

Academic Dissertation

Analysis of the electrical energy requirements of the GSI facility

Ripp, Christopher (Technische Universität Darmstadt)

30 October 2013



The EuCARD-2 Enhanced European Coordination for Accelerator Research & Development project is co-funded by the partners and the European Commission under Capacities 7th Framework Programme, Grant Agreement 312453.

This work is part of EuCARD-2 Work Package 3: **Energy Efficiency (EnEfficient)**.

The electronic version of this EuCARD-2 Publication is available via the EuCARD-2 web site <http://eucard2.web.cern.ch/> or on the CERN Document Server at the following URL:
<<http://cds.cern.ch/search?p=CERN-THESIS-2013-414>>

Analyse des elektrischen Energiebedarfs der GSI

Analysis of the electrical energy requirements of the GSI facility

Masterthesis von Christopher Ripp, B.Sc.

Matrikelnummer: 1322622

Darmstadt, den 30.10.2013



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Masterthesis – Analyse des elektrischen Energiebedarfs der GSI
master's thesis – Analysis of the electrical energy requirements of the GSI facility

Vorgelegte Masterthesis von

Christopher Ripp, B.Sc.

Geboren in Frankfurt am Main am 21.11.1985

1. Gutachter: Professor Dr. Oliver Boine-Frankenheim
2. Gutachter: Professor Dr. Jutta Hanson

Betreuer: Dr. Jens Stadlmann

Tag der Einreichung:

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen	2
2.1	GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH	2
2.2	Energiemanagement und ISO 50001	3
2.3	Anbindung der GSI an das Hochspannungsnetz.....	4
2.4	Energiebedarf Allgemeinlastnetz vs. Pulslastnetz	4
2.5	Lastdaten und auswertungsrelevante Größen und Begriffe	5
2.5.1	Begriffsdefinition Grund- und Spitzenlast.....	5
2.5.2	Wirkleistung, Blindleistung und $\cos(\varphi)$	5
2.5.3	Erhebung von Messdaten	8
2.5.4	Fehlerabschätzung	9
2.5.5	Lastdiagramme	9
2.5.6	Lastdauerdiagramme.....	9
3	Auswertung und Analyse der Allgemeinlastdaten	11
3.1	Elektrischer Energiebedarf des C1-Netzes	11
3.2	Analyse der Lastgänge.....	13
3.2.1	„Peaks-Plateau-Modulation“	13
3.2.2	„Wochenend-Approximation“ und Bürobedarf.....	14
3.3	Analyse der Lastdauerdiagramme.....	16
3.3.1	Spitzenlastmanagement	16
3.3.2	Grundlast und Shutdown	17
4	Analyse der Niederspannungsebene	20
4.1	Aufbau der Niederspannungshauptverteilung (NSHV)	20
4.2	Analyse der Grundlast bzw. Stand-by-Leistung der GSI.....	23
4.2.1	Unterschied der Wintershutdownvarianten	23
4.2.2	Anteil der einzelnen NSHVen an der Grundlast	24
4.2.3	Identifikation von spezifischen NSHV Verbrauchern.....	26
4.2.4	Analyse der NSHV-Grundlast mittels Blindleistung und $\cos(\varphi)$	29
5	Modellierung der Leistungsbezüge der Komponenten der Beschleunigeranlage	33
5.1	Erläuterung der Messung von H. Vormann et. al.....	33
5.2	Modellierung des Energieverbrauchs der Jahre 2011 und 2012	34
5.2.1	Aufbau und Optimierung des Modells	35
5.2.2	Ergebnisse der Modellierung	36
6	Das Paul Scherrer Institut (PSI) – Ein kurzer internationaler Vergleich	39
7	Zusammenfassung und Ausblick	41
8	Anhang	43
9	Literaturverzeichnis	61

1 Einleitung

Die Veränderung auf dem deutschen Energiemarkt durch die Energiewende bringt eine Vielzahl von Problemen mit sich. Der stetig ansteigende Ausbau von erneuerbaren Energien und die daraus resultierende starke Schwankung der eingespeisten Energiemengen zwingen die Netzbetreiber zum Ausbau der Stromnetze [1]. Die dadurch verursachten Kosten lassen die Netznutzungsgebühren steigen, welche an die Endkunden weitergegeben werden. Ebenfalls stieg die EEG-Umlage (Erneuerbare-Energie-Gesetz) von 3,6 ct/kWh im Jahr 2012 über 5,3 ct/kWh im Jahr 2013 auf 6,3 ct/kWh für das Jahr 2014 [2], [3], [4]. Die extrem schnell steigenden Energiekosten zwingen die Verbraucher zur Erhöhung ihrer Energieeffizienz, um die laufenden Kosten so niedrig wie möglich zu halten [3]. Dies verlangt nach innovativen Ansätzen und Lösungen im unternehmenseigenen Energiemanagement. Besonders Forschungseinrichtungen mit großem Energiebedarf müssen eine höhere Energieeffizienz realisieren, um bei knappen Budgets ihrem Forschungsauftrag gerecht zu werden. Als großes Vorzeigeprojekt gilt das ESS (European Spallation Source) in Lund, Schweden. Die geplante Beschleunigeranlage realisiert Wärmerückgewinnung und produziert ein Teil ihres Energiebedarfs mittels Windkraftanlagen, die am gleichen Standort stehen [5]. Auch seitens der EU werden Projekte gezielt in diese Forschungsrichtung gefördert, zu nennen ist hier das Arbeitspaket „Energie Effizienz“ innerhalb des EuCARD-2 Projekts (European Coordination for Accelerator Research and Development) [6].

Diese Masterarbeit ist die erste Analyse des elektrischen Energiebedarfs der großtechnischen Beschleuniger Forschungseinrichtung GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH. Sie hat das Ziel, den Energiebedarf der GSI aufzuschlüsseln, eventuelle Optimierungsmöglichkeiten aufzuzeigen und ökonomisch sinnvolle Ansatzpunkte zur Steigerung der Energieeffizienz zu identifizieren. Der Bedarf an elektrischer Energie führt zu dem zweitgrößten Anteil der jährlich laufenden Kosten neben den Personalkosten. 2012 betrugen die Gesamtkosten für elektrische Energie 8,6 Mio.€. Aktuell befindet sich die Facility for Antiproton and Ion Research (FAIR) im Bau, das eine Erweiterung der bestehenden GSI Anlage bildet und den Energiebedarf nach ersten Schätzungen versechsbis- bis versiebenfacht wird [7]. Der erwartete zukünftige Bedarf an elektrischer Energie in Kombination mit den steigenden Preisen macht es notwendig, ein besseres Verständnis der Struktur des Energiebedarfs zu erlangen. Dies bedeutet zum einen die Aufschlüsselung des Energiebedarfs in die für Beschleunigerbetrieb notwendige und davon unabhängig benötigte Energie, wie z.B. für die Technische Gebäudeausrüstung (TGA), Arbeitsplatz PCs oder Beleuchtung. Zum anderen die Aufteilung des Bedarfs in Grundlast/Stand-by Modus der Anlage und in die zusätzliche benötigte Energiemenge während des Experimentierbetriebs.

Großtechnische Forschungseinrichtungen, wie die GSI, unterliegen hierbei einer besonderen Kontroverse, eine möglichst hohe Forschungsleistung zu erbringen bei gleichzeitig optimiertem Energiebedarf. Die zugrunde liegende Beschleunigerphysik gibt genaue Parameter der zum Betrieb einer solch komplexen Anlage benötigten Strukturen (Magnete, Vakuum, Hochfrequenz, etc.) vor, so dass am Prozess selbst kaum Optimierungsspielraum vorhanden ist. Die folgende Analyse ist daher neben der Aufschlüsselung des Energiebedarfs daraufhin ausgerichtet unnötige bezogene Leistung zu identifizieren.

2 Grundlagen

2.1 GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH

Die GSI betreibt eine großtechnische, weltweit einzigartige Schwerionenbeschleunigeranlage zur Forschung. Die Beschleunigeranlage bietet die einzigartige Möglichkeit, jedes beliebige chemische Element zu beschleunigen und mehrere Experimente gleichzeitig mit verschiedenen Ionensorten zu bedienen. Die Forschungsschwerpunkte sind Kern- und Atomphysik, Biophysik und Strahlmedizin, Plasmaphysik, Materialforschung und Beschleunigertechnologie. Zielsetzung ist es neue Erkenntnisse im Bereich der Struktur der Materie und der Entwicklung unseres Universums zu erlangen. Darüber hinaus werden neue Behandlungsmethoden in der Krebstherapie.

Gegründet wurde die GSI im Jahr 1969. Im Jahr 1975 folgten die ersten Experimente mit dem **Universal Linear Accelerator** (UNILAC). Dieser Teil der Anlage wird in der Aufteilung der elektrotechnischen Anlagen als Altbau bezeichnet. 1990 wurden das **Schwerionensynchrotron** (SIS-18), der **Experimentierspeicherring** (ESR) und der **Fragmentseparator** (FRS) für den Experimentierbetrieb freigegeben und bilden mit der dazugehörigen neuen Experimentierhalle II den momentan aktuellen Stand der GSI (siehe Abbildung 1). Dieser aus der Erweiterung hervorgegangener Gebäudekomplex wird in der Aufteilung der elektrotechnischen Anlagen als Neubau bezeichnet.

Die GSI ist ein national finanziertes Forschungsinstitut und wird zu 90 % vom Bund, zu 8 % vom Bundesland Hessen und zu je 1 % von Rheinland-Pfalz und dem Freistaat Thüringen finanziert. Das Gesamtbudget beträgt 108 Mio. €. Die Kosten für elektrische Energie beliefen sich 2012 auf 8,6 Mio. €, was 8 % des Budgets entsprochen hat. Im Jahresschnitt werden ca. 60 GWh elektrische Energie benötigt.

Es arbeiten ca. 1050 Mitarbeiter bei der GSI mit einer durchschnittlichen Wochenarbeitszeit von 40,5 Stunden inklusive 1,5 Stunden Pause. Eine Besonderheit stellt der Betrieb des Beschleunigers dar. In den Betriebsphasen arbeitet die Mannschaft des **Hauptkontrollraums** (HKR) rund um die Uhr teilweise über mehrere Wochen im Dreischichtbetrieb. Dabei werden

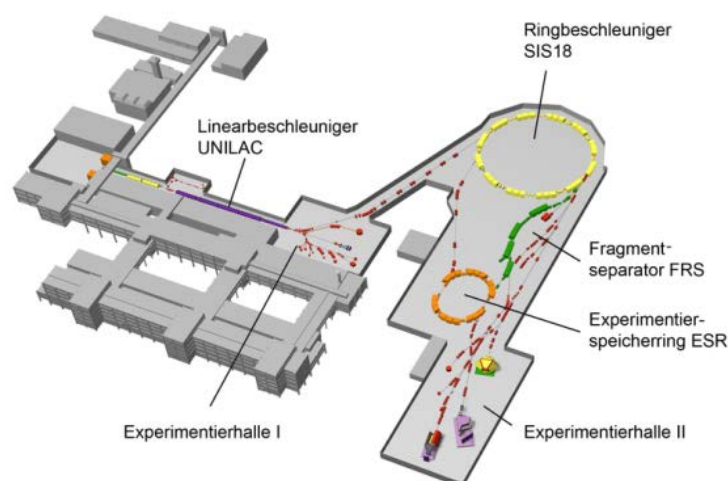


Abbildung 1: Übersicht über die GSI-Beschleunigeranlage mit UNILAC, der dazugehörigen Experimentierhalle I und dem 1990 neu eingeweihte Teil mit SIS-18, ESR, FRS und Experimentierhalle II .

abhängig von der Strahlzeitplanung mehrere Experimente parallel mit Strahl versorgt. Zu den fest angestellten Mitarbeitern kommen im Jahr etwa 1200 externe Wissenschaftler aus der ganzen Welt, die ihre Experimente bei der GSI durchführen.

2.2 Energiemanagement und ISO 50001

„Energiemanagement ist die vorausschauende, organisierte und systematisierte Koordination von Beschaffung, Wandlung, Verteilung und Nutzung von Energie zur Deckung der Anforderungen unter Berücksichtigung ökologischer und ökonomischer Zielsetzungen“ [8].

Mit der ISO 50001:2011 „Energy management systems – Requirements with guidance for use“ existiert ein international einheitlicher Rahmen für Energiemanagement, der Aufbau und Ausgestaltung von Energiemanagementsystemen festlegt [9], [10]. Der Erhalt einer solchen Zertifizierung, die die Einhaltung der Normen ausweist, ist mit Kosten und Aufwand verbunden, birgt einige Vorteile. Eine Zertifizierung sorgt für eine transparente und optimierte Nutzung der benötigten Energie. Dies hat den Vorteil, ökonomisch effizienter, ressourcen- und klimaschonender zu produzieren bzw. zu forschen.

Die ISO 50001 unterliegt, wie auch schon aus dem Qualitätsmanagement (EN ISO 9000 ff) bekannt, dem sogenannten Plan-Do-Check-Act (PDCA-Zyklus), siehe Abbildung 2, der eine dauerhafte Kontrolle und stetige Entwicklung des zugrunde liegenden Prozesses garantiert. Ebenso ermöglicht er einen definierten Einstieg für den Neuaufbau eines Managementsystems. Dieser erfolgt im „Plan“-Abschnitt des Zyklus, welcher die Erfassung des Ist-Zustandes beinhaltet. Genau an diesem Punkt, den Momentanzustand des Energieverbrauchs und die Verbrauchsstruktur herauszuarbeiten, setzt die vorliegende Arbeit an. Weiter dient die Zertifizierung nach ISO 50001 laut §41 des EEG als notwendige Voraussetzung zur Begrenzung der EEG-Umlage durch das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA), bei einem Energieverbrauch von mehr als 10 GWh pro Kalenderjahr [11]. Die Sonderregelung zur Begrenzung der EEG-Umlage ist nur für produzierendes Gewerbe bestimmt. Ob und inwiefern eine Forschungseinrichtung bzw. Beschleunigeranlage zu produzierendem Gewerbe gezählt werden kann, ist ungeklärt.

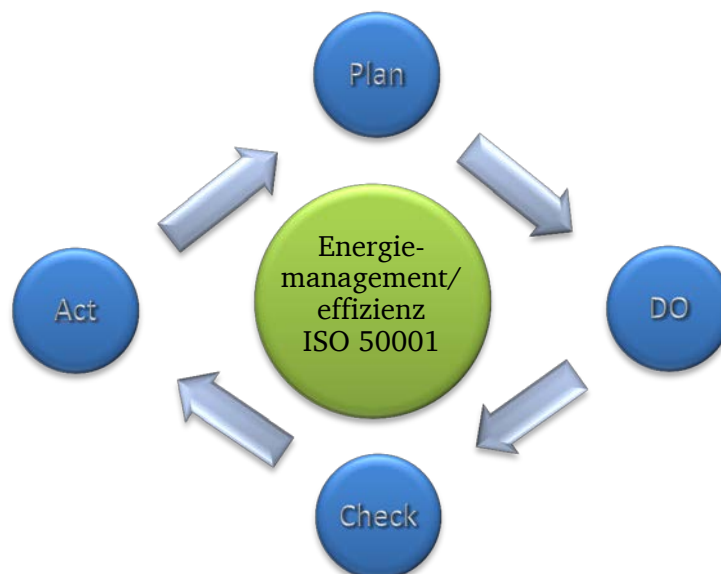


Abbildung 2: Schematisch dargestellter Plan-DO-Check-ACT-Zyklus (PDCA-Zyklus) der ISO 50001.

2.3 Anbindung der GSI an das Hochspannungsnetz

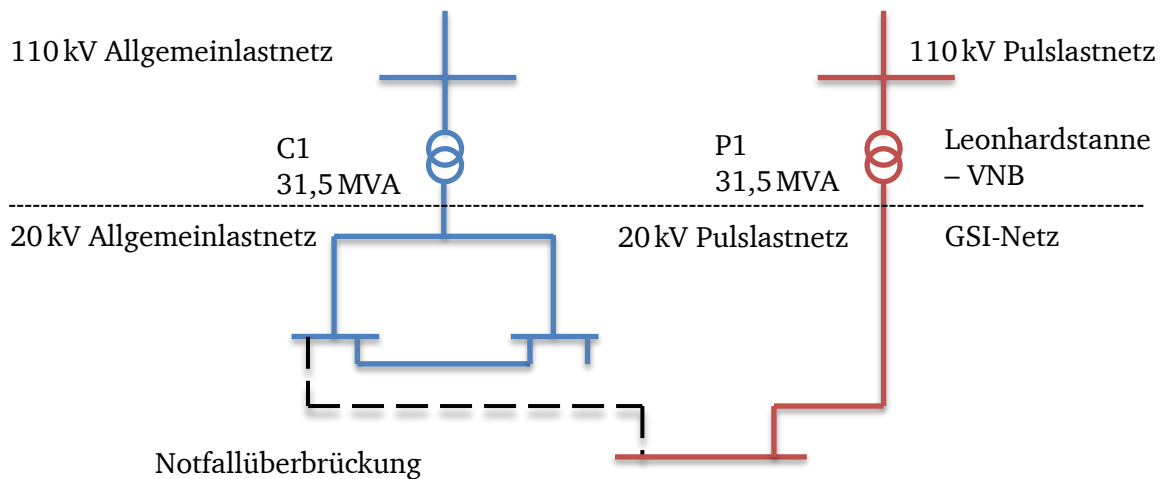


Abbildung 3: Schematische Darstellung der GSI-Stromnetze mit dem Gebiet Leonhardstanne, dem GSI Netz und den Leitungen des Allgemeinlastnetzes (intern, C1-Netz, in Blau dargestellt) und Pulslastnetzes (intern, P1-Netz, in Rot dargestellt).

Die GSI ist im Unterschied zu den meisten Stromverbrauchern an zwei Stromnetze angebunden: die intern bezeichneten C1- und P1- Netze (siehe Abbildung 3). Beide 110kV-Leitungen kommen vom ca. 3km entfernten Umspannwerk bei Urberach, in dem von 220kV auf 110kV transformiert wird. Der Standort der beiden 31,5MVA Transformatoren, die von der 110kV auf 20kV Ebene die Einspeisung in das GSI Netz realisieren, bilden das Gelände Leonhardstanne. Dieses ist kein GSI-Betriebsgelände, es gehört zum Betriebsgelände des Verteilnetzbetreibers (VNB). Das sogenannte Allgemeinlastnetz, intern C1-Netz, bildet die Grundversorgung der GSI. Dieses Netz versorgt sowohl alle klassischen Stromverbraucher, Lüftungs- und Kühlungsanlagen und die Hochfrequenztechnik für die Beschleunigerstrukturen, als auch alle Büro-, Sanitär- und Heizungseinrichtungen. Aufgrund der kurzen und sehr hohen Leistungsbezüge, bis zu 18MW für 0,5s, die für das Rampen der Magnete der Ringbeschleuniger SIS und des Experimentierspeicherrings ESR benötigt werden, ist die GSI zusätzlich über eine zweite Leitung an das sogenannte Pulslastnetz, intern P1-Netz, angebunden. Die sehr kurzen und extrem hohen Leistungsbezüge führen im Stromnetz zu Spannungs- und Frequenzschwankungen. Die Endverbraucher im Allgemeinlastnetz könnten Schäden erleiden.

2.4 Energiebedarf Allgemeinlastnetz vs. Pulslastnetz

Die GSI benötigt, wie im vorangegangenen Abschnitt 2.3 bereits erwähnt, aufgrund der speziellen Anforderung zwei verschiedene Anbindungen an das Stromnetz. Der Energiebedarf der beiden Netze ist genau gegensätzlich zur Höhe der maximalen Wirkleistungsbezüge. Im Pulslastnetz werden zwar bis zu 18MW Spitzenleistung benötigt, um die Magnete des SIS und des ESR zu rampen [12], im Allgemeinlastnetz hat die absolute Spitzenleistung hingegen „nur“ 12,8MW betragen, am 16.11.2010 um 15.30Uhr. Der Energiebedarf der beiden Netze ist hingegen genau umgekehrt. Tabelle 1 fasst den Energiebedarf der letzten drei Jahre zusammen. Der Anteil der im Pulslastnetz umgesetzten Energie beträgt im Jahresmittel 5,8GWh was 9,5% des Gesamtbedarfs entspricht. Der geringe Anteil macht eine Optimierung weniger attraktiv, da jeder Optimierungsversuch massiven Einfluss auf den Strahlbetrieb hätte und damit auf die Forschungsleistung. Die verbleibende Möglichkeit zur Optimierung des Energiebe-

Tabelle 1: Auflistung des Gesamtenergiebedarfs der GSI der letzten 3 Jahre und dessen Aufteilung auf die beiden Netze Puls und Allgemeinlast. Der Anteil des Pulslastnetzes am Gesamtbedarf beläuft sich im Jahresmittel auf 5,8 GWh bzw. 9,5%.

Jahr	Gesamtenergiebedarf	Pulslastnetz	prozentualer Anteil	Allgemeinlastnetz	prozentualer Anteil
2010	66,6 GWh	6,1 GWh	9,2%	60,5 GWh	90,8%
2011	54,6 GWh	4,4 GWh	8,1%	50,2 GWh	91,9%
2012	62,8 GWh	7,0 GWh	11,1%	55,8 GWh	88,9%
Ø	61,3 GWh	5,8 GWh	9,5%	55,5 GWh	90,5%

darfs des P1-Netzes ist an den einzelnen Komponenten wie z.B. an den Magnetnetzgeräten anzusetzen. Durch Modernisierung der Komponenten eine Erhöhung des Wirkungsgrades und damit eine Verbesserung der Energieeffizienz zu erreichen.

Aufgrund dieser Fakten beschränkt sich diese Arbeit im Weiteren auf die Betrachtung des C1-Netzes.

2.5 Lastdaten und auswertungsrelevante Größen und Begriffe

2.5.1 Begriffsdefinition Grund- und Spitzenlast

Als Grundlast definiert man die dauerhaft, d.h. 365 Tage im Jahr bezogene minimalste Leistung. Mittels der Formel

$$E = P \cdot t, \quad (1)$$

wobei E die Energie, P die Leistung und t die Zeit ist, lässt sich so die dadurch benötigte Energie berechnen. Der Grundlast-Energiebedarf ist in den meisten Fällen einer der größten Anteile des Gesamtenergiebedarfs und ist somit interessant für weitere Analysen unter der Prämisse die Energiekosten zu senken.

Im Gegensatz dazu bezeichnet die Spitzenlast die maximalen Lastspitzen, die nur sehr wenige Stunden oder Minuten im Jahr bezogen werden. Die Identifizierung und Analyse der Spitzenlast ist deshalb von Relevanz, da Stromgroßabnehmer ein gesondertes Netznutzungsentgelt bezahlen, welches unter anderem einen Fixkostenpunkt enthält, der abhängig von der einmaligen im Kalenderjahr maximal bezogenen Leistung ist.

