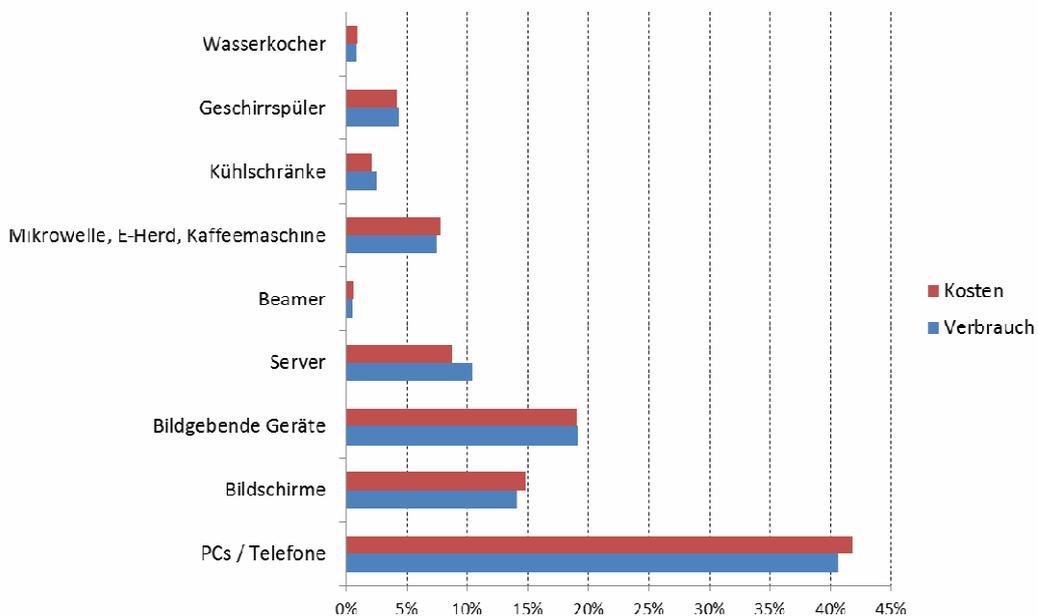


Abbildung 3.12: Vergleich Verbrauch – Kosten Infrastruktur Variante A (Daten aus EXAA, 2011)

Man sieht, dass bei einigen Verbrauchern das Verhältnis zwischen dem Anteil am Verbrauch und an den Kosten unterschiedlich ist. Während der Verbrauch einiger Geräte zu erheblichen Teilen während Zeiten niedriger Stromtarife (meist nachts) anfällt, sind andere Geräte nur während der Nutzungszeit des Gebäudes in Betrieb und

außerhalb dieser Zeit fällt maximal Standby-Verbrauch an. So kühlt der Kühlschrank beispielsweise rund um die Uhr und auch der Server arbeitet unabhängig von der Tageszeit. Die restlichen Geräte der EDV sowie die Küchengeräte sind jedoch nur während der Nutzungszeit oder kurz danach (Geschirrspüler) im Einsatz. Außerhalb dieser Zeiten befinden sich diese Geräte im Standby-Betrieb.

Beleuchtung

Bei der Beleuchtung wurden verschiedene Varianten für 30, 60 und 90 % Fensterflächenanteil simuliert. Zudem wurden die Varianten für verbaute sowie frei stehende Gebäude modelliert. Es ergeben sich somit sechs verschiedene Varianten. Diese Varianten wurden für eine gleichbleibende elektrische Bewertungsleistung simuliert. Bei Büros wurden hier 15 W/m^2 , bei der Küche 10 W/m^2 und bei Verkehrsflächen (Gänge und Stiegenhaus) $4,5 \text{ W/m}^2$ angesetzt. Die niedrigeren Werte bei der Küche und den Verkehrsflächen wurden aufgrund der hier niedrigeren erforderlichen Beleuchtungsstärken (vgl. Tabelle 2.32) gewählt. Es wurde eine manuelle Steuerung (ohne Präsenzmelder) vorausgesetzt. Dabei ergibt sich der Jahresverbrauch für die Beleuchtung gemäß Abbildung 3.13.

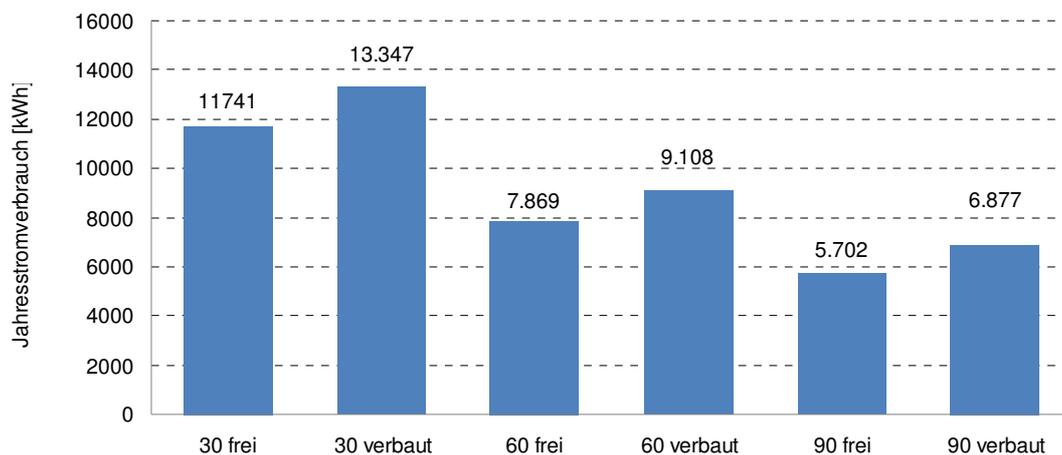


Abbildung 3.13: Jahresverbrauch Beleuchtung nach Fensterflächenanteil und Aufstellungsart Variante A (Daten aus Inschlag, 2011)

Es ist einerseits zu erkennen, dass der Stromverbrauch bei steigendem Fensterflächenanteil sinkt. Andererseits ist auch zu erkennen, dass beim verbauten Gebäude ein höherer Verbrauch vorhanden ist als bei der frei stehenden Variante. Beim frei stehenden Gebäude sind auch die Jalousien der beiden unteren Etagen zeitweise geschlossen, während dies beim verbauten Gebäude nur für die oberste Etage zutrifft. Dadurch lässt sich die Aussage treffen, dass unter diesen Vorgaben die teilweise Schließung der Jalousien zu niedrigerem Energiebedarf bei der Beleuchtung führt als die Vermeidung der Schließung durch Wahl des Standorts in einem verbauten Gebiet.

Abbildung 3.14 vergleicht den Jahresstromverbrauch der einzelnen Varianten mit den Jahresstromkosten. Die jeweiligen Höchstwerte wurden dabei als 100 % gewertet, die restlichen Varianten beziehen sich auf diese Höchstwerte. Sowohl bei den Kosten als auch beim Verbrauch entsteht der Höchstwert bei dem verbauten Gebäude mit 30 % Fensterflächenanteil.

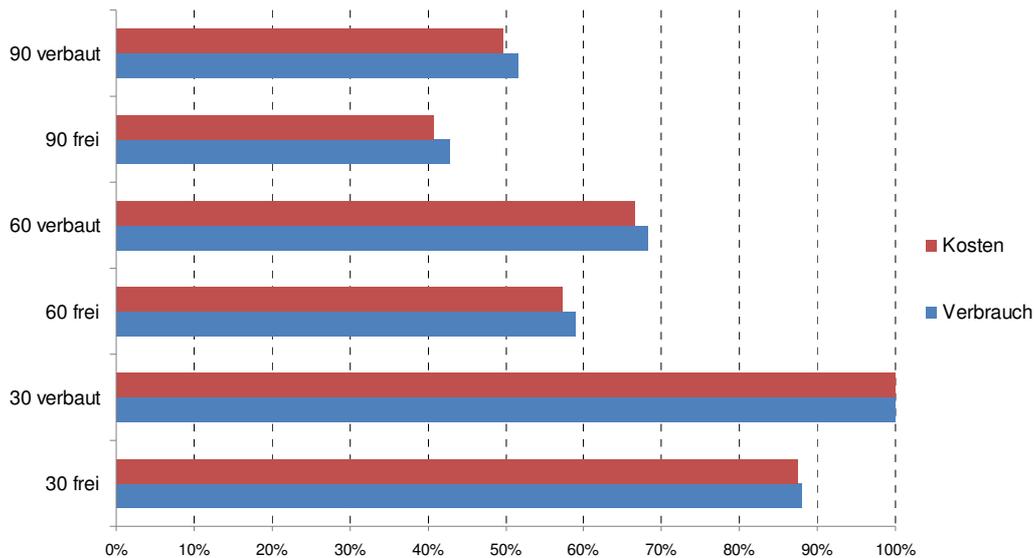


Abbildung 3.14: Vergleich Verbrauch – Kosten Beleuchtung Variante A (Daten aus EXAA, 2011 und Inschlag, 2011)

Neben der Tatsache, dass mit steigendem Verglasungsanteil sowohl der Stromverbrauch als auch die Stromkosten für die Beleuchtung sinken, fällt auf, dass die Stromkosten bei den verwendeten Daten in höherem Ausmaß sinken, als der Verbrauch.

Tabelle 3.3 gibt eine Übersicht über den absoluten Stromverbrauch sowie die Stromkosten der einzelnen Varianten.

Tabelle 3.3: Stromverbrauch und Stromkosten Beleuchtung Variante A (Daten aus EXAA, 2011 und Inschlag, 2011)

Varianten [Fenster % / Verbauung]	Stromverbrauch [kWh/a]	Stromkosten [Euro/a]
30 / frei	11.741	965
30 / verbaut	13.347	1.104
60 / frei	7.869	631
60 / verbaut	9.108	736
90 / frei	5.702	449
90 / verbaut	6.877	547

Peripherie

Als Wärmeerzeuger wurde ein zentrales Gerät gewählt, das keine elektrische Energie benötigt. Somit spielt dessen Erzeugungslastgang für die Betrachtungen auch nur eine untergeordnete Rolle. Die Verteilung der Wärme erfolgt mit Wasser, in den Lastgangbetrachtungen ist also der elektrische Lastgang der Pumpen zu berücksichtigen. Es wird ein Wärmeabgabesystem mit konstantem Volumenstrom simuliert, die Regelung erfolgt über Temperaturvariation. Dies bedeutet, dass die Heizungswasserpumpe entweder bei Nennlast arbeitet oder still steht. Das Gebäude verfügt lediglich über eine Warmwasserheizung. Eine mechanische Belüftung sowie eine Gebäudekühlung sind nicht vorhanden. Die Warmwassererzeugung erfolgt ebenfalls

über den zentralen Wärmeerzeuger ohne Einsatz elektrischer Energie. Mittels Warmwasserzirkulationspumpe wird das Wasser an den Entnahmestellen auf Temperatur gehalten. Die Geräte der Peripherie werden komplettiert durch die Motoren der elektrischen Jalousie.

Es gibt bei dieser Variante somit folgende elektrische Verbraucher im Bereich der Peripherie:

- Heizungswasserpumpe
- Warmwasserzirkulationspumpe
- Jalousiemotoren

Der thermische Lastgang des Gebäudes wurde mittels TRNSYS simuliert. Bei den Simulationen wurden jeweils wieder ein Gebäude mit 30, 60 und 90 % Fensterflächenanteil modelliert. Zudem wurden die U-Werte der Außenwände mit den Werten 0,15, 0,35 und 0,55 W/m²K angesetzt. Es ergeben sich somit neun verschiedene thermische Lastgänge. Als Temperaturvorgaben wurden für die Büros und die Küche 22°C während der Anwesenheitszeit im Büro und 18°C außerhalb dieser Zeit verwendet. Für das Stiegenhaus und die Gänge gilt eine Vorgabe von 20°C (Anwesenheit) bzw. 18°C (Abwesenheit) (Inschlag, 2011). Der Vollständigkeit halber soll an dieser Stelle erwähnt werden, dass bei den Simulationen in TRNSYS auch gleich der Kühlfall mit simuliert wurde. Das bedeutet, dass in den aus TRNSYS exportierten Datensätzen, die den Untersuchungen zugrunde liegen, im Sommer eine Temperaturabsenkung im Gebäude durch aktive Kühlung vorhanden ist. Dadurch ergibt sich während der Kühlperiode ein anderes Gebäudeverhalten, als wenn nur eine Heizung vorhanden wäre. Da jedoch im Normalfall Heizfall und Kühlfall zeitlich auseinander liegen, werden diese Daten für die Analyse des Heizfalls ohne Berücksichtigung der Kühlung als hinreichend genau erachtet. Die weiteren Eingabeparameter für die Simulation können aus Tabelle 3.1 entnommen werden. Bei diesen Simulationen entsteht für die verschiedenen Varianten ein Heizwärmebedarf gemäß Tabelle 3.4. Ebenso ist in dieser Tabelle der höchste Viertelstundenmittelwert der benötigten Heizleistung der jeweiligen Variante angeführt.

Tabelle 3.4: Heizwärmebedarf (Daten aus Inschlag, 2011)

Varianten [Fenster % / U-Wert W/m ² K]	Heizwärmebedarf [kWh/a]	Maximale Heizleistung [kW]
30 / 0,15	10.534	43,44
30 / 0,35	17.333	49,12
30 / 0,55	24.587	53,23
60 / 0,15	15.872	50,05
60 / 0,35	19.447	52,45
60 / 0,55	21.335	53,59
90 / 0,15	22.351	54,82
90 / 0,35	23.223	55,33
90 / 0,55	24.095	55,83

Mit den Gleichungen 2.51 und 2.52 kann die benötigte Pumpenleistung, die im Falle der Regelung mittels Temperaturvariation im Betrieb konstant ist, ermittelt werden.

Dabei wurde eine maximale Temperaturspreizung zwischen Vorlauf und Rücklauf von 20 K angenommen. Zudem wurde der Wirkungsgrad der Pumpe bei Nennleistung bei 0,2 angesetzt. Der Druckverlust der Heizungsanlage wurde gemäß Tabelle 2.19 mit 0,2 bar geschätzt. Bei der maximalen Heizleistung aus Tabelle 3.4 ergeben sich somit die benötigten Pumpennennleistungen der Heizungswasserpumpen in Tabelle 3.5. Es wurde dabei auf Ganze gerundet und mit den genauen Werten weiter gerechnet.

Tabelle 3.5: Pumpennennleistungen Variante A (Daten aus Inschlag, 2011)

Varianten [Fenster % / U-Wert W/m ² K]	Pumpennennleistung [W]
30 / 0,15	52
30 / 0,35	59
30 / 0,55	64
60 / 0,15	60
60 / 0,35	63
60 / 0,55	64
90 / 0,15	65
90 / 0,35	66
90 / 0,55	67

Somit ist der entsprechende Wert für die Heizungswasserpumpe immer dann anzusetzen, wenn Heizungswärmebedarf im Gebäude vorhanden ist. Führt man diese Betrachtung für alle Varianten durch, so ergibt sich der Strombedarf für Heizungswasserpumpen gemäß Abbildung 3.15.

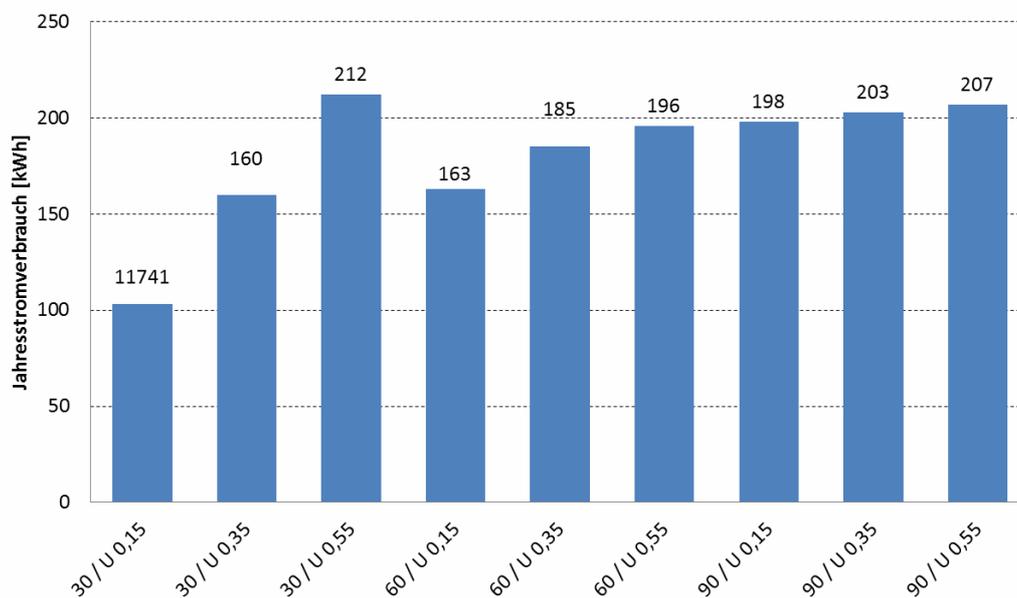


Abbildung 3.15: Jahresverbrauch Heizungswasserpumpe Variante A (Daten aus Inschlag, 2011)

Vergleicht man wieder den Jahresverbrauch und die Jahresstromkosten der jeweiligen Varianten, so ergibt sich die Abbildung 3.16. Auch hier wurde der Höchstwert mit 100 % angesetzt und die restlichen Varianten damit ins Verhältnis gesetzt. Beim Verbrauch ist hier die Variante mit 30 % Fensterflächenanteil und dem U-Wert von

0,55 am höchsten. Die Kosten dieser Variante sind gleich hoch wie die Variante mit 90 % Fensterfläche bei gleichem U-Wert.

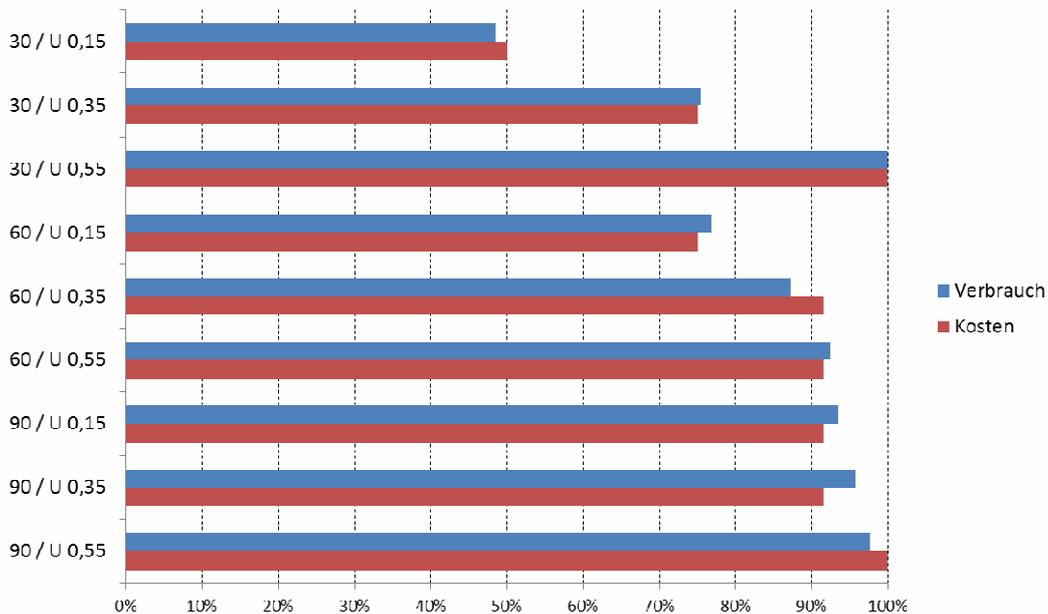


Abbildung 3.16: Vergleich Verbrauch – Kosten Heizungswasserpumpe Variante A (Daten aus EXAA, 2011 und Inschlag, 2011)

Tabelle 3.6 zeigt wieder einen Vergleich der absoluten Werte des Stromverbrauchs und der Stromkosten der einzelnen Varianten.

Tabelle 3.6: Stromverbrauch und Stromkosten Heizungswasserpumpe Variante A (Daten aus EXAA, 2011 und Inschlag, 2011)

Varianten [Fenster % / U-Wert W/m ² K]	Stromverbrauch [kWh/a]	Stromkosten [Euro/a]
30 / U 0,15	103	6
30 / U 0,35	160	9
30 / U 0,55	212	12
60 / U 0,15	163	9
60 / U 0,35	185	11
60 / U 0,55	196	11
90 / U 0,15	198	11
90 / U 0,35	203	11
90 / U 0,55	207	12

Es ist erkennbar, dass die Auswirkungen auf die Kosten aufgrund des niedrigen Jahresverbrauchs gering sind. Jedoch verdoppeln sich zwischen der günstigsten und ungünstigsten Variante die Stromkosten.

Für die Warmwasserleitung ergibt sich gemäß Kapitel 2.3.3 eine Wärmedurchgangszahl von 0,2 W/mK. Bei einer Warmwassertemperatur von 40°C und einer Umgebungstemperatur von 20°C ergibt dies einen Wärmestrom von 4 W/m. Für den benötigten Volumenstrom der Zirkulationsleitung ergibt sich somit nach Gleichung 2.55 ein Wert von $\sim 0,08$ m³/h. Nimmt man an, dass der Druckverlust in der

Warmwasserleitung inklusive der Zirkulationsleitung gleich hoch ist wie im Heizungs-wasserkreislauf (0,2 bar), so ergibt sich bei einem angenommenen Pumpenwirkungs-grad von 0,1 nach Gleichung 2.51 eine Leistungsaufnahme von 4,57 W. Im Jahr entsteht dabei ein Strombedarf von ~ 40 kWh/a. Die virtuellen Stromkosten anhand der Börsenpreise betragen $\sim 2,65$ Euro/a.

Für den Verbrauch und den Lastgang der Jalousiemotoren können verschiedene Varianten analog zu denen der Beleuchtung modelliert werden. Während der Unterschied zwischen verbautem und unverbautem Gebäude darin liegt, dass einmal nur die Jalousien der oberen Etage, beim anderen mal die aller drei Etagen bewegt werden, hängt die Dauer und die Leistungsaufnahme, die für die Bewegung not-wendig ist, von der Fensterfläche ab (vgl. Kapitel 2.3.9). Es ergeben sich die Stromverbräuche und Stromkosten gemäß Tabelle 3.7. Die Werte wurden wieder ge-rundet.

Tabelle 3.7: Stromverbrauch und Stromkosten Jalousie (Daten aus EXAA, 2011 und Inschlag, 2011)

Varianten [Fenster % / Verbauung]	Stromverbrauch [kWh/a]	Stromkosten [Euro/a]
30 / frei	3	0,25
30 / verbaut	1	0,08
60 / frei	13	0,99
60 / verbaut	4	0,33
90 / frei	28	2,22
90 / verbaut	9	0,74

Für den Gesamtverbrauch sowie die Kosten der Peripherie gibt es somit verschiedene Varianten, die sowohl vom Fensterflächenanteil und der Verbauung, als auch von der Wärmedämmung abhängen. Tabelle 3.8 zeigt den Verbrauch sowie die virtuellen Kosten der Peripherie bei den verschiedenen möglichen Varianten. Darin enthalten sind die Heizungswasserpumpe, die Warmwasserzirkulationspumpe und die Jalousie.

Tabelle 3.8: Stromverbrauch und Stromkosten Peripherie Variante A (Daten aus EXAA, 2011 und Inschlag, 2011)

Varianten [Fenster % / Verbauung]	U 0,15		U 0,35		U 0,55	
	Verbrauch [kWh/a]	Kosten [Euro/a]	Verbrauch [kWh/a]	Kosten [Euro/a]	Verbrauch [kWh/a]	Kosten [Euro/a]
30 / frei	146	9,25	203	12,25	255	15,25
30 / verbaut	144	9,08	201	12,08	253	15,08
60 / frei	216	12,99	238	14,99	249	14,99
60 / verbaut	207	12,33	229	14,33	240	14,33
90 / frei	266	16,22	271	16,22	275	17,22
90 / verbaut	247	14,74	256	14,74	256	15,74

Es wurden somit alle elektrischen Verbraucher dieser Variante betrachtet. Es bleibt aber noch die Aktualisierung des Kühlschranks mit den tatsächlichen Raumtemper-aturen aus der TRNSYS-Simulation. Da in dieser Simulation jedoch auch eine Kühlung

im Sommer vorhanden ist, die bei dieser Lastgangvariante nicht berücksichtigt wurde, wird die Umgebungstemperatur im Sommer (Mai bis September) geschätzt. Es wird hierfür vereinfachend angenommen, dass die Umgebungstemperatur in der Zeit zwischen 09:00 und 20:00 26°C beträgt, außerhalb dieser Zeit werden die 20°C beibehalten. Da die Temperaturvorgaben in den einzelnen Varianten der Verglasung und Wärmedämmung gleich sind, ist auch anzunehmen, dass der Wärmeverlauf im Gebäude sehr ähnlich ist. Deswegen wird der Verlauf der Variante mit 60 % Fensteranteil und einem U-Wert von 0,35 W/m²K in den Monaten von Oktober bis März verwendet. Dies stellt sowohl beim Fensteranteil als auch der Wärmedämmung den mittleren Wert der simulierten Varianten dar. Durch diese Aktualisierung erhöht sich der Strombedarf der drei Kühlschränke von 450 auf 512 kWh/a. Die virtuellen Stromkosten steigen von 30,01 auf 35,14 Euro/a. Der durchschnittliche Strompreis des Stroms, den der Kühlschrank benötigt, steigt von 6,67 auf 6,83 ct/kWh. Dies lässt sich dadurch begründen, dass tagsüber, wenn die Strompreise im Schnitt höher sind als nachts, durch die höheren Umgebungstemperaturen auch höhere thermische Verluste entstehen. Der Stromverbrauch für die Infrastruktur beträgt somit insgesamt 18.207 kWh/a bei virtuellen Gesamtkosten von 1.447 Euro/a. Im Durchschnitt kostet eine Kilowattstunde Strom für die Infrastruktur somit 7,95 ct/kWh.

Fasst man den gesamten Stromverbrauch der Variante A zusammen, so ergibt sich der Jahresverbrauch und die virtuellen Stromkosten gemäß Tabelle 3.9. Es sind dabei wieder alle möglichen Konstellationen aus Wärmedämmung, Verbauung und Fensterflächenanteil dargestellt.

Tabelle 3.9: Stromverbrauch und Stromkosten Variante A (Daten aus EXAA, 2011)

Varianten [Fenster % / Verbauung]	U 0,15		U 0,35		U 0,55	
	Verbrauch [kWh/a]	Kosten [Euro/a]	Verbrauch [kWh/a]	Kosten [Euro/a]	Verbrauch [kWh/a]	Kosten [Euro/a]
30 / frei	30.094	2.421	30.151	2.424	30.203	2.427
30 / verbaut	31.698	2.560	31.755	2.563	31.807	2.566
60 / frei	26.292	2.091	26.314	2.093	26.325	2.093
60 / verbaut	27.522	2.195	27.544	2.197	27.555	2.197
90 / frei	24.175	1.912	24.180	1.912	24.184	1.913
90 / verbaut	25.331	2.009	25.340	2.009	25.340	2.010

Es ist zu erkennen, dass die Konstellation mit dem höchsten Stromverbrauch auch jene ist, bei der die Stromkosten am höchsten sind (30 % Fensterflächenanteil, U-Wert 0,55 W/m²K, verbaut). Ebenso fallen der niedrigste Stromverbrauch und die niedrigsten Kosten auf die gleiche Konstellation (90 % Fensterflächenanteil, U-Wert 0,15 W/m²K, frei). Es ist auch ersichtlich, dass der Einfluss der Fensterflächen und der Verbauung weitaus größer ist, als der Einfluss der Wärmedämmung. Der Grund dafür ist, dass die Wärmeerzeugung im Gebäude unabhängig von elektrischem Strom ist. Somit hat der thermische Lastgang lediglich Einfluss auf die Heizungswasserpumpe, die im Vergleich zur Beleuchtung und der bei allen Konstellationen gleich bleibenden Infrastruktur nur einen marginalen Teil des Jahresverbrauchs ausmacht. Dividiert man die Stromkosten durch den Verbrauch, so ergibt sich in jedem der Fälle ein durchschnittlicher Strompreis von 8 ct/kWh +/- 0,1 ct/kWh.

Die maximal gleichzeitig auftretende Last liegt bei allen Konstellationen aus Wärmedämmung, Fensterflächenanteil und Verbauungsart zwischen 21 und 22 kW. Die minimale Last ist überall gleich und beträgt 463 W.

Stellvertretend für alle Konstellationen ist der Lastgang eines Tages in Abbildung 3.17 für ein frei stehendes Gebäude mit 60 % Fensterflächenanteil und einem U-Wert von 0,15 an einem Wintertag dargestellt. Es erfolgte eine Aufteilung in die Kategorien Infrastruktur, Beleuchtung und Peripherie. Zudem ist der Verlauf des Strompreises dargestellt.

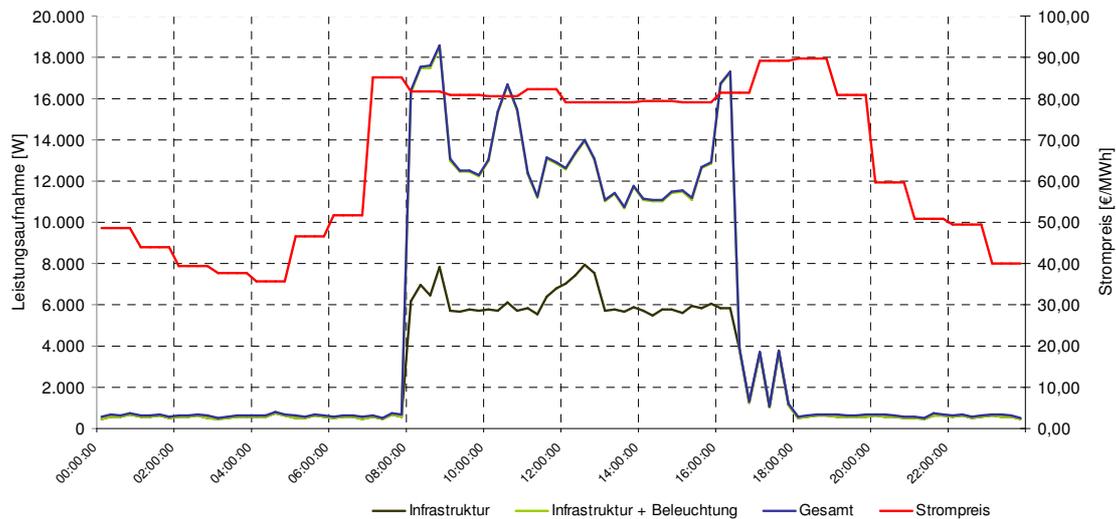


Abbildung 3.17: Lastgang 60 / 0,15 / frei stehend Variante A (Daten aus EXAA, 2011 und Inschlag, 2011)

Es ist zu erkennen, dass die Leistungsaufnahme und die Zeiten hoher Strompreise miteinander korrelieren. Aufgrund der geringen Leistungsaufnahme der Peripherie ist der Unterschied zwischen dem Lastgang mit und ohne Peripherie kaum erkennbar. Bei einem Strompreismodell mit zwei Tarifen (Hochtarif zwischen 6:00 und 22:00) fallen 1.770 kWh/a in die Zeit niedrigen Stromtarifs, während 24.522 kWh/a zu Zeiten des hohen Stromtarifs benötigt werden. Bei einem Gesamtverbrauch von 26.292 kWh/a fallen somit weniger als 7 % in die Zeit mit niedrigem Stromtarif.

3.2.2 Variante B

Infrastruktur

Bei der Variante B werden vorwiegend Geräte mit Lastverschiebungspotential verwendet. Auf jedem Arbeitsplatz wird ein Notebook der Kategorie C verwendet. Dadurch wird der Bildschirm überflüssig und fällt weg. Zudem wird für diese Variante angenommen, dass das Gebäude im Sommer auch gekühlt wird. Deswegen ändert sich wieder der Verlauf der Umgebungstemperatur bei der Modellierung des Lastgangs für den Kühlschrank. Der Verbrauch pro Kühlschrank steigt dadurch nochmals gegenüber der Variante A auf 189 kWh/a. Dies lässt den Schluss zu, dass die Temperaturen im Sommer bei der Variante A zu niedrig gewählt wurden und der Verbrauch der Kühlschränke bei Variante A etwas zu gering ist. Da für den Temperaturverlauf im Sommer ohne Kühlung jedoch keine Simulationswerte vorhanden sind und da der Kühlschrank nur einen sehr geringen Teil des gesamten elektrischen Verbrauchs aus-

macht, wird diese Ungenauigkeit in Kauf genommen. Die restlichen Geräte der Infrastruktur bleiben gleich wie bei der Variante A.

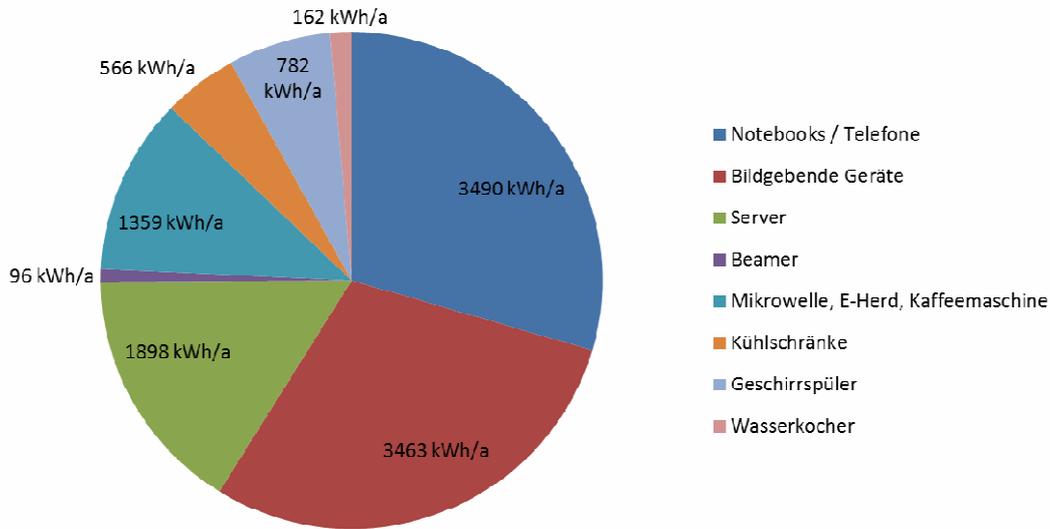


Abbildung 3.18: Aufteilung Jahresverbrauch Infrastruktur Variante B

Der Jahresstromverbrauch ist hier durch die Nutzung von Notebooks anstelle von Desktops und Bildschirmen mit 11.816 kWh/a erheblich niedriger als bei der Variante A (18.207 kWh). Dadurch sinkt der Anteil der EDV am gesamten Stromverbrauch der Infrastruktur auf rund 75 %.

Abbildung 3.12 zeigt den Anteil der Verbraucher am Jahresstromverbrauch sowie an den Stromkosten des Jahres.

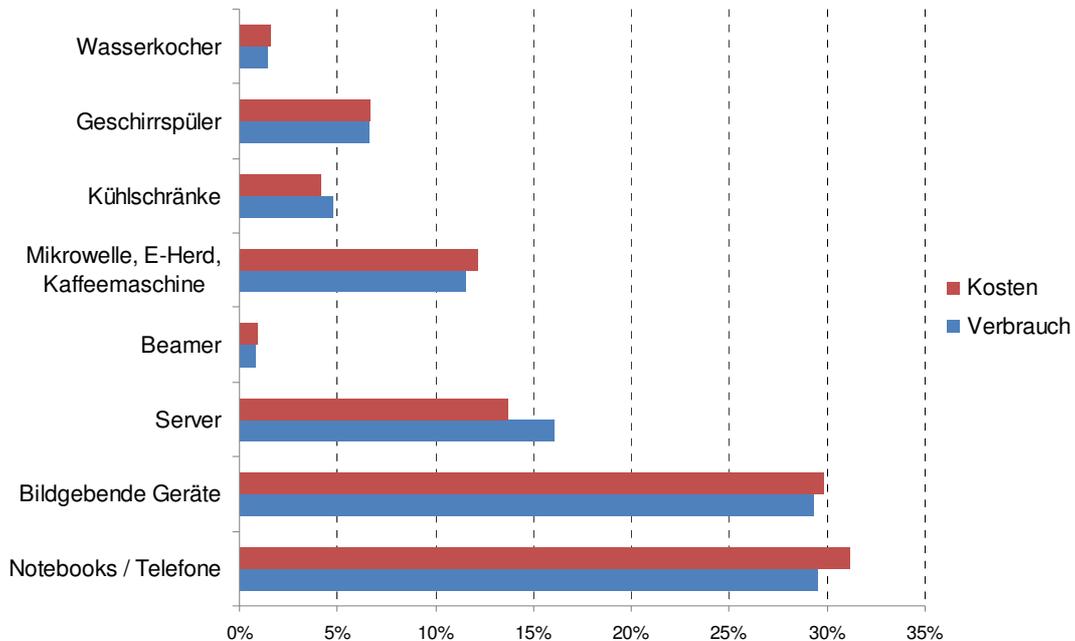


Abbildung 3.19: Vergleich Verbrauch – Kosten Infrastruktur Variante B (Daten aus EXAA, 2011)

Es ist wieder deutlich zu erkennen, dass die Geräte, die nur während der Nutzungszeit des Gebäudes von 08:00 bis 16:30 in Betrieb sind, im Vergleich zum Verbrauch überproportional hohe Stromkosten verursachen. Der gegensätzliche Trend ist bei Geräten, die auch außerhalb dieser Zeiten erhebliche Stromaufnahmen aufweisen, zu beobachten.

Beleuchtung

Die Beleuchtung wird in der Variante B analog zur Variante A je nach Fensterflächenanteil und Verbauungsart mit den gleichen Werten modelliert und bleibt gleich.

Peripherie

Im Bereich der Peripherie wird eine Variante simuliert, deren Abhängigkeit von elektrischer Energie erheblich höher ist als die der Vorvariante. So wird die Heizenergie entweder mit einer elektrischen Widerstandsheizung oder mit einer Wärmepumpe bereitgestellt. Im Sommer wird zudem gekühlt. Die Rückkühlung wird entweder mit einem Verdunstungsrückkühler mit Schalldämpfer in einem geschlossenen Kreislauf oder mit Luft bewerkstelligt. Die Temperatur der Verflüssigung beim Verdunstungskühler wird dabei konstant mit 30°C, bei der Luftrückkühlung mit der Lufttemperatur plus 15 K angenommen (Schramek, 2009h). Die Temperatur der Verdampfung beträgt 1°C, die Vorlauftemperatur des Kühlkreises 6°C. Die Lüftung erfolgt mechanisch mittels Ventilatoren, die Heiz- und Kühlenergie wird getrennt davon mit dem Medium Wasser im Gebäude verteilt. Die Regelung erfolgt hier über die Änderung des Volumenstroms, was wiederum Auswirkungen auf den Lastgang der Heizungs- und Kühlwasserverteilerpumpe hat. Die Warmwasseraufbereitung erfolgt dezentral direkt an den Entnahmestellen. Der Lastgang der Jalousie bleibt gleich wie bei der Variante A.

Die Dimensionierung der Verbraucher der Wärme- und Kältebereitstellung hängt wieder direkt mit dem Gebäudetyp (Wärmedämmung und Fensterflächenanteil) zusammen. Tabelle 3.10 zeigt eine Übersicht über die maximale Wärmeleistung, Kälteleistung und der dazugehörigen Pumpennennleistung für die Verteilpumpe. Für deren Auslegung wurde aufgrund der höheren Effizienz der Wärmepumpe bei niedrigeren Temperaturniveaus eine Temperaturdifferenz von 10 K zwischen Vor- und Rücklauf angesetzt. Im Kühlfall wurde mit einer Temperaturdifferenz von 6 K gerechnet. Für diese Variante wird angenommen, dass die gleiche Pumpe sowohl für die Verteilung der Energie im Heiz- als auch im Kühlfall zuständig ist. Somit kann je nach Variante die Wärme- oder Kühlleistung unter Berücksichtigung der Temperaturspreizung für die Auslegung der Pumpe ausschlaggebend sein. In der Tabelle ist zudem die Leistungsaufnahme der mechanischen Lüftungsanlage für die erforderliche Luftwechselzahl im Gebäude angeführt. Diese ist in allen Fällen gleich. Da die Klimatisierung nicht über die Lüftungsanlage erfolgt, wurden hier die Werte für eine Zu- und Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung verwendet.

Tabelle 3.10: Thermische Nennleistungen (Daten aus Inschlag, 2011)

Varianten [Fenster % / U-Wert W/m ² K]	Maximale Wärmeleistung [kW]	Maximale Kühlleistung [kW]	Pumpennenn- leistung [W]	Ventilatorleistung [W]
30 / 0,15	43,44	28,94	115	616
30 / 0,35	49,12	26,27	117	616
30 / 0,55	53,23	24,07	127	616
60 / 0,15	50,05	50,88	202	616
60 / 0,35	52,45	49,19	196	616
60 / 0,55	53,59	48,35	192	616
90 / 0,15	54,82	69,14	275	616
90 / 0,35	55,33	68,75	273	616
90 / 0,55	55,83	68,36	272	616

Der thermische Lastgang des Gebäudes wurde hier aus denselben Simulationsdaten wie bei Variante A entnommen. Der Unterschied liegt lediglich darin, dass hier auch die simulierte aktive Kühlung im Sommer berücksichtigt wird. Die Solltemperatur wurde dabei an Anwesenheitstagen in allen Räumen zwischen 08:00 und 17:00 auf 26°C, außerhalb dieser Zeiten auf 35°C festgelegt (Inschlag, 2011). Tabelle 3.11 zeigt den gesamten Heizwärmebedarf und Kühlenergiebedarf der verschiedenen Gebäudevarianten.

Tabelle 3.11: Heizwärmebedarf (Daten aus Inschlag, 2011)

Varianten [Fenster % / U-Wert W/m ² K]	Heizwärmebedarf [kWh/a]	Kühlenergiebedarf [kWh/a]
30 / 0,15	10.534	16.525
30 / 0,35	17.333	13.008
30 / 0,55	24.587	10.514
60 / 0,15	15.872	29.489
60 / 0,35	19.447	26.962
60 / 0,55	21.335	25.804
90 / 0,15	22.351	42.163
90 / 0,35	23.223	41.488
90 / 0,55	24.095	40.838

Bei elektrischen Widerstandsheizungen ist dabei der Heizwärmebedarf 1:1 mit dem elektrischen Energiebedarf gleichzusetzen. Hier werden dezentrale Geräte vorausgesetzt, die keine elektrische Energie zur Verteilung der Wärme benötigen.

Um die verschiedenen möglichen Fälle im Bereich der Peripherie zu zeigen, wurde der Lastgang der Jalousie vereinfacht. Da Jalousiemotoren eine sehr geringe Auswirkung auf den elektrischen Lastgang der gesamten Peripherie haben, wurde für die Peripherie der Variante B nur die unverbaute Version betrachtet. Die dabei verwendete Jalousiesteuerung deckt sich auch mit den Simulationen in TRNSYS.

Tabelle 3.12 zeigt den elektrischen Energiebedarf und die virtuellen Stromkosten der verschiedenen simulierten Wärme- und Kälteerzeuger inklusive Hilfsenergiebedarf (Heizungswasserpumpe und Energieaufwand für Rückkühlung) eines Jahres. Die thermische Antriebsenergie für die Absorptionskältemaschinen ist in der Betrachtung nicht enthalten, da vorausgesetzt wird, dass diese nicht elektrisch bereitgestellt wird. Ebenso dargestellt werden der Verbrauch und die Kosten für die Verteilpumpen. Bei der Spalte „Gesamt“ wurden diese Werte mit dem Verbrauch der Lüftung, Jalousie und Verbrauch für Warmwassererzeugung (6.944 kWh/a) addiert. Die Warmwassererzeugung erfolgt dabei analog zu der in Kapitel 2.3.9 gezeigten Vorgehensweise für dezentrale Systeme bei einer Speicheraufladung um 05:00. Es wurden sechs Einheiten (je eine pro Küche und WC) simuliert, die restlichen Vorgaben wurden beibehalten.

Die Konstellation „Wasser“ setzt dabei auf eine Wärmepumpe, die Grundwasser als Wärmequelle nutzt und auf eine Kompressionskältemaschine mit Verdunstungsrückkühler. Kategorie „Luft“ beinhaltet eine Luftwärmepumpe und eine Kältemaschine, die mit Luft rückgekühlt wird. Bei der Variante „Absorption“ wird eine Absorptionsanlage mit einer Leistungszahl von 1,7 (Heizen) und 0,7 (Kühlen) eingesetzt. Die Variante „Elektrisch“ wird eine elektrische Widerstandsheizung eingesetzt. Die Kühlung erfolgt hier durch dezentrale luftgekühlte Geräte, zur Energieverteilung ist keine Pumpe notwendig.

Tabelle 3.12: Jahresstrombedarf und Energiekosten Peripherie Variante B (Daten aus Inschlag, 2011 und EXAA, 2011)

Varianten [Fenster % / U-Wert W/m ² K]		Heizung		Kühlung		Pumpe		Gesamt	
		Verbrauch [kWh/a]	Kosten [Euro/a]	Verbrauch [kWh/a]	Kosten [Euro/a]	Verbrauch [kWh/a]	Kosten [Euro/a]	Verbrauch [kWh/a]	Kosten [Euro/a]
Wasser	30 / 0,15	2.695	173	3.888	362	24	2,09	13.551	1.125
	30 / 0,35	4.465	282	3.066	284	18	1,50	14.493	1.156
	30 / 0,55	6.349	397	2.478	228	16	1,29	15.787	1.215
	60 / 0,15	3.960	240	6.853	629	61	5,33	17.819	1.462
	60 / 0,35	4.906	296	6.278	577	53	4,57	18.181	1.465
	60 / 0,55	5.401	325	6.013	552	49	4,21	18.407	1.469
	90 / 0,15	5.416	312	9.655	876	81	7,00	22.104	1.784
	90 / 0,35	5.641	325	9.498	862	79	6,90	22.171	1.783
	90 / 0,55	5.867	338	9.346	849	78	6,80	22.224	1.782
Luft	30 / 0,15	3.239	207	3.899	363	24	2,09	14.106	1.160
	30 / 0,35	5.302	332	3.075	285	18	1,50	15.339	1.207
	30 / 0,55	7.493	465	2.485	229	16	1,29	16.939	1.283
	60 / 0,15	4.839	290	6.873	631	61	5,33	18.720	1.515
	60 / 0,35	5.964	356	6.296	578	53	4,57	19.260	1.528
	60 / 0,55	6.553	391	6.031	554	49	4,21	19.580	1.537
	90 / 0,15	6.693	383	9.683	879	81	7,00	23.409	1.857
	90 / 0,35	6.965	398	9.526	865	79	6,90	23.522	1.858
	90 / 0,55	7.237	413	9.374	851	78	6,80	23.641	1.860
Absorption	30 / 0,15	108	7	358	34	24	2,09	7.434	631
	30 / 0,35	177	11	280	26	18	1,50	7.419	627
	30 / 0,55	251	16	226	21	16	1,29	7.437	626
	60 / 0,15	168	10	653	60	61	5,33	7.826	664
	60 / 0,35	205	12	599	55	53	4,57	7.801	660
	60 / 0,55	225	13	574	53	49	4,21	7.791	659
	90 / 0,15	239	14	936	85	81	7,00	8.208	695
	90 / 0,35	248	14	921	84	79	6,90	8.201	694
	90 / 0,55	257	15	907	83	78	6,80	8.195	693
Elektrisch	30 / 0,15	10.503	673	3.899	363	0	0	21.346	1.624
	30 / 0,35	17.328	1.093	3.075	285	0	0	27.346	1.966
	30 / 0,55	24.585	1.537	2.485	229	0	0	34.014	2.355
	60 / 0,15	15.452	935	6.873	631	0	0	29.272	2.154
	60 / 0,35	19.116	1.152	6.296	578	0	0	32.360	2.319
	60 / 0,55	21.039	1.265	6.031	554	0	0	34.017	2.408
	90 / 0,15	21.147	1.220	9.683	879	0	0	37.782	2.687
	90 / 0,35	22.025	1.270	9.526	865	0	0	38.503	2.723
	90 / 0,55	22.904	1.320	9.374	851	0	0	39.230	2.760

Abbildung 3.20 zeigt den Gesamtverbrauch und die Kosten der einzelnen Konstellationen nochmals in grafischer Form. Die jeweils höchsten Werte wurden hier wieder als 100 % angesetzt, die anderen Werte beziehen sich darauf.

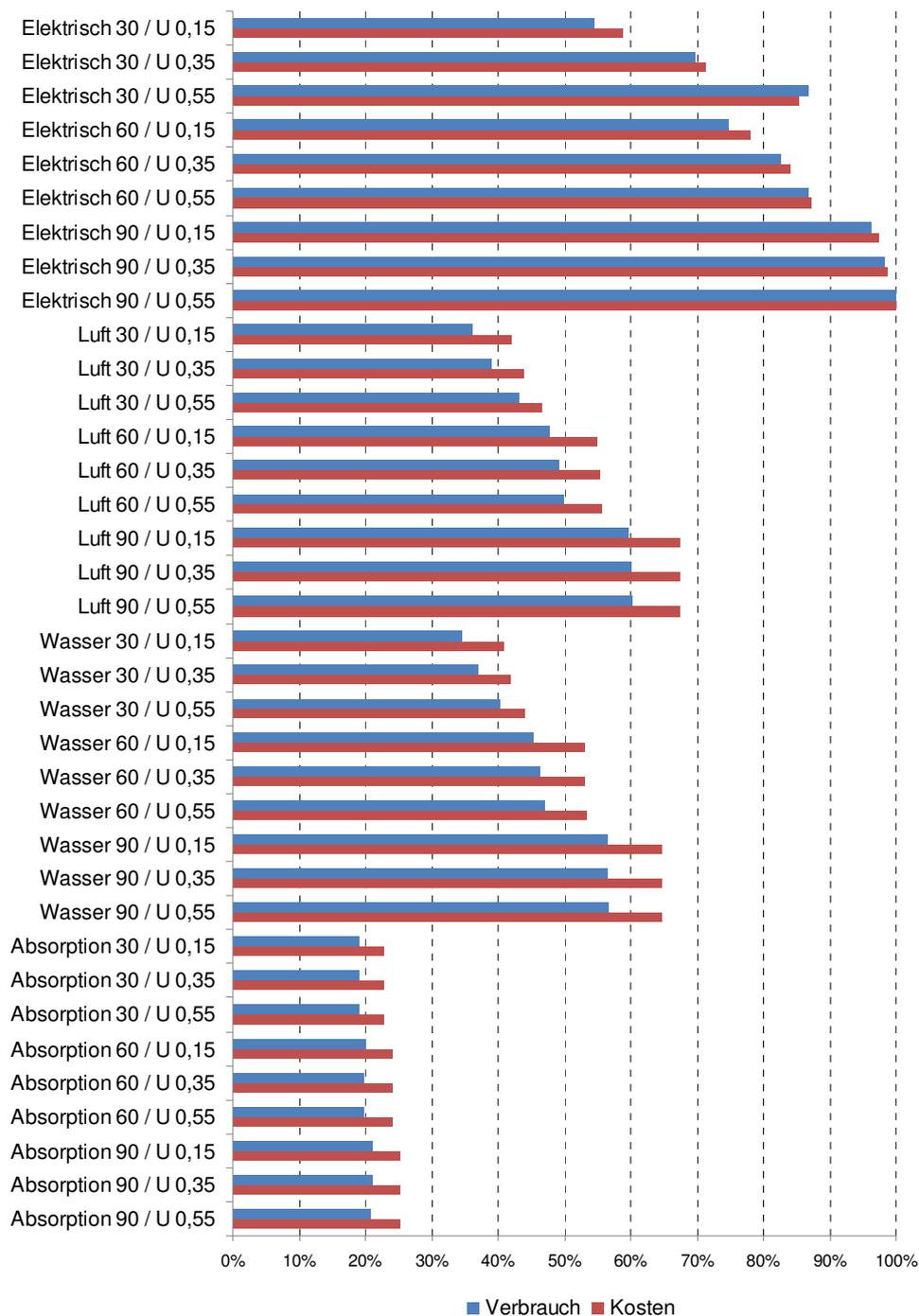


Abbildung 3.20: Vergleich Verbrauch – Kosten Infrastruktur Variante B (Daten aus Inschlag, 2011 und EXAA, 2011)

Da der thermische Lastgang für jede dieser Konstellationen gleich ist, ist bei jeder Kombination aus Wärmedämmung und Fensterflächenanteil die Konstellation „Elektrisch“ gefolgt von „Luft“, „Wasser“ und „Absorption“ die mit dem höchsten Verbrauch und mit den höchsten Kosten. Wird die Wärme mit elektrischer Widerstandsheizung bereitgestellt, so ist der gesamte Wärmebedarf in Form von elektri-

scher Energie bereitzustellen. Aufgrund der unterschiedlichen Temperaturniveaus bei Luft- und Wasserwärmepumpen bzw. -kältemaschinen ergeben sich unterschiedliche Leistungszahlen, die im Schnitt bei den Geräten, die Wasser als Wärmequelle bzw. -senke verwenden, höher sind. Es fällt auf, dass gegenüber dem Lastgang mit den höchsten Kosten und dem höchsten Verbrauch, die Kosten der übrigen Lastgänge nicht in gleichem Ausmaß wie der Verbrauch zurückgehen.