2.5.2 Wirkleistung, Blindleistung und $\cos(\varphi)$

Unser elektrisches Versorgungsnetz ist ein Wechselstromnetz mit der Richtfrequenz 50 Hz. Bei Wechselstrom anders als bei Gleichstrom durchlaufen der elektrische Strom und die Spannung zeitlich einen sinusförmigen Verlauf, beschrieben durch

$$u(t) = \hat{u} \cdot \sin(\omega t + \varphi_u) = \operatorname{Re}\{\hat{u} \cdot e^{j\varphi_u} \cdot e^{j\omega t}\} \quad (2)$$

$$i(t) = \hat{i} \cdot \sin(\omega t + \varphi_i) = \operatorname{Re}\{\hat{i} \cdot e^{j\varphi_i} \cdot e^{j\omega t}\}. \quad (3)$$

Hierbei sind $u(t)$ die Spannung, $i(t)$ die Stromstärke, $\hat{u}$ bzw. $\hat{i}$ die Maximalamplitude, ω die Kreisfrequenz, φ_u und φ_i die Phasen. Für die Momentanleistung $p(t)$ des Wechselstroms gilt folgender Zusammenhang,

$$\begin{aligned} p(t) &= u(t) \cdot i(t) \\ &= \hat{u} \cdot \sin(\omega t + \varphi_u) \cdot \hat{i} \cdot \sin(\omega t + \varphi_i). \end{aligned} \quad (4)$$

Dies lässt sich mittels der trigonometrischen Beziehung

$$\sin(\alpha) \cdot \sin(\beta) = \frac{1}{2} [\cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta)] \quad (5)$$

umformen zu

$$p(t) = \frac{1}{2} \hat{u} \cdot \hat{i} [\cos(\varphi_u - \varphi_i) - \cos(2\omega t + \varphi_u + \varphi_i)]. \quad (6)$$

Mittels der weiteren Umformung

$$\begin{aligned} \cos(2\omega t + \varphi_u + \varphi_i) &= \cos(2(\omega t + \varphi_u) - (\varphi_u - \varphi_i)) \\ &= \cos(2(\omega t + \varphi_u)) \cos(\varphi_u - \varphi_i) + \sin(2(\omega t + \varphi_u)) \sin(\varphi_u - \varphi_i) \end{aligned} \quad (7)$$

ergibt sich die Momentanleistung $p(t)$ zu

$$p(t) = \frac{1}{2} \hat{u} \cdot \hat{i} [(1 + \cos(2(\omega t + \varphi_u))) \cos(\varphi_u - \varphi_i) + \sin(2(\omega t + \varphi_u)) \sin(\varphi_u - \varphi_i)] \quad (8)$$

Der erste Summand dieses Ausdrucks hat aufgrund des Terms $(1 + \cos(2(\omega t + \varphi_u)))$ den zeitlichen Mittelwert 1 und der zweite Summand den zeitlichen Mittelwert von 0 ist, da $\sin(2(\omega t + \varphi_u)) \rightarrow 0$ geht. Die im zeitlichen Mittel im Wechselstrom abgegebene Leistung definiert man als Wirkleistung P . Demgegenüber steht der Anteil, der im zeitlichen Mittel 0, also abgegeben und wieder aufgenommen wird. Dieser ist die sogenannte Blindleistung Q . Unter Verwendung der Effektivwerte für Spannung $U_{eff} = \frac{\hat{u}}{\sqrt{2}}$ und Stromstärke $I_{eff} = \frac{\hat{i}}{\sqrt{2}}$ ergeben sich Wirk- und Blindleistung wie folgt,

$$P = U_{eff} \cdot I_{eff} \cdot \cos(\varphi_u - \varphi_i) \quad (9)$$

$$Q = U_{eff} \cdot I_{eff} \cdot \sin(\varphi_u - \varphi_i). \quad (10)$$

Die Momentanleistung $p(t)$ ist zu jedem Zeitpunkt positiv wenn, $u(t)$ und $i(t)$ in Phase sind, $\varphi_u = \varphi_i$. In diesem Fall ist $Q = 0$ und es wird nur Wirkleistung bezogen. Wenn hingegen zwischen $u(t)$ und $i(t)$ eine Phasendifferenz von $\pi/2$, besteht ist entsprechend $P = 0$, womit ausschließlich Blindleistung bezogen wird.

Unter Verwendung der komplexen Schreibweise für $u(t)$ und $i(t)$ können wir nun die komplexe Scheinleistung

$$S = P + jQ = \frac{1}{2} \hat{u} \cdot \hat{i} e^{i(\varphi_u - \varphi_i)} \quad (11)$$

so definieren, dass die Wirkleistung $P = \operatorname{Re}\{S\}$ und die Blindleistung $Q = \operatorname{Im}\{S\}$ ist.

Die eigentliche Belastung, für die ein Verteilernetz ausgelegt sein muss, wird also durch die Scheinleistung festgelegt. Mittels der graphischen Darstellung in der imaginären Ebene, wie in Abbildung 4 dargestellt, lässt sich der $\cos(\varphi)$ bestimmen zu

$$\cos(\varphi) = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (12)$$

Hieraus wird ersichtlich, dass der $\cos(\varphi)$ den relativen Anteil der Wirkleistung an der Scheinleistung angibt. Dieser Wert wird bei sinus-förmigen Spannungs- und Stromverläufen auch Leistungsfaktor genannt. Generell kann dieser Wert zur Einschätzung der Art der Verbrau-

cher, die sich in einem Netz befinden, herangezogen werden. Je mehr induktive Komponenten wie z.B. elektrische Motoren aus dem Netz Leistung beziehen, desto größer ist der Anteil der Blindleistung an der Scheinleistung oder entsprechend der Anteil der Wirkleistung geringer, wodurch der $\cos(\varphi)$ kleiner wird.

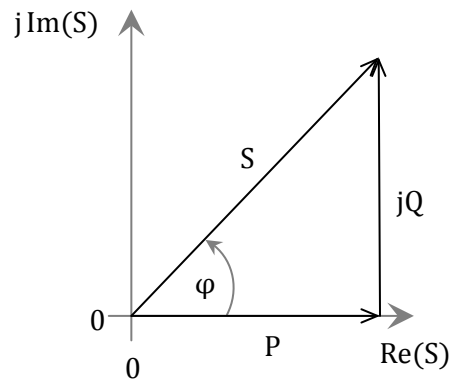


Abbildung 4: Dargestellt ist der geometrische Zusammenhang der Schein-, Blind- und Wirkleistung in der imaginären Ebene, hierbei bildet φ den Winkel zwischen Schein- und Wirkleistung.

2.5.3 Erhebung von Messdaten

Momentan existiert im GSI-internen Verteilnetz eine Messeinrichtung für die gesamte Wirkleistung direkt am Einspeisepunkt auf der Station Leonhardstanne, welches Eigentum des VNBS ist. Von der Station Leonhardstanne wird je verbrauchte 5 kWh ein Zählpuls zur Zählapparatur gesendet, die sich auf dem GSI-Gelände befindet. Dort werden die Pulse auf einem Computer registriert, mittels des zeitlichen Abstandes der aktuelle Wirkleistungsbezug errechnet und, wie in Deutschland üblich, im 15-Minuten-Mittelwert gespeichert [13], [14]. Diese Messdaten werden seit November 2009 getrennt für C1- und P1-Netz aufgezeichnet. Die vorliegende Arbeit betrachtet und analysiert die Daten der letzten drei Kalenderjahre 2010, 2011 und 2012.

Zudem ist auf der Niederspannungsebene (400 V) in 20 von 30 Niederspannungshauptverteilungen (NSHV) ein Bus-System mit Messeinrichtungen der Firma FRAKO integriert. Tabelle 2 gibt einen Überblick über die Ausrüstung der NSHVn mit einem FRAKO-Bus. Diese Messeinrichtungen messen die Werte für die Blind- und Wirkleistung und speichern diese. Die Aufteilung der NSHVn in Alt- bzw. Neubau ist die in Abschnitt 2.1 dargestellte. Die Abteilung Elektrotechnik (ET) betreut dieses FRAKO-Bus-System, dessen eigentlicher Zweck die Qualitätssicherung der Stromversorgung im Unterverteilungsnetz der GSI, und die Überwachung vor Überlastungen der Niederspannungstransformatoren ist [15]. Diese Messdaten reichen im Bereich Altbau bis Anfang 2010 zurück. Die Einrichtungen im Bereich Neubau sind teils erst Mitte 2011 oder 2012 installiert worden.

Tabelle 2: Übersicht über die installierte FRAKO-Bus Messeinrichtung für Blind- und Wirkleistungsmessung der einzelnen NSHVn. Die Daten der FRAKO-Bus-Messeinrichtungen im Bereich des Altbaus reichen bis Ende 2009 zurück, wohingegen die des Neubaus erst Mitte 2011 oder erst 2012 eingebaut wurden. Ein Haken steht für eine installierte, das Kreuz für eine fehlende Messeinrichtung.

Altbau				Neubau			
NSHV	FRAKO-Bus	NSHV	FRAKO-Bus	NSHV	FRAKO-Bus	NSHV	FRAKO-Bus
EA	✓	EK	✓	IA	✓	IL	✗
EB	✓	EL	✓	IB	✗	IM	✓
EC	✓	EM-T1	✓	IC	✗	IN	✗
ED	✓	EM-T2	✓	ID	✗	IP	✗
EE	✓	EN	✓	IE	✓	IR	✗
EF-T1	✓	EP	✗	IF	✗	IS	✓
EF-T2	✓			IG	✓	IT-01	✓
EH	✓			IH	✓	IT-02	✓
EJ	✓			IK	✗	IU	✓

2.5.4 Fehlerabschätzung

Die aus der Analyse ermittelten Ergebnisse sind alle fehlerbehaftet. Um die Ergebnisse besser beurteilen zu können, wird im Folgenden bei ermittelten Werten immer ein Fehler angegeben. Dieser Fehler, wenn nicht anders angegeben, ist immer die Standardabweichung der Daten im Analysezeitraum und setzt sich entsprechend linear über das Integral fort, z.B. bei der Berechnung der Energie aus der Wirkleistung. Bei der Addition oder Subtraktion von mehreren fehlerbehafteten Größen wird immer der Maximalfehler angenommen, d.h. die Fehler der einzelnen Summanden addiert. Die Fehler der Messelektronik sind erheblich kleiner als die Fehler der Analyse und können daher vernachlässigt werden.

Alle Wirkleistungsdaten sind jeweils in 15-Minuten-Mittelwerten angeben.

2.5.5 Lastdiagramme

Die grundlegende Art Lastdaten grafisch darzustellen sind, die sogenannten Lastdiagramme. Hierbei wird der Wirkleistungsbezug über einen begrenzten Zeitraum abgebildet. Aus diesen Lastdiagrammen lassen sich zeitraumabhängige Perioden herausarbeiten und somit unterscheiden, beispielsweise Sommer- und Winterperioden oder Werktage und Wochenenden (siehe Abbildung 5). Ebenfalls lassen sich verschiedene Produktionsperioden unterscheiden. Wird z.B. Produkt 1 im Zeitraum A und Produkt 2 im Zeitraum B gefertigt, werden durch die verschiedenen Fertigungsarten andere Kombinationen von Maschinen genutzt und mehr oder weniger Leistung bezogen.

2.5.6 Lastdauerdiagramme

Lastdauerdiagramme werden zur Identifikation der Grundlast und Spitzenlast herangezogen. Hierbei wird der Leistungsbezug über die jeweilige Nutzungsdauer in dem zur Analyse relevanten Zeitraum aufgetragen. Aus dieser speziellen Darstellung lassen sich der Grundlast- und der Spitzenlastbereich direkt identifizieren. Allerdings muss bei dieser Art der Darstellung darauf geachtet werden, dass die Nutzungsdauer einer hohen Leistung bereits in der Nutzungsdauer einer niedrigeren Leistung enthalten ist. Ein Aufsummieren der Nutzungsdauern verschiedener Leistungen ist bei dieser Darstellung unzulässig. Abbildung 6 zeigt exemplarisch ein Lastdauerdiagramm über den Zeitraum eines Jahres (8670 Nutzungsstunden). Gut zu erkennen sind der Spitzenlastbereich in Rot und der Grundlastbereich in Blau.

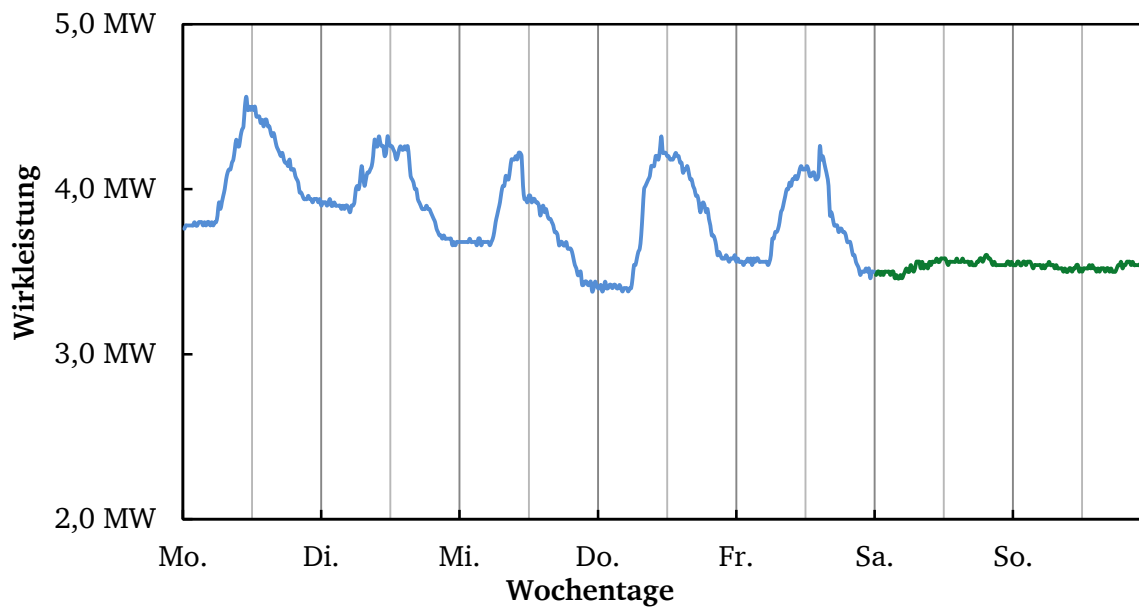


Abbildung 5: Der Graph zeigt die exemplarische Darstellung einer Lastdauerlinie im Zeitraum einer Kalenderwoche. Deutlich zu sehen sind die unterschiedlichen Leistungsbezüge während der Werktage in Blau und dem Wochenende in Grün.

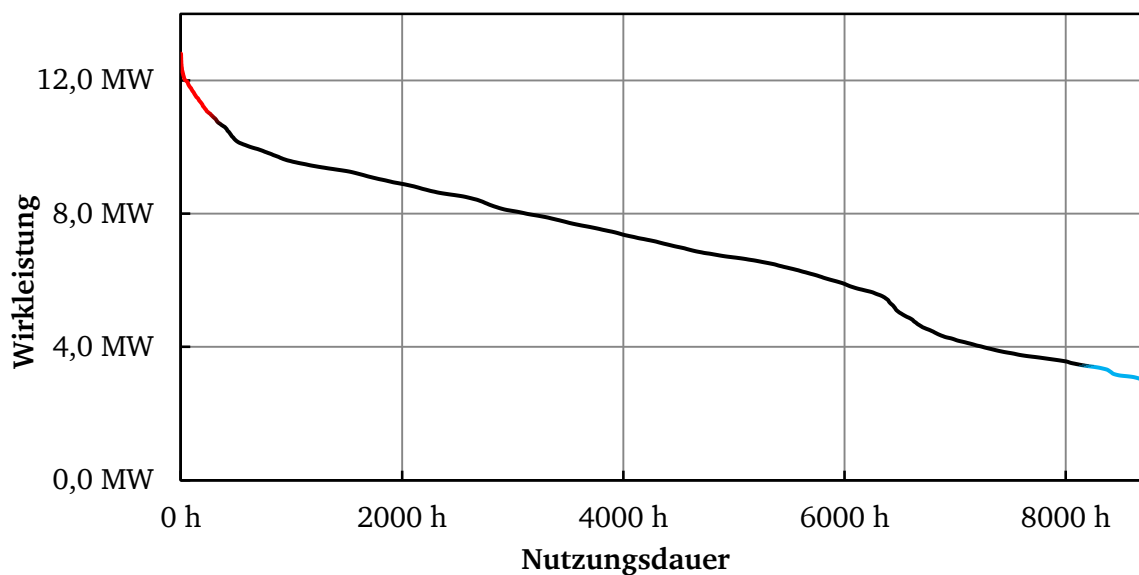


Abbildung 6: Exemplarisches Lastdauerdiagramm über den Zeitraum eines Jahres (8760 Nutzungsstunden). Der Spitzenlastbereich in Rot sowie der Grundlastbereich in Blau sind deutlich zu erkennen.

3 Auswertung und Analyse der Allgemeinlastdaten

3.1 Elektrischer Energiebedarf des C1-Netzes

Wie in Tabelle 3 zusammengestellt ergeben sich die vom Bedarf abhängigen jährlichen Kosten des C1 Netzes im Schnitt zu etwa 6 Mio.€. Die Kosten pro kWh, wie angegeben, setzen sich aus dem reinen Energiepreis (Wirkarbeit), der Stromsteuer und der EEG-Umlage zusammen. Die Steigung der Kosten ist vor allem durch die Steigung der EEG-Umlage um $\sim 1,5 \text{ ct/kWh}$ vom Jahr 2010 auf 2011 begründet. Ein kleiner Teil ist durch den Anstieg des reinen Energiepreises verursacht: $\sim 0,5 \text{ ct/kWh}$.

Die starke Schwankung der Betriebsstunden pro Jahr ist durch Umbaumaßnahmen, vorrangig Upgrade-Maßnahmen für FAIR oder Revisionsperioden, zu begründen. Zur genaueren Analyse ist es zweckmäßig eine spezifische Kenngröße η zu definieren,

$$\eta = \frac{\text{verbrauchte Energie in MWh}}{\text{Beschleunigerbetriebsstunden pro Jahr}}, \quad (13)$$

die den Energieverbrauch in Zusammenhang mit den Beschleunigerbetriebsstunden setzt. Für die Jahre 2010 bis einschließlich 2012 ergeben sich die in Tabelle 3 dargestellten Werte für die Kenngröße η . Hierbei gilt je geringer η , desto geringer ist der Energieverbrauch pro Beschleunigerbetriebsstunde. Die Kenngröße eignet sich, um zukünftige energieeffizienzsteigernde oder Einsparungs-Maßnahmen/Projekte zu bewerten. Die Betrachtung der η -Werte zeigt, dass eine höhere Auslastung der Anlage zu energieeffizienteren Nutzung führt und ein erheblicher Teil des Energiebedarfs auf die Grundlast zurückzuführen ist, die unabhängig von den Beschleunigerbetriebsstunden anfällt. Weitere Analysen zur Grundlast und Überprüfung dieser Annahme folgen in Abschnitt 3.3.2. Generell gilt ein höherer Auslastungsgrad führt zu einer Reduzierung des Energieverbrauchs pro Beschleunigerstunde und der Kenngröße η . Ein gleichzeitiger Betrieb des SIS und des UNILAC ist energieeffizienter, denn der UNILAC muss als Injektor des SIS immer betrieben werden und das SIS kann nur ein Bunch (zukünftig maximal drei) pro Sekunde der maximal möglichen 50 pro Sekunde des UNILAC aufnehmen [16]. Ein alleiniger UNILAC-Betrieb ist aus ökonomischer Sicht sinnvoll, aus dem Standpunkt der maximalen Energieeffizienz ist er es nicht.

Die notwendigen Leistungsbezüge eines UNILAC-Betriebs und eines parasitären SIS-Betriebs werden in Kapitel 5 diskutiert.

Tabelle 3: In der Tabelle sind der Bedarf der elektrischen Energie des C1-Netzes, die dadurch entstandenen Kosten, die Mitarbeiterzahl der GSI sowie die Beschleunigerbetriebsstunden der letzten drei Jahre angegeben. Die spezifische Kenngröße η verknüpft den elektrischen Energiebedarf mit den Beschleunigerbetriebsstunden.

Jahr	Energie	Preis inkl. Steuer, Energiepreis und EEG	Kosten	Mitarbeiter- anzahl	Beschleuniger- betriebsstunden
2010	60,5 GWh	0,094 €/kWh	5.664.077,56 €	~1050	6504
2011	50,2 GWh	0,114 €/kWh	5.708.009,22 €		4872
2012	55,8 GWh	0,116 €/kWh	6.472.800,00 €		5640
Jahr	spezifische Kenngröße η in MWh pro Betriebsstunde				
2010	9,3				
2011	10,3				
2012	9,9				

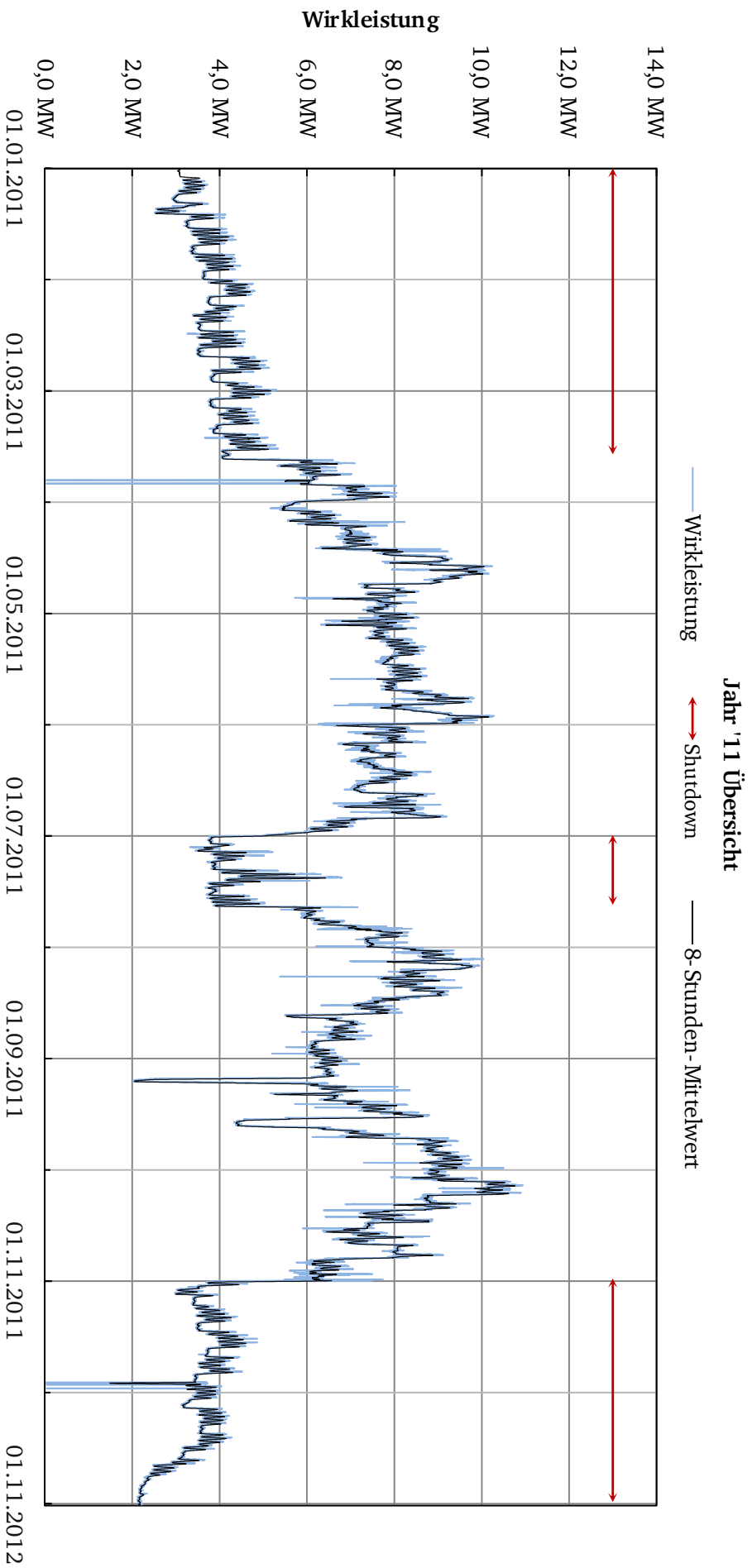


Abbildung 7: Exemplarisches Lastdiagramm des Jahres 2011, dargestellt sind die GSI-intern aufgezeichneten 15-Minuten-Werte der Wirkleistung in Blau, der achtstündige Mittelwert in Schwarz und ergänzend die Shutdownperioden des Jahres 2011 in Rot.