Für die Kombination der verschiedenen Lastgänge aus Infrastruktur, Beleuchtung und Peripherie ist nun eine hohe Anzahl an Möglichkeiten vorhanden. Stellvertretend für alle Lösungen der Peripherie wird hier die Gerätekonstellation „Luft“ dargestellt. Tabelle 3.13 zeigt den dabei während des Jahres entstehenden Stromverbrauch sowie die virtuellen Kosten.

Tabelle 3.13: Stromverbrauch und Stromkosten Variante B „Luft“ (Daten aus EXAA, 2011 und Inschlag, 2011)

Varianten [Fenster % / Verbauung]	U 0,15		U 0,35		U 0,55	
	Verbrauch [kWh/a]	Kosten [Euro/a]	Verbrauch [kWh/a]	Kosten [Euro/a]	Verbrauch [kWh/a]	Kosten [Euro/a]
30 / frei	37.664	3.043	38.896	3.090	40.497	3.166
30 / verbaut	39.269	3.182	40.502	3.229	42.102	3.305
60 / frei	38.405	3.064	38.945	3.077	39.264	3.086
60 / verbaut	39.645	3.169	40.184	3.182	40.504	3.191
90 / frei	40.927	3.224	41.040	3.226	41.159	3.227
90 / verbaut	42.101	3.323	42.215	3.324	42.334	3.326

Auch hier fällt auf, dass Konstellationen mit hohen Kosten auch durchwegs mit hohem Verbrauch übereinstimmen. Der Unterschied ist jedoch sowohl bei den virtuellen Kosten als auch beim Jahresverbrauch eher gering. Grund hierfür sind teilweise gegenläufige Trends. So ist beispielsweise bei größeren Fenstern zwar geringerer Beleuchtungsbedarf, jedoch höherer Kühlbedarf gegeben. Zudem ist bei besserem U-Wert zwar geringerer Heizwärmebedarf, jedoch erhöhter Kühlbedarf vorhanden (vgl. Tabelle 3.11 und

Tabelle 3.12). Tabelle 3.14 zeigt die dabei maximal auftretenden elektrischen Lasten und durchschnittlichen virtuellen Strompreise.

Tabelle 3.14: Maximallast und Durchschnittlicher Strompreis Variante B „Luft“ (Daten aus EXAA, 2011 und Inschlag, 2011)

Varianten [Fenster % / Verbauung]	U 0,15		U 0,35		U 0,55	
	Last [kW]	Preis [ct/kWh]	Last [kW]	Preis [ct/kWh]	Last [kW]	Preis [ct/kWh]
30 / frei	40,24	8,08	42,37	7,94	44,03	7,82
30 / verbaut	40,24	8,10	42,37	7,97	44,03	7,85
60 / frei	43,06	7,98	44,04	7,90	44,50	7,86
60 / verbaut	43,06	7,99	44,04	7,92	44,50	7,88
90 / frei	45,34	7,88	45,56	7,86	45,77	7,84
90 / verbaut	45,34	7,89	45,56	7,87	45,77	7,86

Die maximale Last tritt dabei stets an einem Wintertag am Beginn des Arbeitstages auf. Zu diesem Zeitpunkt ist gleichzeitig die Last der Heizung und Beleuchtung hoch, und Küchengeräte werden benutzt. Die Kühlspitzen im Sommer treten hingegen um die Mittagszeit auf, wo der Strombedarf für die Beleuchtung minimal ist. Es ist zu erkennen, dass die maximale Last mit zunehmendem Fensterflächenanteil steigt. Die Verbauung hat hingegen keinen Einfluss auf die Spitzenlast, jedoch ist bei den verbauten Gebäuden der durchschnittliche Preis pro Kilowattstunde stets geringfügig höher als bei der freistehenden Variante. Zudem steigt die maximale Last auch bei schlechteren U-Werten. Abbildung 3.21 und Abbildung 3.22 zeigen je einen Lastgang für das frei stehende Gebäude mit 60 % Fensterfläche und einen U-Wert von 0,15 W/m²K an einem Sommer- und an einem Wintertag. Zudem ist hier auch der Preis dargestellt. Das Diagramm zeigt zum besseren Verständnis auch exemplarisch die Aufteilung der Lasten in die einzelnen Kategorien Infrastruktur, Beleuchtung und Peripherie in deutlicher Weise. Diese Darstellung ist auch für die anderen Diagramme, bei denen der Lastgang in Kategorien aufgeteilt gezeigt wird, relevant.

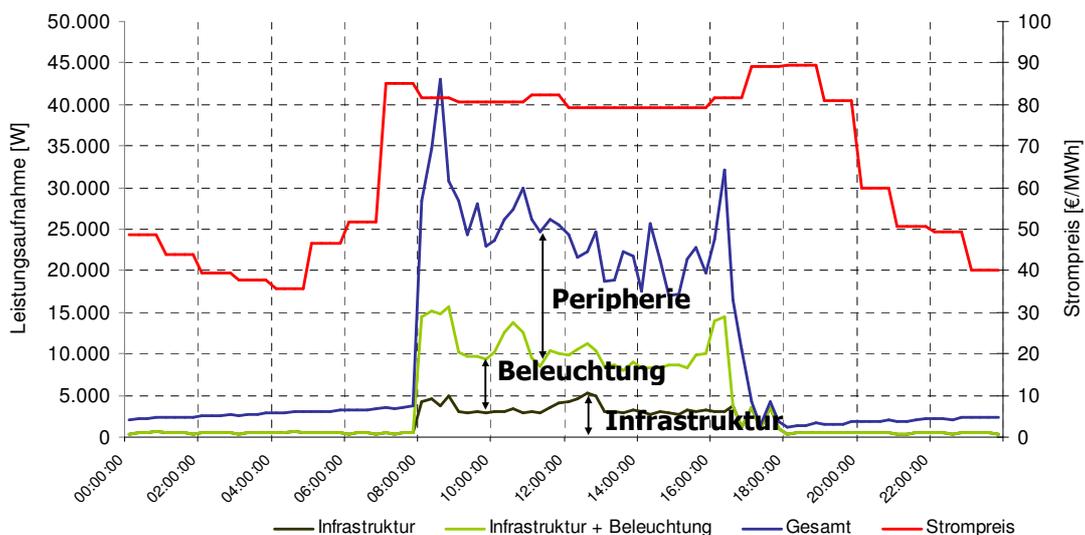


Abbildung 3.21: Lastgang 60 / 0,15 / frei stehend Variante B „Luft“ Winter (Daten aus EXAA, 2011 und Inschlag, 2011)

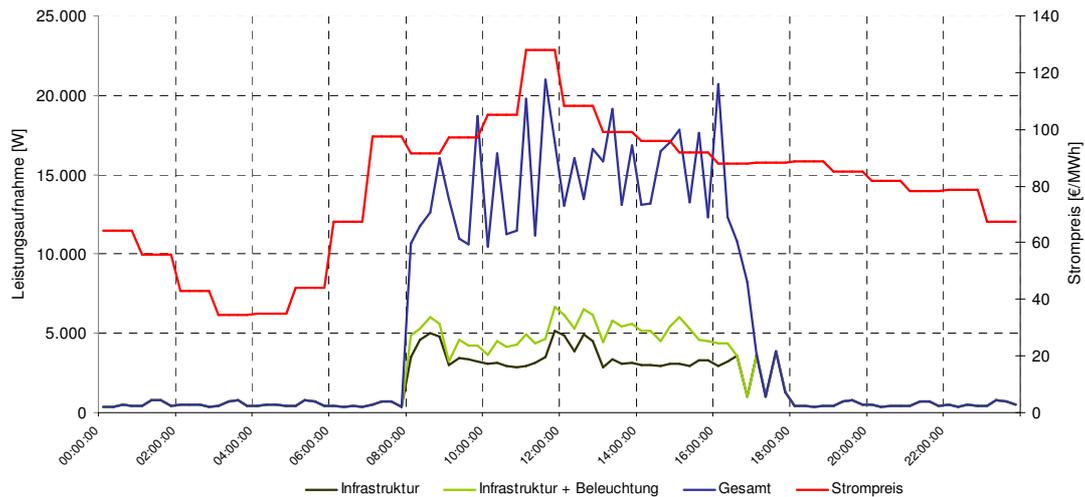


Abbildung 3.22: Lastgang 60 / 0,15 / frei stehend Variante B „Luft“ Sommer (Daten aus EXAA, 2011 und Inschlag, 2011)

Der Lastverlauf der Infrastruktur ist nicht vom Wetter abhängig und deswegen im Winterfall ähnlich wie im Sommerfall. Die Unterschiede entstehen hier nur durch verschiedene Werte im Bereich der zufällig gewählten Abwesenheitszeiten. Bei der Beleuchtung ist eine höhere Leistungsaufnahme im Winter zu sehen. Während hier die höchste Last rund 15 kW zu Beginn und am Ende der Anwesenheitszeit und während des Tages meist um die 10 kW beträgt, ist die elektrische Leistungsaufnahme im Sommerfall geringer. Im Winterfall ist bei der Peripherie morgens aufgrund der Erhöhung der Raumtemperatur von 18°C auf 22°C bzw. 20°C eine hohe Lastspitze vorhanden. Während des Tages erfolgt die Leistungsaufnahme etwa gleichmäßig und am Ende der Anwesenheitszeit ist nochmals eine Lastspitze vorhanden. Die Lastspitzen beim Sommerfall sind über den Tag verteilt. Bei beiden Fällen ist auch hier zu beobachten, dass die Zeiten hoher Lasten mit den Zeiten hoher Strompreise zusammen fallen, wobei die Preisspitze im Sommer zu Mittag liegt, während sie im Winter in den frühen Abendstunden zu finden ist.

Betrachtet man wieder ein System mit einem Hoch- und einem Niedertarif, so werden bei der gezeigten Variante (60 % Fensterflächenanteil, U-Wert 0,15 W/m²K, freie Aufstellung) 94,11 % (36.143 kWh/a) während der Hochtarifzeit und 5,89 % (2.262 kWh/a) während des niedrigen Tarifs bezogen.

3.2.3 Variante C

Variante C deckt sich weitgehend mit Variante B. Es werden lediglich einige Energieeffizienzpotentiale ausgenutzt. Konkret wird eine effizientere Beleuchtung gewählt. Zudem soll ein intelligentes Regelsystem gewährleisten, dass die Gebäudekühlung wenn möglich durch freies Kühlen erfolgt. Alle anderen Rahmenbedingungen bleiben gleich wie bei Variante B.

Beleuchtung

Beim Einsatz effizienter Beleuchtungskörper kann die elektrische Bewertungsleistung der Beleuchtung auf 8 W/m² gesenkt werden (Juwi, 2008). Dieser Wert wird nun für die Büros und die Küche verwendet. Die Verkehrsflächen und die WCs bleiben wie bei den beiden anderen Varianten aufgrund der geringeren notwendigen Beleuch-

tungsstärke bei $4,5 \text{ W/m}^2$. Zudem wird hier eine automatische Präsenzkontrolle angenommen. Somit erhöht sich der Faktor für die Effizienz der Präsenzkontrolle auf 0,95 (vgl. Gleichung 2.47). Abbildung 3.23 zeigt einen Vergleich des Beleuchtungsenergiebedarfs der Varianten A und C.

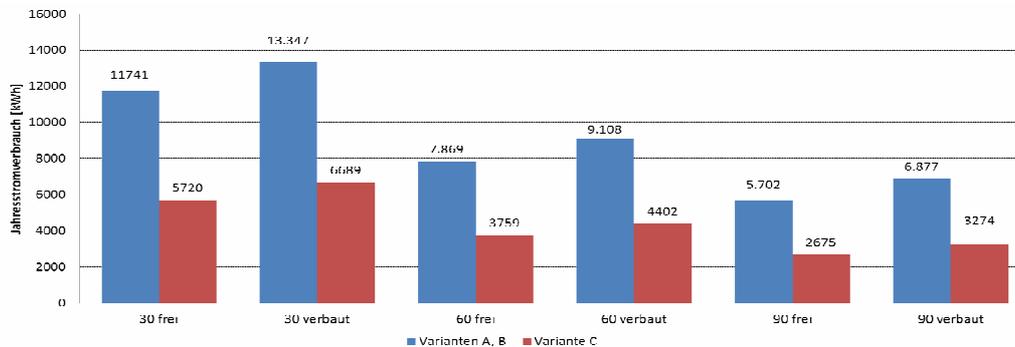


Abbildung 3.23: Jahresverbrauch Beleuchtung nach Fensterflächenanteil und Aufstellungsart Variante A, B und C (Daten aus Inschlag, 2011)

Zudem ist in Abbildung 3.24 wieder ein Vergleich zwischen dem Verbrauch und den Kosten der einzelnen Fensterflächenanteile, der Verbauung und der Varianten A, B und C dargestellt. Der höchste Wert wurde hier wieder mit 100 % angesetzt, alle anderen Werte beziehen sich auf diesen.

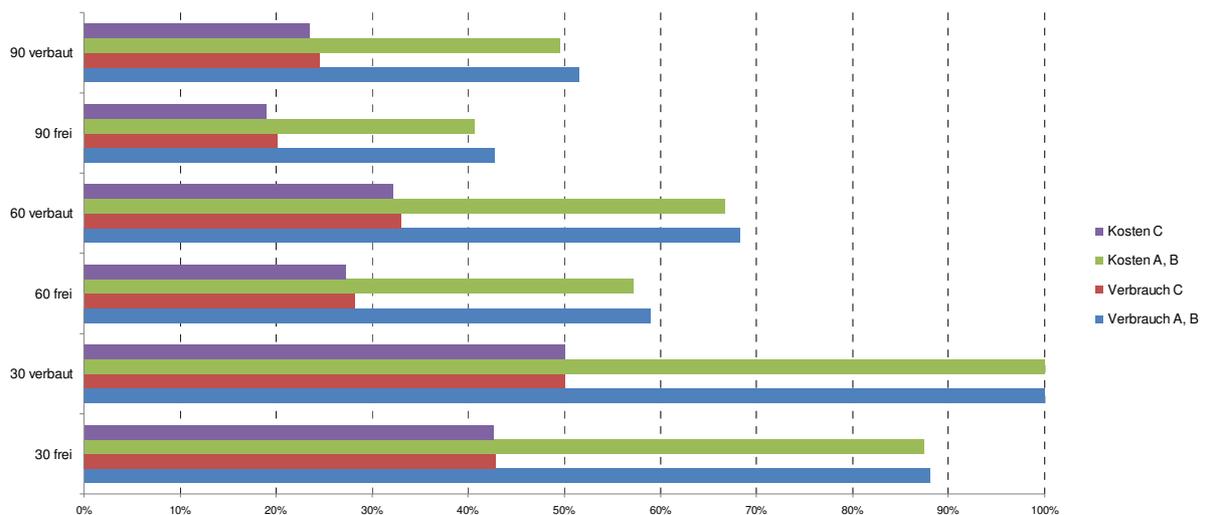


Abbildung 3.24: Vergleich Verbrauch – Kosten Beleuchtung Variante A, B und C (Daten aus EXAA, 2011 und Inschlag, 2011)

Die Kosteneinsparungen, die sich durch diese Effizienzmaßnahme ergeben decken sich in etwa mit der jeweiligen Verbrauchseinsparung. Dies war auch zu erwarten, da die Tageszeit und damit der schwankende Strompreis keine Rolle spielt. Der Verbrauch zur jeweiligen Zeit wurde lediglich geringer, und die Abwesenheitskontrolle in der Nutzungszeit des Gebäudes besser.

Peripherie

Ist ein Kühlbedarf im Gebäude vorhanden, so vergleicht die Gebäuderegulung die Außentemperatur mit der Temperatur im Gebäude. Liegt die Außentemperatur mehr als 1 K unter der Raumtemperatur, so wird nicht über die Kältemaschine sondern

mittels freier Kühlung gekühlt. Es wird hier der Fall simuliert, dass diese Kühlung über die Fenster mit automatischem Öffnungsmechanismus ohne Einsatz von elektrischer Energie bewerkstelligt werden kann. Tabelle 3.15 zeigt den dabei jeweils entstehenden Jahresverbrauch und die Kosten.

Tabelle 3.15: Stromverbrauch und Kosten Kühlung Variante C (Daten aus Inschlag, 2011 und EXAA, 2011)

Varianten [Fenster % / U-Wert W/m ² K]	Luft		Wasser		Absorption	
	Verbrauch [kWh/a]	Kosten [Euro/a]	Verbrauch [kWh/a]	Kosten [Euro/a]	Verbrauch [kWh/a]	Kosten [Euro/a]
30 / 0,15	671	60,07	669	59,90	50	4,48
30 / 0,35	606	54,22	604	54,06	45	4,05
30 / 0,55	548	49,06	547	48,92	41	3,69
60 / 0,15	1.094	97,53	1.091	97,25	85	7,64
60 / 0,35	1.056	94,09	1.053	93,82	82	7,37
60 / 0,55	1.037	92,38	1.034	92,12	80	7,24
90 / 0,15	1.449	129,00	1.445	128,63	114	10,25
90 / 0,35	1.440	128,17	1.436	127,81	113	10,17
90 / 0,55	1.431	127,36	1.427	126,99	113	10,17

Vergleicht man diese Werte mit den Werten aus der Variante B, so ergibt sich durch die freie Kühlung ein erhebliches Einsparungspotential. Betrachtet man wieder die Gerätekonstellation „Luft“ näher, so ergeben sich für den Gesamtverbrauch und die virtuellen Gesamtkosten der Variante C die Werte gemäß Tabelle 3.16.

Tabelle 3.16: Stromverbrauch und Stromkosten Variante C „Luft“ (Daten aus EXAA, 2011 und Inschlag, 2011)

Varianten [Fenster % / Verbauung]	U 0,15		U 0,35		U 0,55	
	Verbrauch [kWh/a]	Kosten [Euro/a]	Verbrauch [kWh/a]	Kosten [Euro/a]	Verbrauch [kWh/a]	Kosten [Euro/a]
30 / frei	28.405	2.244	30.404	2.364	32.539	2.491
30 / verbaut	29.375	2.328	31.374	2.448	33.509	2.575
60 / frei	28.478	2.197	29.564	2.259	30.135	2.292
60 / verbaut	29.121	2.252	30.207	2.314	30.777	2.347
90 / frei	29.614	2.231	29.877	2.245	30.140	2.260
90 / verbaut	30.213	2.281	30.476	2.295	30.739	2.310

Es fällt auf, dass der Verbrauch bei verschiedenen Fensterflächenanteilen ähnlich bleibt. Aufgrund der Ausnutzung der freien Kühlung fällt hier der höhere Bedarf für die Kühlung nicht so stark ins Gewicht als bei der Variante B, während auch hier bei größeren Fensterflächen der Aufwand für die Beleuchtung niedriger wird. Die Kosten nehmen bei höherem Fensterflächenanteil zum Teil sogar ab. Bei schlechterem U-Wert sind der Verbrauch und die Kosten auch hier höher als bei guter Wärmedämmung.

Tabelle 3.17 zeigt die maximale Last und den durchschnittlichen virtuellen Strompreis der einzelnen Gebäudetypen.

Tabelle 3.17: Maximallast und Durchschnittlicher Strompreis Variante C „Luft“ (Daten aus EXAA, 2011 und Inschlag, 2011)

Varianten [Fenster % / Verbauung]	U 0,15		U 0,35		U 0,55	
	Last [kW]	Preis [ct/kWh]	Last [kW]	Preis [ct/kWh]	Last [kW]	Preis [ct/kWh]
30 / frei	34,98	7,90	37,11	7,78	38,78	7,66
30 / verbaut	34,98	7,93	37,11	7,80	38,78	7,68
60 / frei	37,80	7,71	38,78	7,64	39,24	7,61
60 / verbaut	37,80	7,73	38,78	7,66	39,24	7,63
90 / frei	40,09	7,53	40,31	7,51	40,53	7,50
90 / verbaut	40,09	7,55	40,31	7,53	40,53	7,51

Auch hier ist zu beobachten, dass die Verbauung keinen Einfluss auf die maximale Last hat. Ebenso wie bei Variante B steigt die Maximallast bei steigendem Fensterflächenanteil und schlechterem U-Wert. Auch die Tatsache, dass der durchschnittliche Strompreis bei höherem Fensterflächenanteil und schlechterem U-Wert sinkt, ist wie bei Variante B zu beobachten. Generell ist die Maximallast bei Variante C ebenso stets niedriger als bei Variante B. Gleiches gilt für den Strompreis.

Abbildung 3.25 und Abbildung 3.26 zeigen wieder je einen Lastgang für das frei stehende Gebäude mit 60 % Fensterfläche und einem U-Wert von 0,15 W/m²K an einem Sommer- und an einem Wintertag inklusive Preisverlauf. Es handelt sich um dieselben Tage wie bei Variante B, der dargestellte Wintertag ist zudem der selbe Tag, der bei Variante A dargestellt wurde.

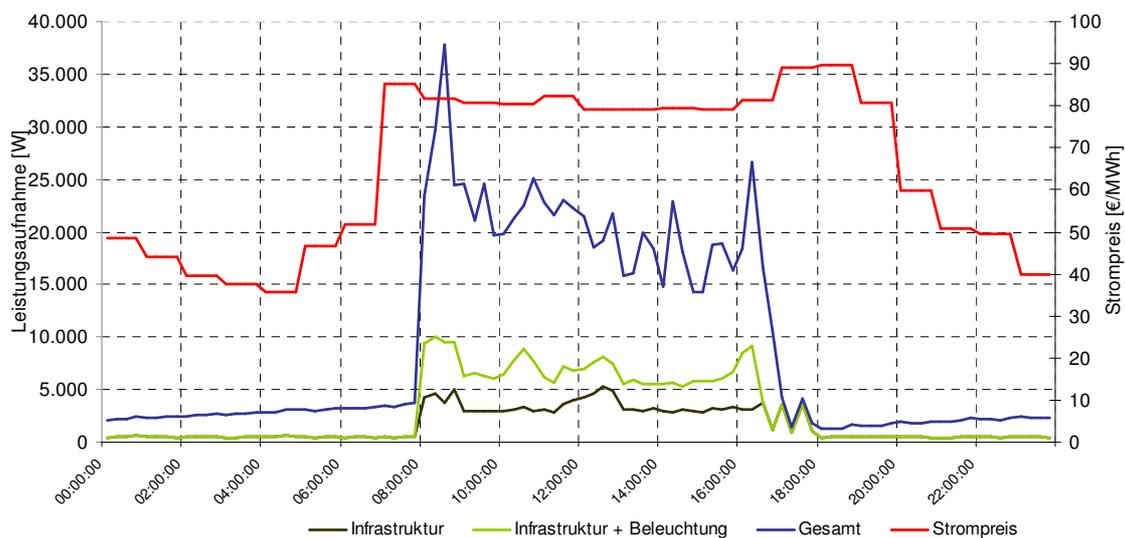


Abbildung 3.25: Lastgang 60 / 0,15 / frei stehend Variante C „Luft“ Winter (Daten aus EXAA, 2011 und Inschlag, 2011)

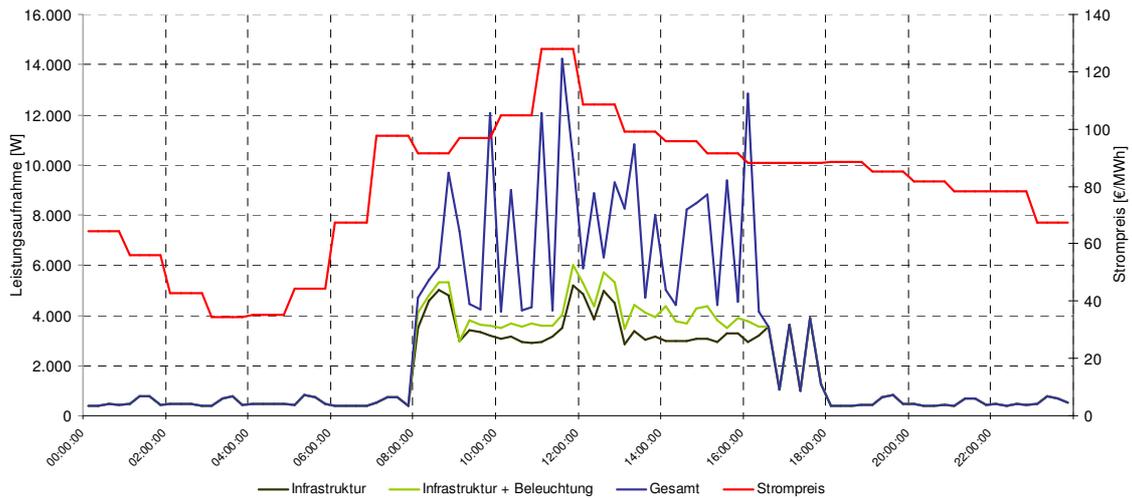


Abbildung 3.26: Lastgang 60 / 0,15 / frei stehend Variante C „Luft“ Sommer (Daten aus EXAA, 2011 und Inschlag, 2011)

Es ist in beiden Fällen ein ähnlicher Verlauf zu beobachten wie bei Variante B. Es sind lediglich niedrige Lasten vorhanden.

Betrachtet die Variante C wieder die Aufteilung in Hoch- und Niedertarifzeit bei 60 % Fensterflächenanteil, einem U-Wert von 0,15 W/m²K und freier Aufstellung, so fallen 1.646 kWh/a (5,78 %) während der Niedertarifzeit an, der Rest - 26.832 kWh/a bzw. 94,22 % - liegt in der Hochtarifzeit. Dies ist ähnlich wie bei Variante B.

In Abbildung 3.27 und Abbildung 3.28 ist ein Vergleich der einzelnen Varianten für einen Winter- bzw. Sommerfall zu sehen.

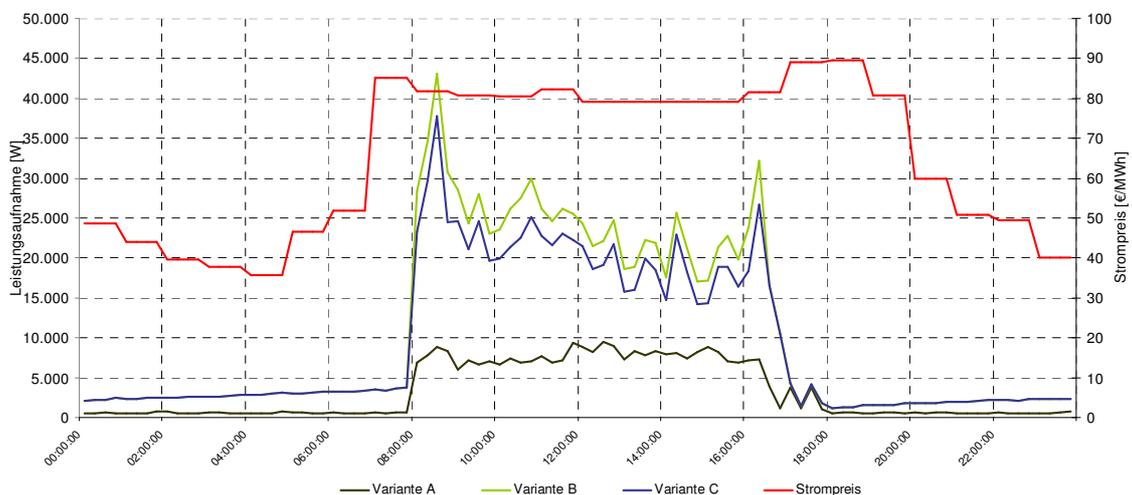


Abbildung 3.27: Vergleich Varianten A, B und C Winter (Daten aus EXAA, 2011 und Inschlag, 2011)

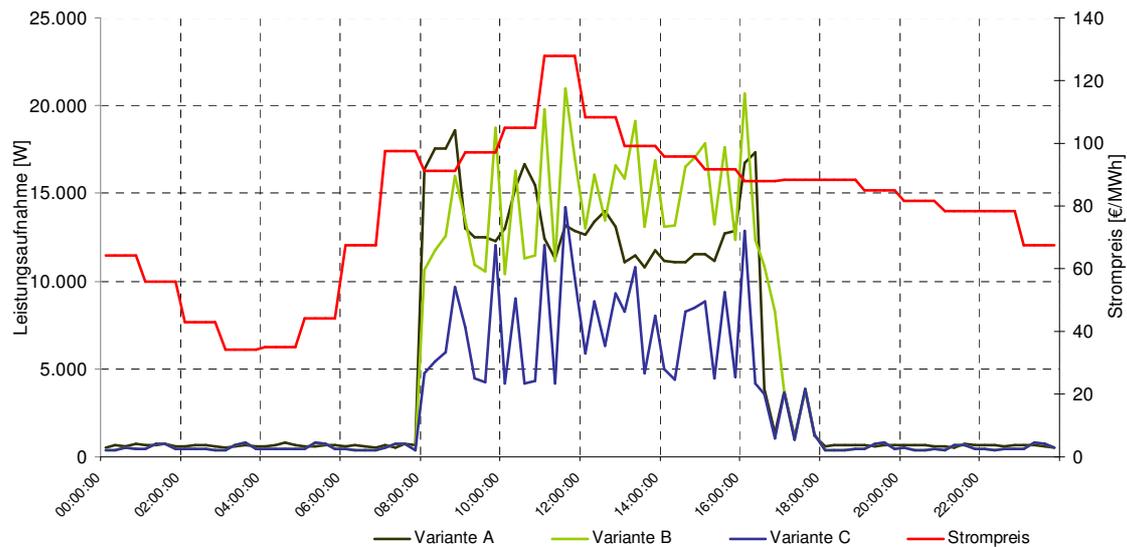


Abbildung 3.28: Vergleich Varianten A, B und C Sommer (Daten aus EXAA, 2011 und Inschlag, 2011)

Während im Winter die Varianten B und C aufgrund der Abhängigkeit der Heizung von elektrischer Energie stets eine höhere Leistungsaufnahme aufweisen als die Variante A, ist dies im Sommer nicht der Fall. Hier überlagert der höhere Verbrauch der EDV oftmals die für die Kühlung notwendige Energie. Im Sommer ist zudem ein hoher Unterschied zwischen den Leistungsaufnahmen der Variante B und C zu sehen. Der Unterschied im Winter fällt hingegen geringer aus.

3.3 Potential Lastmanagement

3.3.1 Variante A

Anhand der in Kapitel 2.5 gezeigten Möglichkeiten lassen sich bei der Variante A folgende Verbraucher mit Optimierungspotential identifizieren:

- Kühlschränke
- Geschirrspüler
- Beleuchtung
- Heizungswasserpumpen
- Warmwasserzirkulationspumpen

Infrastruktur

Die Kühlschränke werden wieder mit den Starttemperaturen 4, 6 und 8°C simuliert. Es kommt hier die Optimierungsvariante 2 (vgl. Kapitel 2.5.1) zum Einsatz. Während sich dadurch der Verbrauch von den 512 kWh/a bei der Standardvariante auf 522 kWh/a erhöht, ergibt sich eine geringfügige Einsparung der virtuellen Stromkosten. Diese sinken von 35,14 auf 34,72 Euro/a, der Strompreis von 6,67 auf 6,65 ct/kWh.

Der Geschirrspüler wird bei der Optimierung zum jeweils niedrigsten Strompreis zwischen Ende des jeweiligen Arbeitstags und Beginn des nächsten Arbeitstages gestar-

tet. Der Jahresverbrauch bleibt dabei gleich, die virtuellen Stromkosten sinken durch diese Maßnahme allerdings erheblich von 60,70 auf 28,39 Euro/a. Dies bedeutet eine Senkung des Preises von 7,76 auf 3,63 ct/kWh.

Durch die Optimierung des Kühlschranks und der Geschirrspüler ergibt sich eine neue Verteilung der Kosten und des Verbrauchs der einzelnen Geräte der Infrastruktur. Abbildung 3.29 zeigt diese. Vor allem beim Geschirrspüler zeigt sich, dass sich die Kosten im Vergleich zum Verbrauch erheblich verringert haben.

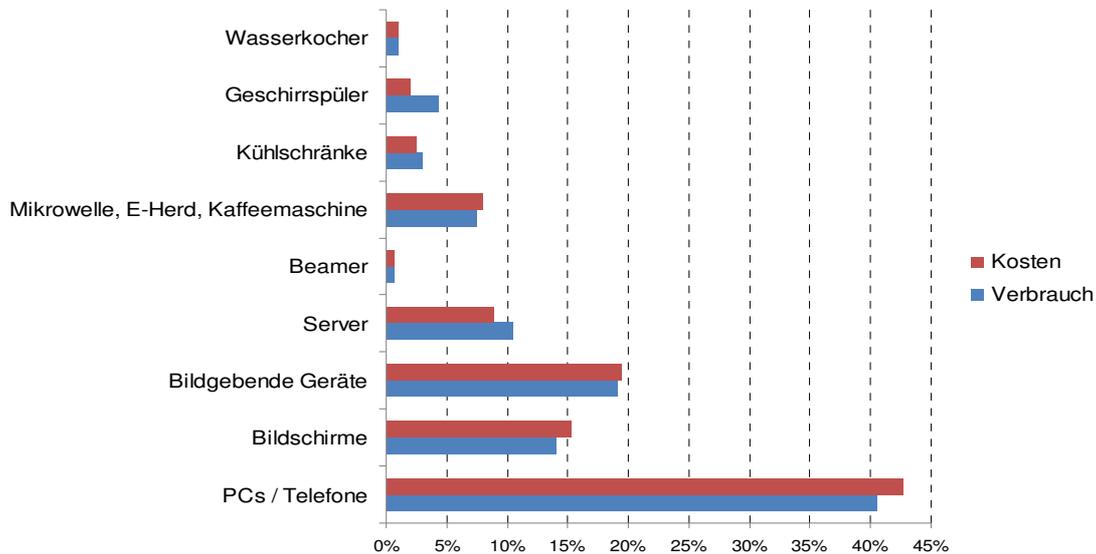


Abbildung 3.29: Vergleich Verbrauch – Kosten Infrastruktur Variante A Optimiert (Daten aus EXAA, 2011)

Für die gesamte Infrastruktur ergibt sich durch diese Maßnahmen ein leicht erhöhter Stromverbrauch von 18.217 kWh/a (nicht optimierte Variante: 18.207 kWh/a). Die Kosten fallen allerdings von 1.447 auf rund 1.414 Euro/a.

Beleuchtung

Die Optimierung der Beleuchtung erfolgt mittels Lichtsensoren, automatischer Präsenzkontrolle und automatischer Dimmung (vgl. Kapitel 2.5.2). Dadurch lassen sich auch ohne Berücksichtigung der Gewinne durch den Wartungsfaktor bereits erhebliche Einsparungen erzielen. Abbildung 3.30 zeigt einen Vergleich des ursprünglichen Jahresverbrauchs der Variante A mit dem Jahresverbrauch bei Optimierung ohne Berücksichtigung des Wartungsfaktors bzw. im jeweiligen Jahr der Wartungsperiode. Es ist jedoch zu beachten, dass ein Teil der Einsparungen bereits durch die automatische Präsenzkontrolle entsteht und somit nicht der automatischen Dimmung zugeschrieben werden kann.

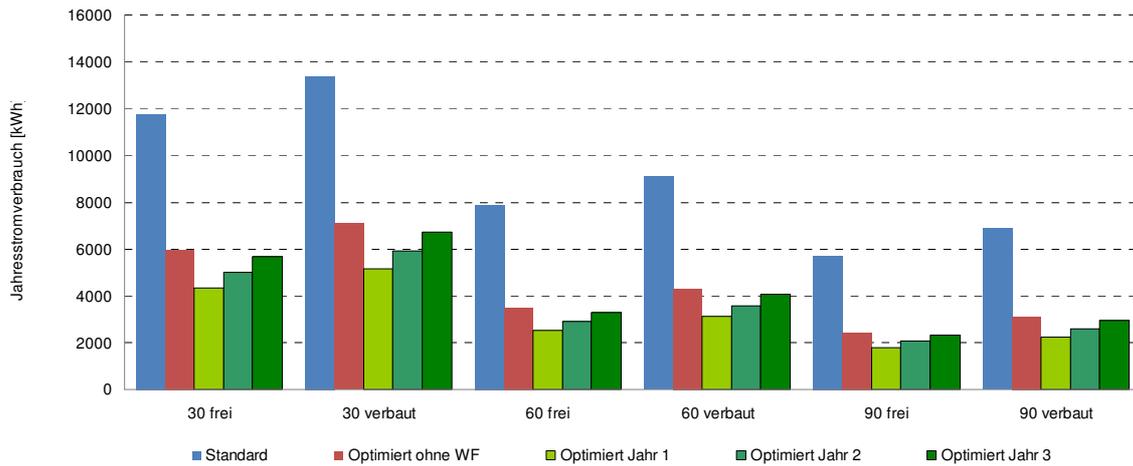


Abbildung 3.30: Jahresverbrauch Beleuchtung nach Fensterflächenanteil und Aufstellungsart Variante A und Variante A optimiert (Daten aus Inschlag, 2011)

Wie in Kapitel 2.5.2 gezeigt, bringt das letzte Jahr des jeweiligen Wartungsintervalls die geringsten Einsparungen. Zur Ermittlung des Kosteneinsparungspotentials wird deshalb, um die Einsparungen vorsichtig anzusetzen, das Jahr drei der jeweiligen Wartungsperiode bei einem Wartungsintervall von drei Jahren herangezogen. Vergleicht man hier Verbrauch und Kosten der optimierten mit der nicht optimierten Variante, so ergibt sich Abbildung 3.31.

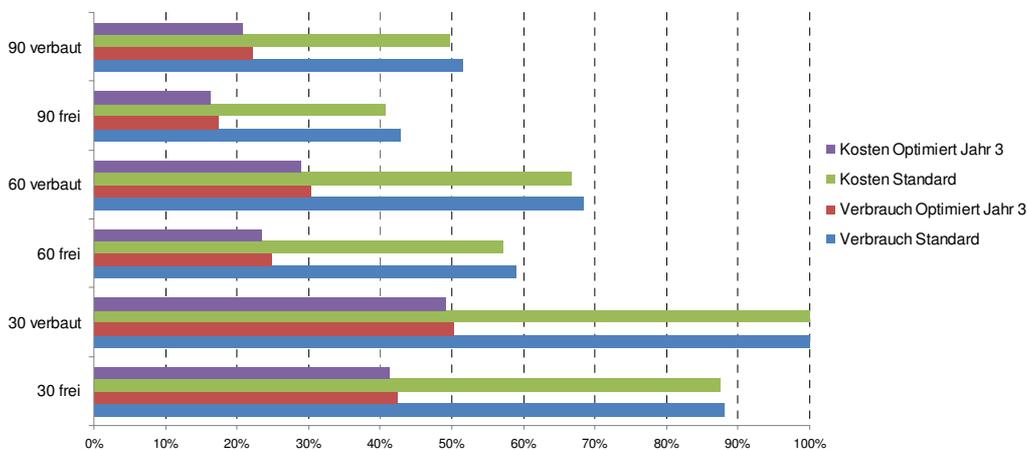


Abbildung 3.31: Jahresverbrauch und Kosten Beleuchtung nach Fensterflächenanteil und Aufstellungsart Variante A und Variante A optimiert (Daten aus Inschlag, 2011)

Es ist zu sehen, dass die Verbrauchs- und die Kosteneinsparungen etwa gleiches Ausmaß haben. Tabelle 3.18 gibt eine Übersicht über den absoluten Stromverbrauch sowie die Stromkosten der einzelnen optimierten Varianten. Es wurde wieder das Jahr drei im Wartungsintervall dargestellt.

Tabelle 3.18: Stromverbrauch und Stromkosten Beleuchtung Variante A optimiert (Daten aus EXAA, 2011 und Inschlag, 2011)

Varianten [Fenster % / Verbauung]	Stromverbrauch [kWh/a]	Stromkosten [Euro/a]
--------------------------------------	------------------------	----------------------

Varianten [Fenster % / Verbauung]	Stromverbrauch [kWh/a]	Stromkosten [Euro/a]
30 / frei	5.660	454
30 / verbaut	6.715	543
60 / frei	3.307	258
60 / verbaut	4.052	319
90 / frei	2.321	178
90 / verbaut	2.942	228

Peripherie

Aufgrund der geringen Auswirkungen des thermischen Lastgangs auf den elektrischen Lastgang (lediglich die Heizwasserpumpe wird hier beeinflusst) erfolgt hier thermische Lastverschiebung. Die einzige Optimierung im Bereich der Peripherie betrifft die Warmwasserzirkulationspumpe. Diese wird bei der optimierten Variante außerhalb der Nutzungszeiten des Gebäudes außer Betrieb genommen. Der Verbrauch der Warmwasserzirkulationspumpe sinkt dadurch auf rund 10 kWh/a bei virtuellen Kosten von unter einem Euro/a.

Tabelle 3.19: Stromverbrauch und Stromkosten Variante A optimiert (Daten aus EXAA, 2011)

Varianten [Fenster % / Verbauung]	U 0,15		U 0,35		U 0,55	
	Verbrauch [kWh/a]	Kosten [Euro/a]	Verbrauch [kWh/a]	Kosten [Euro/a]	Verbrauch [kWh/a]	Kosten [Euro/a]
30 / frei	23.993	1.877	24.080	1.882	24.132	1.885
30 / verbaut	25.046	1.965	25.133	1.970	25.185	1.973
60 / frei	21.710	1.684	21.762	1.688	21.773	1.688
60 / verbaut	22.446	1.744	22.498	1.748	22.509	1.748
90 / frei	20.774	1.608	20.809	1.610	20.813	1.611
90 / verbaut	21.376	1.656	21.415	1.658	21.415	1.659

Wie bei der nicht optimierten Variante ist zu erkennen, dass die Konstellation mit dem höchsten Stromverbrauch auch jene ist, bei der die Stromkosten am höchsten sind (30 % Fensterflächenanteil, U-Wert 0,55 W/m²K, verbaut). Ebenso fallen der niedrigste Stromverbrauch und die niedrigsten Kosten auf die gleiche Konstellation (90 % Fensterflächenanteil, U-Wert 0,15 W/m²K, frei). Der Einfluss der Fensterflächen und der Verbauung ist auch hier weitaus größer, als der Einfluss der Wärmedämmung. Dividiert man die Stromkosten durch den Verbrauch, so ergibt sich in jedem der Fälle ein durchschnittlicher Strompreis von 7,7 bis 7,8 ct/kWh und liegt damit unter dem Preis der nicht optimierten Variante (8 ct/kWh +/- 0,1 ct/kWh).

Die Maximallast bleibt bei der optimierten Variante ebenfalls zwischen 21 und 22 kW. Da die größten Einsparungen der Optimierung bei der Beleuchtung zu finden sind und die Maximallast am Beginn des Arbeitstags entsteht, wo die Beleuchtung aufgrund der niedrigen Tageslichtversorgung noch nicht gedimmt werden kann, bleibt dieser Wert gleich.

Abbildung 3.32 zeigt den Lastgang eines Wintertages für ein frei stehendes Gebäude mit 60 % Fensterflächenanteil und einen U-Wert von 0,15 W/m²K. Abbildung 3.33 zeigt den Vergleich zwischen der Standardvariante und der optimierten Variante A.

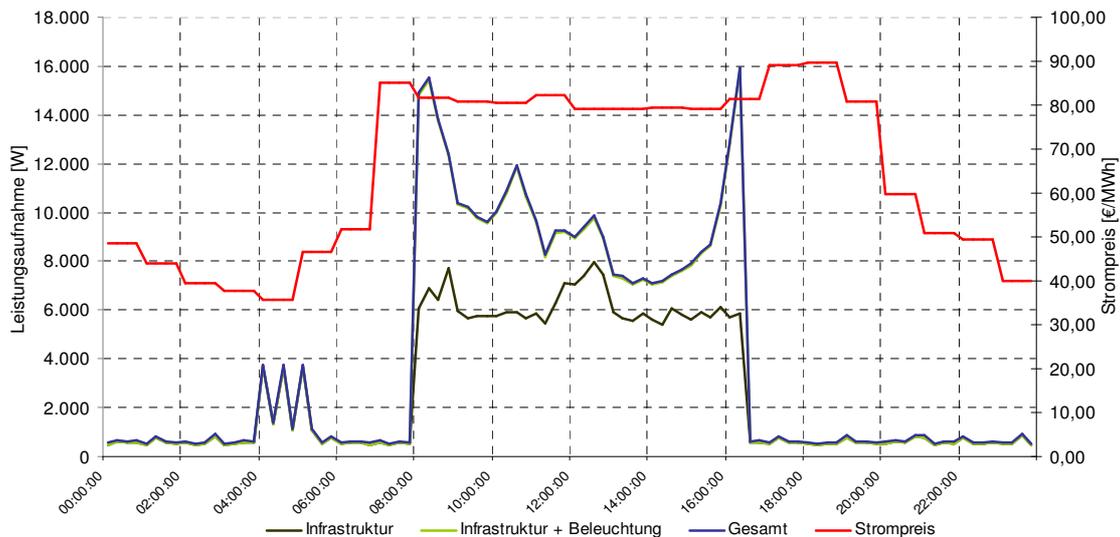


Abbildung 3.32: Lastgang 60 / 0,15 / frei stehend Variante A optimiert (Daten aus EXAA, 2011 und Inschlag, 2011)

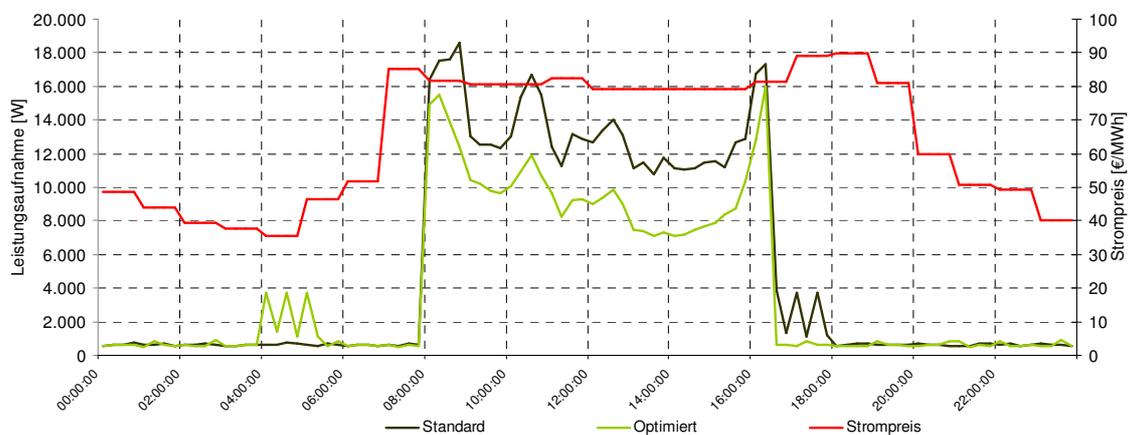


Abbildung 3.33: Vergleich Variante A und Variante A optimiert 60 / 0,15 / frei stehend (Daten aus EXAA, 2011 und Inschlag, 2011)

Die Einsparungsmaßnahmen der Beleuchtung sind hier während der Nutzungszeit klar erkennbar. Es ist auch zu sehen, dass die Lastaufnahme des Geschirrspülers nicht mehr am Abend, sondern in den frühen Morgenstunden erfolgt.

Bei einem Strompreismodell mit zwei Tarifen (Hochtarif zwischen 6:00 und 22:00) fallen 2.378 kWh/a in die Zeit niedrigen Stromtarifs, während 19.332 kWh/a zu Zeiten des hohen Stromtarifs benötigt werden. Bei einem Gesamtverbrauch von

21.710 kWh/a fallen somit fast 11 % in die Zeit mit niedrigem Stromtarif. Bei der Standardvariante waren dies nur 7 %.

3.3.2 Variante B

Infrastruktur

Neben den Optimierungen, die bei der Variante A durchgeführt wurden, kommen bei der Variante B noch die Optimierungsmöglichkeiten durch Ausnutzung der Speicherkapazität der Laptops und die der thermischen Lastverschiebung hinzu. Die Kühlschränke müssen mit den Umgebungstemperaturen der Variante B ebenfalls neu berechnet werden. Der Verbrauch für die Kühlschränke beträgt dabei 577 kWh/a.

Für die Optimierung der Notebooks wird die erweiterte Optimierungsvariante 3 (vgl. Kapitel 2.5.1) verwendet. Es wird angenommen, dass die Steckdosen in der Abwesenheitszeit, wenn kein Strombedarf besteht, spannungsfrei geschaltet werden können und somit keine Leistungsaufnahme erfolgt. Dabei muss auch berücksichtigt werden, dass im Gegensatz zur Darstellung in Kapitel 2.5.1 auch während des Tages Abwesenheitszeiten vorhanden sind, in denen sich der Bildschirm des Notebooks ausschaltet oder das Gerät überhaupt in den Standby-Modus wechselt und dadurch geringerer Leistungsbedarf als im Betrieb auftritt. Da das System jedoch nicht erkennen kann, ob der User den Platz im Laufe des Tages noch verlassen wird und dabei das Notebook eine geringere Leistungsaufnahme aufweist, kalkuliert das System den Restverbrauch des Arbeitstages wie wenn der Nutzer den Rest des Tages am Arbeitsplatz verbringen würde. Durch die Optimierung erhöht sich der Strombedarf für Notebooks inklusive Telefone von 3.490 kWh/a auf 3.706 kWh/a. Ursache dafür ist der Ladewirkungsgrad des Akkus. Die virtuellen Stromkosten sinken hingegen von 286 auf 247 Euro/a. Für die gesamte Infrastruktur ist somit ein Jahresverbrauch von 12.043 kWh/a bei Kosten von 884 Euro/a vorhanden. Abbildung 3.34 zeigt den Vergleich der Kosten und des Verbrauchs der Infrastruktur der optimierten Variante B. Es ist zu sehen, dass bei den Notebooks im Gegensatz zur Standardvariante hier der Anteil der Kosten niedriger ist als der Anteil am Verbrauch.