3.2 Analyse der Lastgänge

Abbildung 7 zeigt exemplarisch den Lastgang des Jahres 2011. Dargestellt sind in Blau die 15-Minuten-Mittelwerte der bezogenen Leistung über den Zeitraum des Jahres 2011. Zusätzlich ist der 8-Stunden-Mittelwert dieser Daten in Schwarz aufgetragen, im oberen Bereich des Graphen sind die Shutdownperioden durch rote Balken markiert. Die Lastkurve besteht in erster Näherung aus drei Bereichen: dem Grundlastbereich von 0 MW bis ca. 2,2 MW, der „Peaks-Plateau-Modulation“ auf der Kurve und dem Bereich dazwischen. Erwartungsgemäß wird der Verlauf der bezogenen Last stark dominiert durch den Beschleunigerbetrieb. Während den Shutdownperioden werden etwa um die Hälfte geringere Leistungen bezogen. Begründet ist dies dadurch, dass ein Teil der zum Beschleunigerbetrieb benötigten Endgeräte, wie beispielsweise die Netzgeräte der Hochfrequenz, der Magnete und der Kühlung, während der Shutdownperioden ausgeschaltet sind oder sich im Stand-by-Betrieb befinden. Die weiteren Analysen dienen der Aufschlüsselung der Leistungsbezüge bzw. des Energieverbrauchs nach Verbrauchergruppen. Als ersten Schritt werden die oben genannten Bereiche der Lastgänge näher betrachtet. Die Leitfragen sind im Weiteren: Woher kommt die „Peaks-Plateau“-Modulation auf der Kurve?, welchen Anteil hat die Grundlast am gesamten Energieverbrauch der GSI? und wie setzt sich diese zusammen?.

3.2.1 „Peaks-Plateau-Modulation“

Die „Peaks-Plateau-Modulation“ auf dem Lastgang ist ein sich stetig wiederholender Effekt und innerhalb des Zeitraums von einem Jahr 51-mal zu beobachten. Die Peaks innerhalb einer Periode treten immer fünfmal auf, exemplarisch dargestellt in Abbildung 7. Diese Modulation ist zurückzuführen auf die Werktage und das Wochenende, wobei sich jeweils ein Peak durch einen Werktag und das Plateau durch das Wochenende, Samstag und Sonntag, identifizieren lassen.

Ein signifikanter Anstieg vom nächtlichen niedrigen Niveau erfolgt morgens jeweils zwischen 6:00 Uhr und 6:30 Uhr, was mit dem Arbeitsbeginn einiger GSI-Mitarbeiter korrespondiert. Der Leistungsbezug steigt bis etwa 11:30 Uhr bzw. 12:00 Uhr durch den weiteren Arbeitsbe-

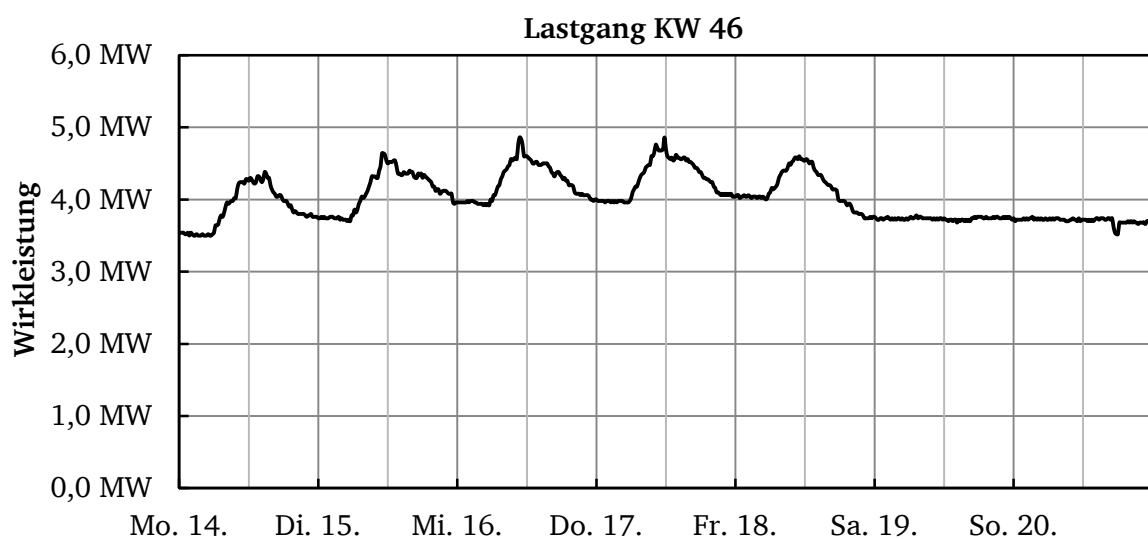


Abbildung 8: Dargestellt ist der Lastgang einer Kalenderwoche als Ausschnitt aus dem Jahreslastgang von 2011, hier exemplarische Kalenderwoche 46. Gut zu erkennen ist die in Abschnitt 3.2 definierte „Peaks-Plateau-Modulation“ auf dem Lastgang.

ginn der restlichen Mitarbeiter sowie durch den Betrieb der Kantine an. Das Leistungsmaximum um kurz vor 12:00 Uhr kommt durch die Kantine, die bis zu dieser Uhrzeit die erheblich Leistung ziehende Konvektomaten betreibt. Ab 12:00 Uhr, Öffnungszeit der Kantine, wird nur noch warmgehalten. Ab ca. 19:30 Uhr wird das nächtliche Niveau erreicht. Dieser Zyklus wiederholt sich dann jeweils jeden Werktag. Am Wochenende befindet sich der Leistungsbezug durchgehend auf einem Niveau.

3.2.2 „Wochenend-Approximation“ und Bürobedarf

Durch die genaue Identifikation der „Peaks-Plateau-Modulation“ als Kalenderwochenzyklus, beziehungsweise Abfolge von Werktagen lässt sich nun der Energieverbrauch des Bürobetriebs ermitteln. Zur Berechnung des Bürobedarfs muss eine Wochengrundlast simuliert werden, um die Werktagspeaks von der Grundlast zu trennen. Die simulierte Grundlast der jeweiligen Kalenderwoche wird mittels der entwickelten „Wochenend-Approximation“ realisiert. Hierbei wird der Leistungsbezug des Wochenendes der jeweiligen Kalenderwoche als Grundlast für die Werktage angenommen. Mit Hilfe der Annahme, dass das Wochenende samstags um 0 Uhr, Zeitpunkt t_1 mit Leistungsbezug, P_1 , anfängt und sonntags um 24 Uhr, Zeitpunkt t_2 mit Leistungsbezug P_2 , endet, lässt sich mittels Zweipunkt-Form eine Gerade berechnen, die die Grundlast der Werktage auf Grundlage des Wochenendniveaus bestimmt:

$$P(t) = \frac{P_1 - P_2}{t_1 - t_2} t + P_1 - \frac{P_1 - P_2}{t_1 - t_2} t_1. \quad (14)$$

Abbildung 9 zeigt die durch die Gerade definierte simulierte Grundlast exemplarisch für die Kalenderwoche 46 des Jahres 2011. Gut zu erkennen ist, dass während der gesamten Wochentage sich der Leistungsbezug deutlich vom Wochenendniveau abhebt.

Durch Bildung der Differenz des Lastgangs und der simulierten Grundlast erhält man den Anteil des Lastgangs, der auf den Bürobetrieb zurückzuführen ist. Dies bedeutet, dass man den Energieverbrauch, der durch den Bürobetrieb während eines normalen Arbeitstages benötigt wird, näherungsweise bestimmen kann. Hierbei ist zu beachten, dass ausschließlich Endgeräte, die dem werktäglichen oder werkswöchentlichen Ein-Ausschalt-Zyklus unterliegen,

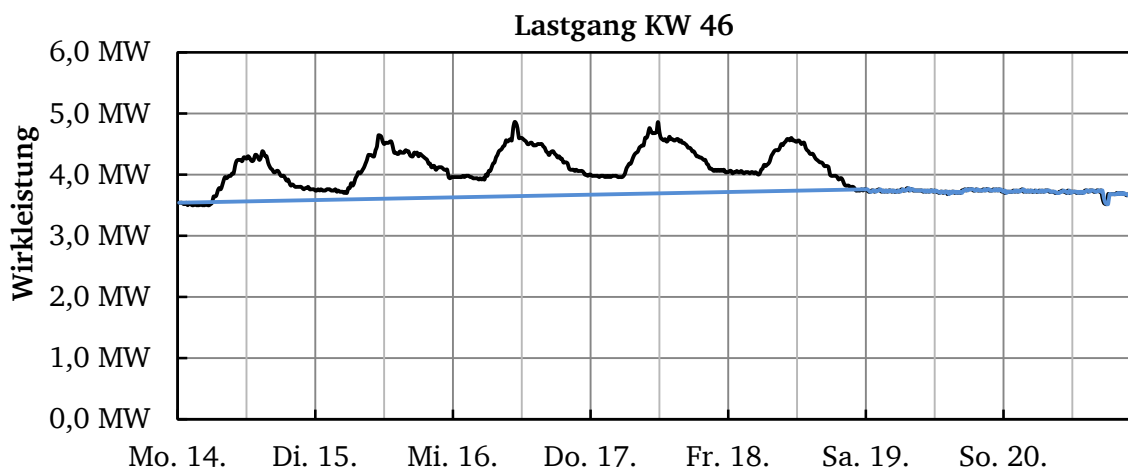


Abbildung 9: Dargestellt ist der Lastgang der Kalenderwoche 46 des Jahres 2011 in Schwarz. Zusätzlich ist die „Wochenend-Approximation“ in Blau dargestellt, welche die simulierte Grundlast der Arbeitswoche auf Basis des Wochenendniveaus abbildet.

enthalten sind. Hierzu zählen nahezu alle Arbeitsplatz-PCs, die Ausstattung der Kantine, alle Lichtquellen am Arbeitsplatz etc.

In den Betriebsperioden ist die Approximation problematisch, weil sich durch den starke Einfluss der Beschleunigebetrieb auf den Lastgang, wie in Abschnitt 3.2 beschrieben, kein passendes Wochenendniveau bestimmen lässt und somit keine simulierte Grundlast für die Arbeitswoche, da der Betrieb auch am Wochenende stattfindet. Ein weiterer Zeitraum, der zur Auswertung ausgeschlossen wurde, ist der Zeitraum der hessischen Schulferien, da ein Großteil der Beschäftigten im Bundesland Hessen wohnt und ihren Urlaub an die Schulferienzeiten anpasst. Zu diesen Zeiträumen ist die Anzahl der bei der GSI arbeitenden Mitarbeiter und der Leistungsbezug, der durch den Bürobetrieb verursacht wird, nicht repräsentativ. Insgesamt ergeben sich aus dieser Betrachtung der drei Jahre 29 Wochen, die sich zur Auswertung eignen. Der Leistungsbezug, der auf den Bürobetrieb zurückzuführen ist, beläuft sich im zeitlichen Mittel auf (437 ± 116) kW. Der anteilige Jahresbedarf elektrischer Energie des Bürobetriebs, bei 51 Arbeitswochen, ergibt sich zu $(2,67 \pm 0,71)$ GWh. Der Pro-Kopf-Bedarf bei einer durchschnittlichen Mitarbeiteranzahl von 1050 Personen beziffert sich auf (2547 ± 676) kWh. Der Anteil des Bürobetriebs am Gesamtbedarf ist, wie in Abbildung 10 exemplarisch für das Jahr 2011 dargestellt, ca. 5%.

Bedarf elektrischer Energie 2011 C1-Netz

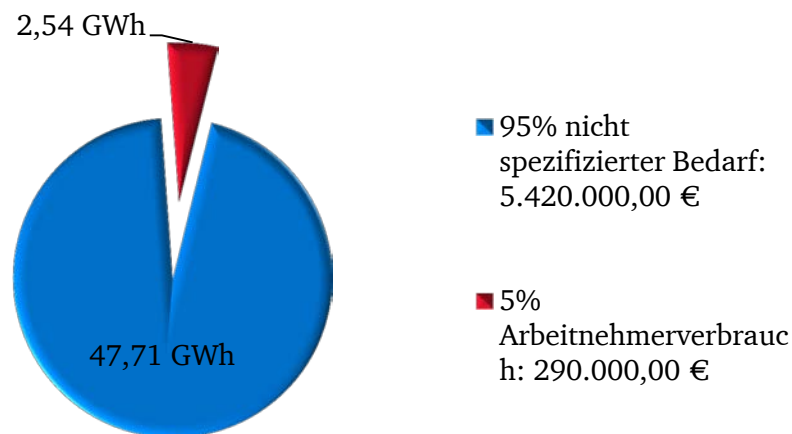


Abbildung 10: Das Kreisdiagramm zeigt für das Jahr 2011 den Anteil des Arbeitnehmerverbrauchs am gesamten Verbrauch elektrischer Energie, welcher sich auf ca. 5% beläuft.

3.3 Analyse der Lastdauerdiagramme

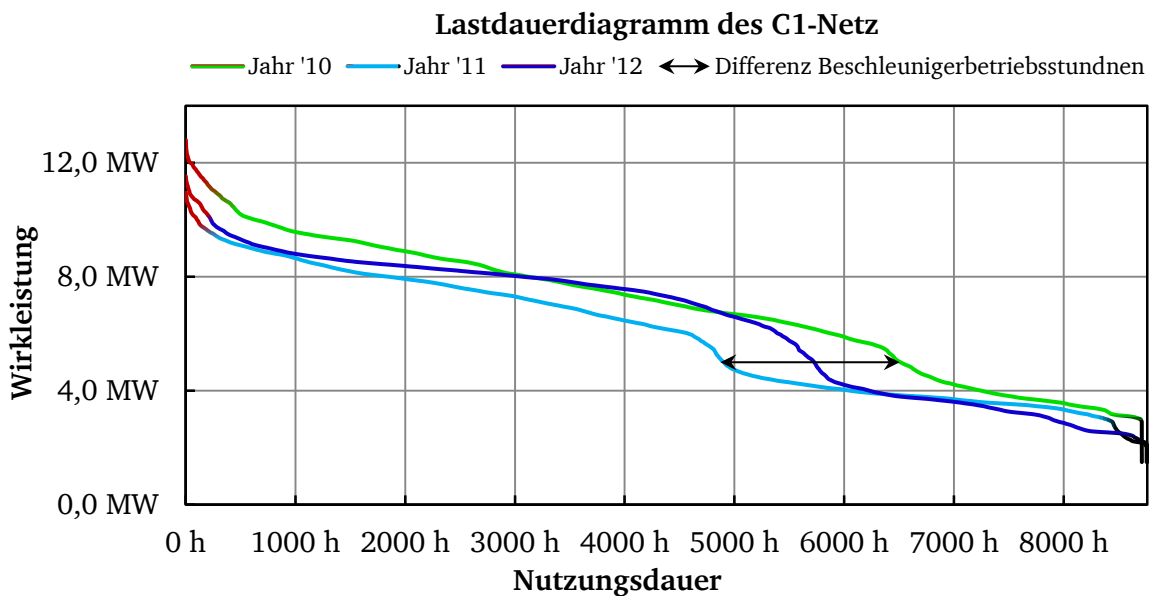


Abbildung 11: Dargestellt sind die Lastdauerdiagramme der drei Jahre 2010, 2011 und 2012. Im Bereich sehr geringer Nutzungsdauern (rot), wenige Stunden, sind deutlich hohe Leistungsbezüge zu erkennen, sogenannte Spitzenlasten. Im Bereich von Nutzungsdauern, die das ganze Jahr anhalten (schwarz), ist der Bereich der Grundlast gut zu erkennen. Die schwarzen Pfeile zeigen die Differenz der Beschleunigerbetriebsstunden an. Der starke Abfall der Kurve korreliert mit der Anzahl der Beschleunigerbetriebsstunden des jeweiligen Jahres.

Die in Abbildung 11 dargestellten Leistungsdauerlinien der drei Analysejahre zeigen die Spitzenlast (roter Bereich) bis zu fast 13 MW im Jahr 2010 und eine Grundlast (schwarzer Bereich) von ca. 3 MW im Jahr 2010 bzw. ca. 2 MW in den Jahren 2011 und 2012. Aufgrund von betriebssystembedingten Neustarts der Messapparatur wurden keine 8760 Stunden lang Messwerte aufgezeichnet, deshalb enden die Kurven vor 8760 Nutzungsstunden. Der starke Abfall rechts, fast senkrecht, ist durch einmalig auftretende Vorfälle, wie zum Beispiel einen Wasserrohrbruch oder Ähnliches, begründet. Bei diesen besonderen Vorfällen werden durch das Interlocksystem für Maschinensicherheit zum Schutz der Anlage Teile der Beschleunigeranlage abgeschaltet, womit sich untypische und einzigartige niedrige Leistungsbezüge einstellen. Die schwarzen Pfeile geben die Differenz der Beschleunigerbetriebsstunden der Jahre 2010 und 2011 an. Die Beschleunigerbetriebsstunden des Jahres 2012 liegen zwischen diesen Jahren, siehe Tabelle 3. Der Abfall der Kurve in diesem Bereich korreliert mit den Beschleunigerbetriebsstunden. Der Wirkleistungsbezug der Nutzungsstunden oberhalb der Beschleunigerbetriebsstunden setzt sich zusammen aus der Grundlast plus einzelnen Maschinenexperimente und/oder Tests an einzelnen Experimente.

3.3.1 Spitzenlastmanagement

Die Kurven zeigen deutlich, dass ein klassischer Ansatz zur Reduzierung der nur kurz bezogenen Spitzenlasten zu wählen wäre. Die Spitzenlasten von 11 – 13 MW werden nur wenige Stunden im Jahr bezogen, deshalb wäre der Ansatz der „Vermeidung der Gleichzeitigkeit“ zur Reduzierung der Spitzenlasten angemessen [17], [18]. Die Kosteneinsparungen würden sich pro eingesparte bezogene MW auf ca. 21.000 € belaufen. Eine konkrete Umsetzung wäre mittels der Planung der Strahlzeit die Experimente so zu terminieren, dass Experimente mit hohen Leistungsbezügen nicht gleichzeitig, sondern zu verschiedenen Zeiträumen stattfinden.

Dies würde bedeuten, dass jedes Experiment durchgeführt werden könnte, gleichzeitig aber hohe Spitzenlasten vermieden und so Kosten eingespart würden. Eine weitere Möglichkeit wäre in das neue aktuell in Entwicklung befindliche Kontrollsystem für FAIR konzeptionell eine Option zur Vermeidung von gleichzeitigem Betrieb leistungsintensiver Komponenten/Anlagenteilen zu implementieren. Das Kontrollsystem könnte zukünftig die Operateure vor leistungsintensivem Betrieb warnen oder dies autonom verhindern. Die Analyse des Energiebedarfs und die daraus resultierende Kenntnis über die differenzierten Leistungsbezüge der verschiedenen Anlagenteile ist für diese Umsetzungen eine Notwendigkeit.

3.3.2 Grundlast und Shutdown

Die Grundlast der GSI liegt, wie in Abbildung 11 durch den schwarzen Bereich gekennzeichnet, im Bereich von 2-3 MW. Dieser Leistung wird ganzjährig bezogen und hat dadurch ein großes Potential für Effizienzsteigerungen. Die Grundlast, die geringste bezogene Dauerleistung im Jahr, ist bei der GSI durch den Shutdown zwischen den Jahren während der Betriebsferien definiert. Zu dieser Zeit arbeiten nur sehr wenige Mitarbeiter und es findet kein Beschleunigerbetrieb statt. In diesem Zeitraum fallen trotzdem Kosten von mindestens 5500 € pro Tag an. Für das Energiemanagement und zur Aufdeckung von Einsparpotentialen ist es wichtig die Grundlast genauer zu differenzieren. Der erste Schritt ist die Betrachtung der unterschiedlichen Shutdownperioden zwischen den Jahren mit einem Leistungsbezug von 2 MW bzw. 3 MW.