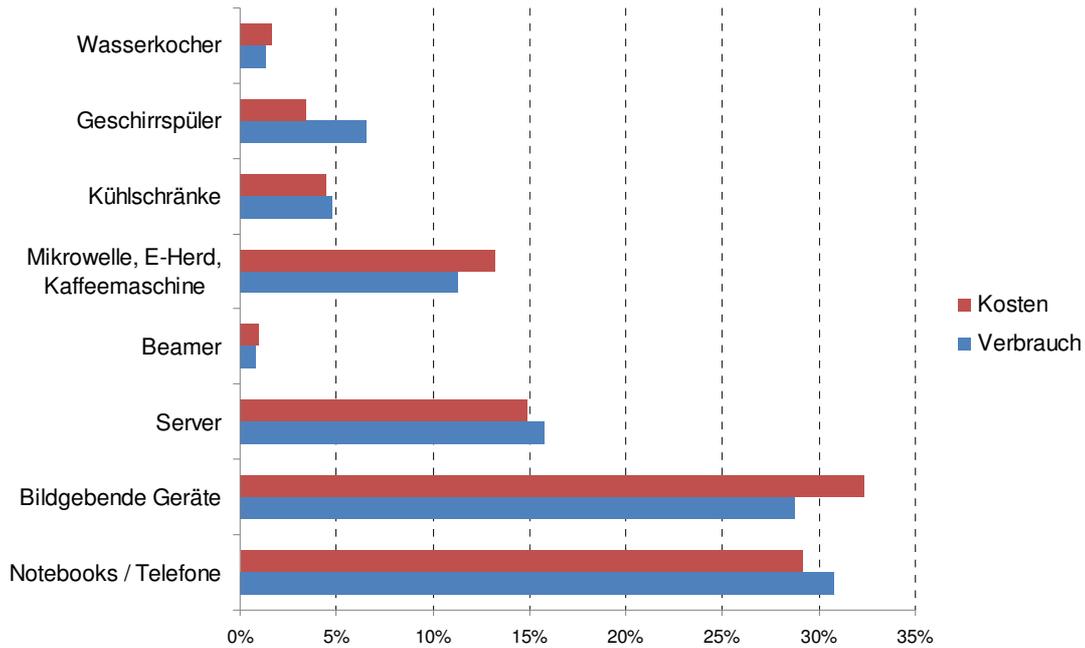


Abbildung 3.34: Vergleich Verbrauch – Kosten Infrastruktur Variante B optimiert (Daten aus EXAA, 2011)

Abbildung 3.35 zeigt den Vergleich des Standardlastgangs eines Tages für die Notebooks inklusive Telefone mit dem optimierten Lastgang.

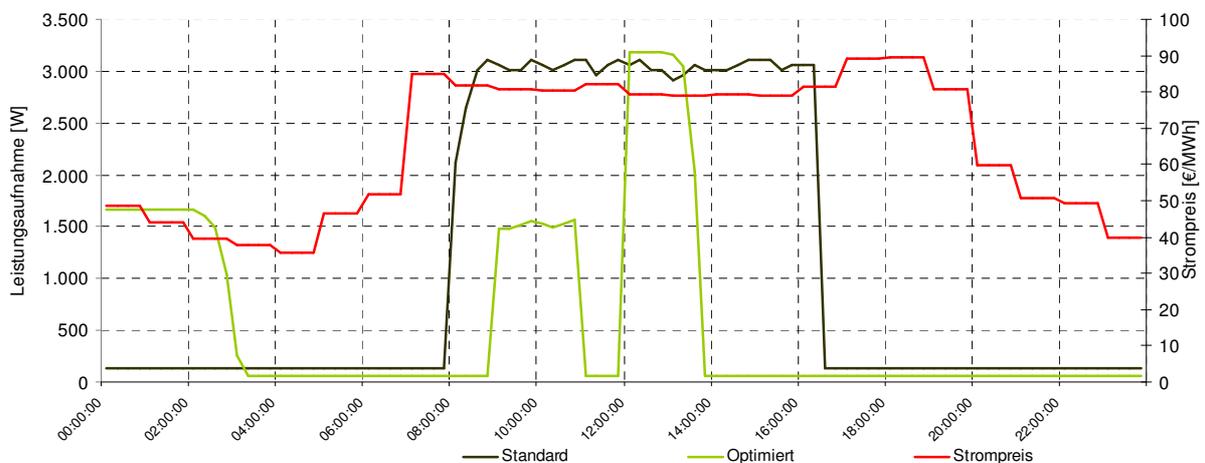


Abbildung 3.35: Vergleich Notebooks Variante B und optimierte Variante B (Daten aus EXAA, 2011)

Es ist zu sehen, dass der optimierte Lastgang in Zeiten hoher Stromaufnahme während des Tages oft niedrigere Leistungsaufnahmen verursacht. Zudem ist durch die Spannungsfreischaltung der Steckdosen der Verbrauch im Off-Modus in der Nacht nicht gegeben, es ist hier lediglich die Leistungsaufnahme der Telefone vorhanden.

Bei einem Tarifmodell mit Hoch- und Niedertarif können 3.267 kWh/a der 12.043 kWh/a in der Niedertarifzeit bezogen werden. Das entspricht ~27 %. Bei der Standardvariante konnten hingegen nur 1.469 kWh/a (~12,4%) während der Niedertarifzeit bezogen werden.

Peripherie

Für die Verschiebung der elektrischen Lasten der Peripherie wird untersucht, wie weit das Gebäude als thermischer Speicher genutzt werden kann. Hierfür wurden die in TRNSYS simulierte Lastgänge mit anderen Temperaturvorgaben nochmals simuliert. Für den Heizfall wurde dafür die Temperatur in der Nacht zwischen 00:00 und 08:00 von 18 bis 25°C bzw. zwischen dem höchsten und niedrigsten Strompreis des Tages interpoliert. Da die Strompreise nachts niedriger sind als am Tag, ergibt sich dadurch eine höhere Solltemperatur in der Nacht und das Gebäude muss vor Beginn und während der Nutzungszeit nicht mehr so stark beheizt werden. Während der Anwesenheitszeit im Gebäude wurde die Temperaturvorgabe anhand des Strompreises zwischen 21 und 23°C interpoliert. In der Kühlperiode wurde umgekehrt vorgegangen. Hier wurde nachts zwischen 22 und 24°C interpoliert, während der Nutzungszeit zwischen 24 und 27°C. Während der Monate April und Oktober wurde die Temperaturvorgabe des Standardlastgangs beibehalten. Diese Vorgaben wurden aus Bukvic-Schäfer (2007) in modifizierter Form übernommen. Insgesamt ergibt sich dadurch zwar ein erhöhter Heiz- und Kühlbedarf, dieser tritt jedoch zu Zeiten niedriger Strompreise auf. Setzt man die jeweilige thermische Last mit der elektrischen Last gleich und errechnet anhand dieser die jährlichen Stromkosten, so ergeben sich die Werte in Tabelle 3.20. Es wird dabei verglichen, wie stark der Energiebedarf für Heizen und Kühlen bei dieser Vorgehensweise steigt und sich die Kosten verändern.

Tabelle 3.20: Übersicht Vorheiz- und Vorkühlstrategien (Daten aus Inschlag, 2011 und EXAA, 2011)

Varianten [Fenster % / U-Wert W/m ² K]		Standard		Vorheiz- Vorkühlstrategie		Veränderung	
		Energiebedarf [kWh/a]	Kosten [Euro/a]	Energiebedarf [kWh/a]	Kosten [Euro/a]	Energiebedarf %	Kosten %
Heizen	30 / 0,15	10.534	675	16.319	590	155	87
	30 / 0,35	17.333	1.094	23.392	880	135	80
	30 / 0,55	24.587	1.538	30.708	1.219	125	79
	60 / 0,15	15.872	965	23.029	868	145	90
	60 / 0,35	19.447	1.176	26.781	1.032	138	88
	60 / 0,55	21.335	1.287	28.727	1.121	135	87
	90 / 0,15	22.351	1.301	30.586	1.207	137	93
	90 / 0,35	23.223	1.351	31.500	1.250	136	93
	90 / 0,55	24.095	1.401	32.410	1.293	135	92
Kühlen	30 / 0,15	16.525	1.537	20.165	1.195	122	78
	30 / 0,35	13.010	1.206	16.487	955	127	79
	30 / 0,55	10.514	969	13.811	785	131	81
	60 / 0,15	29.490	2.699	35.045	2.355	119	87
	60 / 0,35	26.962	2.470	32.419	2.173	120	88
	60 / 0,55	25.804	2.365	31.190	2.088	121	88
	90 / 0,15	42.163	3.798	48.868	3.502	116	92
	90 / 0,35	41.488	3.739	48.170	3.452	116	92
	90 / 0,55	40.838	3.681	47.494	3.405	116	92
Gesamt	30 / 0,15	27.059	2.212	36.484	1.786	135	81
	30 / 0,35	30.343	2.299	39.880	1.835	131	80

Varianten [Fenster % / U-Wert W/m ² K]	Standard		Vorheiz- Vorkühlstrategie		Veränderung	
	Energiebedarf [kWh/a]	Kosten [Euro/a]	Energiebedarf [kWh/a]	Kosten [Euro/a]	Energiebedarf %	Kosten %
30 / 0,55	35.101	2.506	44.519	2.004	127	80
60 / 0,15	45.362	3.664	58.074	3.223	128	88
60 / 0,35	46.409	3.646	59.200	3.205	128	88
60 / 0,55	47.139	3.652	59.917	3.209	127	88
90 / 0,15	64.514	5.099	79.455	4.709	123	92
90 / 0,35	64.712	5.090	79.670	4.702	123	92
90 / 0,55	64.933	5.082	79.903	4.697	123	92

Es ist zu erkennen, dass der Energiebedarf für Heizen und Kühlen zwar bei jedem Gebäudetyp steigt, die Kosten jedoch immer niedriger sind als beim Standardlastgang. Es ist auch zu sehen, dass diese Strategie bei größeren Fensterflächen schlechter funktioniert. Dies erscheint auch logisch, da ein höherer Fensterflächenanteil den Maueranteil und somit die thermische Speichermasse verringert. Die Wärmedämmung hat hingegen kaum Auswirkungen auf die Gesamteinsparung. Vor allem bei niedrigen Verglasungsanteilen ist hier jedoch zu beobachten, dass die Vorheizstrategie bei besseren Dämmwerten weniger, die Vorkühlstrategie mehr Kosteneinsparung bringt. Abbildung 3.36 und Abbildung 3.37 zeigen die Temperaturvorgaben und die Heiz- bzw. Kühlleistungen sowie den Strompreis je eines Winter- und Sommertages. Es wurde wieder der Gebäudetyp mit 60 % Fensterflächenanteil und einem U-Wert von 0,15 W/m²K gewählt (Daten aus EXAA, 2011 und Inschlag, 2011).

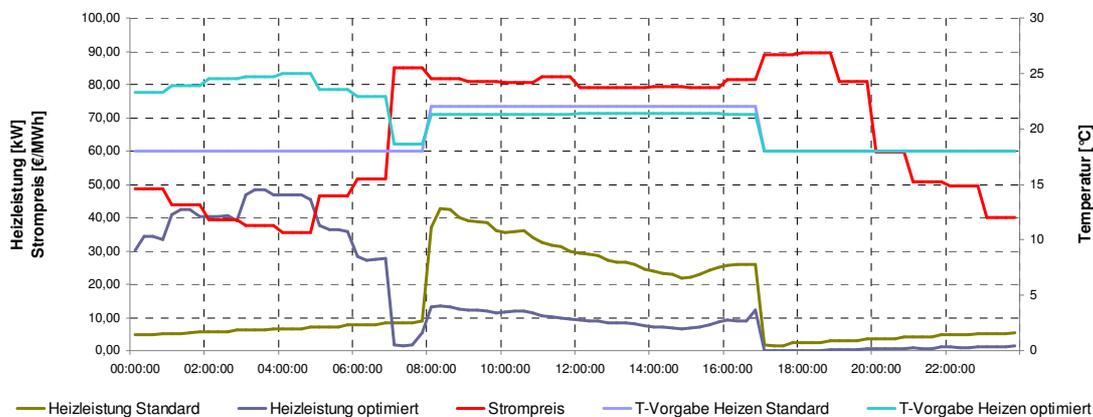


Abbildung 3.36: Vergleich Heizen Standard und Heizen optimiert 60 % / U 0,15 (Daten aus EXAA, 2011 und Inschlag, 2011)

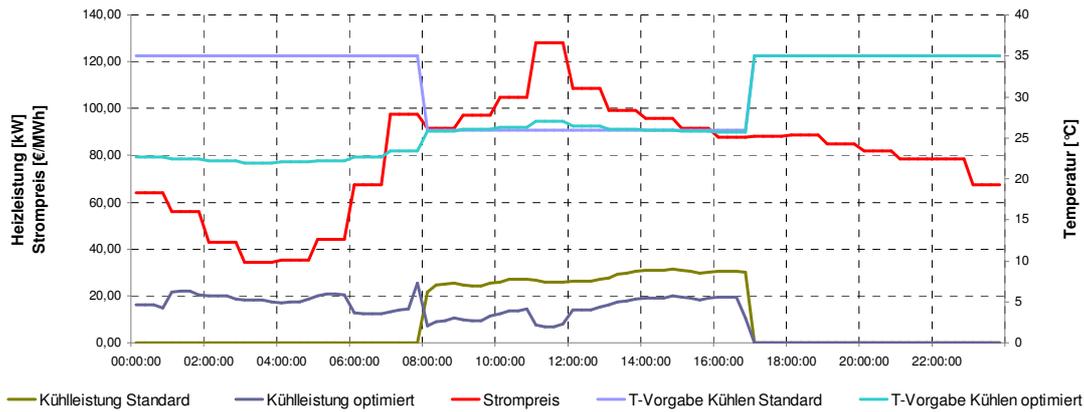


Abbildung 3.37: Vergleich Kühlen Standard und Heizen optimiert 60 % / U 0,15 (Daten aus EXAA, 2011 und Inschlag, 2011)

In beiden Fällen kann die Leistungsaufnahme in Zeiten hohen Stromtarifs deutlich reduziert werden. Der elektrische Lastgang ist nicht mit dem thermischen Lastgang gleichzusetzen. Bei einem Klimatisierungssystem, das zu einem hohen Anteil mit elektrischer Energie betrieben wird ist allerdings anzunehmen, dass der elektrische Lastgang dem thermischen Lastgang folgt. Für die Variante mit 60 % Fensterflächenanteil und einem U-Wert von 0,15 W/m²K wurden die Konstellationen „Luft“ und „Wasser“ näher untersucht. Inclusive Energieverteilpumpen betragen die virtuellen Kosten bei der Konstellation „Luft“ bei der optimierten Version 89,25 % der Kosten der Standardvariante, bei „Wasser“ 88,36 %. Bei der Kühlung bei tieferen Temperaturen in der Nacht steigt die Leistungszahl der luftgekühlten Kältemaschine. Bei der Luftwärmepumpe hingegen sinkt die Leistungszahl durch die kälteren Temperaturen in der Nacht. Die Geräte, die Wasser als Wärmequelle oder -senke nutzen, arbeiten auf einem konstanteren Temperaturniveau (vgl. Abbildung 2.39). Die Konstellation „Wasser“ bringt hier im Vergleich zum Standardlastgang bei der Optimierung höhere Einsparungen als die Konstellation „Luft“. Daraus lässt sich ableiten, dass die höheren Leistungszahlen der luftgekühlten Kältemaschine durch die Kühlung bei tieferen Außentemperaturen in der Nacht im Sommer die niedrigeren Leistungszahlen der Wärmepumpe bei der nächtlichen Heizung im Winter nicht wettmachen. Bezogen auf die gesamte Peripherie (inklusive Warmwassererzeugung, Lüftung und Jalousie) erhöht sich der Jahresstromverbrauch von 18.720 kWh/a auf 22.442 kWh/a. Die Kosten sinken hingegen von 1.515 auf 1.415 Euro/a. Der durchschnittliche Strompreis für die Verbraucher der Peripherie sinkt von 8,09 ct/kWh auf 6,31 ct/kWh. Da die Nachladung der dezentralen Warmwasserspeicher bereits nachts erfolgt und hier die Strompreise in der Regel niedrig sind, wird diese nicht weiter optimiert.

Durch die Optimierung aller Bereiche (Infrastruktur, Peripherie und Beleuchtung) bei der Variante mit 60 % Fensterflächenanteil, einem U-Wert von 0,15 W/m²K und freier Aufstellung ergeben sich bei der Variante B virtuelle Stromkosten von 2.520 Euro/a. Im Vergleich dazu betragen die Kosten bei der Standardvariante B 3.064 Euro/a. Der Gesamtverbrauch beträgt 37.791 kWh/a bei der optimierten Variante, 38.405 kWh/a bei der Standardvariante. Durch die Einsparungsmaßnahmen konnte also der erhöhte Verbrauch durch die Vorheiz- und Vorkühlstrategie wieder wettgemacht werden. Der durchschnittliche Strompreis sinkt von ursprünglich 7,98 ct/kWh auf 6,67 ct/kWh. Abbildung 3.38 und Abbildung 3.39 zeigen einen Lastgang der optimierten Variante für den Sommer und den Winterfall.

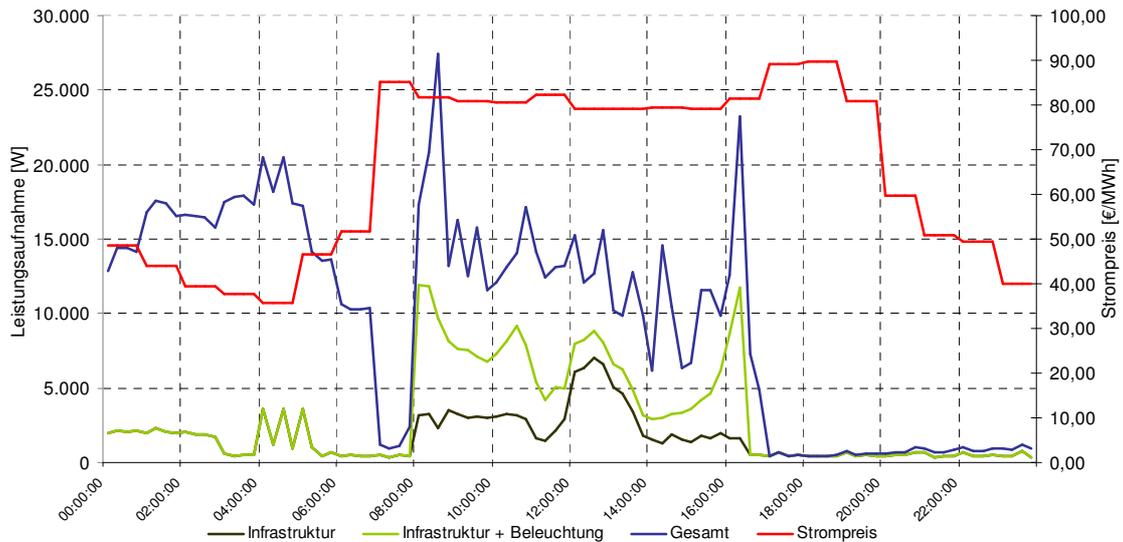


Abbildung 3.38: Lastgang 60 / 0,15 / frei stehend Variante B „Luft“ optimiert Winter (Daten aus EXAA, 2011 und Inschlag, 2011)

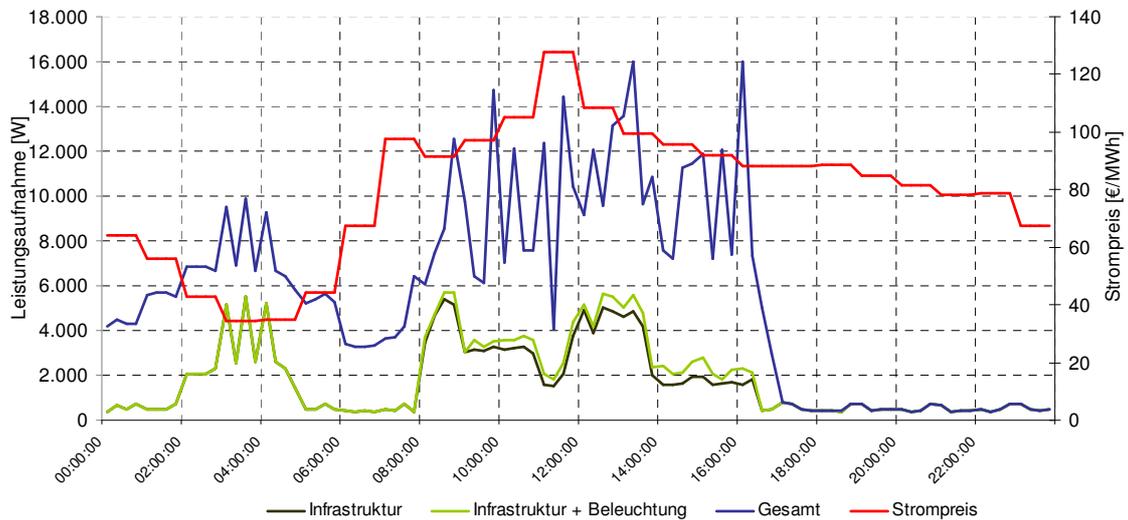


Abbildung 3.39: Lastgang 60 / 0,15 / frei stehend Variante B „Luft“ optimiert Sommer (Daten aus EXAA, 2011 und Inschlag, 2011)

Im Vergleich zur Standardvariante konnte ein erheblicher Teil der Leistungsaufnahme in die Zeit niedriger Stromtarife verschoben werden. Zudem fällt vor allem im Sommerfall auf, dass der Bedarf für Beleuchtung nur noch sehr gering ist. Abbildung 3.40 und Abbildung 3.41 zeigen noch den Vergleich mit dem Standardlastgang im Winter und Sommer.



Abbildung 3.40: Vergleich Variante B „Luft“ und Variante B „Luft“ optimiert 60 / 0,15 / frei stehend Winter (Daten aus EXAA, 2011 und Inschlag, 2011)

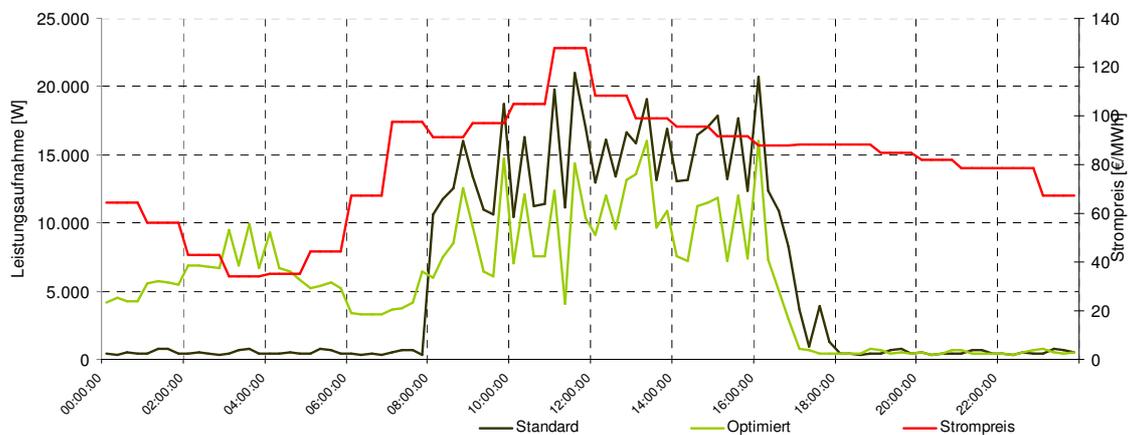


Abbildung 3.41: Vergleich Variante B „Luft“ und Variante B „Luft“ optimiert 60 / 0,15 / frei stehend Sommer (Daten aus EXAA, 2011 und Inschlag, 2011)

In beiden Fällen ist die deutliche Minderung der Stromaufnahme zu Zeiten hohen Tarifs erkennbar. Währenddessen entsteht in den Zeiten des niedrigsten Stromtarifs eine neue Lastspitze.

Bei einem Strompreismodell mit zwei Tarifen (Hochtarif zwischen 6:00 und 22:00) fallen 11.843 kWh/a in die Zeit niedrigen Stromtarifs, während 25.948 kWh/a zu Zeiten des hohen Stromtarifs benötigt werden. Bei einem Gesamtverbrauch von 37.791 kWh/a fallen somit fast 31 % in die Zeit mit niedrigem Stromtarif. Bei der Standardvariante waren dies nur 5,89 %. Die absolute Lastspitze bei der betrachteten Gebäudevariante beträgt ~29 kW im Vergleich zu 43 kW bei der Standardvariante.

3.3.3 Variante C

Infrastruktur

Die Optimierung der Infrastruktur der Variante C deckt sich mit der der Variante B. Die restlichen Untersuchungen werden auch hier mit der Gerätekonstellation „Luft“

und der Gebäudevariante mit 60 % Fensterflächenanteil und einem U-Wert von 0,15 W/m²K sowie freier Aufstellung durchgeführt.

Beleuchtung

Bei der Beleuchtung wurde hier wie bei der Variante B das dritte Jahr im Wartungsintervall zur Darstellung der Optimierung gewählt. Der Verbrauch der Beleuchtung beträgt bei der Standardvariante C 3.499 kWh/a. Bei der optimierten Variante C wurde dieser mit 2.922 kWh/a berechnet.

Peripherie

Der Lastgang der Wärmebereitstellung deckt sich bei der optimierten Variante C ebenfalls mit dem der Variante B. Bei der Gebäudekühlung ergibt sich jedoch aufgrund der Nutzung der freien Kühlung bei der Variante C ein anderes Bild. Bei der Standardvariante C wurde hier für die Kühlung 1.094 kWh/a elektrische Energie benötigt. Bei der optimierten Variante reduziert sich der Bedarf trotz Vorkühlstrategie durch die niedrigeren Temperaturen in der Nacht und die dadurch bedingte bessere Ausnutzung der freien Kühlung auf 631 kWh/a. Durch den höheren Bedarf durch die Vorheizstrategie im Winter steigt der Gesamtverbrauch der optimierten Variante C auf 29.781 kWh/a. Die Kosten sinken von 2.197 Euro/a auf 1.989 Euro/a. Der Strompreis beträgt somit 6,67 ct/kWh. Abbildung 3.42 und Abbildung 3.43 zeigen wieder den optimierten Lastgang an einem Wintertag und einem Sommertag. Es ist zu erkennen, dass im Winter in der Nacht eine hohe Leistungsaufnahme aufgrund der Vorheizstrategie vorhanden ist. Die Last der Vorkühlstrategie ist hingegen beim Sommerfall durch die Ausnutzung der freien Kühlung nicht mehr vorhanden. Am Tag sind im Sommer jedoch Kühlspitzen vorhanden. Die gesamte Last im Sommer ist aufgrund der Vorkühlstrategie niedriger als bei der Standardvariante C.

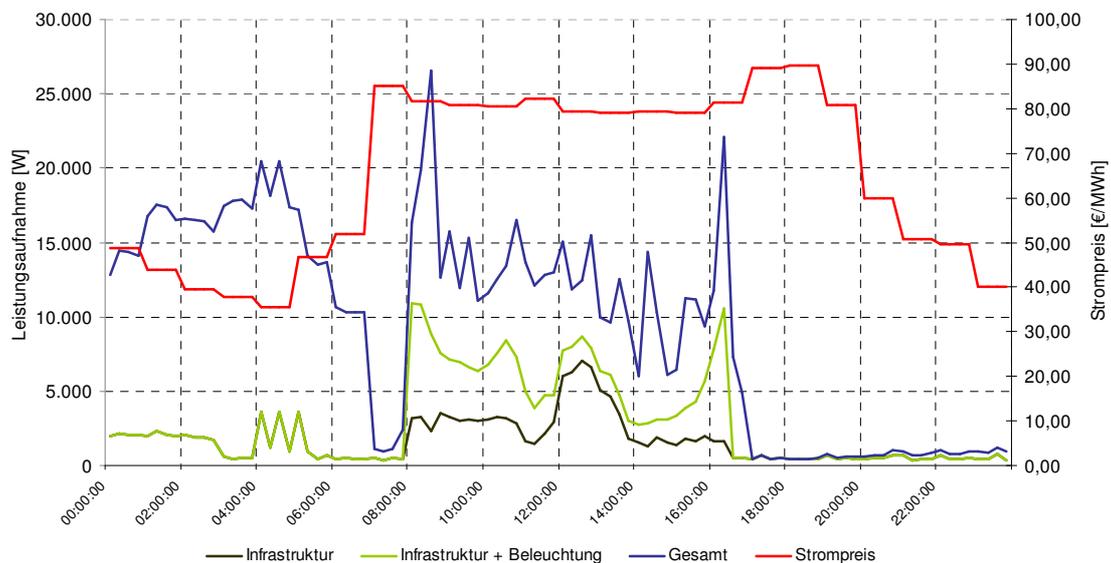


Abbildung 3.42: Lastgang 60 / 0,15 / frei stehend Variante C „Luft“ optimiert Winter (Daten aus EXAA, 2011 und Inschlag, 2011)

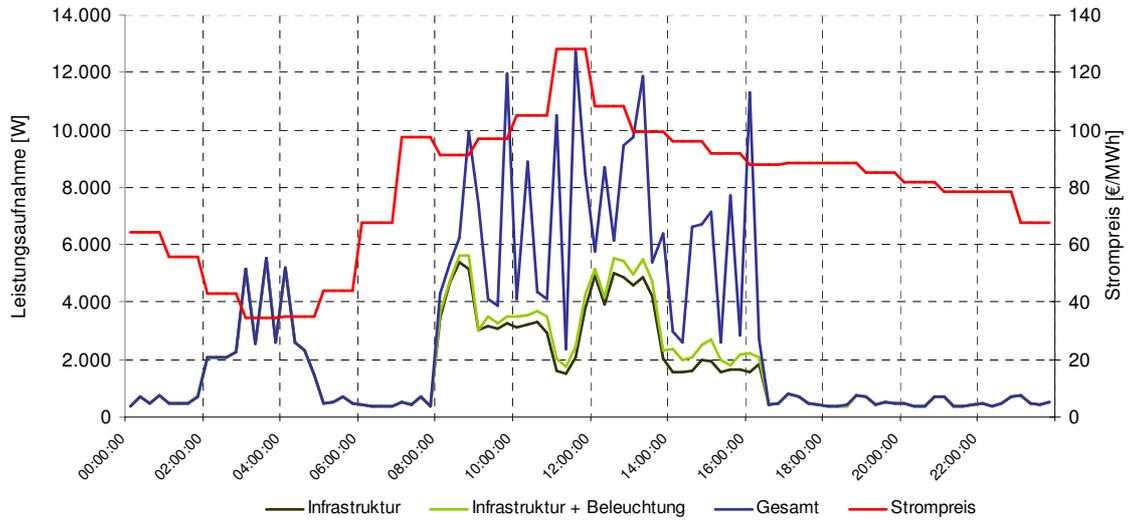


Abbildung 3.43: Lastgang 60 / 0,15 / frei stehend Variante C „Luft“ optimiert Sommer (Daten aus EXAA, 2011 und Inschlag, 2011)

Abbildung 3.44 und Abbildung 3.45 zeigen einen Vergleich der Standardvariante mit der optimierten Variante.

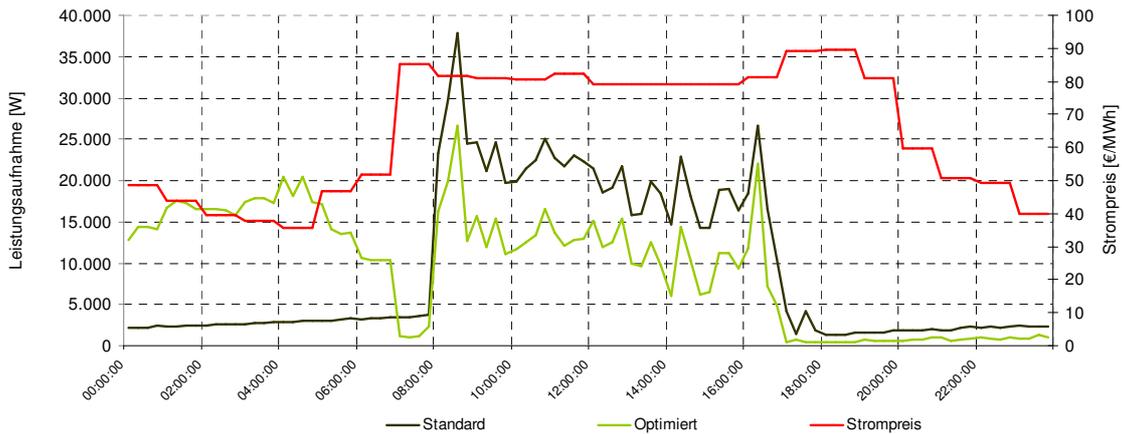


Abbildung 3.44: Vergleich Standardvariante C „Luft“ und Variante C „Luft“ optimiert Winter (Daten aus EXAA, 2011 und Inschlag, 2011)

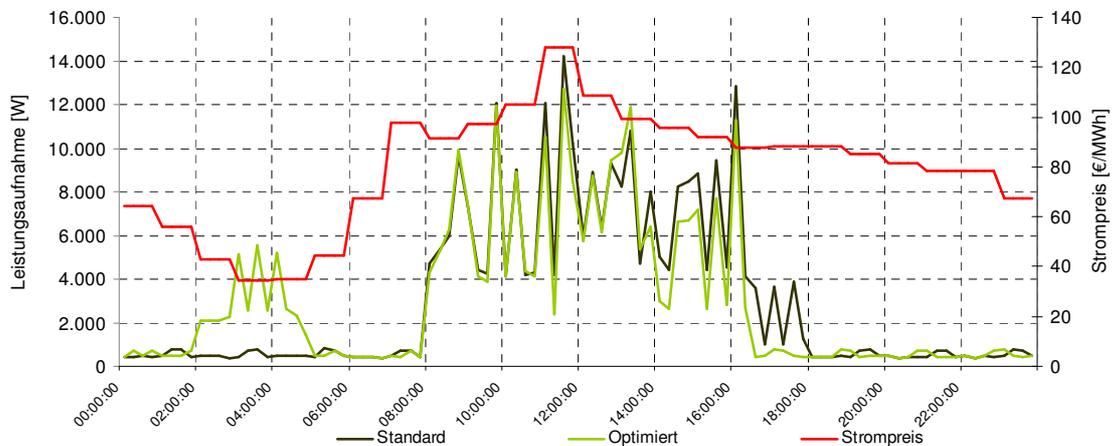


Abbildung 3.45: Vergleich Standardvariante C „Luft“ und Variante C „Luft“ optimiert Sommer (Daten aus EXAA, 2011 und Inschlag, 2011)

Es ist wieder deutlich die Wirkung der Vorheizstrategie im Winter zu sehen. Im Sommer fehlt diese Spitze wieder durch die freie Kühlung. Es entsteht lediglich durch den Geschirrspüler sowie die Aufladung der Laptopakkus und Warmwasserspeicher eine nächtliche Lastspitze. Auffällig ist auch, dass bei der optimierten Variante C im Sommer tagsüber die Last oft sehr ähnlich der nicht optimierten Variante ist.

Bei einem Tarifsystem mit Hoch- und Niedertarifzeiten fallen bei der optimierten Variante 8.831 kWh/a in die Niedertarifzeit. Dies entspricht knapp 30 % des Gesamtverbrauchs. Bei der Standardvariante entfielen nur 5,78 % auf die Niedertarifzeit.

3.4 Sonstige Systemkomponenten

3.4.1 Erzeugungsanlagen

Wie in Kapitel 2.6 gezeigt, wurden die Lastgänge von Kleinwindanlagen und Photovoltaikanlagen modelliert. Diese werden nun mit den Lastgängen der drei Varianten in der Standard- und optimierten Version kombiniert.

Hierfür wird bei Windanlagen und Solarstromanlagen jeder Viertelstundenwert der spezifischen Lastgänge mit der jeweiligen Anlagennennleistung multipliziert. Dadurch entsteht der Erzeugungslastgang der Anlage bei der gewählten Nennleistung. Durch Vergleich der Erzeugungslastgänge mit den Lastgängen des Strombedarfs kann so die Restlast angegeben werden, die vom Netz bezogen werden muss bzw. der Überschuss ermittelt werden, der ins Netz eingespeist werden kann. Es wird auch untersucht, ob durch den zeitlichen Verlauf Auswirkungen auf den virtuellen Strompreis bzw. den Anteil des Strombezugs während der Hoch- bzw. Niedertarifzeit vorhanden ist.

Hierzu soll zuerst eine Übersicht der Lastgänge ohne Erzeugungsanlagen über diese Werte gezeigt werden. Es wurde wieder der Gebäudetyp mit 60 % Fensterflächenanteil, einem U-Wert von 0,15 W/m²K und freier Aufstellung gewählt. Tabelle 3.21 zeigt dies. Die Werte für die Verbrauchsanteile wurden dabei auf ganze Prozent gerundet.

Tabelle 3.21: Übersicht Lastgänge ohne Erzeugung

Variante	Strompreis [ct/kWh]	Verbrauch Hochtarif [%]	Verbrauch Niedertarif [%]
Variante A Standard	7,95	93	7
Variante B Standard	7,98	94	6
Variante C Standard	7,71	94	6
Variante A optimiert	7,75	89	11
Variante B optimiert	6,67	69	31
Variante C optimiert	6,67	70	30

Als Kleinwindanlagen wurde eine Anlage mit 10 kW Nennleistung simuliert. Der spezifische Lastgang wurde hierfür für jedes Zeitintervall mit diesem Wert multipliziert. Kombiniert man nun den Erzeugungsverlauf dieser Windanlage in einer windreichen Woche mit der Variante B (Standard und optimiert), so ergibt sich ein Verlauf gemäß Abbildung 3.46.

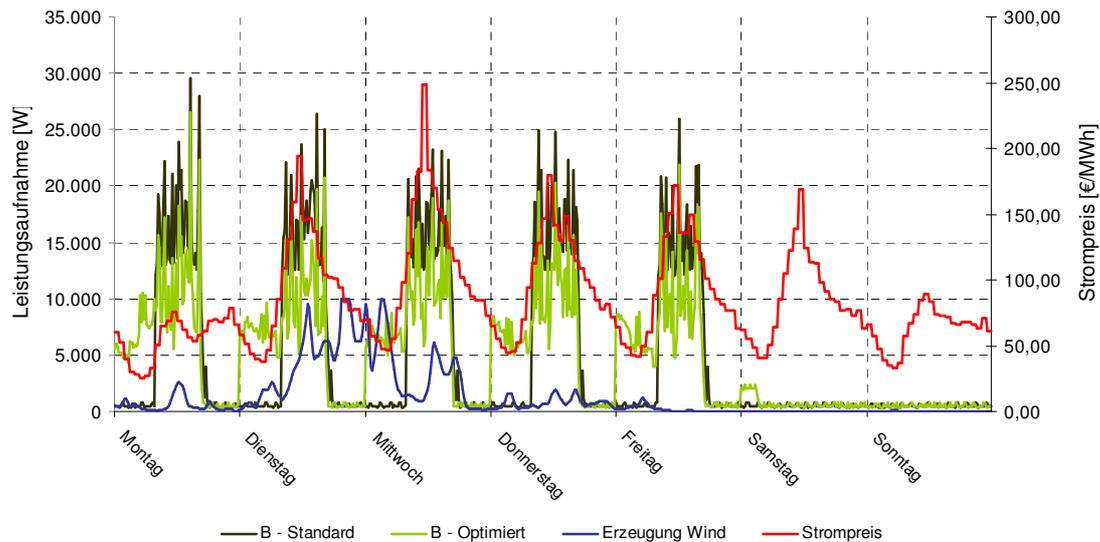


Abbildung 3.46: Vergleich Erzeugung Wind - Lastgang B Standard und B optimiert (Daten aus EXAA, 2011 und Inschlag, 2011)

Es ist zu erkennen, dass die Winderzeugung den Verbrauch beider Varianten teilweise übersteigt. Durch die Verschiebung der Last bei der optimierten Variante kann die Winderzeugung in der Nacht von Dienstag auf Mittwoch jedoch besser ausgenutzt werden. Tabelle 3.22 zeigt eine Übersicht über den virtuellen Strompreis und die Anteile des Verbrauchs im Hoch- und Niedertarif unter Berücksichtigung der Winderzeugung. Zudem wurde die Tabelle um eine Spalte, die zeigt wie hoch der Anteil der erzeugten Windenergie, der ins Netz eingespeist wird, bei den einzelnen Varianten ist, ergänzt.

Tabelle 3.22: Übersicht Lastgänge bei Winderzeugung

Variante	Strompreis [ct/kWh]	Verbrauch Hochtarif [%]	Verbrauch Niedertarif [%]	Anteil Einspeisung [%]
Variante A Standard	8,01	95	5	5
Variante B Standard	8,02	96	4	5
Variante C Standard	7,75	94	6	5
Variante A optimiert	7,81	91	9	4
Variante B optimiert	6,63	68	32	5
Variante C optimiert	6,63	70	30	5

Im Vergleich zu den Werten ohne Winderzeugung fällt auf, dass der durchschnittliche Strompreis bei allen Standardvarianten durch die Windanlage steigt, während er bei allen optimierten Varianten sinkt. Der Anteil des Bezugs beim Hochtarif ist bei jeder Version höher als ohne die Winderzeugung. Einzige Ausnahme ist die optimierte Variante B. Der Anteil der eingespeisten Windenergie ist bei jeder Variante ähnlich. Einzig bei der Variante B ist die Anteil der Einspeisung um ein Prozent geringer als bei den anderen Varianten.

Für die Betrachtung einer PV-Anlage wurde ebenfalls die Anlagengröße von 10 kW Nennleistung (10 kWp) gewählt. Es wurde hier wie bei der Windenergieanlage vorge-

gangen. Für die optimierte Variante B ergeben sich an einem Winter bzw. Sommer tag die Lastgänge gemäß Abbildung 3.47 und Abbildung 3.48.

Beim Wintertag hat die Erzeugung der PV kaum Auswirkungen auf den Lastgang. Im Sommer sind hingegen auch Zeiten vorhanden, an denen die PV-Leistung die Bezugsleistung der optimierten Variante übersteigt. Es ist auch offensichtlich, dass die PV-Anlage zu Zeiten hoher Strompreise produziert.

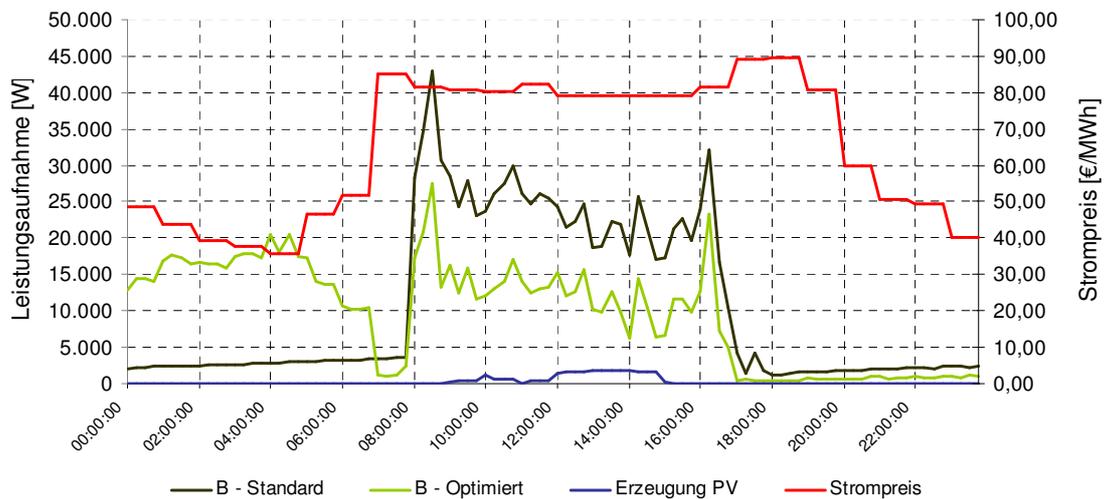


Abbildung 3.47: Vergleich Erzeugung PV - Lastgang B „Luft“ Standard und B „Luft“ optimiert Winter (Daten aus EXAA, 2011 und Inschlag, 2011)

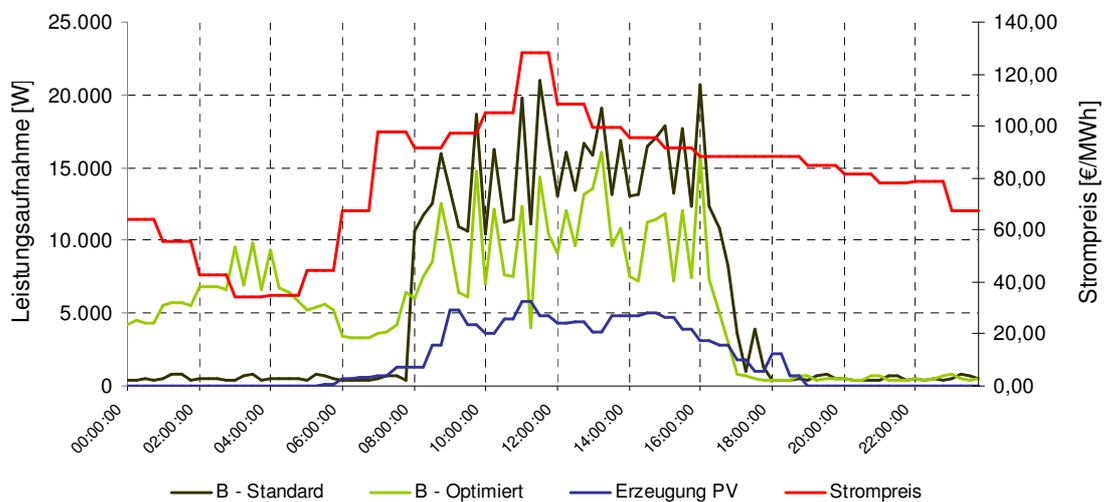


Abbildung 3.48: Vergleich Erzeugung PV - Lastgang B „Luft“ Standard und B „Luft“ optimiert Sommer (Daten aus EXAA, 2011 und Inschlag, 2011)

Tabelle 3.22 zeigt eine Übersicht über den virtuellen Strompreis und die Anteile des Verbrauchs im Hoch- und Niedertarif unter Berücksichtigung der Photovoltaikerzeugung. Zudem ist angeführt, wie hoch der Anteil der ins Netz eingespeisten, von der Photovoltaik erzeugten Energiemenge ist.

Tabelle 3.23: Übersicht Lastgänge bei PV-Erzeugung

Variante	Strompreis [ct/kWh/kWh]	Verbrauch Hochtarif [%]	Verbrauch Niedertarif [%]	Anteil Einspeisung [%]
Variante A Standard	7,69	89	11	25
Variante B Standard	7,24	92	8	25
Variante C Standard	7,83	88	12	28
Variante A optimiert	6,09	80	20	27
Variante B optimiert	7,37	57	43	26
Variante C optimiert	5,89	56	44	32

Es gibt sich hier ein differenziertes Bild. Während der Strompreis bei den Standardvarianten A und B durch die PV-Anlage sinkt, steigt er bei Variante C. Demgegenüber sinkt der Strompreis bei den optimierten Varianten A und C merklich, bei der Variante B steigt er. Bei einem System mit Hoch- und Niedertarifzeiten steigt der Anteil des Stroms, der zu Zeiten des niedrigen Tarifs bezogen wird, durch die PV-Erzeugung am Tag bei allen Varianten. Durch die Verschiebung der Lasten vom Tag in die Nacht steigt der Anteil der Netzeinspeisung bei den optimierten Lastgängen.

Für BHKWs werden an dieser Stelle nur einige theoretische Überlegungen angestellt. Wie in Kapitel 2.6 dargestellt, wird bei BHKWs von einer Stromkennzahl von 0,385 ausgegangen. Das heißt, dass bei einer thermischen Leistung von 1 kW 0,385 kW oder 385 W an elektrischer Leistung anfallen. Bei modulierbaren BHKWs arbeitet das Gerät in der Stufe, die vom jeweiligen Bedarf überschritten wird bzw. kann Überschussstrom auch ins öffentliche Netz einspeisen. Beim Einsatz von BHKWs ist es zudem sinnvoll, auch außerhalb der Heizperiode Wärmeabnehmer zu haben. Im Bürogebäude könnte dies beispielsweise eine Absorptionskältemaschine sein, die die Abwärme des BHKWs zur Antriebsenergie nutzt (Thomas, 2007). Verschiebt man nun die Last der Absorptionskältemaschine durch die Vorkühlstrategie vom Tag in die Nacht, so erhöht sich der elektrische Lastgang nicht in hohem Ausmaß, da das Gerät nur 1-3 % der Kälteleistung als elektrische Leistung benötigt. Hingegen muss bei einem Wärmeverhältnis von 0,7 das 1,43-fache der benötigten Kälteleistung als Wärmeleistung durch das BHKW bereitgestellt werden (vgl. Kapitel 2.3.6). Multipliziert man diese Wärmeleistung (das 1,43-fache der Kälteleistung) dann mit der Stromkennzahl 0,385 so kann man feststellen, dass 55 % der Kälteleistung als elektrische Leistung bereitgestellt werden. In der Nacht gibt es allerdings niedrigere elektrische Stromabnahme und der Strombezugspreis ist noch dazu niedriger als am Tag. Zudem steigt durch die Vorkühlstrategie der Kühlenergiebedarf und mit ihm auch der Bedarf der Absorptionskältemaschine an Heizenergie. Aus diesen Gründen erscheint der Einsatz von BHKWs bei Ausnutzung von Vorheiz- und Vorkühlstrategie nicht sinnvoll.

3.4.2 Speicher

Speicher können in einem Gebäude helfen, sowohl thermische als auch elektrische Leistungsaufnahme zeitlich zu verschieben. Bei der Vorheiz- und Vorkühlstrategie wurde bereits versucht, das thermische Speichervermögen des Gebäudes auszunutzen. Verwendet man einen eigenen thermischen Speicher (z.B. mit Wasser als

Speichermedium), so kann man den Speicher ebenfalls in Zeiten niedriger Strompreise beladen und bei Wärmepumpen bzw. Kompressionskältemaschinen elektrische Lasten verschieben. Zu Tageszeiten mit hohen Strompreisen muss dann nur noch die elektrische Leistung zur Verteilung der Energie (Pumpen bzw. Ventilatoren) bezogen werden. Thermische Speicher können hierbei sowohl zur Speicherung von Wärme, als auch Kälte genutzt werden. Eine Vorheiz- und Vorkühlstrategie ist durch diese Vorgehensweise nicht mehr notwendig. Die Auslegung eines Speichers kann beispielsweise mit einer etwas abgeänderten Form einer Jahresdauerlinie erfolgen. So kann man die täglich benötigte Energie für Heizen und Kühlen geordnet nach Menge in ein Diagramm eintragen. Abbildung 3.49 zeigt so ein Diagramm für die benötigte thermische Wärmemenge zwischen 06:00 und 22:00. Dies entspricht auch der Hochtarifzeit. Abbildung 3.50 zeigt das gleiche Diagramm für die Kühlenergie. In beiden Fällen wurde der thermische Lastgang für das Gebäude mit 60 % Fensterflächenanteil und einem U-Wert von $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$ verwendet. Dabei wurde die Standardvariante des thermischen Lastgangs verwendet.