Abbildung 12 zeigt den Lastgang zwischen den Jahren 2010 auf 2011 (blau), 2011 auf 2012 (grün) und 2012 auf 2013 (orange). Der durch die roten Balken eingegrenzte Bereich ist ein Referenzzeitraum, der zum Vergleich der drei Zeiträume dient. Dieser wurde so gewählt, dass keine Werkstage innerhalb des jeweiligen Zeitraumes liegen und der Zeitraum möglichst groß

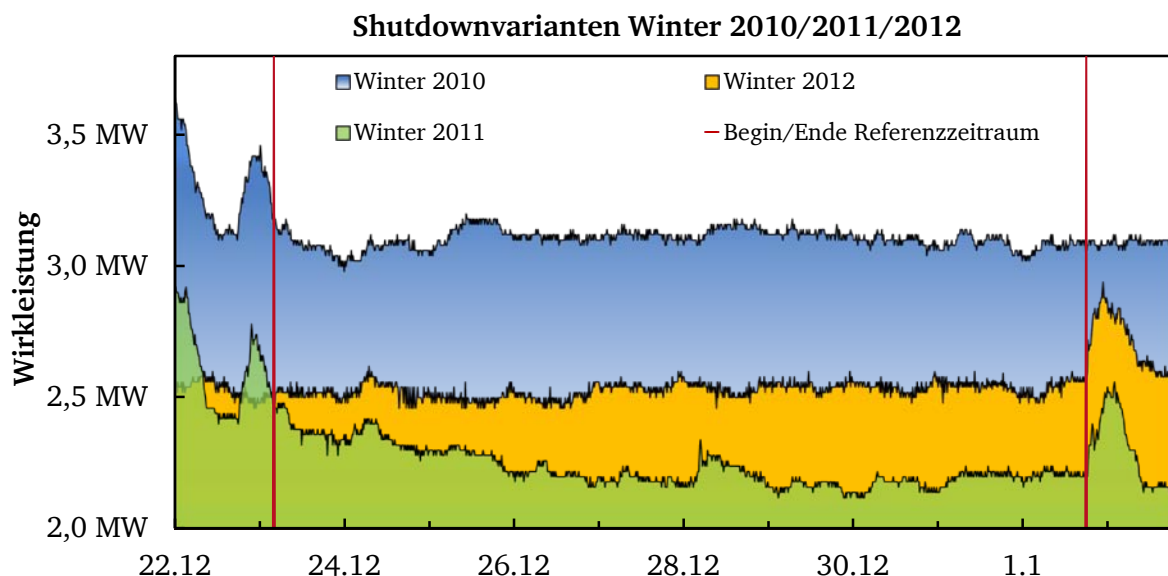


Abbildung 12: Die Abbildung zeigt die Lastdiagramme zwischen den Jahren 2010 auf 2011 (blau), 2011 auf 2012 (grün) und 2012 auf 2013 (orange). Durch die Roten Balken wird der Referenzzeitraum für den Vergleich der beiden Zeiträume definiert. Gut zu erkennen sind die in Abschnitt 3.2.2 identifizierten „Werktagpeaks“ an den jeweiligen Werktagen, z.B. am 23.12.

ist, um den Fehler zu minimieren. Insgesamt beinhaltet einen Zeitraum von zehn Tagen und 14 Stunden, vom 23.12 16:00 Uhr bis zum 02.01. 06:00 Uhr des darauffolgenden Jahres. Für das Jahr 2010 ergibt sich hieraus eine Grundlast von (3104 ± 35) MW, im gleichen Zeitraum für das Jahr 2011 (2236 ± 77) kW und für das Jahr 2012 (2529 ± 30) MW. Der Unterschied im Leistungsbezug zwischen den drei Jahren beträgt (868 ± 112) kW im Maximum zwischen den Jahren 2010 und 2011. Dieser Leistungsunterschied entspricht einer Differenz der verbrauchten Energie pro Tag von $\sim 20,8$ MWh, äquivalent zu einem Kostenpunkt von ca. 2.400 € pro Tag bei einem Preis von 0,116 €/kWh. Die große Differenz der jeweiligen Zeiträume wird im folgenden Abschnitt 4.2.2 mittels der Daten der NSHVen FRAKO-Bus Messgeräte, siehe Abschnitt 2.5.3, genauer analysiert. Es lässt sich festhalten, dass sich die Grundlast der GSI im Mittel zu (2623 ± 361) kW bestimmen lässt und einen Energiebedarf von 23 GWh verursacht. Der relative Anteil am Energiebedarf beträgt etwa 42 %, was die Vermutung, des relativ hohen Grundlast/Anlagen- Stand-by-Energieverbrauchs aus Abschnitt 3.1 bestätigt. Zusammenfassend ist in Tabelle 4 der ermittelte Leistungsbezug, der gesamt Energiebedarf pro Kalenderjahr der drei ermittelten Hauptbedarfskategorien, angegeben. Zur Berechnung des Energiebedarfs durch den Bürobetrieb wurden 50 Arbeitswochen pro Jahr angenommen, da in der Woche zwischen den Jahren Betriebsferien sind. Zudem wurden zusammen sechs bundesweite und hessische Feiertage von der Berechnung ausgenommen. Abbildung 13 setzt den jeweiligen Energiebedarf der drei Kategorien in Zusammenhang mit dem durchschnittlichen Jahresbedarf und gibt deren Anteil an. Zur Berechnung der Kosten wurde der elektrische Energiepreis von 0,116 €/kWh des Jahres 2012 genommen.

Tabelle 4: Aufstellung des ermittelten Leistungsbezugs inkl. Unsicherheit nach den drei Hauptkategorien Beschleunigerbetrieb und Experimente, Bürobetrieb und Grundlast/Anlagen Stand-by. Der Energiebedarf für Beschleunigerbetrieb und Experimente wurde aus der Differenz von Gesamtenergiebedarf des C1-Netzes, Bürobetrieb und Grundlast ermittelt.

Kategorie	durchschnittlicher Leistungsbezug	Fehler	Energiebedarf	Fehler
Beschleunigerbetrieb und Experimente	nicht ermittelt		30,00 GWh	$\pm 3,91$ GWh
Bürobetrieb	437 kW	$\pm 30 \%$	2,54 GWh	$\pm 0,76$ GWh
Grundlast/Anlagen Stand-by	2623 kW	$\pm 13,7 \%$	22,98 GWh	$\pm 3,15$ GWh

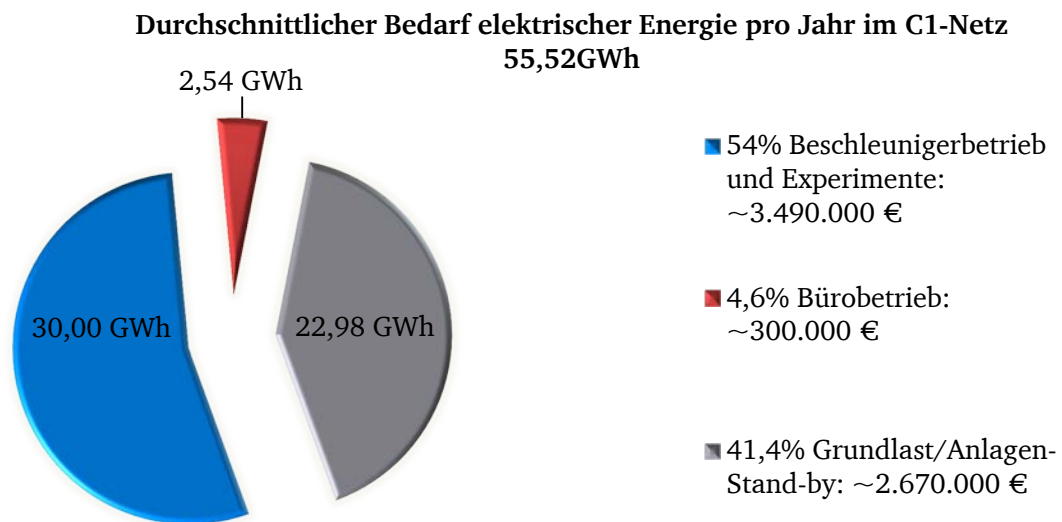


Abbildung 13: Das Kreisdiagramm zeigt den aus den Gesamtlastdaten des C1-Netzes aufgeschlüsselten Energieverbrauch im Jahresdurchschnitt. Herangezogen wurden hierzu die Jahre 2010 bis 2012. Der durch die Grundlast benötigte anteilige Energiebedarf pro Kalenderjahr beträgt 41,4%. Der Bürobetrieb benötigt 4,6%, wie in Abschnitt 3.2.2 berechnet.

4 Analyse der Niederspannungsebene

Im vorangegangenen Kapitel 3 wurde eine erste Komplettsystem-Analyse des elektrischen Energiebedarfs der GSI mittels der Wirkleistungsdaten des C1-Netzes erstellt. Der Bedarf von elektrischer Energie wurde in drei Hauptkategorien unterteilt. Hierbei zeigt sich, dass der Beschleunigerbetrieb und die Experimente den größten Bedarf an elektrischer Energie haben. Dass der Erhalt des Stand-by-Modus der Beschleunigeranlage bzw. die Grundlast einen so großen Anteil am gesamten Bedarf ausmacht, worauf auch die in Abschnitt 3.1 definierte Kenngröße η vorab hindeutete, ist dennoch erstaunlich. Der Leistungsbezug zwischen den Jahren, der den Grundlast-Leistungsbezug definiert, ist mit (2623 ± 359) MW im Mittel sehr hoch. Der Shutdown zwischen den Jahren stellt den tiefsten Shutdown dar, es werden ergänzend zu normalen Shutdownperioden Sonderabschaltungen durchgeführt. In dieser Zeit arbeitet außer dem Personal des Sicherheitsdiensts niemand auf dem GSI-Gelände. Dies lässt vermuten, dass es sich hierbei um teilweise vermeidbare Last handelt. Im Weiteren ist es deshalb von Interesse, diesen Leistungsbezug genauer aufzuschlüsseln, eventuelle Schwachstellen zu identifizieren und gegebenenfalls zu benennen bzw. auf Potentiale zur Reduzierung dieser Last hinzuweisen.

Zu dieser weiterführenden Detailanalyse des elektrischen Energiebedarfs bzw. der Leistungsbezüge werden die Daten der teilweise vorhandenen FRAKO-Bus-Messeinrichtungen der NSHVen, siehe Abschnitt 2.5.3, herangezogen. Das Niederspannungsnetz versorgt alle Verbraucher auf der 400V-Ebene, dies sind bei der GSI alle Büro- und Sanitäreinrichtungen, die Kantine, Beleuchtung jeglicher Art, alle Lüfter und Pumpen der Technischen Gebäudeausrüstung (TGA) und Kühlkreisläufe der Beschleunigeranlage [15]. Lediglich die primären Beschleunigerkomponenten wie die Netzgeräte der Hochfrequenztechnik (HF) und teilweise die Magnetstromversorgung der DC-Magnete werden direkt über 20kV bzw. 10kV Ebene gespeist. Dies eröffnet die Möglichkeit, eine umfassende Analyse des Shutdownszeitraums und damit der Grundlast der Anlage ausschließlich auf Basis der Daten der Niederspannungsebene zu erstellen.

4.1 Aufbau der Niederspannungshauptverteilung (NSHV)

Die NSHVen werden direkt aus der Mittelspannungsebene versorgt, mehrere Transformatoren über das ganze GSI-Gelände verteilt transformieren die 20kV kommend von Station Leonhardstanne stufenweise über 10kV nach 400V, siehe Abbildung 14. Insgesamt existieren 30 NSHVen, die jeweils durch einen eigenen Transformator an die vorgelagerte Spannungsebene gekoppelt sind, außer der NSHV EF und EM, diese sind jeweils aufgeteilt in zwei redundante Transformatoren, um bei Bedarf oder während eines Störfalls unterbrechungsfrei umschalten zu können. Die eindeutige Kennzeichnung der NSHVs folgt einer Zwei-Buchstaben Folge. Der erste Buchstabe ist entweder ein „E“ oder „I“, wobei „E“ für den Altbau und „I“ für den Neubau steht (siehe Abschnitt 2.1), der zweite Buchstabe ist eine alphabetische Aufzählung. Ergänzt wird die Kennzeichnung durch die Angabe des Standortes in GSI-interner Gebäudenebenennung und Stockwerksbezeichnung, die durch ein „+“ angehängt wird [19]. Hierbei ist zu beachten, dass sich in den meisten Gebäuden mehrere NSHVen befinden. Abbildung 15 zeigt die Standorte der einzelnen NSHV auf dem GSI Gelände. Die Kennzeichnung ist allerdings nur eine rein funktionelle, praktisch ist hierdurch kaum Information über die Art der Verbraucher zu erhalten, die durch die entsprechende NSHV versorgt werden. In Anhang E befindet sich ein Auszug aus der offiziellen Funktionskennzeichnung nach DIN 40719 Teil 2

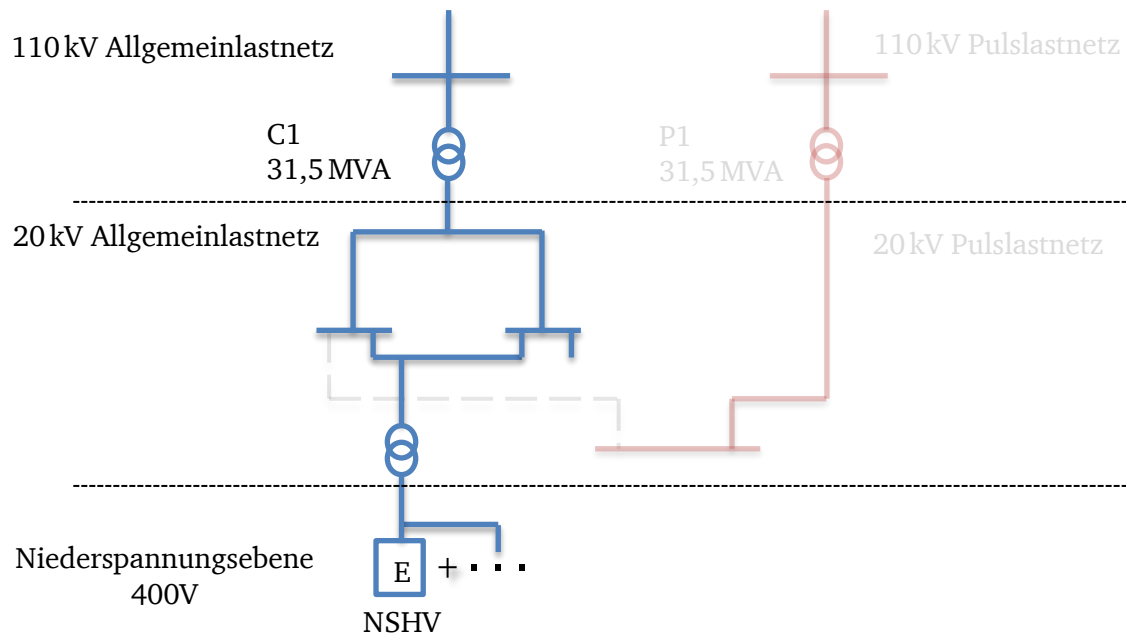


Abbildung 14: Schematische Darstellung des GSI-Allgemeinlastnetzes von Station Leonhardstanne 110kV Ebene bis zur Niederspannungsebene 400V, von der eine Vielzahl von Verbrauchern ihre Leistung bezieht. Insgesamt existieren auf dem GSI-Gelände 30 NSHVen. Ausgegraut ist der Bereich des Pulslastnetzes.

für die NSHVen. Darin aufgelistet sind die Standorte der NSHVen, sowie teilweise die geplanten Verbrauchergruppen der NSHVen. Die NSHVen versorgen jeweils einen räumlichen Quadranten der GSI, so dass Verbraucher jeglicher Art in diesem Quadranten von ein und der gleichen NSHV versorgt werden. Eine vollständige Dokumentation, welche spezifischen Verbraucher eine NSHV versorgt, existiert momentan nicht. Durch Auswertung der Lastdaten einer NSHV erhält man Informationen über die Summe aller Endverbraucher, die von dieser NSHV versorgt werden. Potentiale zur Einsparung können nur anhand einer ganzen NSHV aufgezeigt werden.

In Einzelfällen können spezifische Informationen über exklusive Einzelnutzung und Unabhängigkeit vom Beschleunigerbetrieb einiger NSHVen mit der Gruppe Elektrotechnik (ET) erarbeitet werden [15]. Die NSHVen EL und EK, die sich beide im Südbau (Gebäude SB) befinden, ebenso IR, IS, IT und IU sind vom Beschleunigerbetrieb unabhängig. NSHV EL versorgt das Rechenzentrum 1 im Südbau und den Container C25 (Prototyp des Green-Cube), beide inklusive Kühlung. NSHV EK versorgt den kompletten Bürokomplex SB inklusive der Biolabore und der Werkstätten. Die NSHVen IS und IT versorgen die Testinghalle. Die NSHV IU versorgt das neue Rechenzentrum Teraflop, das die Cluster Prometheus und Hera umfasst, allerdings ohne Kühlung. Die Kühlung des Teraflops wird über die NSHV IM versorgt. Die letzte NSHV mit Einzelnutzung ist die NSHV IR, die ausschließlich das Rechenzentrum im BG, welches die Cluster Ikarus und Alice Tier 2 umfasst, versorgt. Eine genauere Analyse der Wirkleistungsbezüge der Rechenzentren folgt in Abschnitt 4.2.3.

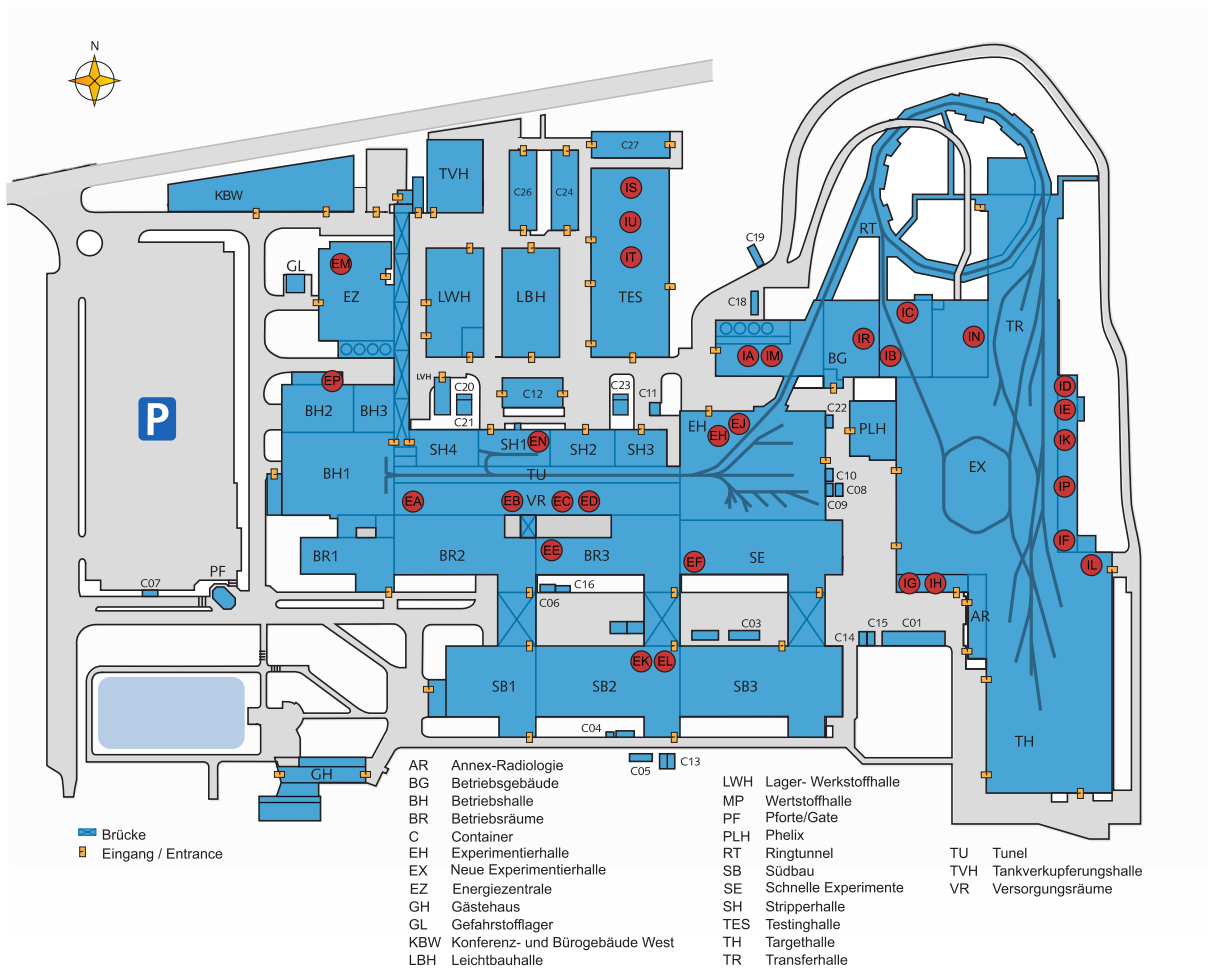


Abbildung 15: Der GSI Lageplan inklusive der Standorte der einzelnen NSHVen. Die roten Markierungen geben die Standorte an und beinhalten die NSHV-Kennzeichnung.

4.2 Analyse der Grundlast bzw. Stand-by-Leistung der GSI

4.2.1 Unterschied der Wintershutdownvarianten

In Abschnitt 3.3.2 wurde anhand der GSI-Gesamtlastdaten der Leistungsbezug der Grundlast (2623 ± 361) kW ermittelt. Dieser Leistungsbezug ist definiert durch den Zeitraum zwischen den Jahren.

Aus den Allgemeinlastdaten konnte der Unterschied der einzelnen Jahre nicht geklärt werden. Mittels der NSHV-Wirkleistungsdaten lässt sich nun zumindest für die Jahre 2012 und 2011 der Unterschied klären, da im Sommer des Jahres 2012 das neue Teraflop-Rechenzentrum in der Testinghalle in Betrieb genommen wurde.

Das Teraflop-Rechenzentrum wird exklusiv durch die NSHV IU versorgt, welche mit einem FRAKO-Bus ausgerüstet ist. Somit liegen die Wirkleistungsdaten des Rechenzentrums ohne Kühlung direkt vor. Die Kühlung des Rechenzentrums wird über die NSHV IM versorgt. Das Kühlsystem des Teraflops wurde ebenfalls im Sommer 2012 in Betrieb genommen. Durch den Vergleich der Wirkleistungsbezüge der Winter 2011 und 2012 der NSHV IM kann so der Wirkleistungsbezug der Kühlung des Teraflops ermittelt werden. In diesem Zeitraum wurden laut Abteilung ET keine weiteren Änderungen an der NSHV vorgenommen [15]. Die NSHV IM versorgt zusätzlich die beiden Kühlkreisläufe KS01 und KS02 und die beiden Kreisläufe der Heizungen TH01 und TH02 im Betriebsgebäude, sowie den Technikraum in Container 27. Diese Einrichtungen sind zwischen den Jahren jedoch größtenteils abgeschaltet oder haben nur einen sehr geringen Leistungsbezug. Im Wintershutdown 2011 beträgt der Leistungsbezug der NSHV IM ($2,4 \pm 4,4$) kW. Der relativ hohe Fehler rührt daher, dass ein Viertelstundenwert des Wirkleistungsbezugs periodisch etwa 12 kW und der Rest der Zeit 0 kW beträgt. Im gleichen Zeitraum des Jahres 2012, entsprechend nach Installation der Teraflop Kühlung, beträgt der Leistungsbezug ($61,3 \pm 5,3$) kW. Der Lastgang der NSHV IM, der beide Zeiträume abdeckt,

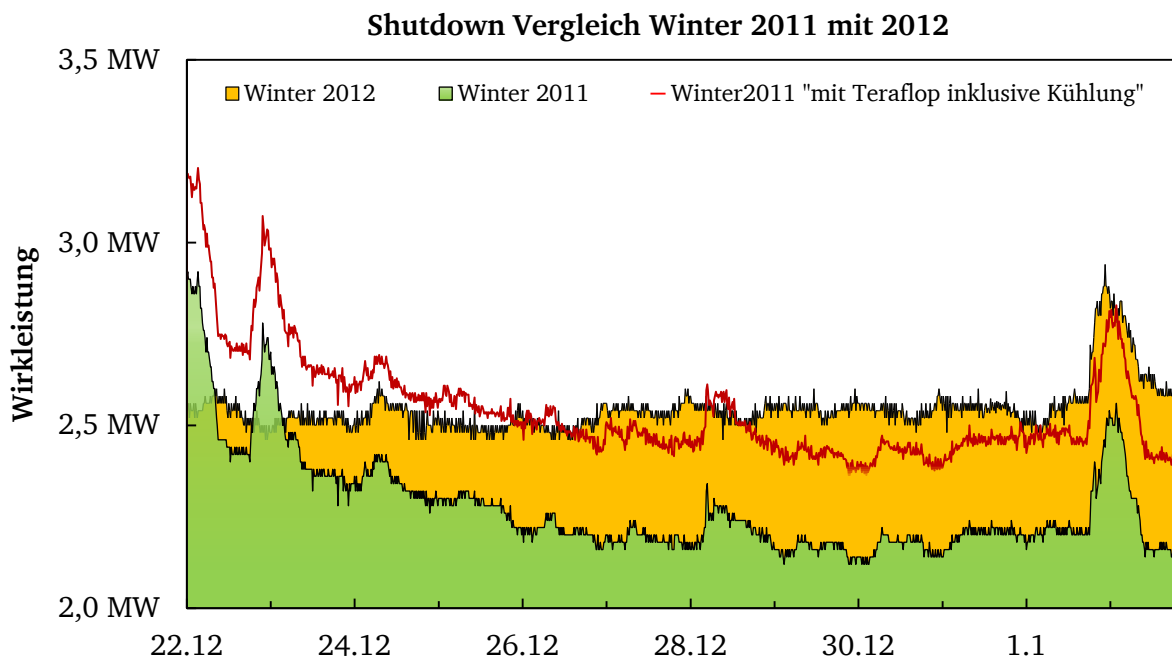


Abbildung 16: Vergleich der beiden Wintershutdowns der Jahre 2011 und 2012. In Rot dargestellt ist der Leistungsbezug des Winters 2011 plus der fiktiv gedachte Ausbaustatus des Jahres 2012 des Teraflop-Rechenzentrums. Somit ergibt sich der Leistungsbezug als nahezu identisch.

befindet sich in Anhang C. Daraus ergibt sich durch Differenz dieser Werte und der Annahme eines Maximalfehlers der Leistungsbezug der Teraflop-Kühlung zu $(58,9 \pm 13,3)$ kW. Der gesamte Wirkleistungsbezug des Teraflop-Rechenzentrums inklusive Kühlung beträgt demzufolge im Wintershutdown 2012 $(300,7 \pm 18,8)$ kW. Der Leistungsbezug des Jahres 2011 ist somit identisch mit dem des Jahres 2012 unter der fiktiven Annahme, dass der Teraflop schon im Jahr 2011 im gleichen Status in Betrieb gewesen wäre. Abbildung 16 zeigt die Lastgänge des Wintershutdowns 2011, 2012 und des Jahres 2011 plus des fiktiven Betriebs des Teraflops. Im Rahmen des Fehlers kann daher angenommen werden, dass in den beiden Jahren ein gleich tiefer Shutdown hergestellt wurde. Im Weiteren ist zu klären, woher die Leistungsbezüge während des Shutdowns kommen und entsprechend, ob es Potentiale zur Reduzierung der Grundlast gibt.

4.2.2 Anteil der einzelnen NSHVen an der Grundlast

Um die Ursache der sehr hohen Grundlast der GSI zu identifizieren, ist es nötig, alle vorhandenen Wirkleistungsbezüge der NSHVen während des Wintershutdowns auszuwerten. Im Rahmen der Berechnung der GSI-Grundlast, siehe 3.3.2, wurde ein Referenzzeitraum definiert, damit die unterschiedlichen Wintershutdowns vergleichbar sind. Genau dieser Zeitraum wird auch hier verwendet, um die Wirkleistungsdaten der NSHVen im Wintershutdown 2012 bzw. deren Grundlast zu bestimmen. Das Jahr 2012 wurde gewählt, weil nur für dieses Jahr Daten aller installierten NSHV-FRAKO-Bus-Messeinrichtung vorhanden sind, siehe Abschnitt 2.5.3. Alle beschleunigerbetriebsrelevanten Komponenten, die ihre Wirkleistung direkt von der 20 kV Ebene beziehen, wie z.B. die HF-Verstärker der Beschleunigerkavitäten, sind im Wintershutdown definitiv vom Netz genommen [12]. Deshalb ist eine Analyse der Grundlast ausschließlich über die Wirkleistungsdaten der NSHVen möglich.

Tabelle 5 ist eine absteigende Auflistung aller ermittelten Grundlast-Wirkleistungsbezüge der NSHVen und des auf ein Jahr hochgerechneten Energiebedarfs. Die NSHV-EM-Unterteilung in Transformator 1 und 2 ist hier zusammengefasst, da während dieses Zeitraums Transformator 1 zwecks Revisionsarbeiten auf Transformator 2 überbrückt wurde. Die Summe aller NSHV-Grundlastbezüge beträgt (2208 ± 30) kW. Die Differenz der in Abschnitt 3.3.2 ermittelten Gesamtgrundlast für die GSI (2623 ± 359) kW und die Summe der Grundlasten der NSHVen mit FRAKO-Bus ist die Grundlast der NSHVs ohne FRAKO-Bus und beträgt (415 ± 389) kW. Der hohe Fehler begründet sich auf der großen Unsicherheit der GSI Grundlast, aufgrund der starken Unterschiede der drei Jahre, und durch die Annahme eines Maximalfehlers. Der Energiebedarf in einem Jahr wurde entsprechend der Definition der Grundlast berechnet: die Leistung wird 365 Tage im Jahr und 24 h am Tag bezogen.

Die Dokumentation der NSHV ist, wie in Abschnitt 4.1 angesprochen, für eine genaue Analyse bzw. Identifikation von diskreten Verbrauchern unzureichend, da lediglich Standorte der NSHVen und fortlaufend nummerierte Abgänge dokumentiert sind, siehe exemplarischer Ausschnitt der NSHV-Pläne im Anhang D. Die fortlaufende Nummerierung findet sich zwar auf fast jedem Endgerät vor Ort als Kennzeichnungsaufkleber wieder, allerdings ist es für diese Arbeit ein zu großer, nichtvertretbarer Aufwand per Hand alle Endverbraucher nach Klassen und genauer Identität zu dokumentieren. Daher beschränkt sich die weitere Analyse der NSHVen Grundlastwirkleistungsbezüge auf die NSHVen, deren Jahresenergiebedarf über einer Gigawattstunde liegt. Diese sind in Tabelle 5 fett gedruckt, wobei hier die NSHVen mit zwei redundanten Trafos, EM und EF, für die weitere Analyse zusammengefasst werden.

Tabelle 5: Auflistung der ermittelten Grundlast aller NSHVn mit einem FRAKO-Bus, der Unsicherheit und des auf ein Jahr hochgerechneten Energieverbrauchs. Die NSHVn EF-T1 und EF-T2 bilden zusammen die NSHV EF, die durch zwei redundante Trafos gespalten ist. Die NSHV EM ist ebenfalls in zwei redundante Trafos aufgeteilt, aber in dem hier berechneten Wintershutdown 2012 ist der EM-T1 Transformator zwecks Wartung auf EM-T2 überbrückt worden. Aus der Differenz der Grundlast des jährlichen Mittels ergibt sich die Grundlast der NSHVn ohne FRAKO-Bus. Der hohe Fehler gründet sich auf die große Unsicherheit der GSI-Grundlast, aufgrund der starken Unterschiede der drei Jahre und auf der Annahme eines Maximalfehlers. Die NSHVn, deren Jahresenergiebedarf größer als 1 GWh, ist werden im Weiteren genauer betrachtet und sind fett gedruckt.

NSHV	Wirkleistung	Unsicherheit	Energiebedarf in einem Jahr	Unsicherheit
EA	75 kW	± 2 kW	0,65 GWh	$\pm 0,02$ GWh
EB	16 kW	± 1 kW	0,14 GWh	$\pm 0,01$ GWh
EC	181 kW	± 12 kW	1,59 GWh	$\pm 0,10$ GWh
ED	28 kW	± 1 kW	0,25 GWh	$\pm 0,01$ GWh
EE	149 kW	± 7 kW	1,30 GWh	$\pm 0,06$ GWh
EF-T1	112 kW	± 6 kW	0,98 GWh	$\pm 0,05$ GWh
EF-T2	117 kW	± 6 kW	1,03 GWh	$\pm 0,06$ GWh
EH	25 kW	± 2 kW	0,22 GWh	$\pm 0,01$ GWh
EJ	37 kW	± 2 kW	0,32 GWh	$\pm 0,02$ GWh
EK	133 kW	± 8 kW	1,16 GWh	$\pm 0,07$ GWh
EL	241 kW	± 12 kW	2,11 GWh	$\pm 0,10$ GWh
EM T1-2	373 kW	± 6 kW	3,27 GWh	$\pm 0,05$ GWh
EN	49 kW	± 3 kW	0,43 GWh	$\pm 0,03$ GWh
IA	96 kW	± 8 kW	0,84 GWh	$\pm 0,07$ GWh
IE	32 kW	± 5 kW	0,28 GWh	$\pm 0,02$ GWh
IG	35 kW	± 5 kW	0,31 GWh	$\pm 0,05$ GWh
IH	162 kW	± 11 kW	1,42 GWh	$\pm 0,10$ GWh
IM	61 kW	± 5 kW	0,54 GWh	$\pm 0,05$ GWh
IS	0 kW	± 0 kW	0,00 GWh	$\pm 0,00$ GWh
IT01	0 kW	± 0 kW	0,00 GWh	$\pm 0,00$ GWh
IT02	44 kW	± 4 kW	0,38 GWh	$\pm 0,04$ GWh
IU	242 kW	± 6 kW	2,12 GWh	$\pm 0,05$ GWh
Summe	2208 kW	± 30 kW	19,34 GWh	$\pm 0,26$ GWh
Grundlast Jahresschnitt	2623 kW	± 359 kW	22,98 GWh	$\pm 0,26$ GWh
NSHV ohne FRAKO-Bus	415 kW	± 389 kW	3,64 GWh	$\pm 3,40$ GWh

4.2.3 Identifikation von spezifischen NSHV Verbrauchern

Die einzige Verbrauchergruppe, die sich direkt aus den Daten der NSHVen zusammenfassen lässt, sind die GSI-Rechenzentren. Diese werden als einzige Verbrauchergruppe über einzelne speziell für sie bereitgestellte NSHVen versorgt. Das Rechenzentrum 1 im Südbau (SB), der Green-Cube-Prototyp in Container 25 und deren Kühlsysteme werden von der NSHV EL versorgt. Das Rechenzentrum 2, das den Ikarus- und Alice-Tier-2-Cluster umfasst, befindet sich im Betriebsgebäude (BG) im 2. Stock und wird von der NSHV IR versorgt. Die Kühlung dieses Rechenzentrums ist allerdings an die Gebäudelüftung bzw. Kühlung des BG-Gebäudes parasitär gekoppelt [20]. Das dritte Rechenzentrum ist das Teraflop-Rechenzentrum, das die Cluster Prometheus und Hera umfasst. Dieses wird von der NSHV IU versorgt. Das Kühlsystem des Teraflops bezieht seine Leistung über die NSHV IM und befindet in dem großen blauen Container hinter der Testinghalle. Die gesamte Grundlast der Rechenzentren lässt sich somit aus den NSHV-Wirkleistungsdaten ermitteln. Auch hier ist es zweckmäßig einen geeigneten Referenzzeitraum zu wählen, z.B. der Zeitraum des Wintershutdowns 2012, damit die Grundlast-Wirkleistungsbezüge vergleichbar bleiben.

Der Lastgang der NSHV EL, die das Rechenzentrum 1 und den Green-Cube-Prototyp im Container 25 inklusive Kühlung versorgt, ist in Abbildung 17 dargestellt. Die Grundlast liegt im zeitlichen Mittel bei $(240,8 \pm 11,6)$ kW.

Die NSHV IR, die das zweite Rechenzentrum im Betriebsgebäude versorgt, ist mit einem FRAKO-Messgerät ausgestattet. Dieses hängt allerdings nicht mit am Bus und kann nicht von der Abteilung ET per Computer durch Fernzugriff ausgelesen werden. Aufgrund unklarer Zuständigkeiten sind die Daten nicht verfügbar. Die Annahme des Wirkleistungsbezugs stützt sich auf einen Vortrag des IT-Palavers von H. Kreiser und beträgt etwa 120 kW inklusive Kühlung [21].

Die Grundlast des Teraflop-Rechenzentrums wurde bereits in Abschnitt 4.2.1 im Zusammenhang mit der Analyse der unterschiedlichen Leistungsbezüge in den Wintershutdowns 2012 und 2011 ermittelt. Sie beläuft sich inklusive Kühlung auf $(300,7 \pm 18,8)$ kW, wobei es sich um den Ausbaustatus des Teraflops im Winter 2012 handelt und nicht um den aktuellen Wirkleistungsbezug. Dieser liegt bei $(363,5 \pm 29,5)$ kW inklusive Kühlung (Stand: erste Maiwoche 2013). Der Lastgang des Referenzzeitraums ist in Abbildung 18 dargestellt.

In der Summe ergibt sich hieraus eine Gesamtgrundlast der Rechenzentren von $(661,5 \pm 30,4)$ kW. Da die Rechenzentren kaum Schwankungen in ihrem Leistungsbezug aufweisen, siehe Zweijahreslastgang des Rechenzentrums 1 und des Teraflop-Rechenzentrums im Anhang F, kann mittels der ermittelten Grundlast der Gesamtenergiebedarf eines Jahres errechnet werden. Dieser beträgt $(5,8 \pm 0,2)$ GWh. Abbildung 19 fasst die bisherigen Ergebnisse aus Abschnitt 4.2.2 und die hier ermittelte Menge des Energiebedarfs der Rechenzentren zusammen und setzt sie in Zusammenhang mit dem Gesamtenergiebedarf eines Jahres der GSI.

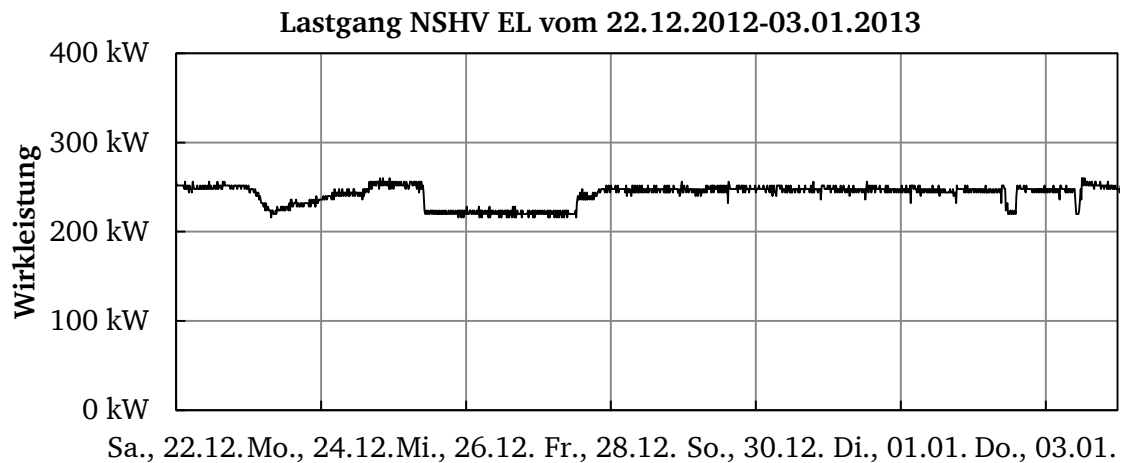


Abbildung 17: Lastgang der NSHV EL vom 22.12.2012 bis 03.01.2012. Diese versorgt das Rechenzentrum 1 und den Green-Cube-Prototypen inklusive deren Kühlung. Der mittlere Wirkleistungsbezug in diesem Zeitraum beträgt $(240,8 \pm 11,6)$ kW.

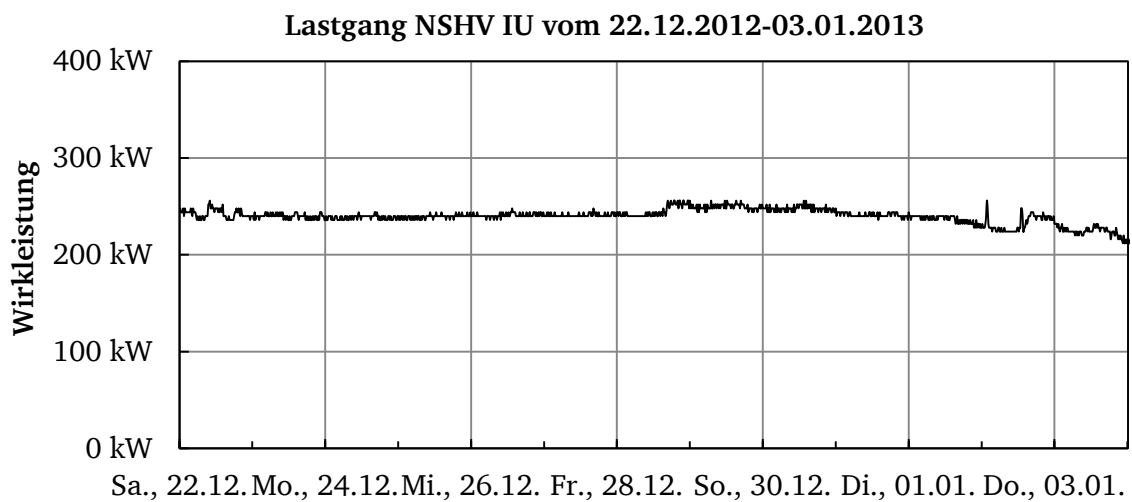


Abbildung 18: Lastgang der NSHV IU vom 22.12.2012 bis 03.01.2012. Diese versorgt das Teraflop Rechenzentrum ohne Kühlung. Der mittlere Wirkleistungsbezug in diesem Zeitraum beträgt $(207,6 \pm 18,0)$ kW.

Durchschnittlicher jährlicher Bedarf elektrischer Energie des C-1-Netzes 55,5 GWh

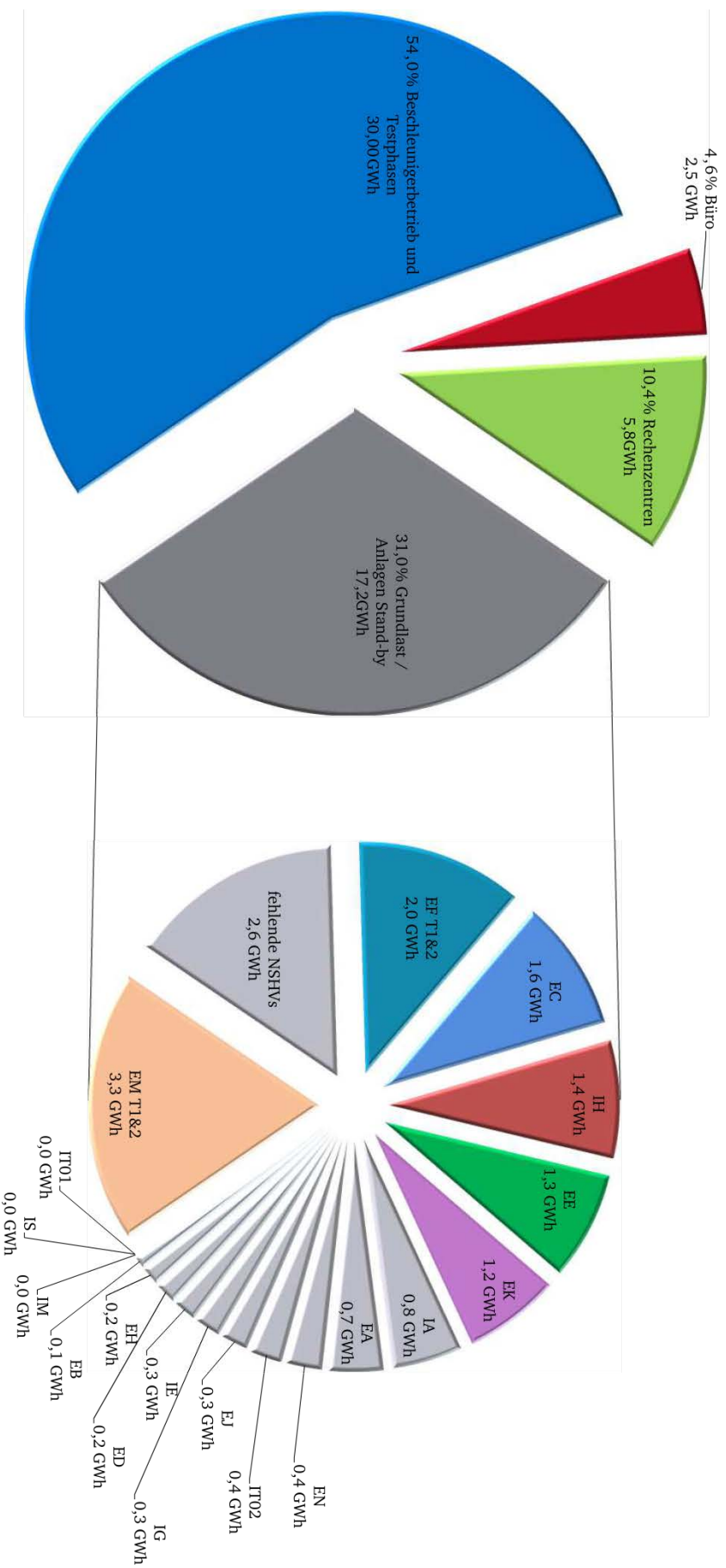


Abbildung 19: Darstellung des durchschnittlichen Energiebedarfs pro Jahr von 55,52 GWh der GSI. Der Bedarf ist aufgeschlüsselt nach den jeweiligen Verbrauchskategorien. Ausgehend von den drei bereits in Abschnitt 3.3.2 ermittelten Kategorien, Beschleunigerbetrieb und Testphasen, Büro und Grundlast/Anlagen-Stand-by ist es möglich, durch die Analyse der NSHV-Wirkleistungsdaten die Grundlast genauer zu differenzieren und den Anteil der Rechenzentren einzeln zu benennen. Zudem ist eine Aufteilung der restlichen, durch die Grundlast benötigt Energie von 17,2 GWh auf die einzelnen NSHVs möglich. Berechnet wurde der jährliche Energiebedarf der NSHVs anhand des im Wintershutdown 2012 ermittelten GrundlastWirkleistungsbezug.

4.2.4 Analyse der NSHV-Grundlast mittels Blindleistung und $\cos(\varphi)$

Die spärliche Dokumentation erfordert es die Blindleistung und den $\cos(\varphi)$ zu betrachten, siehe Abschnitt 2.5.2. Dies ermöglicht Aussagen darüber, inwiefern drehende Maschinen, das sind Elektromotoren jeglicher Art, von der NSHV versorgt werden und ob diese geregelt oder ungeregelt sind bzw. an- oder ausgeschaltet werden. Induktive Blindleistungsbezüge ($Q > 0$) geben an ob überhaupt drehende Maschinen im Netz betrieben werden, da diese Blindleistung benötigen um Magnetfelder aufzubauen. Durch Schwankungen des Blindleistungsbezugs kann daher direkt auf eine Änderung des Betriebs der drehenden Maschinen geschlossen werden. Der $\cos(\varphi)$ gibt den Anteil der Wirkleistung an der Scheinleistung an und ist somit ein Indikator für den Anteil des Energieverbrauchs der drehenden Maschinen im Netz, je kleiner der $\cos(\varphi)$, desto höheren Anteil haben die drehenden Maschinen am Energiebedarf im Vergleich zu den rein ohmschen Verbrauchern. Die Blindleistungs- und $\cos(\varphi)$ Betrachtung wurde für alle NSHVen mit einem Grundlast-Energiebedarf von mehr als 1 GWh durchgeführt. Diese sind in Tabelle 5 fett gedruckt und im rechten Tortendiagramm der Abbildung 27 farblich (nicht grau) abgebildet. Im Folgenden wird anhand zwei ausgewählter NSHVen, den NSHVen EK und EC, die Analyse der Blindleistung und des $\cos(\varphi)$ ausführlich dargestellt. NSHV EK versorgt den Südbau, ein Beschleunigerunabhängiger Gebäudekomplex der GSI. NSHV EC versorgt ausschließlich beschleunigerkomponenten. Die Auffälligkeiten und Potentiale sind auch auf alle anderen NSHV zu übertragen, da es sich hier um systembedingte Probleme handelt, die innerhalb der gesamten GSI zu beobachten sind. Die Plots und Analysen aller NSHVen, deren Grundlast-Energiebedarf pro Jahr über 1 GWh liegt, befinden sich im Anhang G.