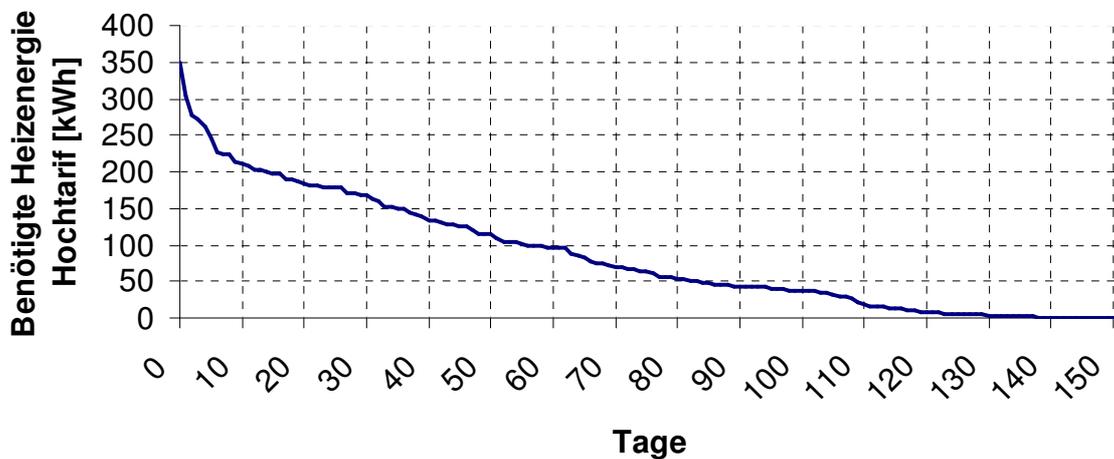


Abbildung 3.49: Jahresdauerlinie Heizen (Daten aus Inschlag, 2011)

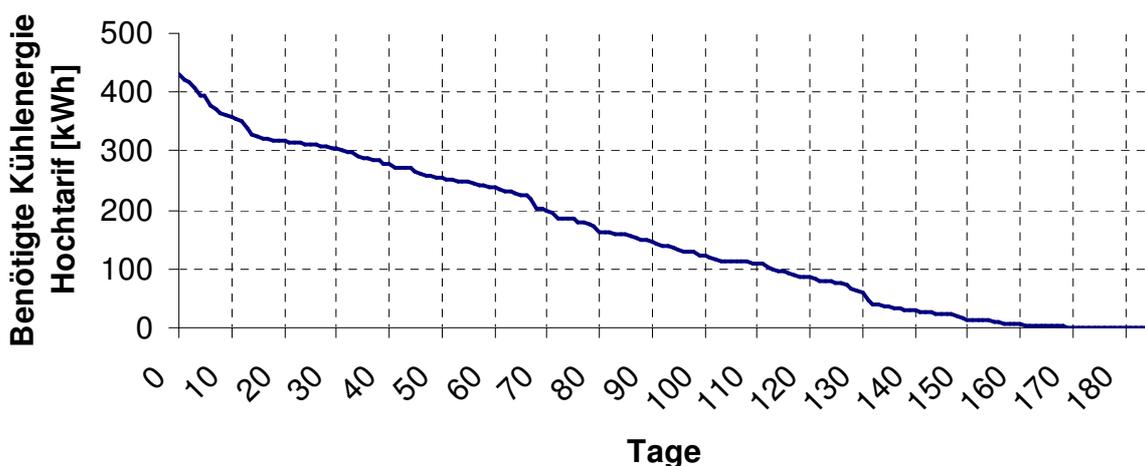


Abbildung 3.50: Jahresdauerlinie Kühlen (Daten aus Inschlag, 2011)

Beim Diagramm für die Heizung ist nun erkennbar, dass die Heizenergiebedarf eines Tages nur an etwa zehn Tagen die Marke von 200 kWh übersteigt, der Spitzenwert beträgt jedoch knapp 350 kWh. Bei der Kurve für die Kühlung ist etwas oberhalb von

300 kWh ein Knick nach oben zu beobachten. Hier könnte eine Auslegung in der dieser Größe sinnvoll sein. Die tatsächliche Auslegung obliegt jedoch immer auch wirtschaftlichen Rahmenbedingungen und kann nicht rein anhand dieser Kurve ermittelt werden.

Für die weiteren Betrachtungen wird ein Speicher mit einer nutzbaren Kapazität von 200 kWh für den Heizfall und aufgrund der niedrigeren Temperaturdifferenz 150 kWh für den Kühlfall verwendet. Dieser wird mit dem Lastgang der Variante B in der Gerätekonstellation „Luft“ kombiniert. Es wird der optimierte Lastgang verwendet, der entstehen würde, wenn keine Vorheiz- und Vorkühlstrategie angewendet werden würde. Es wird angenommen, dass getrennte Wärme- und Kältespeicher vorhanden sind. Es wird hier eine vereinfachte Darstellung, bei der die Speicherverluste vernachlässigt werden, gewählt. Der Heizungsspeicher wird während der Heizperiode in der Nacht ab 02:00 voll beladen, tagsüber erfolgt eine Nachladung, wenn der Speicherinhalt unter 20 kWh fällt. Bei diesen Nachladungen werden jeweils 20 kWh eingespeichert. Der Kältespeicher arbeitet ähnlich. Die Aufladung erfolgt in der Kühlperiode ebenfalls um 02:00. Nachladungen erfolgen auch hier wenn der Speicherinhalt unter 20 kWh fällt mit dem Ausmaß von 20 kWh. Dadurch ergibt sich ein neuer thermischer Lastgang, mit welchem die Geräte der Konstellation „Luft“ neu berechnet werden. Es wird dabei von einer Heizperiode von Oktober bis März und einer Kühlperiode von April bis September gerechnet. Entsteht außerhalb dieser Perioden Bedarf, werden die Speicher immer auf einem Energieinhalt von 20 kWh gehalten. Fällt der Inhalt unter 20 kWh wird in wieder um 20 kWh nachgeladen. Für die Aufladung in der Nacht wird hier auch eine Beladungsrate von 20 kWh pro Viertelstundenintervall angenommen. Dies entspricht einer thermischen Leistung von 80 kW. Ist der Heizungsspeicher also ganz leer, so dauert die Aufladung zehn Viertelstundenintervalle oder zweieinhalb Stunden. Ist der Kältespeicher leer, so dauert die Aufladung knapp zwei Stunden. Aufgrund des Speicherinhalts, der am Ende des Jahres noch in den thermischen Speichern vorhanden ist, ergibt sich bei der Betrachtungsgrenze von einem Jahr ein etwas erhöhter Verbrauch für die Peripherie dieser Variante. Im Gegensatz zur Standardvariante (18.720 kWh/a) beträgt der Verbrauch 18.907 kWh/a. Die virtuellen Kosten für die Peripherie der neuen Variante betragen 1.202 Euro/a. Im Vergleich dazu betragen die Kosten für die Peripherie für die Standardvariante 1.515 Euro/a, bei der optimierten Variante 1.415 Euro/a. Es ist also zu sehen, dass mit einem Speicher zusätzliche Einsparungen aufgrund des geringeren Gesamtverbrauchs unter gleichzeitiger Ausnutzung der günstigen Strompreise möglich sind. Die gesamten Stromkosten der Variante B sinken durch diese Maßnahme von 3.064 kWh/a bei der Standardvariante bzw. 2.520 Euro/a bei der optimierten Variante auf 2.307 Euro/a.

Die Vorgehensweise bei elektrischen Speichern ist ähnlich. Auch hier kann der Verbrauch jedes Tages bei Hochtarifzeit durch eine Jahresdauerlinie dargestellt werden. Abbildung 3.51 zeigt dies für den soeben modellierten Lastgang. An den Tagen, an denen das Bürogebäude nicht genutzt wird, besteht wenig Energiebedarf. Aufgrund der Dauerlinie wird ein Speicher mit der nutzbaren Kapazität von 80 kWh ausgewählt und untersucht. Die Beladung erfolgt auch hier um 02:00. Als Beladungsrate werden 5 kWh pro Viertelstundenintervall angenommen, eine volle Beladung dauert hier also 16 Intervalle oder vier Stunden. Im Gegensatz zum thermischen Speicher wird der elektrische Speicher, wenn er während des Tages leer

wird, nicht wieder beladen. Die Versorgung der Verbraucher erfolgt dann über das öffentliche Stromnetz, eine Beladung erfolgt erst um 02:00 wieder. Vereinfachend wurden auch hier die Ladeverluste und auch die Selbstentladungsrate vernachlässigt.

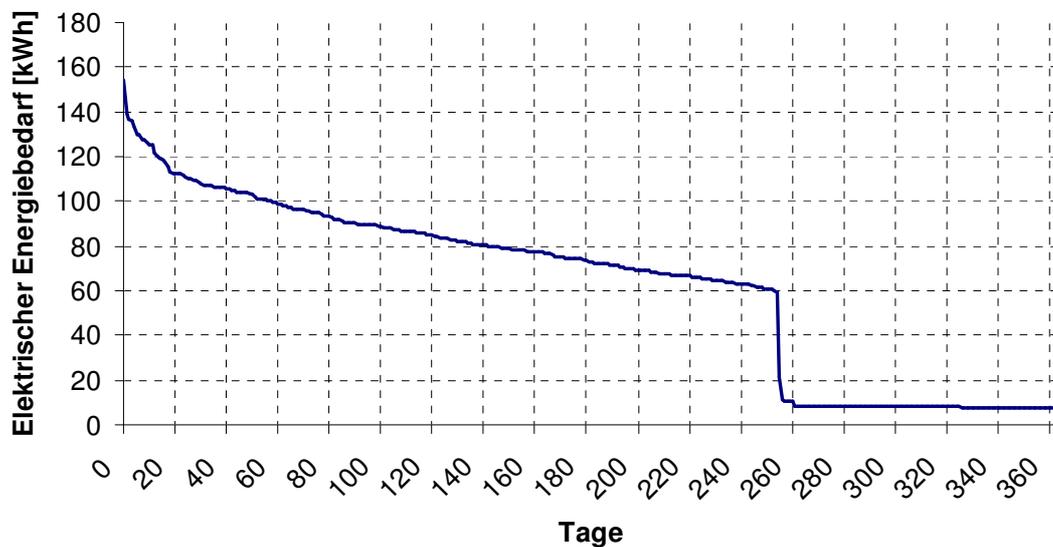


Abbildung 3.51: Jahresdauerlinie Strom (Daten aus Inschlag, 2011)

Während der Verbrauch unter den getroffenen Maßnahmen gleich bleibt, sinken die virtuellen Kosten durch den elektrischen Speicher auf 1.478 Euro/a. Es müssen nur noch 3.349 kWh/a während der Hochtarifzeit bezogen werden. Der virtuelle Strompreis sinkt durch auf 4,3 ct/kWh. Abbildung 3.52 zeigt den Beispiellastgang eines Wintertages, der dabei entsteht. Die Zuteilung in die Kategorien Infrastruktur, Beleuchtung und Peripherie kann hier aufgrund der Einbeziehung des Akkus nicht mehr erfolgen.

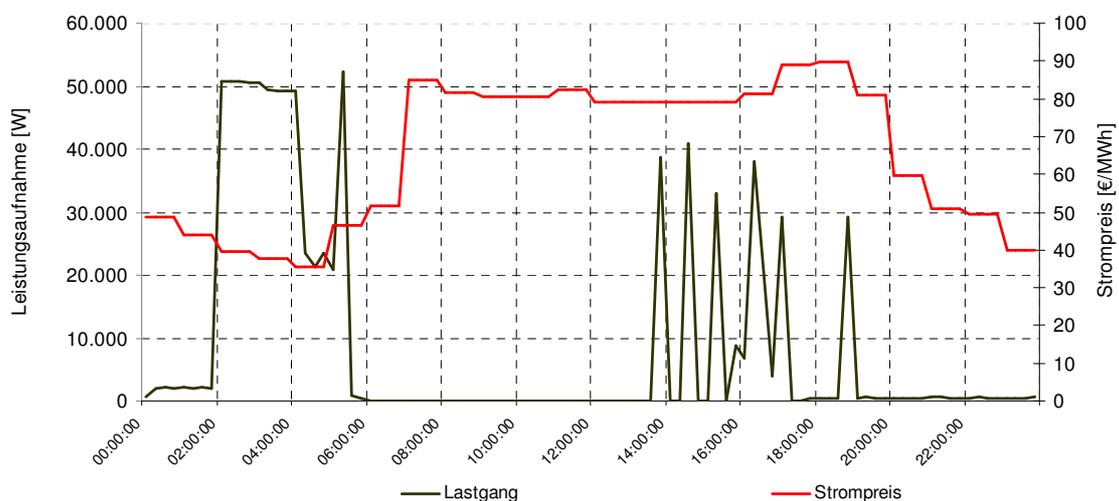


Abbildung 3.52: Lastgang bei vorhandenem Speicher, modifizierte optimierte Variante B „Luft“ Winter (Daten aus Inschlag, 2011 und EXAA, 2011)

Es zeigt sich, dass in der Nacht bei günstigen Preisen ein hoher Strombedarf besteht. Bis kurz vor 14:00 versorgt dann der Akku die elektrischen Verbraucher zu 100 %, danach erfolgt die Versorgung durch den Akku nur noch, wenn der Verbrauch der jeweiligen Viertelstunde die restliche Akkukapazität nicht übersteigt. Dadurch erge-

ben sich auch danach noch Viertelstundenwerte, in denen der Akku die Verbraucher versorgen kann. Die Spitze zwischen 18:00 und 20:00 erfolgt durch eine Nachheizung in den thermischen Speicher. Die Lastspitze vor 06:00 wird ebenfalls hauptsächlich durch eine Nachheizung in den thermischen Speicher verursacht.

4 SCHLUSSFOLGERUNG

Das Thema des elektrischen Lastmanagements könnte bei einer Änderung der Tarifstruktur der Strompreise und der fluktuierend auftretenden Stromerzeugung durch erneuerbare Energien in Zukunft eine zentrale Rolle spielen. Um das Lastverhalten eines Bürogebäudes beurteilen zu können und aktiv in dieses einzugreifen, ist die Kenntnis vieler Daten notwendig. Einerseits ist die Kenntnis der Gerätestruktur im Gebäude unumgänglich. Großen Einfluss haben jedoch auch die Regelstrategien und das Nutzerverhalten sowie die Gebäudecharakteristik selbst. Für viele Verbraucher ist auch das Wetter eine wichtige direkte oder indirekte Einflussgröße. Bei Kenntnis des thermischen Lastgangs und der Tageslichtversorgung des Gebäudes - beides musste über eigene Simulationstools ermittelt werden - lassen sich die Lastgänge aller Verbraucher unter akzeptablen Vereinfachungen darstellen. Die Datenmenge, die dabei entsteht, ist allerdings enorm. Für die Ermittlung, Optimierung und Auswertung der einzelnen Lastgangvarianten mussten mehrere Dateien des Tabellenkalkulationsprogramms miteinander verschachtelt werden, da bei vorhandener Rechnerleistung sonst keine Bearbeitung dieses Themas möglich wäre. Als Alternative dazu erscheint nur ein Gebäudesimulationstool, das alle Algorithmen in sich vereint, sinnvoll.

Es konnte gezeigt werden, dass Bürogebäude ohne Optimierung einen Großteil der elektrischen Energie zu Zeiten hoher Strompreise an den Börsen beziehen. Je nach Zusammensetzung und Betriebsweise des Gebäudes sind hier jedoch teils erhebliche Optimierungspotentiale vorhanden. Auch wenn dadurch wie zum Beispiel bei der Ausnutzung von Vorheiz- und Vorkühlstrategien, teils sogar erhöhter Energiebedarf entsteht, sind unter den getroffenen Voraussetzungen stets Kosteneinsparpotentiale vorhanden. Nicht einberechnet wurden hier allerdings die Investitionskosten, die bei einer Optimierung zu treffen wären. Dies wäre im Einzelfall für jedes Gebäude in der Planungsphase selbst zu evaluieren und die Wirtschaftlichkeit zu bewerten.

Bei den betrachteten Lastgangvarianten zeigt sich deutlich, dass bei einer Anlage für Heizung, Lüftung und Klimatisierung, deren Wärme- und Kälteerzeugung von elektrisch betriebenen Anlagen geprägt ist, besonders hohes Lastverschiebungs- und Kosteneinsparungspotential besteht. Dies kann entweder durch die Nutzung des Gebäudes als thermischer Speicher oder durch einen separaten Speicher ausgenutzt werden. Es muss jedoch im Einzelfall auch evaluiert werden, ob ein System, das andere Energieträger nützt und daher kaum elektrische Lastverschiebung unterstützt, nicht trotzdem kostengünstiger im Betrieb sein kann. Naturgemäß ergibt sich durch den Einsatz elektrischer Speicher ebenfalls großes Lastverschiebungspotential. Hier ist jedoch besonders auf den wirtschaftlich sinnvollen Einsatz zu achten.

Zu beachten ist auch der Einsatz von dezentralen Erzeugungsanlagen. Diese haben ebenfalls Auswirkungen auf den elektrischen Lastgang. Während sich die Erzeugung von PV-Anlagen mit Zeiten hoher Strompreise deckt, tritt der Wind unabhängig von der von der jeweiligen Tageszeit auf.

Ein Unsicherheitsfaktor bei der Methodik der Modellierung der elektrischen Lasten ist hier sicherlich das Nutzerverhalten. Dies wurde in dieser Arbeit anhand von Zufallszahlen simuliert. Bei einem realen Bürogebäude könnten hier Angaben über die spätere Nutzungsweise zur Verbesserung der theoretischen Vorhersage beitragen.

5 ZUSAMMENFASSUNG

Die Arbeit beschäftigt sich mit einem theoretischen Ansatz zum elektrischen Lastverhalten von Bürogebäuden sowie Optimierungsmöglichkeiten hinsichtlich der Ausnutzung günstiger Preise bei variablen Stromtarifen, wie sie in einem zukünftigen System Anwendung finden könnten. Anhand von in der Literatur vorhandener Ansätze lassen sich die elektrischen Lasten aller Verbraucher im Gebäude ermitteln. Wichtige Eingangsdaten dafür sind neben der Gerätestruktur auch das Nutzerverhalten, die Regelstrategien, das thermische Gebäudeverhalten und das Wetter.

Die Einteilung der elektrischen Verbraucher erfolgte in die Kategorien Infrastruktur, Beleuchtung und Peripherie. Die Aufteilung erfolgte nicht zuletzt aufgrund der Einflussfaktoren auf den Lastgang. Geräte der Infrastruktur sind vom Wetter unabhängig. Neben der Effizienz der Geräte spielt hier hauptsächlich das Nutzerverhalten eine tragende Rolle. Bei der Beleuchtung ist daneben auch die Versorgung mit Tageslicht von Bedeutung. Diese wurde über simulierte Tageslichtfaktoren sowie über die Globalstrahlung ermittelt. Das Wetter ist auch die Haupteinflussgröße der Geräte der Peripherie. Der thermische Lastgang eines Standardgebäudes wurde im Gebäudesimulationstool TRNSYS ermittelt und der dazu passende elektrische Lastgang modelliert.

Es konnte gezeigt werden, dass ohne Optimierung der Lastgänge nahezu der gesamte elektrische Energiebedarf zu Zeiten hoher Strompreise entsteht. Dabei wurde neben einem dreistöckigen Standardgebäude von drei Varianten hinsichtlich der Verbraucherstruktur ausgegangen. Bei der ersten Variante wurde von einem System ausgegangen, dass wenige Verbraucher mit Lastverschiebungspotential aufweist. Die Heizung des Gebäudes erfolgte weitgehend unabhängig von elektrischen Verbrauchern. An den Arbeitsplätzen wurden Desktops verwendet, Notebooks mit integriertem Akku kamen nicht zum Einsatz. Bei der zweiten Variante wurden wenn möglich Verbraucher mit Lastverschiebungspotential verwendet. Die dritte Variante ähnelt der Variante zwei. Hier wurde jedoch versucht, Effizienzpotentiale abseits der Lastverschiebung auszunutzen. Zudem wurden bei allen Varianten die Fensterflächenanteile sowie die Wärmedämmung variiert.

Es konnte anhand von virtuellen Strompreisen, die sich am Preis an der Strombörse EXAA orientieren, gezeigt werden, dass bei allen Varianten Kosteneinsparungspotential besteht, auch wenn dies teilweise einher geht mit einem höheren Energieverbrauch.

Ebenfalls untersucht wurde der Einsatz von dezentralen Erzeugungsanlagen auf den elektrischen Lastgang. Hier lässt sich keine generelle Aussage darüber treffen, ob sich dadurch der durchschnittliche Strompreis verringert. Augenscheinlich ist jedoch, dass die Erzeugung der PV-Anlage einher geht mit Zeiten hoher Strompreise.

Mit der Simulation des Einsatzes von thermischen und elektrischen Speichern konnte gezeigt werden, dass sich dadurch der Bezug elektrischer Leistung zu Zeiten hoher Strompreise ebenfalls gravierend senken lässt.

6 LITERATUR

- Alcatel (2011): Jalousieantriebe - Baureihe D370/D470, Datenblatt, Alcatel SEL AG, Bonndorf, Deutschland
- Altenbernd, G. und Möller, W. (2011): Leistungsflüsse in Niederspannungsnetzwerken, Leibniz Universität Hannover, Präsentation, Erfahrungswert Gleichzeitigkeitsfaktor
- BMLFUW (2011): Topprodukte.at – Projektoren, <http://www.topprodukte.at/>, aufgerufen am 18.05.2011 um 19:00, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien
- Bogner, T. (2011): Stellungnahme Energy Star Comment, Power Consumption Measurement for a Desktop PC, Österreichische Energieagentur, Wien
- Braun (2011): Kleinwindanlagen ANTARIS 6,0 kW - Technische Daten, <http://www.braun-windturbinen.com/antaris6.html>, aufgerufen am 27.08.2011 um 22:30, Braun Windturbinen GmbH, Nauroth, Deutschland
- Brauner, G.; Poepl, G.; Einfalt, A.; Tiefgraber, D. (2007): Balancing of Fluctuating Regenerative Generation by DSM, TU Wien, Wien
- Bukvic-Schäfer, A. (2007): Lastmanagement – Nutzung der Thermischen Kapazität von Gebäuden als nichtelektrischer Energiespeicher in elektrischen Versorgungsnetzen, Universität Kassel, Kassel, Deutschland
- DIN 18599-4 (2007): Vornorm Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 4: Nutz- und Endenergiebedarf für Beleuchtung, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Deutschland
- DIN 18599-10 (2007): Vornorm Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Deutschland
- DIN EN 50304 (2010): Elektrische Herde, Kochmulden, Backöfen und Grillgeräte für den Hausgebrauch - Verfahren zur Messung der Gebrauchseigenschaften, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Deutschland
- e-control (2011): Betriebsstatistik 2011 – Täglicher Belastungsablauf, <http://www.e-control.at/de/statistik/strom/betriebsstatistik/betriebsstatistik2011>, aufgerufen am 02.04.2011 um 13:00, Energie-Control Austria, Wien
- Eckey, H.; Kosfeld, R.; Türck, M. (2005): Wahrscheinlichkeitsrechnung und Induktive Statistik, 1. Auflage, GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, Deutschland, S. 112
- EIWOG (2010): Elektrizitätswirtschafts- und -organisationsgesetz 2010 und Energiecontrol-Gesetz, § 17
- Energy Star (2009): EnergyStar Version 1.0 Program Requirements for Computer Servers, Umweltschutzbehörde und Energiedepartement der Vereinigten Staaten, Washington, USA

- Energy Star (2011a): History of Energystar, http://www.energystar.gov/index.cfm?c=about.ab_history, aufgerufen am 29.04.2011 um 18:00, Umweltschutzbehörde und Energiedepartement der Vereinigten Staaten, Washington, USA
- Energy Star (2011b): Find Energy Star Products, http://www.energystar.gov/index.cfm?fuseaction=find_a_product.showProductGroup&pgw_code=CO, aufgerufen am 29.04.2011 um 19:00, Umweltschutzbehörde und Energiedepartement der Vereinigten Staaten, Washington, USA
- Energy Star (2011c): Answering Machines & Cordless Phones Key Product Criteria, http://www.energystar.gov/index.cfm?c=phones.pr_crit_phones aufgerufen am 29.05.2011 um 11:00, Umweltschutzbehörde und Energiedepartement der Vereinigten Staaten, Washington, USA
- EXAA (2011): EXAA Spotpreise 2011, http://www.exaa.at/market/historical/austria_germany/ aufgerufen am 12.04.2011 um 19:00, Energy Exchange Austria GmbH, Wien
- Europäische Kommission (2009a): Beschluss 2009/489/EG der Europäischen Kommission zur Festlegung des Standpunkts der Gemeinschaft für einen Beschluss der nach dem Abkommen zwischen der Regierung der Vereinigten Staaten von Amerika und der Europäischen Gemeinschaft über die Koordinierung von Kennzeichnungsprogrammen für Strom sparende Bürogeräte eingesetzten Verwaltungsorgane über die Änderung der Spezifikationen für Computer in Anhang C Teil VIII des Abkommens, Brüssel, Belgien
- Europäische Kommission (2009b): Beschluss 2009/789/EG der Europäischen Kommission zur Festlegung des Standpunkts der Gemeinschaft für einen Beschluss der nach dem Abkommen zwischen der Regierung der Vereinigten Staaten von Amerika und der Europäischen Gemeinschaft über die Koordinierung von Kennzeichnungsprogrammen für Strom sparende Bürogeräte eingesetzten Verwaltungsorgane über die Änderung der Spezifikationen für Computerbildschirme in Anhang C Teil II des Abkommens, Brüssel, Belgien
- Europäische Kommission (2009c): Beschluss 2009/347/EG der Europäischen Kommission zur Festlegung des Standpunkts der Gemeinschaft für einen Beschluss der nach dem Abkommen zwischen der Regierung der Vereinigten Staaten von Amerika und der Europäischen Gemeinschaft über die Koordinierung von Kennzeichnungsprogrammen für Strom sparende Bürogeräte eingesetzten Verwaltungsorgane über die Änderung der Spezifikationen für bildgebende Geräte in Anhang C Teil VII des Abkommens, Brüssel, Belgien
- Europäisches Parlament (2006): Richtlinie 2006/32/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über Endenergieeffizienz und Energiedienstleistungen, Artikel 13, Straßburg, Frankreich
- Europäischer Rat (2003): Beschluss 2003/269/EC des Europäischen Rates über den Abschluss, im Namen der Gemeinschaft, des Abkommens zwischen der Regierung der Vereinigten Staaten von Amerika und der Europäischen Gemeinschaft über die Koordinierung von Kennzeichnungsprogrammen für Strom sparende Bürogeräte, Luxemburg, Luxemburg

- Fördergemeinschaft Gutes Licht (Hrsg.) (2008): licht.wissen 01 – Die Beleuchtung mit künstlichem Licht, Frankfurt, Deutschland
- Frey, G.; Schulz, W.; Horst, J.; Leprich, U. (2007): Studie zu den Energieeffizienzpotentialen durch Ersatz von elektrischem Strom im Raumwärmebereich, IZES GmbH, Saarbrücken, Deutschland
- Heimrath, R. (2009): Einführung TRNSYS, Lehrveranstaltungsunterlage, TU Graz
- Hennings, D.; Hinz, E.; Steinmüller, B.; Großklos, M. (2000): Leitfaden Elektrische Energie im Hochbau, Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, Deutschland, S. 36ff
- Hiller, D.; Neuburger, C.; Löffler, S.; Schweizer, M. (2007): Windenergie, Präsentationsunterlage Seminar Energie & Umwelt - eine Herausforderung für Wissenschaft und Ethik, Eberhard Karls Universität Tübingen, Tübingen, Deutschland
- Inschlag, F. (2011): Simulation des energetischen Verhaltens von Bürogebäuden mittels TRNSYS, Ausgabedatei, FH Burgenland, Pinkafeld
- Intel (2011): Enhanced Intel Speed Step Technology – How to Document, <http://www.intel.com/cd/channel/reseller/asmo-na/eng/203838.htm#overview>, aufgerufen am 10.05.2011 um 10:00, Intel Corporation, Santa Clara, USA
- Jossen, A.; Weydanz, W. (2006): Moderne Akkumulatoren richtig einsetzen, Reichardt Verlag, Untermeitingen, Deutschland
- Juwi (2008): Das Energieeffizienteste Bürogebäude der Welt – Sonderheft zum Neubau der Firmenzentrale in Wörrstadt, juwi Holding AG, Wörrstadt, Deutschland
- Köchling, C. und Knerrmann, C. (2008): PC vs. Thin Client, Fraunhofer Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT, Oberhausen, Deutschland, S. 9-11
- Krenksi, U. (2011): Leistungsbedarf für Antriebsmotoren von Sorptions- und Wärmerückgewinnungsrädern, persönliche Mitteilung am 08.08.2011 um 13:00, Klingenburg GmbH, Gladbeck, Deutschland
- Krottil, R. (2011): Umrechnung des Anteils der elektrischen Antriebsleistung im Kältebetrieb auf den Anteil im Wärmepumpenbetrieb, persönliche Mitteilung am 04.08.2011 um 15:00, FH Burgenland, Pinkafeld
- Leimer, H. (2011): Thermisch-energetische Gebäudesimulation – Möglichkeiten zur Bestimmung des zu erwartenden Raumklimas bei der Planung und Instandsetzung von Gebäuden, BBS Institut, Wolfenbüttel, Deutschland
- Lünsdorf, O. und Sonnenschein, M. (2009): Lastadaption von Haushaltsgeräten durch Verbundsteuerung, Proceeding 3. Symposium des FEN, Oldenburg, Deutschland, S. 71-83
- Merz, H.; Hansemann T.; Hübner, C. (2007): Gebäudeautomation – Kommunikationssysteme mit EIB/KNX, LON und BACnet, Hanser Verlag, München, Deutschland, S. 74ff

- Nipkow, J. (2009): Messmethode und Berechnungsschema für den Elektrizitätsverbrauch von Kaffeemaschinen für die Nutzung im Haushalt, Topten International Group TIG, Zürich, Schweiz, S. 10
- Notebookakkus (2011): Versandhandel für Notebookakkus, www.notebookakkus.de, Aufgerufen am 18.08.2011 um 17:30, Giseke GmbH & Co KG, Berlin, Deutschland
- ÖNORM H 7500 (2006): Heizungssysteme in Gebäuden – Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast, Österreichisches Normungsinstitut, Wien
- ÖNORM EN 13779 (2007): Lüftung von Nicht-Wohngebäuden, Österreichisches Normungsinstitut, Wien
- ÖNORM EN 1838 (1999): Angewandte Lichttechnik – Notbeleuchtung, Österreichisches Normungsinstitut, Wien
- ÖNORM H 1946-1 (1999): Wärmetechnisches Verhalten von Bauprodukten und Bauteilen - Teil 1 Allgemeingültige Regeln, Österreichisches Normungsinstitut, Wien
- ÖNORM H 5058 (2010): Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden – Kühltechnik – Energiebedarf, Österreichisches Normungsinstitut, Wien
- Osram (2011): Vorteile durch den Einsatz dimmbarer Leuchten mit Quicktronic Intelligent (DALI) DIM, http://www.osram.de/osram_de/Professionals/EVG/EVG_fuer_FL_und_CFL/EVG_mit_Dimmfunktion_und_DALI/Vorteile_QTi_DIM_dimmbare_Leuchten_/index.html#b, aufgerufen am 23.08.2011 um 19:30, Osram AG, München, Deutschland
- Pink, W. (2007): Absorptionstechnologie im kleinen Leistungsbereich, Präsentation Tagung Pansol Eisenstadt, 15.05.2007, Pink GmbH, Langenwang
- Producto AG (2011a): Mikrowellengeräte, http://www.testberichte.de/testsieger/level_3_kleine_haushaltsgeraete_mikrowellen_306.html, aufgerufen am 20.05.2011 um 11:30, Producto AG, Berlin, Deutschland
- Producto AG (2011b): Eco Top Ten – Geschirrspülmaschinen, <http://www.testberichte.de/d/read-swf/185688.html>, aufgerufen am 28.05.2011 um 13:30, Producto AG, Berlin, Deutschland
- Producto AG (2011c): Ratgeber Wasserkocher – Fassungsvermögen und Leistung, <http://haushalt.testberichte.de/2008/10/23/ratgeber-wasserkocher-fassungsvermoegen-und-leistung/>, aufgerufen am 29.05.2011 um 17:00, Producto AG, Berlin, Deutschland
- Radgen, P. (2007): Zukunftsmarkt Elektrische Energiespeicherung – Fallstudie im Auftrag des Umweltbundesamtes, Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung, Karlsruhe, Deutschland
- Ranft, F.; Repke, I.; Frohn, B.; Weinreich, K. (2007): Neubau eines energetisch optimierten Bürogebäudes, Fachhochschule Köln, Köln, Deutschland
- Ressourcenschutz (Hrsg.) (2011): BHKW-Check – Handbuch zur Ermittlung von Einsparpotentialen durch den Einsatz von Blockheizkraftwerken, Unternehmen für Ressourcenschutz, Hamburg, Deutschland

- Rössel, T.; Hausladen, G.; Wagner, U.; Hamacher, T.; Jungwirth J. (2011): Lastmanagement in Nichtwohngebäuden, Vortrag Berliner Energietage 18.-20.Mai 2011, Berlin, Deutschland
- Ruhstrat, A., Finke, H. (2010): Planungsgrundlagen Notbeleuchtung, Ruhstrat GmbH, Bovenden, Deutschland
- Rummich, E. (2009): Energiespeicher Grundlagen, Komponenten, Systeme und Anwendungen, Expert Verlag, Renningen, Deutschland
- Schramek, E. (Hrsg.) (2009a): Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik - Recknagel 2009/2010; 74. Auflage; Oldenbourg Industrieverlag, München, Deutschland, S. 137 - 138
- Schramek, E. (Hrsg.) (2009b): Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik - Recknagel 2009/2010; 74. Auflage; Oldenbourg Industrieverlag, München, Deutschland, S. 922ff
- Schramek, E. (Hrsg.) (2009c): Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik - Recknagel 2009/2010; 74. Auflage; Oldenbourg Industrieverlag, München, Deutschland, S. 973ff
- Schramek, E. (Hrsg.) (2009d): Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik - Recknagel 2009/2010; 74. Auflage; Oldenbourg Industrieverlag, München, Deutschland, S. 423
- Schramek, E. (Hrsg.) (2009e): Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik - Recknagel 2009/2010; 74. Auflage; Oldenbourg Industrieverlag, München, Deutschland, S. 131-134
- Schramek, E. (Hrsg.) (2009f): Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik - Recknagel 2009/2010; 74. Auflage; Oldenbourg Industrieverlag, München, Deutschland, S. 153-158
- Schramek, E. (Hrsg.) (2009g): Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik - Recknagel 2009/2010; 74. Auflage; Oldenbourg Industrieverlag, München, Deutschland, S. 1453ff
- Schramek, E. (Hrsg.) (2009h): Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik - Recknagel 2009/2010; 74. Auflage; Oldenbourg Industrieverlag, München, Deutschland, S. 469ff
- Schramek, E. (Hrsg.) (2009i): Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik - Recknagel 2009/2010; 74. Auflage; Oldenbourg Industrieverlag, München, Deutschland, S. 1511ff
- Schramek, E. (Hrsg.) (2009j): Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik - Recknagel 2009/2010; 74. Auflage; Oldenbourg Industrieverlag, München, Deutschland, S. 1520ff
- Schramek, E. (Hrsg.) (2009k): Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik - Recknagel 2009/2010; 74. Auflage; Oldenbourg Industrieverlag, München, Deutschland, S. 1282
- Schramek, E. (Hrsg.) (2009l): Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik - Recknagel 2009/2010; 74. Auflage; Oldenbourg Industrieverlag, München, Deutschland, S. 1020ff

- Schramek, E. (Hrsg.) (2009m): Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik - Recknagel 2009/2010; 74. Auflage; Oldenbourg Industrieverlag, München, Deutschland, S. 908ff
- Schuster, T (2008): Aufbau und Betrieb eines dezentralen Heizkraftwerks zur Versorgung eines Mehrfamilienhauses, Proceeding 10. Symposium Energieinnovation, 13.-15.02.2008, TU Graz
- Skovgaard, A., Nielsen, C. (2004): Pumpenhandbuch; Grundfos Management A/S, Erkrath, Deutschland
- SMA (2011): Sunny Mini Central 4600A / 5000A / 6000A – Technische Daten, <http://www.sma.de/de/produkte/solar-wechselrichter/sunny-mini-central/sunny-mini-central-4600a-5000a-6000a.html> aufgerufen am 26.08.2011 um 17:40, SMA Solar Technology AG, Niesetal, Deutschland
- SNT-VO (2010): Systemnutzungstarife-Verordnung der Energie-Control Kommission 2010, § 7
- Solon (2011): Solon 230/07 Polykristalline Solarmodule, Datenblatt, http://www.solon.com/export/sites/default/solonse.com/_downloads/products/download-center/modules/SOLON-Blue-230-07/datasheet/SOLON-Blue-230-07-Datasheet_de.pdf aufgerufen am 26.08.2011 um 17:30, Solon SE, Berlin, Deutschland
- SPEC (2011): All Published SPECpower_ssj2008 Results, http://www.spec.org/power_ssj2008/results/power_ssj2008.html, Aufgerufen am 29.05.2011 um 13:00, SPEC Headquarters, Gainesville, USA
- Stadler, M.; Krause, W.; Sonnenschein, M.; Vogel, U. (2007): The Adaptive Fridge – Comparing different control schemes for enhancing load shifting of electricity demand, Proceeding 21st Conference on Informatics for Environmental Protection – Enviroinfo, Warschau, Polen, S. 199-206
- Stiftung Warentest (2008): Test Mikrowellen, Test 08/2008, Berlin, Deutschland
- Stumpf, W. (2011): Gebäudeplan des Standardgebäudes, CAD-Plan, FH Burgenland, Pinkafeld
- Thomas, B. (2007): Miniblockheizkraftwerke - Grundlagen, Gerätetechnik, Betriebsdaten, Vogel Buchverlag, Würzburg, Deutschland
- VDI 4707 (2007): Aufzüge – Energieeffizienz, VDI – Gesellschaft Technische Gebäudeausrüstung, Band 5: Aufzugstechnik, Düsseldorf, Deutschland
- Wolf (2011): Sorptionsrad, http://www.wolf-geisenfeld.de/Heizung-_Lueftung-_Klimatechnik-Produkte-Klimageraete_Zentral-Technik-DEC-Anlagen--177.htm, aufgerufen am 05.08.2011 um 13:45, Wolf Anlagentechnik GmbH & Co KG, Geisenfeld, Deutschland

ANHANG

A.1 Tageslichtquotienten freie Aufstellung

Messpunkte	154,00			105,00			63,00		119,00			63,00			63,00			81,00			1,00	1,00		
Fläche [m²]	126,54			15,54			15,54		32,19			16,10			24,80			17,40			49,25	32,19		
	B1			B2			B3		B4			B5			B6			B7			Gang	Stiegenhaus		
Messpunkte	64,00	63,00	27,00	30,00	30,00	45,00	43,00	20,00	34,00	34,00	51,00	18,00	27,00	18,00	36,00	27,00	27,00	27,00	27,00					
Fläche [m²]	52,59	51,77	22,19	4,44	4,44	6,66	10,61	4,93	9,20	9,20	13,80	4,60	6,90	4,60	14,17	10,63	5,80	5,80	5,80	49,25				32,19
Fall	Gut	Mitte	Schlecht	Gut	Mitte	Schlecht	Gut	Schlecht	Gut	Mitte	Schlecht	Gut	Mitte	Schlecht	Gut	Schlecht	Gut	Mitte	Schlecht	-	-			
30f offen	7,85	1,13	0,45	10,20	5,62	2,17	7,60	1,55	8,43	2,90	0,87	7,47	1,97	0,56	8,01	1,05	5,84	1,04	0,42					
30f 70%	2,36	0,34	0,13	3,05	1,69	0,65	2,28	0,47	2,53	0,87	0,26	2,24	0,59	0,17	2,40	0,32	1,75	0,31	0,13					
Ostzu	6,88	1,03	0,43				5,52	1,07																
Südzu							4,39	0,95							5,66	0,79								
Westzu	6,83	1,04	0,42												4,72	0,57								
60f offen	11,72	2,28	1,06	17,53	8,64	4,12	13,75	3,07	15,07	5,14	1,77	13,92	3,56	1,19	13,14	2,18	10,73	1,98	0,89					
60f 70%	3,52	0,69	0,32	5,26	2,59	1,24	4,13	0,92	4,52	1,54	0,53	4,18	1,07	0,36	3,94	0,65	3,22	0,60	0,27					
Ostzu	10,30	2,11	0,97				9,80	2,12																
Südzu							8,10	1,85							8,25	1,21								
Westzu	10,30	2,14	0,94												8,25	1,21								
90f offen	14,30	3,58	1,75	18,90	10,70	5,97	16,40	4,73	16,70	6,98	2,73	15,50	5,00	1,85	15,60	3,33	12,30	3,16	1,37					
90f 70%	4,29	1,07	0,53	5,68	3,22	1,79	4,91	1,42	5,02	2,10	0,82	4,65	1,50	0,55	4,67	1,00	3,69	0,95	0,41					
Ostzu	12,60	3,31	1,61				11,70	3,25																
Südzu							9,63	2,89							10,50	2,45								
Westzu	12,50	3,35	1,56												9,71	1,88								

freie Aufstellung

A.2 Tageslichtquotienten verbaute Aufstellung

Messpunkte	154,00			105,00			63,00		119,00			63,00			63,00			81,00			1,00	1,00		
Fläche [m²]	126,54			15,54			15,54		32,19			16,10			24,80			17,40			49,25	32,19		
	B1			B2			B3		B4			B5			B6			B7			Gang	Stiegenhaus		
Messpunkte	64,00	63,00	27,00	30,00	30,00	45,00	43,00	20,00	34,00	34,00	51,00	18,00	27,00	18,00	36,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00				
Fläche [m²]	52,59	51,77	22,19	4,44	4,44	6,66	10,61	4,93	9,20	9,20	13,80	4,60	6,90	4,60	14,17	10,63	5,80	5,80	5,80	49,25	32,19			
Fall	Gut	Mitte	Schlecht	Gut	Mitte	Schlecht	Gut	Schlecht	Gut	Mitte	Schlecht	Gut	Mitte	Schlecht	Gut	Schlecht	Gut	Mitte	Schlecht	-	-			
30uoffen	3,56	0,71	0,35	7,53	1,96	0,96	4,50	1,19	4,07	0,88	0,49	3,54	0,71	0,32	4,57	0,74	2,37	0,47	0,28				unten	
60uoffen	6,34	1,39	0,70	12,10	4,79	1,86	8,84	2,30	8,50	1,74	0,90	7,67	1,36	0,61	8,10	1,43	5,37	0,86	0,48					
90uoffen	8,33	1,98	1,01	13,40	6,86	2,62	10,90	3,25	10,40	2,73	1,23	9,41	2,04	0,82	10,10	2,05	6,71	1,15	0,66					
30moffen	5,09	0,67	0,33	9,39	3,75	0,97	5,66	1,15	6,39	1,04	0,48	5,56	0,75	0,31	5,87	0,72	3,71	0,43	0,27				mitte	
60moffen	8,52	1,34	0,67	14,80	6,84	2,45	10,80	2,28	11,60	2,97	0,89	10,50	2,02	0,59	10,10	1,43	7,72	0,88	0,49					
90moffen	11,10	2,25	0,98	16,20	8,94	4,27	13,50	3,60	13,30	4,87	1,36	12,30	3,36	0,87	12,60	2,29	9,38	1,77	0,70					
30ooffen	7,70	1,03	0,39	10,30	5,55	2,00	7,61	1,55	8,45	2,70	0,75	7,43	1,82	0,47	7,94	1,00	5,67	0,94	0,38				verbaut oben	
30o70%	2,31	0,31	0,12	3,09	1,67	0,60	2,28	0,47	2,54	0,81	0,23	2,23	0,55	0,14	2,38	0,30	1,70	0,28	0,11					
Ostzu	6,76	0,94	0,38				5,47	1,05																
Südzu							4,40	0,97							5,60	0,74								
Westzu	6,67	0,95	0,36												4,71	0,55								
60ooffen	11,30	2,29	1,00	17,30	8,68	4,09	13,70	3,27	14,40	4,98	1,72	13,30	3,50	1,15	12,80	2,20	10,30	1,99	0,91					
60o70%	3,39	0,69	0,30	5,19	2,60	1,23	4,11	0,98	4,32	1,49	0,52	3,99	1,05	0,35	3,84	0,66	3,09	0,60	0,27					
Ostzu	9,93	2,09	0,97				9,67	2,22																
Südzu							8,03	2,00							8,55	1,62								
Westzu	9,85	2,11	0,94												8,15	1,23								
90ooffen	14,10	3,73	1,72	18,70	10,80	6,06	16,30	5,06	16,50	6,91	2,74	15,10	5,03	1,90	15,50	3,48	12,00	3,25	1,41					
90o70%	4,23	1,12	0,52	5,61	3,24	1,82	4,89	1,52	4,95	2,07	0,82	4,53	1,51	0,57	4,65	1,04	3,60	0,98	0,42					
Ostzu	12,40	3,40	1,67				11,50	3,45																
Südzu							9,68	3,12							10,40	2,53								
Westzu	12,20	3,44	1,61												9,74	1,97								

A.3 Übersicht untersuchte Varianten

Variante	Fensterflächenanteil [%]	U-Wert [W/m ² K]	Verbauung	Beschreibung der Kategorien		
				Infrastruktur	Beleuchtung	Peripherie
Standard A	30 / 60 / 90	0,15 / 0,35 / 0,55	frei / verbaut	<ul style="list-style-type: none"> • Desktops Kategorie D • Bildschirme Kategorie 2 • 1 Telefon pro Arbeitsplatz • 1 s/w-Drucker pro Zimmer • 1 Farbmehrzweckgerät pro Etage • 1 Beamer im Gebäude • 3 Mikrowellenherde • 3 Elektroherde • 3 Geschirrspüler • 3 Kaffeemaschinen • 3 Kühlschränke • 3 Wasserkocher 	<ul style="list-style-type: none"> • Elektrische Bewertungsleistung Büros: 15 W/m² • Elektrische Bewertungsleistung Küche: 10 W/m² • Elektrische Bewertungsleistung Verkehrsflächen und WCs: 4,5 W/m² • Keine Automatische Präsenzkontrolle • Keine Tageslichtregelung 	<ul style="list-style-type: none"> • Wärmeerzeugung nicht elektrisch • Keine aktive Kühlung • Keine mechanische Lüftung • Wärmeverteilung über Heizungswasserpumpen • Zentrale Warmwassererzeugung, Warmwasserzirkulationspumpe im Dauerbetrieb • Nachtabsenkung im Heizfall
Standard B	30 / 60 / 90	0,15 / 0,35 / 0,55	frei / verbaut	<p>Abweichend von Standard A:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Keine Desktops und Bildschirme • Verwendung von Notebooks Kategorie C 	Analog Standard A	<ul style="list-style-type: none"> • Heizung elektrisch oder mit Wärmepumpen verschiedener Bauart • Kühlung mit Kältemaschinen verschiedener Bauart

Variante	Fensterflächenanteil [%]	U-Wert [W/m ² K]	Verbauung	Beschreibung der Kategorien		
				Infrastruktur	Beleuchtung	Peripherie
						<ul style="list-style-type: none"> • Energieverteilung mit Wasser • Mechanische Lüftung mit Ventilationssystem im Dauerbetrieb • Nachtabsenkung im Heizfall • Dezentrale Warmwasserbereitstellung
Standard C	30 / 60 / 90	0,15 / 0,35 / 0,55	frei / verbaut	Analog Standard B	<ul style="list-style-type: none"> • Elektrische Bewertungsleistung Büros: 8 W/m² • Elektrische Bewertungsleistung Küche: 8 W/m² • Elektrische Bewertungsleistung Verkehrsflächen und WCs: 4,5 W/m² • Automatische Präsenzkontrolle • Keine Tageslichtregelung 	Analog Standard B jedoch Ausnutzung von freier Kühlung
Optimiert A	30 / 60 / 90	0,15 / 0,35 / 0,55	frei / verbaut	Ausgehend von Standardvariante A	Analog Standard A jedoch automatische Präsenzkontrolle und	Analog Standard A jedoch Abschaltung der Warmwasserzirkulati-

Variante	Fensterflächenanteil [%]	U-Wert [W/m ² K]	Verbauung	Beschreibung der Kategorien		
				Infrastruktur	Beleuchtung	Peripherie
				Ausnutzung Lastverschiebungspotential: <ul style="list-style-type: none"> • Kühlschränke • Geschirrspüler 	Tageslichtregelung	Wärmepumpe außerhalb der Nutzungszeit
Optimiert B	30 / 60 / 90	0,15 / 0,35 / 0,55	frei	Ausgehend von Standardvariante B Ausnutzung Lastverschiebungspotential: <ul style="list-style-type: none"> • Kühlschränke • Geschirrspüler • Notebooks 	Analog optimiert A	Ausgehend von Standardvariante B Nutzung von Lastverschiebungspotential durch thermische Lastverschiebung. Nähere Untersuchung der Gebäudevariante mit 60 % Fensterflächenanteil und einem U-Wert von 0,15 W/m ² K mit der Konstellation „Luft“
Optimiert C	60	0,15	Frei	Analog optimiert B	Analog optimiert A bei Anpassung der Bewertungsleistungen	Analog optimiert B jedoch Ausnutzung von freier Kühlung.
Kombination mit Wind	60	0,15	Frei	Analog bisherige Varianten, jedoch Kombination mit Windanlage mit 10 kW Nennleistung		
Kombination mit PV	60	0,15	Frei	Analog bisherige Varianten, jedoch Kombination mit PV-Anlage mit 10 kW Nennleistung		
Optimiert B modifiziert + Speicher	60	0,15	Frei	Analog optimierte Variante B ohne thermische Lastverschiebung, sowie inklusive Kombination mit thermischen und elektrischen Speichern		

A.4 Aufbau der Dateien zur Lastgangmodellierung

An dieser Stelle soll der grundsätzliche Aufbau der Dateien des Tabellenkalkulationsprogramms zur Lastgangmodellierung gezeigt werden. Die ersten vier Spalten sind in jeder Simulation gleich (Datum, Zeit, Wochentag, Strompreis). In den Spalten danach folgen die spezifischen Berechnungen der einzelnen Verbraucher bzw. die schrittweise Zusammenführung der einzelnen Lastgänge zu einem gesamten Lastgang. Jede Datei hat 35.040 Zeilen, eine für jedes Viertelstundenintervall des Jahres. Durch die unterschiedlichen Verbraucher und Varianten wurden im Zuge der Arbeit eine Vielzahl an Dateien nach diesem Prinzip erstellt.

	A	B	C	D	E	F	G
1							
2						11415,95166	10407,08183
3				Kosten		1414,669603	454,4533833
4				Verbrauch		18217,18561	5660,358153
5	Datum	Zeit	Wochentag	Strompreis [€/MWh]	B1.1	Infrastruktur	Bel. 30 frei
6	01.01.2008	00:00:00	Mittwoch	32,31	0	814,1701843	0
7	01.01.2008	00:15:00	Mittwoch	32,31	0	576,7884332	0
8	01.01.2008	00:30:00	Mittwoch	32,31	0	542,6708295	0
9	01.01.2008	00:45:00	Mittwoch	32,31	0	582,8831797	0
10	01.01.2008	01:00:00	Mittwoch	23,32	0	580,9569124	0
11	01.01.2008	01:15:00	Mittwoch	23,32	0	590,7707373	0
12	01.01.2008	01:30:00	Mittwoch	23,32	0	465,3362673	0
13	01.01.2008	01:45:00	Mittwoch	23,32	0	517,5482488	0
14	01.01.2008	02:00:00	Mittwoch	19,33	0	578,1182028	0
15	01.01.2008	02:15:00	Mittwoch	19,33	0	781,8251152	0
16	01.01.2008	02:30:00	Mittwoch	19,33	0	595,97	0
17	01.01.2008	02:45:00	Mittwoch	19,33	0	569,4523963	0
18	01.01.2008	03:00:00	Mittwoch	16,93	0	467,7126728	0
19	01.01.2008	03:15:00	Mittwoch	16,93	0	485,2194009	0
20	01.01.2008	03:30:00	Mittwoch	16,93	0	592,5919355	0
21	01.01.2008	03:45:00	Mittwoch	16,93	0	465,6809677	0
22	01.01.2008	04:00:00	Mittwoch	14,81	0	701,2864977	0
23	01.01.2008	04:15:00	Mittwoch	14,81	0	508,9996774	0
24	01.01.2008	04:30:00	Mittwoch	14,81	0	536,9771889	0
25	01.01.2008	04:45:00	Mittwoch	14,81	0	610,8975576	0
26	01.01.2008	05:00:00	Mittwoch	19,32	0	512,8197696	0
27	01.01.2008	05:15:00	Mittwoch	19,32	0	610,6623502	0
28	01.01.2008	05:30:00	Mittwoch	19,32	0	684,3714747	0
29	01.01.2008	05:45:00	Mittwoch	19,32	0	525,334424	0
30	01.01.2008	06:00:00	Mittwoch	8,52	0	520,0382028	0
31	01.01.2008	06:15:00	Mittwoch	8,52	0	603,7926728	0
32	01.01.2008	06:30:00	Mittwoch	8,52	0	593,0619816	0
33	01.01.2008	06:45:00	Mittwoch	8,52	0	670,5996774	0
34	01.01.2008	07:00:00	Mittwoch	10,00	0	605,120120	0

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Hiermit erkläre ich ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig angefertigt, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Ort, Datum

Unterschrift