Die Blindleistung wird wie die Wirkleistung durch die FRAKO-Bus-Messgeräte gemessen und dokumentiert. Allerdings liegen diese Werte in 5-Minuten-Mittelwerten vor und müssen entsprechend noch auf 15minütige Mittelwerte umgerechnet werden um den $\cos(\varphi)$ zu bestimmen. Der $\cos(\varphi)$ wurde aus den Wirk- und Blindleistungsdaten mittels der Formel (12) berechnet.

Die zur exemplarischen Analyse ausgewählte NSHV EK versorgt den kompletten Südbau, das sich im gleichen Gebäude befindende Rechenzentrum 1 wird hierdurch nicht versorgt, siehe Abschnitt 4.2.3. Im Südbau befinden sich die Biolabore, die Werkstätten, die Kantine und eine große Anzahl von Büroräumen. Dies benötigt eine Vielzahl an leistungsstarker TGA, die im Idealfall auch nur entsprechend ihrer Anforderung betrieben werden sollten. Dies bedeutet, dass idealerweise am Wochenende oder während der Betriebsferien, wenn ein geringer Bedarf besteht, das gesamte Lüftungssystem bzw. die Heizungs- und Klimatechnik heruntergeregelt wird.

Abbildung 20 zeigt die Wirkleistung in Schwarz, die Blindleistung in Blau und den $\cos(\varphi)$ in Grau von Anfang November 2012 bis Ende Januar 2013 der NSHV EK. Dieser Zeitraum beinhaltet alle wichtigen Betriebszustände der GSI. Im November lag Beschleunigerbetrieb vor, der mit dem der Lastgang wie vorhergesagt nicht korreliert, da im Gebäude SB keine Beschleunigerkomponenten untergebracht sind. Von Anfang Dezember war Shutdown und der letzte Zeitraum sind die Betriebsferien zwischen den Jahren, der die Grundlast der GSI definiert. Bei der Betrachtung der Wirkleistung fallen direkt die aus Abschnitt 14 identifizierten Werktagspeaks auf. Bei der Betrachtung der Wochenenden stellt man fest, dass der Wirkleistungsbezug sich jedes Wochenende in etwa auf dem gleichen Niveau befindet, d.h. in etwa die gleichen Verbraucher Leistung beziehen. Im Vergleich mit dem Zeitraum zwischen den Jahren fällt auf, dass hier der identische Leistungsbezug auftritt, d.h. auch hier der gleiche Betrieb im

NSHV EK : Wirk-, Blindleistung und $\cos(\varphi)$

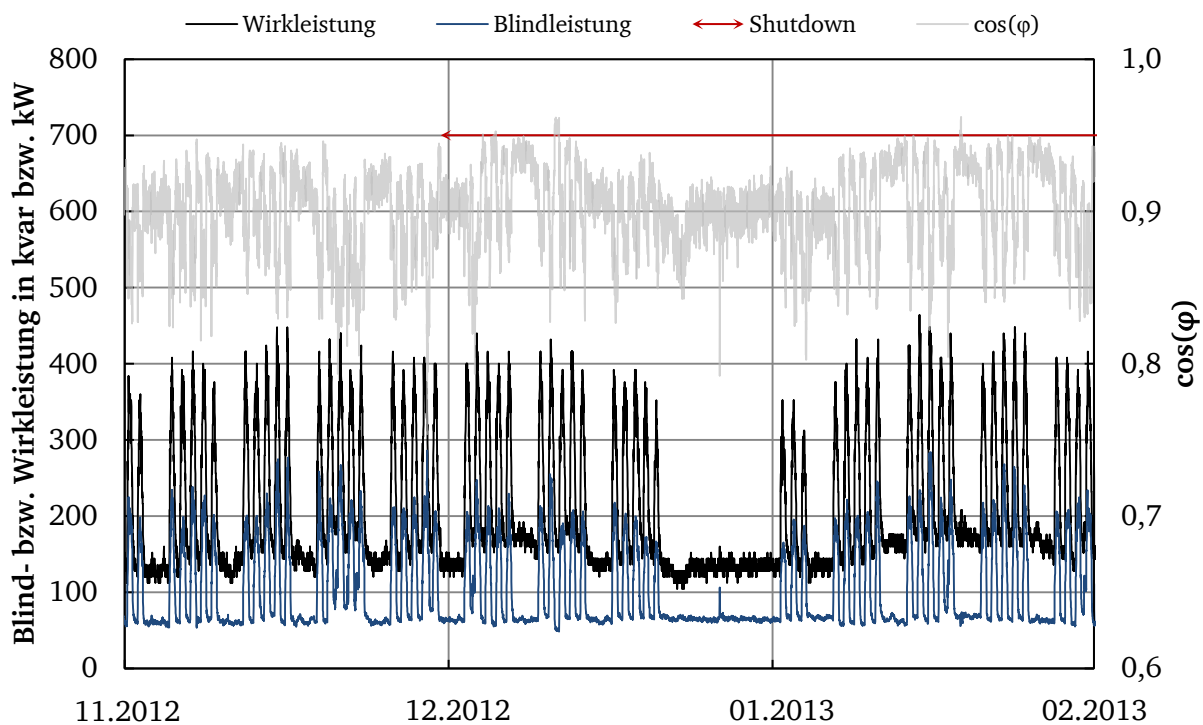


Abbildung 20: Wirk-, Blindleistung (schwarz und blau) und der $\cos(\varphi)$ (grau) der NSHV EK während des Zeitraums Anfang November 2012 bis Ende Januar 2013. Dieser Zeitraum beinhaltet sowohl Beschleunigerbetriebszeit, mit der der Leistungsbezug hier keine Korrelation zeigt, den Zeitraum des Shutdowns und den Zeitraum der Betriebsferien, der Bereich, der die Grundlast der GSI definiert.

Südbau vorliegt. Dieser ist mit einem Leistungsbezug von (133 ± 8) kW sehr hoch, obwohl betriebsferienbedingt keine Personen in diesem Gebäude arbeiteten. Dieser Grundlast-Leistungsbezug des Südbaus führt auf das Jahr hochgerechnet zu Kosten von ~ 135.000 € für elektrische Energie zur Erhaltung eines Stand-by-Status des Gebäudes.

Der Leistungsabgang EK-5a2 der NSHV EK versorgt die Lüftungs- bzw. Klimaanlage der Biolabore, Lüftungsanlage der Flure im SB, die Vakuum-Abluft der Labore, Lüftung des Aufzugsmaschinenraum und die Heizung TH58. Eine Messung des Wirkleistungsbezug des Abgangs EK-5a2 von W. Keil ergab einen Leistungsbezug von ~ 31 kW [22], dies entspricht 23 % der Grundlast der NSHV EK. Der Anteil der Lüftung der Biolabore an der Grundlast der NSHV EK ist dementsprechend kleiner als 23 %.

Betrachtet man die Blindleistung stellt man fest, dass die Blindleistung wie die Wirkleistung Werktagspeaks aufweist, die vor allem von manuell gesteuerten Lüftungsanlagen in den Werkstätten, den Abluftanlagen in der Kantine und bewegungsgesteuerten Ablüftern in den Biolaboren stammen. Die Blindleistung unterschreitet während des gesamten Zeitraums nie ein Minimum von (144 ± 16) kvar, was an den Wochenenden, den Nächten und zwischen den Jahren erreicht wird. Daraus lässt sich schließen, dass die Regelungstechnik der Lüftungsanlagen nicht zwischen Zeiträumen unterscheidet, in denen Personen nur kürzere Zeit abwesend sind, wie Nächte unter der Woche, und längeren Zeiträumen wie Wochenenden oder den Betriebsferien zwischen den Jahren. Differenziert betrachtet werden muss dies für die Biolabore, diese benötigten eine andere Regelung. Die nicht implementierte Unterscheidung in der Regelungstechnik zwischen den genannten Zeiträumen lässt sich durch die ergänzenden Betrachtungen des $\cos(\varphi)$ bestätigen. Würden die Lüftungsanlagen heruntergeregelt werden, würde

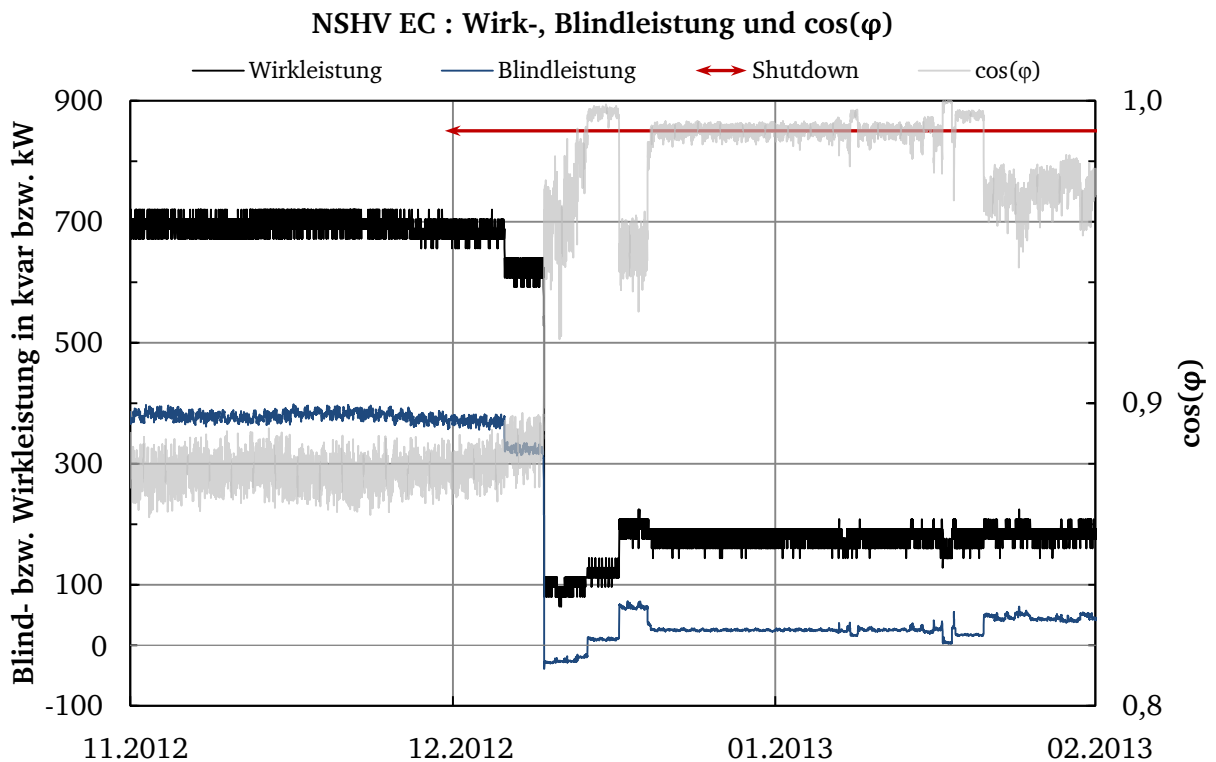


Abbildung 21: Wirk-, Blindleistung (schwarz und blau) und der $\cos(\varphi)$ (grau) der NSHV EC, während des Zeitraums Anfang November 2012 bis Ende Januar 2013. Während der Betriebszeit des Beschleunigers im November ist der Wirkleistungsbezug erheblich höher als während des Shutdowns. Auch der Wirkleistungsbezug sinkt erheblich während des Shutdowns. Der $\cos(\varphi)$ steigt dabei zweitweise auf fast 1 an, wodurch ersichtlich wird, dass der restliche Leistungsbezug fast ausschließlich auf rein ohmsche Verbraucher zurückzuführen ist.

der Anteil Wirkleistung an der Scheinleistung zunehmen und der $\cos(\varphi)$ steigen. Da der $\cos(\varphi)$ eher konstant bleibt als steigt, und während der Betriebsferien sich sogar auf einem eher niedrigen Niveau befindet, ist das ein eindeutiges Anzeichen für einen konstanten Betrieb der Gebäudelüftungsanlagen des gesamten Südbaus. Vor allem zwischen den Jahren und an den Wochenenden kann durch entsprechende Regelung, elektrische Energie eingespart werden. Ein Gespräch mit der Abteilung Gebäude und Anlagentechnik (GA) hat die unzureichende bzw. fehlende Regelungstechnik im Südbau bereits bestätigt [22], ein Problem, das auch auf den Nordbau zutrifft. Die NSHV des Nordbaus versorgt Beschleunigerkomponenten und Bürogebäude, was ein Differenzieren im Nordbau zwischen den beiden Bereichen allerdings unmöglich macht.

Der Verlauf der Wirk-, Blindleistung und des $\cos(\varphi)$ der NSHV EC, dargestellt in Abbildung 21, zeigt ein ganz anderes Verhalten als das der NSHV EK. Deutlich zeigt sich Korrelation des Leistungsbezugs mit dem Beschleunigerbetrieb. Der Wirkleistungsbezug liegt während des Betriebs bei $(693,5 \pm 12,7)$ kW und der Blindleistungsbezug bei $(379,4 \pm 6,8)$ kvar. Der relativ niedrige $\cos(\varphi)$ von $0,877 \pm 0,01$ zeigt, dass es sich hier zum großen Teil um Wirkleistungsbezüge von drehenden Maschinen handelt. Während des Shutdowns stellt sich die Situation komplett anders dar, der Wirkleistungsbezug liegt im Januar bei $(30,8 \pm 11,9)$ kW, der Blindleistungsbezug bei $(182,0 \pm 13,2)$ kvar und der $\cos(\varphi)$ bei $(0,984 \pm 0,011)$. Die geringe Blindleistung mit dem sehr hohen $\cos(\varphi)$ zeigt, dass der Großteil der drehenden Maschinen im Shutdown gedrosselt sind oder komplett ausgeschaltet sind. Allerdings bedeutet das im Ge-

genzug, dass der Wirkleistungsbezug während des Shutdowns auf rein ohmsche Verbraucher zurückzuführen ist, was die Frage aufwirft, ob hier unnötig Steuersysteme, eventuell der ausgeschalteten Pumpen, oder auch Strahldiagnostik noch am Netz sind, obwohl diese eigentlich nicht benötigt werden. Dies muss das Ziel einer weiteren genaueren Untersuchung sein, da der Wirkleistungsbezug von $\sim 182\text{ kW}$ zu einem Energiebedarf pro Tag von $4,3\text{ MWh}$ führt, was jeden Tag Kosten von $\sim 500\text{ €}$ verursacht.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass in allen untersuchten NSHVen vor allem die fehlende Regelung der drehenden Maschinen und damit der Lüftungs- und Kühlungsanlagen der TGA auffällt. Zudem ist zu sehen, dass während des Shutdowns, gerade bei NSHVen, die die Beschleunigeranlage versorgen, die Verbraucher zum großen Teil ohmscher Art sind. Der Leistungsbezug im Shutdown wird durch nicht abgeschaltete Elektronik verursacht, dadurch entstehen unnötigen Kosten. Dies ist nur zu beheben, wenn in den jeweiligen Arbeitsgruppen eine Sensibilisierung für dieses Thema geschaffen wird und im Einzelfall gezielt Abschaltungspläne entwickelt werden. Als eine weitere Möglichkeit einer automatisierten Abschaltung ist die Implementierung von Abschaltungsplänen bzw. Protokollen in das neue Kontrollsystem für FAIR.

Ergänzend lässt sich noch festhalten, dass die GSI zumindest im Jahr 2012 trotz der teils sehr großen Mengen an Blindleistung keine Kosten für zu niedrigen $\cos(\varphi)$ vom VNB berechnet wurde (siehe VNB-Jahresendabrechnung 2012) [23], da in den NSHVen Blindleistungskompensationsanlagen eingebaut sind [15].

5 Modellierung der Leistungsbezüge der Komponenten der Beschleunigeranlage

In der bisherigen Analyse konnten Informationen über den Leistungsbezug bzw. Energieverbrauch der gesamten GSI-Anlage und der meisten NSHVen über vorhandene Messdaten ermittelt und diskutiert werden. Dadurch konnte der Energieverbrauch der GSI im Wesentlichen in vier Kategorien unterteilt werden: den Büro-, den Rechenzentrums-, den Grundlast/Anlagen Stand-by und den Beschleunigerbetriebsanteil. Die Grundlast konnte mittels der soweit vorhandenen Daten der FRAKO-Messgeräte teilweise auf diskrete Verbraucher, aber zumindest auf die einzelnen NSHVen zurückgeführt werden. Der große Anteil des Beschleunigerbetriebs ist allerdings auf diese Weise nicht weiter differenzierbar. Die Hauptkomponenten der Beschleunigeranlage die Leistungsverstärker des Hochstrominjektors (HSI), des Hochladungsinjektors (HLI), der Alvarezbeschleunigerstrukturen 1-4 und der Einzelresonatoren sowie die Netzgeräte der HF und der DC-Magnete des SIS beziehen ihre Leistung direkt von der 20 kV Ebene. Auf der Mittelspannungsebene gibt es keine Messeinrichtung, deshalb liegen hier keine historischen Daten vor. Eigene Messungen konnten aufgrund des durchgehenden Shutdowns der Anlage während der gesamten Zeitdauer der Masterarbeit auch nicht aufgenommen werden. Daher musste ein ganz anderer Ansatz zur Analyse des Beschleunigerbetriebs gewählt werden.

Es existieren Leistungsmessungen des Beschleunigerbetriebs aus dem Juli 2012 von H. Vormann et. al. Diese wurden durch gezieltes ein- und wieder ausschalten einzelner Beschleunigerkomponenten und Anlagenteile und der sich so ergebenden Wirkleistungsdifferenz ermittelt. Insgesamt wurden so die Leistungsbezüge von 31 verschiedenen Anlagenteilen bestimmt, wobei zwischen den Leistungsbezügen der HF- und der Magnetnetzgeräte differenziert wurde. Hierzu wurde die Wirkleistungsanzeige im HKR verwendet. Diese ist eine Echtzeitanzeige der in Abschnitt 2.5.3 beschriebenen Messung der Wirkleistung des Allgemeinlastnetzes. Ein Problem dieser Messung, die den Fehler dieser Daten nur schwer einschätzen lässt, ist die starke Schwankung der Wirkleistungsanzeige. Die Anzeige springt innerhalb von wenigen Sekunden um teils mehrere 50 kW nach oben und unten. Außerdem konnten nur die extremen Betriebsmodi der Beschleunigeranlage gemessen werden. Die ermittelten Leistungsbezüge können dennoch zur Berechnung des Energiebedarfs der Betriebsmonate der letzten zwei Jahre dienen. Um exaktere Leistungsbezüge zu ermitteln passt man mittels eines Algorithmus das Modell dem wirklichen benötigten Bedarf an. Die Messdaten, die dabei als Startwerte der Variablen des Optimierungsalgorithmus dienen, werden dabei so variiert, dass sich der modellierte Energiebedarf an den realen Energiebedarf anpasst.

5.1 Erläuterung der Messung von H. Vormann et. al.

Die genauen Messdaten sind mit den jeweils gewählten Einstellungen im Anhang J und K zu finden. Karten der Strahlzweige inklusive der Bezeichnungen, die im Folgenden verwendet werden, sind in Anhang H und I. Der folgende Abschnitt dient dem besseren Verständnis der Erhebung der Messdaten.

Zur Bestimmung der Leistungsbezüge der UNILAC-Komponenten, Alvarez 1-2B, Alvarez 1-4 und ER und der beiden Injektoren HLI und HSI wurden die vier Extremeinstellungen eines möglichen Betriebs eingestellt. Es wurden hohe Steifigkeit mit einem hohen Tastverhältnis, hohe Steifigkeit mit einem niedrigen Tastverhältnis und entsprechend niedrige Steifigkeit mit einem hohen Tastverhältnis und niedrige Steifigkeit mit niedrigem Tastverhältnis gewählt. Zur Wirkleistungsbestimmung des HLI sowie der Alvarez-Tanks 1-4 und der Einzelresonatoren wurde als Einstellung $64\text{Ni}9+$ mit $A/q = 7,11$ und $40\text{Ar}10+$ mit $A/q = 4$ als Referenz-Isotop

gewählt. Zur Messung des HSI wurden die Einstellungen für 40Ar^{2+} mit $A/q = 20$ und 238U^{4+} mit $A/q = 59,5$ gewählt.

Für die Messung der Strahlzweige in der Experimentierhalle wurden die kompletten Strahlzweige, X bis X8, Y bis Y7, Z bis Z6 und M auf, sofern möglich, einen Referenzbetrieb mit einer Energie von $5,9\text{MeV/u}$ bzw. $11,4\text{MeV/u}$ eingestellt.

Der Wirkleistungsbezug des Transferkanals wurde entsprechend für $11,4\text{MeV/u}$ für hohe Steifigkeit und niedrige Steifigkeit gemessen.

Für den SIS-Betrieb wurden entsprechend der speziellen Anforderung an Pulslänge und Energie der Bunche aus dem UNILAC nochmals alle Strukturen des UNILAC mit denen für den SIS Betrieb typischen Einstellung gemessen. Für das SIS selbst wurde nur der Leistungsbezug des Pulslastnetzes aufgenommen, der für diese Modellierung des Energieverbrauchs im Allgemeinlastnetz nicht von Interesse ist. Der Wirkleistungsbezug für die Netzgeräte der HF wurde, ergänzend zur Messung von H. Vormann et. al., nach Rücksprache mit U. Laier, auf 120kW geschätzt [24].

Die Experimentierhalle 2, siehe Abschnitt 2.1, wurde für die Messung unterteilt in die Hochenergiestrahlführung die Experimente FRS, FOPI, ALADIN und den ESR. Für den ESR wurden im Rahmen der Messung ebenfalls nur der Pulslastbezug ermittelt und nicht der Wirkleistungsbezug der Infrastruktur des ESR, die am Allgemeinlastnetz hängt, wie zum Beispiel die Magneten der Elektronenkühlung. Hierfür wurde ebenfalls ergänzend zur Messung nach Rücksprache mit der ESR-Fachabteilung ein Wirkleistungsbezug von 150kW angenommen [25]. Alle fehlenden Experimentierplätze oder Einrichtung, die direkt mit dem Strahlbetrieb verknüpft sind, wurden nicht berücksichtigt und konnten auch nicht ergänzend in Erfahrung gebracht werden.

Für die Kühlung des UNILAC- und des SIS-Betriebs sind in der Messung von H. Vormann jeweils geschätzte Wirkleistungswerte für einen Normallastbetrieb aller Kühlpumpen angegeben. Ebenso ist für die Summe aller Vakuumpumpen und Strahldiagnostik ein geschätzter Wirkleistungsbezug angegeben.

5.2 Modellierung des Energiebedarfs der Jahre 2011 und 2012

Mittels eines Abgleichs des Operationslogs und des Strahlzeitplans lässt sich fast für jeden Tag der Beschleunigerbetrieb rekonstruieren. Lediglich an wenigen Tagen, an denen Maschinenexperimente durchgeführt wurden, findet sich kein eingetragenes Experiment im Strahlzeitplan, was in der Betrachtung der Ergebnisse der Modellierung beachtet werden muss. Mittels dieser genauen Dokumentation lässt sich nun der Energiebedarf E_{Model} mittels der Wirkleistungsdaten aus der Messung von H. Vormann berechnen. Folgenden Vereinfachungen müssen jedoch getroffen werden:

- (1) Jeder im Strahlzeitplan eingetragenen Experimentier- bzw. Strahlbetrieb besteht 24 Stunden ohne Unterbrechung.
- (2) Die Kühlkreisläufe von UNILAC und SIS sind 24h jeden Tag im Monat unter Normallast in Betrieb.

Der Betriebszustand „Normallast“ wurde aus H. Vormanns Aufzeichnungen zur Messungen übernommen. Die Annahme, trifft allerdings nur teilweise zu. Der Lastgang der NSHV IM, siehe Anhang C, die diese Kühlkreisläufe KS01 und KS02 versorgt, zeigt, dass in kurzen Shutdownperioden teilweise ein reduzierter Betrieb der Kühlung eingestellt wurde. Dies ist jedoch nicht der Regelfall. Diese Vereinfachung muss aber zur Vereinheitlichung des Model getroffen

werden, da die Kühlung nicht mit reduzierter Last in das Modell einberechnet werden kann, da keine fundierten Zahlen eines reduzierten Betriebs vorliegen. Die Monate mit Shutdownphasen, in denen die Kühlleistung reduziert war, werden im Modell zu hohe Leistungsbezüge aufweisen. Das muss entsprechend bei der Ergebnisinterpretation beachtet werden.

5.2.1 Aufbau und Optimierung des Modells

Da die Fehler der Messwerte, siehe Anfang Kapitel 5, schlecht einzuschätzen sind, ist es ebenfalls der damit berechnete Energiebedarf. Dies macht einen Vergleich mit der real verbrauchten Energie E_{real} schwierig. Zudem beinhaltet der Energiebedarf des Allgemeinlastnetzes auch beschleunigerunabhängige Einrichtungen, Bereiche bzw. Prozesse, wie z.B. den Bürobetrieb. Mittels der Ergebnisse der Analyse der Lastgänge des Allgemeinlastnetzes und der Analyse der NSHVen, siehe Kapitel 3 und 4, lässt sich der reale Energiebedarf E_{real} der vergangenen Monate reduzieren um den Energiebedarf, der zweifelsfrei unabhängig vom Beschleunigerbetrieb ist, definiert als E_{un} . Dieser setzt sich zusammen aus den Bereichen Rechenzentren, Bürobetrieb, Betrieb der Testinghalle und Südbau, wobei der Bürobedarf, ermittelt in Abschnitt 3.2.2, um den im Südbau enthaltenen Anteil reduziert wird. Die Existenz dieser Daten ist daher zwingend zur Berechnung von E_{un} . Da diese Daten vollständig erst ab 2011 vorliegen, abhängig vom Installationsdatum der FRAKO-Messeinrichtungen, konnten nur die Jahre 2011 und 2012 modelliert werden. Der Sollwert des Energiebedarfs des Beschleunigerbetriebs ergibt sich so mittels

$$E_{soll} = E_{real} - E_{un} \quad (15)$$

Ausgehend von diesem zum Vergleich dienenden Sollwert des Energiebedarfs des Beschleunigerbetriebs lassen sich die Leistungsbezüge der einzelnen Einrichtungen bzw. Leistungswerte der Messung von H. Vormann et. al. Variieren mit dem Ziel, den Modellwert E_{Modell} dem Sollwert E_{soll} des Energiebedarfs anzupassen. Die zur Optimierung des Modells dienende Größe δ ergibt sich aus der quadratischen Differenz von E_{Modell} und E_{soll} normiert um E_{soll} , damit δ unabhängig von einer Einheit ist,

$$\delta = \frac{(E_{Modell} - E_{soll})^2}{E_{soll}}. \quad (16)$$

Die Optimierung des Modells wurde jeweils für ein gesamtes Jahr, 2011 und 2012, durchgeführt, so dass in den beiden Fällen die Summe der δ_m -Werte eines Monats zu einem Jahres- δ_j als Optimierungsgröße dient,

$$\delta_j = \sum_{m=1}^n \delta_m, \quad (17)$$

wobei n die Zahl Beschleunigerbetriebsmonate darstellt.

Die 52 Messdaten von H. Vormann, deren Messwerte als Startwerte dieser Optimierung dienen, wurden zwecks der Vereinfachung nochmals zusammengefasst unter der Annahme, dass sich der Leistungsbezug der HF und der Magnete identisch verhält. So hat jeweils ein Parameter den gleichen Einfluss auf den Wirkleistungsbezug der Magnete und der HF einer Beschleunigerkomponente. Insgesamt ergeben sich für die Optimierung 30 freie Parameter. Die

Grenzen, in denen sich die Parameter bewegen können, wurden ebenfalls eingeschränkt, um rein mathematische Lösungen zu verhindern. Unter der Annahme, dass die Messwerte von H. Vormann nicht nur geeignete Startwerte bilden, sondern sich auch in der richtigen Größenordnung befinden, beträgt das zulässige Variationsintervall der Parameter maximal das Ein- einhalbfache bzw. minimal die Hälfte des Startwerts.

Zur Optimierung bzw. zur Minimierung von δ wurde ein genetischer Algorithmus verwendet, der vor allem bei Modellen verwendet werden kann, deren mathematische Zusammenhänge nicht geklärt und sehr wahrscheinlich nicht linear sind. Die Größe der Population wurde auf 10000 festgelegt mit einer Mutationsrate von 9 % [26].

5.2.2 Ergebnisse der Modellierung

Tabelle 6 listet die Werte für δ_j vor und nach der Optimierung auf, sowie die Betriebsmonate, die in den Jahren modelliert wurden. Die Modellierung hat δ_j im Jahr 2011 um den Faktor 7,7 verkleinert und im Jahr 2012 um den Faktor 18,2.

Aus dem modellierten und optimierten Energiebedarf der einzelnen Beschleunigerkomponenten kann mittels der jeweiligen Anzahl an Betriebstagen anschließend ein Wirkleistungsbezug für einen durchschnittlichen Betrieb berechnet werden.

Um diesen für den UNILAC zu erhalten, werden der Energiebedarf der Kühlung des UNILAC, der HF und Magnete der Injektoren, der Alvarez-Strukturen und der Einzelresonatoren zusammengefasst. Abbildung 22 stellt die ermittelten Leistungsbezüge des UNILAC-Betriebs in Abhängigkeit der einzelnen Monate der beiden Jahre 2011 und 2012 dar. Hierbei stechen direkt die Monate Juli beider Jahre und der September 2012 mit einem erheblich größeren Leistungsbezugs hervor. Dies liegt vor allem daran, dass in den Monaten jeweils eine Shutdownphase von mindestens zehn Tagen lag, daher ergibt sich hier aufgrund der getroffenen Vereinfachung, dass die Kühlung auf einem identischen Niveau in dieser Zeit weiterläuft (siehe Abschnitt 5.2), ein zu hoher Leistungsbezug. Zusätzlich sind im Juli 2011 während der Shutdownphase Maschinenexperimente durchgeführt worden, die im Strahlzeitplan nicht vermerkt sind, weshalb der modellierte Energieverbrauch in diesen Monat zu hoch ist gemessen am eigentlichen Beschleunigerbetrieb, da der Maschinenexperimentbetrieb dort ohne weitere Beachtung mit einberechnet wurde. Nimmt man diese Monate aufgrund dieser Argumentation aus der weiteren Analyse heraus, ergibt sich für einen durchschnittlichen UNILAC-Betrieb eine notwendige Wirkleistung von $4,2\text{MW} \pm 6\%$. Um einen vergleichbaren Wert für die notwendige Wirkleistung aus dem Allgemeinlastnetz des SIS-Betriebs zu erhalten, werden die Energieverbräuche entsprechend der Anforderung für SIS-Pulse an den UNILAC, die Injektoren, der Alvarez-Strukturen A1-A4, den Transferkanals und die HF des SIS zusammengefasst und anschließend durch die entsprechenden Betriebstage des jeweiligen Monats geteilt. Abbildung 23 fasst die erhaltenen Wirkleistungsbezüge der jeweiligen Monate der Jahre 2011 und 2012 zusammen. Hier wird deutlich, dass der Wirkleistungsbezug des SIS sehr volatil ist

Tabelle 6: Zusammenfassung der Werte für δ_j , die sich aus den Messungen von Dr. Vormann ergeben (Ausgangswerte) und der Werte für δ_j nach der Optimierung des Modells zur Bestimmung der Leistungsbezüge der Beschleunigeranlage.

Jahr	Ausgangswerte δ_j	Nach der Optimierung δ_j	Betriebsmonate
2011	0,088	0,012	7
2012	0,107	0,006	8

und stärker von der Wahl des Betriebsmodus abhängt als bei einem reinen UNILAC-Betrieb. Zudem trägt hier die im vorangegangenen Abschnitt angesprochene Problematik durch Vereinfachung der Annahme der dauerhaft auf Normallastbetrieb laufenden Kühlung eine noch größere Rolle, da es nur sehr wenige Monate gibt, in denen es durchgehenden SIS-Betrieb gibt. Dennoch kann der hier ermittelte Wirkleistungsbezug des SIS als obere Grenze eines durchschnittlichen Betriebs angenommen werden. Unter Ausschluss des Monats Juli 2011, da hier wie bereits angesprochen nicht eingetragene Maschinenexperimente stattfanden, ergibt sich im Mittel für die restlichen Monate ein notwendiger Wirkleistungsbezug für den durchschnittlichen SIS-Betrieb zu $2,2 \text{ MW} \pm 38 \%$.

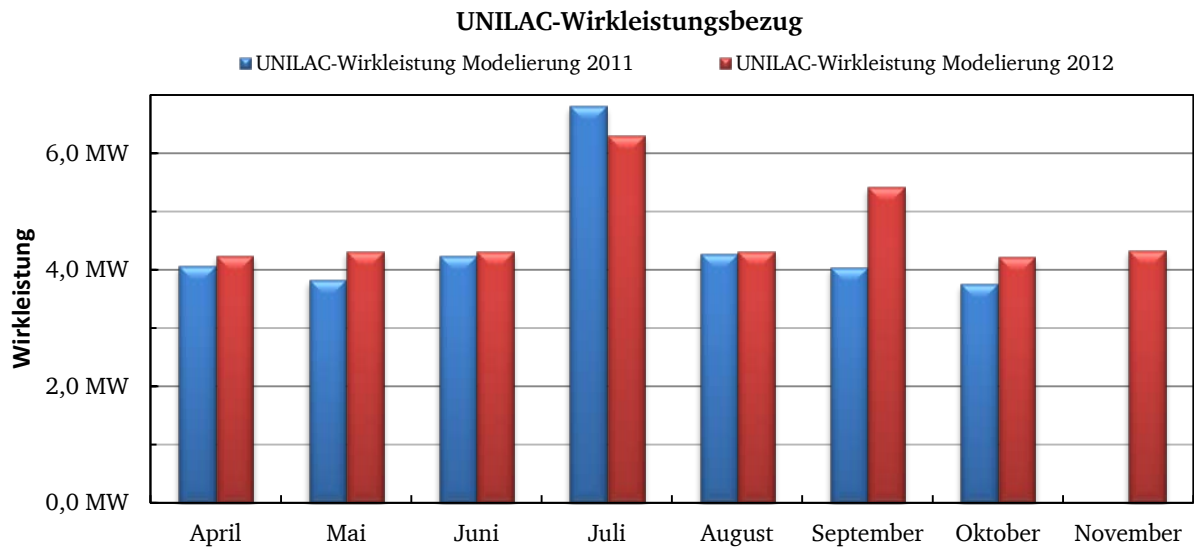


Abbildung 22: Durchschnittlicher Wirkleistungsbezug des UNILAC aus der Optimierung des Models der Jahre 2011 und 2012. In den Monaten Juni und September des Jahres 2012 und im Juni 2011 wurden Maschinenexperimente durchgeführt, die nicht im Strahlzeitplan aufgeführt sind. Deshalb ergibt sich hier ein zu hoher Leistungsbezug, da das Model die Energiemenge auf die wenige Tagen anpasst. Die Monate können aus der Gesamtwertung aufgrund dieser Tatsache herausgenommen werden. Der durchschnittliche Leistungsbezug der durch UNILAC-Betrieb benötigt wird, liegt bei $4,2 \text{ MW} \pm 6\%$.

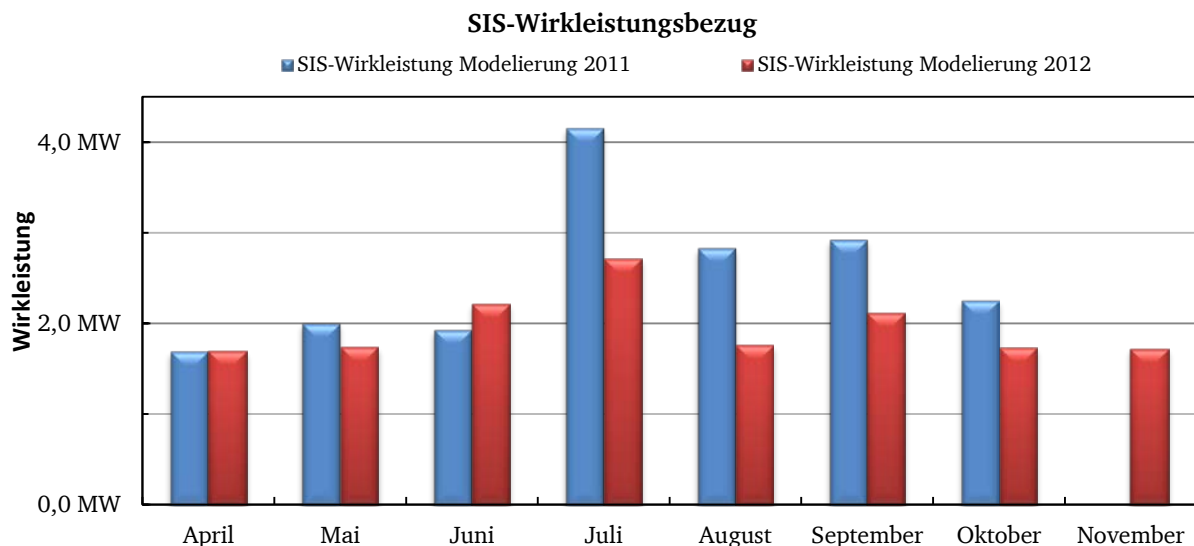


Abbildung 23: Durchschnittlicher Leistungsbezug bei SIS-Betrieb aus der Optimierung des Models des Jahres 2011 und 2012. Der Leistungsbezug des SIS ist sehr volatil aufgrund der vereinfachenden Annahme der immer durchlaufenden Kühlung und der Tatsache, dass der SIS-Wirkleistungsbezug sehr viele stärker von der Wahl des Betriebsmodus abhängt als der Betrieb des UNILAC. Der Wirkleistungsbezug eines durchschnittlichen SIS-Betriebs ergibt sich hieraus zu $2,2 \text{ MW} \pm 38\%$.

6 Das Paul Scherrer Institut (PSI) – Ein kurzer internationaler Vergleich

Im Rahmen dieser Masterarbeit fand ein eingeladenen Besuch am PSI inklusive eines gehaltenen Vortrags dieser aktuellen Untersuchungen des elektrischen Energieverbrauchs der GSI statt. Das PSI betreibt ebenso wie die GSI mehrere großtechnische Beschleunigeranlagen, hat zudem aber noch einige weitere Forschungsgebiete, die sich nicht direkt auf die Beschleunigeranlagen stützen. Der Energiebedarf der Beschleunigeranlagen steht deutlich im Vordergrund. Auch das PSI ist bestrebt, seinen Energieverbrauch genauer aufzuschlüsseln und dadurch besser nachvollziehen zu können und eventuelle Potentiale zur Reduktion des Energieverbrauchs zu identifizieren [27].

Im Rahmen dieses Prozesses am PSI wurde ebenfalls eine Masterthesis von einem EMBA-Studenten angefertigt, diese gibt einen kleinen Überblick über die gesamte Anlage und beschränkt sich im Weiteren aber auf die Einsparungspotentiale der Büro und Laborbereiche [28]. Im Folgenden wird kurz ein Gesamtüberblick des PSI gegeben und die Hauptkennzahlen werden der GSI gegenübergestellt.

Das PSI besteht im Gegensatz zur GSI aus mehreren voneinander unabhängig operierenden Großforschungsanlagen:

- | | |
|--|--------|
| • Protonenbeschleuniger HIPA, inkl. SINQ und UCN | 12 MW |
| • Swiss Lightsource (SLS) | 3,5 MW |
| • Medizinbetrieb | 1,5 MW |
| • Testanlage SwissFEL-Beschleuniger | 1,0 MW |

Die angegebenen Leistungsbezüge beruhen auf einer Schätzung, die im Rahmen der Masterthesis von René Käch eingeholt wurde [28]. Der durchschnittlich jährliche benötigte Energiebedarf, Spitzenlast sowie der Grundlastleistungsbezug des PSI und der GSI sind in Tabelle 7 gegenübergestellt. Das PSI zahlt 0,12 \$/kWh für die elektrische Energie, umgerechnet sind das 0,10 €/kWh und damit ca. 14% weniger als der Preis von 0,116 €/kWh, den die GSI für elektrische Energie bezahlt. Allerdings kommt bei der GSI noch das Netznutzungsentgelt hinzu. Interessant ist hierbei, dass ein Vergleich der wichtigen Kenngrößen des Energieverbrauchs untereinander gleiche Verhältnisse aufweist. Der Energiebedarf des PSI, der Spitzenlastbezug und die Grundlast sind ca. zweimal höher. Das Verhältnis von Spitzenlast zu Grundlast beträgt bei beiden Anlagen in etwa bei vier. Dieser Zusammenhang könnte auf die gleichen Problematiken im Bereich der Grundlast hindeuten: unnötig durchlaufender Betrieb von Kühlkreisläufen in Kombination mit fehlender Regelungstechnik um gedrosselten Betrieb zu realisieren. Dies ist auch eine Vermutung seitens des PSI.

Tabelle 7: Gegenüberstellung der wichtigsten Größen des elektrischen Energiebedarfs im Jahresmittel des PSI und der GSI. Interessant hierbei ist die Tatsache, dass das PSI ca. zweimal mehr Energie benötigt, der maximale Leistungsbezug und der Grundlast Leistungsbezug sich ca. um den Faktor zwei unterscheiden und das Verhältnis Spitzenlast zu Grundlast beider Einrichtung identisch bei ungefähr vier ist.

PSI			GSI		
Energiebedarf	Maximaler Leistungsbezug	Grundlast	Energiebedarf	Maximaler Leistungsbezug	Grundlast
128,65 GWh	~20 MW	~5 MW	55,52 GWh	12 MW	2,6 MW

Das PSI hat mit ähnlichen Problemen zu kämpfen, die auch bei der GSI vorliegen. Zusammengefasst sind dies die fehlenden Messeinrichtungen im Verteilungsnetz, um eine höhere Transparenz des Energiebedarfs zu realisieren und die teils ungenügenden Dokumentation der internen Unterverteilungen, um die entsprechenden Energieverbräuche diskreten Verbraucher überhaupt zuordnen zu können.

Weiter ist das PSI allerdings in Bezug auf die Betrachtung des Energiebedarfs. Das PSI hat im März 2012 ein Energie-Monitoring in das Gebäudeleitsystem integriert und will mittels der gesammelten Daten erstmals Erfahrungen sammeln wie sich der Betrieb differenziert auf den Energiebedarf auswirkt. Diese Erfahrungen sollen dann im Weiteren zu Erkenntnissen führen, wie energieeffizientere Betriebszuständen zu erreichen sind.

Dies ist ein wichtiger und richtiger Schritt zu nachhaltigem und effizientem Betrieb einer großtechnischen Forschungseinrichtung. Es wäre in diesen Zusammenhang eine Zusammenarbeit mit dem PSI, aufgrund ähnlicher Probleme, zu empfehlen. Mit der neuen Anlage FAIR wird sich das Verhältnis des Energiebedarfs zwischen PSI und GSI/FAIR umkehren. Eine steti-ge wachsende Zusammenarbeit würde helfen die Energiekosten zu begrenzen und Ressourcen zu schonen. Außerdem könnten gemeinsame Investitionen, wie die Anschaffung von Mes-selektronik in noch größerer Stückzahl, preisgünstiger werden.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die Beschleunigeranlage der GSI befindet sich im Jahr im Schnitt 5700 Stunden im Experimentierbetrieb. Insgesamt werden im jährlichen Mittel 55,52 GWh elektrischer Energie im Allgemeinlastnetz C1 benötigt. Umgelegt sind das 10 MWh elektrische Energie pro Beschleunigerbetriebsstunde. Die Kosten für elektrische Energie einer Stunde Beschleunigerbetrieb belaufen sich damit auf 1.100 € bei einem Preis von 0,116 €/kWh, wobei hier die Netznutzungsentgelte nicht enthalten sind. Das sind die Kennzahlen des elektrischen Energiebedarfs der GSI. Die genaue Analyse des Bedarfs an elektrischer Energie ist Hauptbestandteil dieser Arbeit.

Die Energie, die im Pulslastnetz umgesetzt wird, beträgt ca. 9 % der benötigten Gesamtenergie. Der Anteil der benötigten Energie im Allgemeinlastnetz beträgt demzufolge 91 %. Die Leistung im Pulslastnetz wird entsprechend des geforderten SIS- bzw. ESR-Betriebs bezogen, so dass hier eine Optimierung nur schwer möglich ist, ohne den Beschleunigerbetrieb direkt einzuschränken. Deshalb wurde das Pulslastnetz von der Analyse ausgenommen. Die Anteile des Energiebedarfs, die auf den Beschleunigerbetrieb, den Bürobetrieb, die Rechenzentren und den Erhalt des Stand-bys der Anlage bzw. der GSI-Grundlast zurückzuführen sind, wurden im Rahmen dieser Arbeit mittels Analyse der Wirkleistungsdaten des Allgemeinlastnetzes und der untergeordneten Niederspannungshauptverteilungen (NSHV) erarbeitet. Der durchschnittlichen Gesamtbedarf an elektrischer Energie beträgt ~56 GWh und setzt sich zusammen aus 54 % Beschleunigerbetrieb und Testphasen, 31 % Grundlast/Erhaltung des Anlagen-Stand-bys, 10,4 % Rechenzentren und 4,6 % Bürobetrieb. Es wurde mit Hilfe der vorhandenen Daten der NSHVen die Zusammensetzung der Grundlast weiter aufgeschlüsselt und Potentiale zur Reduktion des elektrischen Energieverbrauchs benannt. Der Großteil des Energiebedarfs, der beschleunigerbetriebsunabhängig ist, konnte klar abgegrenzt werden. Mittels Leistungsmessung einzelner Beschleunigerkomponenten aus dem Jahr 2012 von H. Vormann et. al. [29] konnte unter Einbezug des Strahlzeitplans und des Operationslogs der Energiebedarf des Beschleunigerbetriebs modelliert werden. Dieses Modell wurde an den realen Bedarf mittels eines Optimierungsalgorithmus angepasst. Ein durchschnittlicher Leistungsbezug für reinen UNILAC- und SIS-Betrieb wurde ermittelt. Die notwendige elektrische Leistung des reinen UNILAC-Betriebs beträgt $4,2 \text{ MW} \pm 6 \%$. Für einen parasitären durchschnittlichen SIS-Betrieb benötigt man weitere $2,2 \text{ MW} \pm 38 \%$ elektrischer Leistung. Diese Leistungsbezüge verstehen sich inklusive Kühlung.

Das identifizierte größte Potential zur Reduktion des Energiebedarfs liegt in der Beseitigung der fehlenden oder unzureichenden Regelungstechnik der Technischen Gebäudeausrüstung (TGA). Die aktuelle Situation führt zu einer erheblichen Menge unnötig bezogener elektrischer Leistung. Die unzureichende Dokumentation der Verteilnetze und fehlende Messeinrichtungen machen die Benennung von einzelnen TGA Komponenten unmöglich. Nur in zwei Dritteln aller NSHVen sind FRAKO-Messeinrichtungen installiert und an einen BUS angebunden. Um den GSI-Energiebedarf weiter aufzuschlüsseln und ihn als zentralen Bestandteil des Betriebs mit einzuplanen, muss die GSI ein einheitliches und vollständiges Messnetz aufbauen. Die Dokumentation des Verteilernetzes sollte so erweitert und aktualisiert werden, dass eine Zuteilung bzw. Identifikation der energieintensiven Verbrauchergruppen zweifelsfrei möglich ist. Die Erhebung der Daten bietet die Möglichkeit, ein genaueres Modell des Energiebedarfs zu erstellen, um die laufenden Kosten besser einschätzen zu können. Außerdem ist es nur mit real gemessenen Verbrauchsdaten möglich vollständige Investitions- und Finanzierungspläne, z.B. für Erneuerungen von Anlagenteilen, aufzustellen, um die Investitionen auf ihre ökonomische Rentabilität zu überprüfen. Des Weiteren bieten die Daten die Möglichkeit

die in Rechnung gestellten Energiebezüge des Versorgers zu kontrollieren. Im Rahmen der Arbeit hat sich gezeigt, dass diese nicht immer korrekt sind.

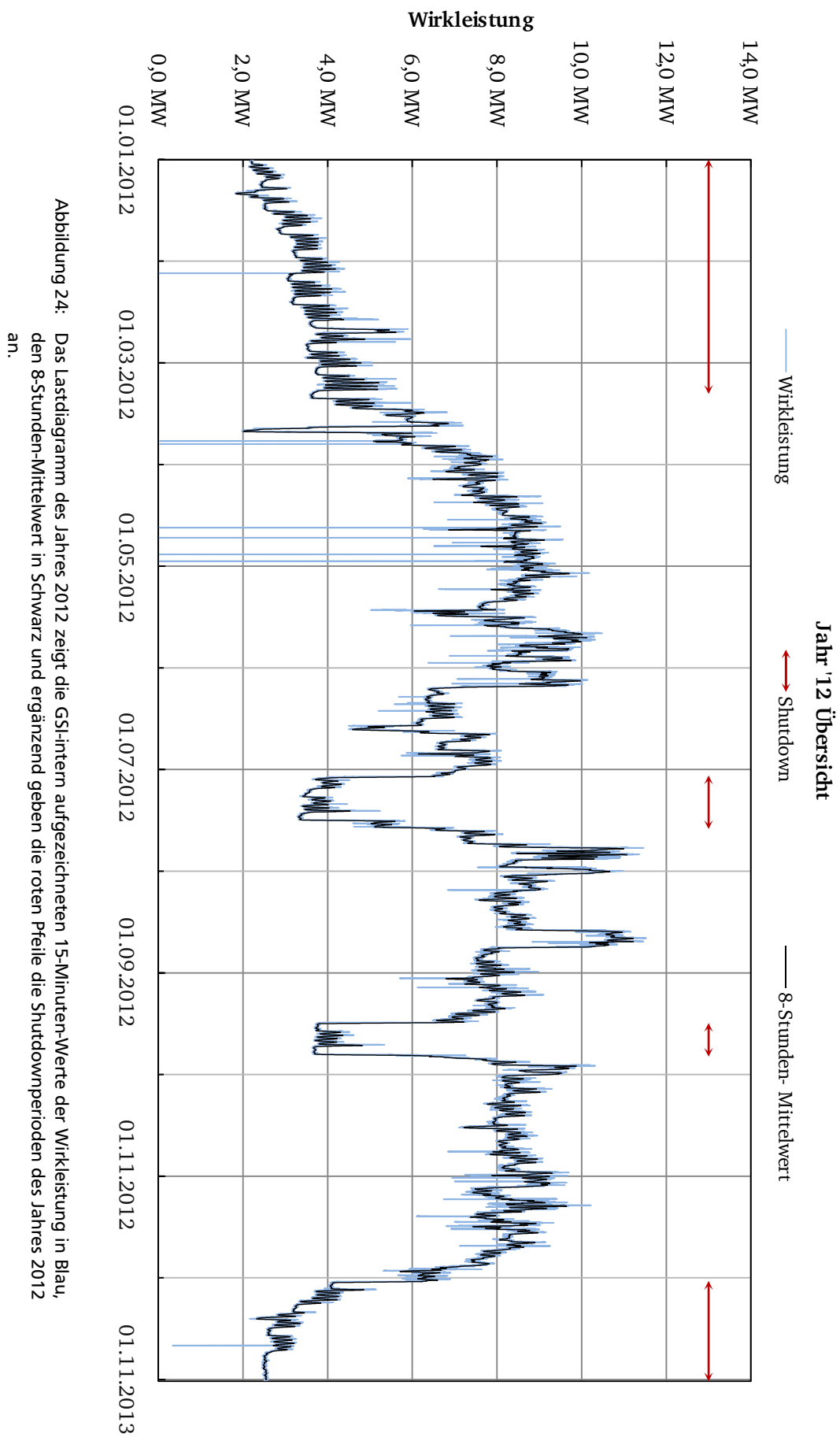
Im Hinblick auf FAIR wird der benötigte Energiebedarf etwa um den Faktor sechs bis sieben steigen. Die jeweiligen Anteile des Beschleunigerbetriebs, der Rechenzentren und der Grundlast am Energiebedarf werden sich verschieben. Auch das Verhältnis von benötigter Energie im Allgemeinlastnetz zur benötigten Energie im Pulslastnetz wird sich ändern. Die Ringbeschleuniger SIS-100/300 werden im Vergleich zum SIS-18 eine höhere Spitzenleistung aus dem Pulslastnetz beziehen, um die Magnete zu rampen. Durch die Verwendung von supraleitenden Magneten für den SIS-100/300 treten keine ohm'schen Verluste mehr auf. Dynamische Verluste durch die starken Magnetfeldgradienten treten weiterhin auf. Die Kryoanlage, die benötigt wird, um die Supraleitung zu ermöglichen, wird nach momentanem Stand eine Anschlussleistung von ca. 11,1 MW haben. Die Kryoanlage besteht aus insgesamt 10 Kompressoren inklusive Peripherie [30]. Die Kryoanlage bezieht die benötigte Leistung aus dem Allgemeinlastnetz. Im Vergleich zur jetzigen Situation ergibt sich durch die Verwendung von supraleitenden Magneten eine relative Verringerung des Energiebedarfs im Pulslastnetz. Dies wird auf Kosten einer Erhöhung des Energiebedarfs im Allgemeinlastnetz erreicht. Die geplante Kryoanlage wird aufgrund ihrer Dimension durchgehend in Betrieb sein. Sie wird nie bzw. nur sehr selten ausgeschaltet werden, da das „Warmfahren“ bzw. das „Kaltfahren“ lange dauert. Es werden für das Kaltfahren drei Monate und für das Warmfahren drei bis vier Wochen angenommen [31]. Die maximale Temperatur im Standby-Betrieb der Kryoanlage soll bei 80 K liegen, dadurch wird auch im Standby Leistung bezogen [31]. Die Grundlast wird dadurch einen höheren Anteil am Energiebedarf als die momentanen 31 % des Gesamtbedarfs verursachen. Dies bedeutet, dass ein noch größerer Anteil der laufenden Kosten unabhängig vom Beschleunigerbetrieb anfallen wird.

Im Hinblick auf FAIR ist es notwendig, sich jetzt den Herausforderungen zu stellen und die Aufgaben zu lösen. Zu den Ausbau bedingten Anstieg des Energiebedarfs kommt die Steigung des Strompreises hinzu. Die jährlichen Kosten für elektrische Energie werden sich mit FAIR unter der Annahme eines zehnprozentigen Anstiegs des Strompreises auf ca. 60 Mio.€ pro Jahr erhöhen. Der Energiebedarf muss in die Planung für den Betrieb und Ausbau der zukünftigen FAIR-Anlage mit hoher Priorität mit einbezogen werden. Nur so können die laufenden Kosten im Rahmen gehalten werden und nur so kann die Höhe des benötigten Budgets begründet werden.



8 Anhang

A Lastgang des Allgemeinlastnetzes Jahr 2012



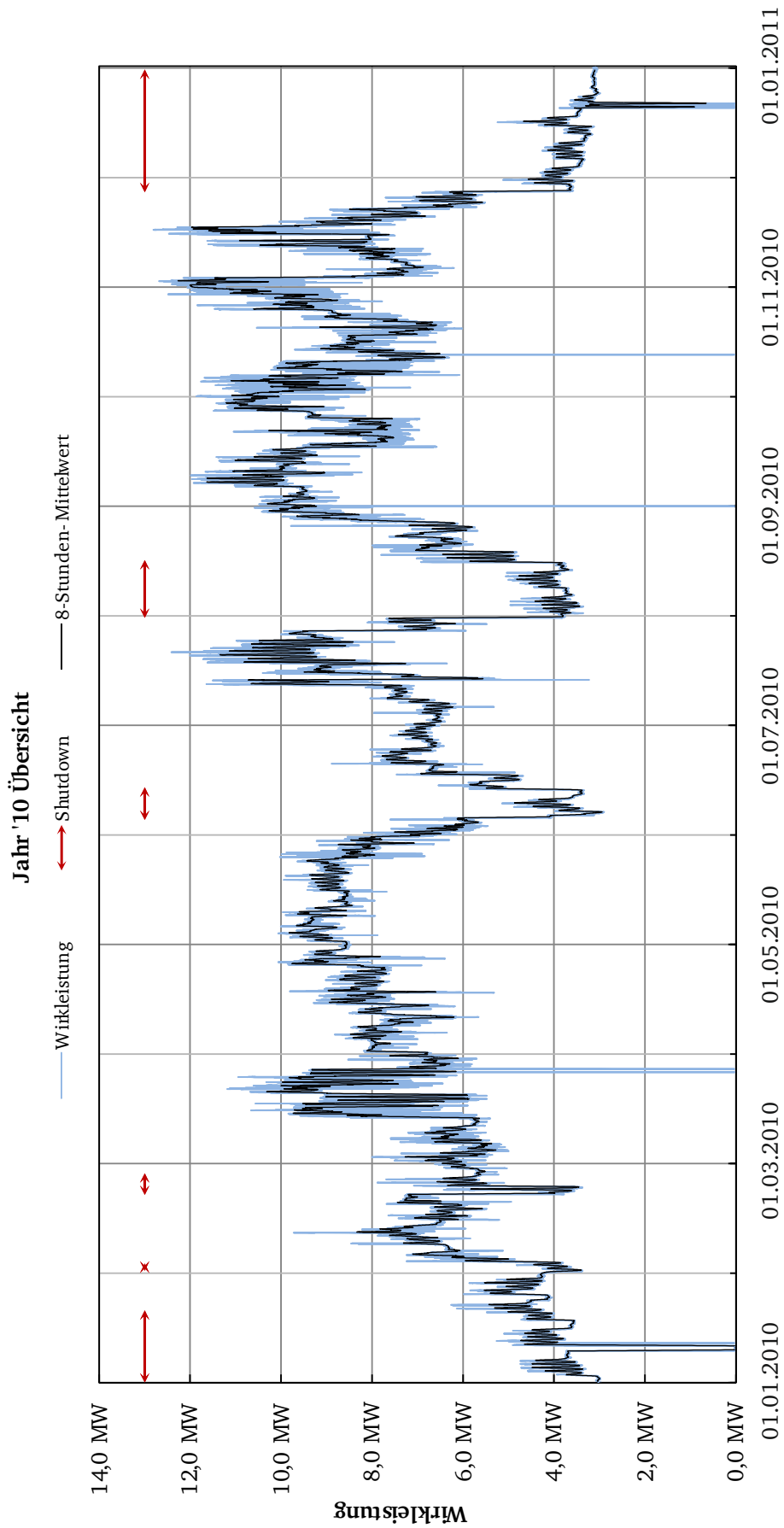


Abbildung 25: Das Lastdiagramm des Jahres 2010 zeigt die GSI-intern aufgezeichneten 15-Minuten-Werte der Wirkleistung in Blau, den 8-Stunden-Mittelwert in Schwarz und ergänzend geben die roten Pfeile die Shutdownperioden des Jahres 2010 an.

C Lastgang der NSHV IM (Versorgung von u.a. KS01, KS02 und Teraflop-Kühlung)

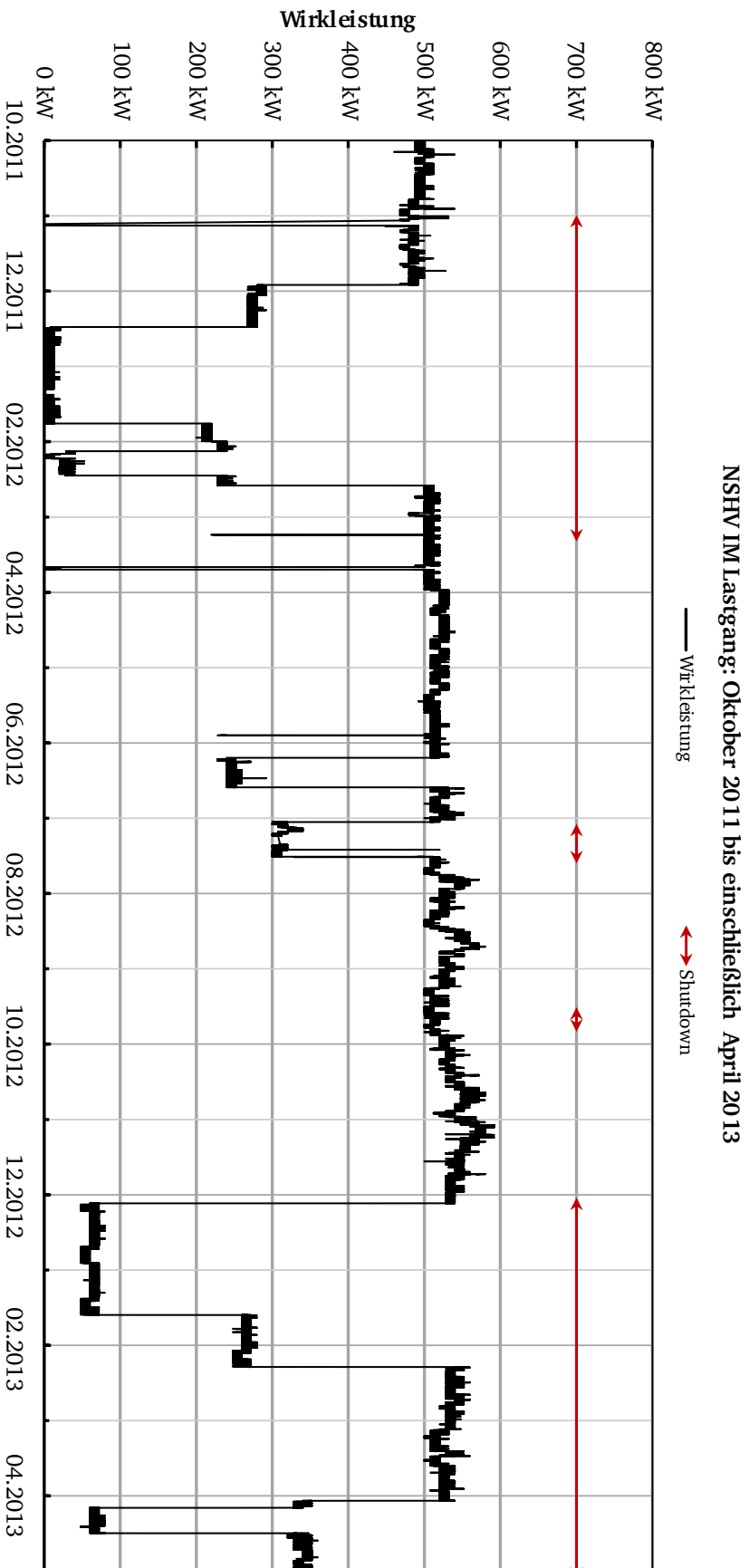


Abbildung 26: Lastgang der NSHV IM von Oktober 2011 bis inklusive April 2013. Die roten Pfeile markieren die Shutdownperioden. Die NSHV IM steht im BG-Gebäude. Sie versorgt die beiden großen Kühlkreisläufe KS01 und KS02 der Experimentierhalle 2, die Kühlung des Teraflop-Rechenzentrums, die beiden Heizungskreisläufe TH01 und TH02, sowie den Technik Raum im Container C27, siehe Anhang D. Die Kühlkreisläufe KS01 und KS02, deren addierter Wirkleistungsbezug ca. (460 ± 40) kW ist, haben den größten Einfluss auf den Lastgang. Die großen Leistungsprünge sind durch das Abschalten beider oder eines dieser beiden Kreisläufe begründet. Somit zeigt sich, dass während Shutdownperioden diese Kühlkreisläufe nur teilweise heruntergefahren werden, oder auch gar nicht. Nur während der Periode zwischen den Jahren sind beide Kühlkreisläufe abgeschaltet. Dies ermöglicht es, den Wirkleistungsbezug der Teraflop Kühlung zu ermitteln. Im Sommer 2011 wurde diese installiert. Durch die Differenz des Winters 2011 und 2012 ergibt sich ein Wirkleistungsbezug der Teraflop-Kühlung zu $(58,9 \pm 13,3)$ kW.

D Ausschnitt der NSHV-Pläne [15]

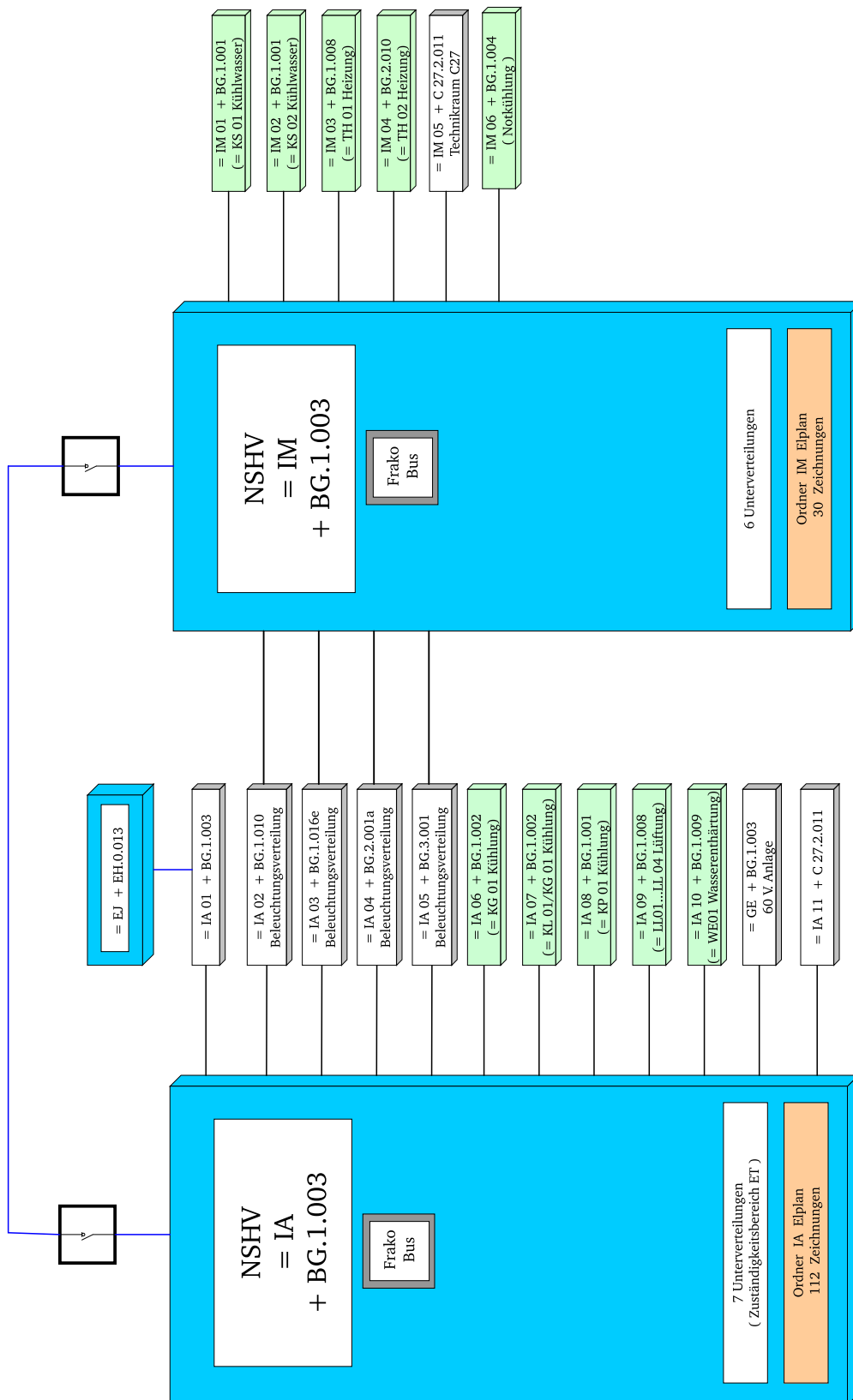


Abbildung 27: Exemplarisch ausgewählt aus den offiziellen NSHV-Plänen die beiden NSHVs mit der Bezeichnung IA und IM. Die Problematik der nicht weiter bezeichneten Abgänge, =IA11, ebenso wie die Mischung verschiedener Verbraucher zeigt sich bei beiden NSHVen. Außerdem sind die eingetragenen Abgänge der NSHV IM nicht vollständig, es fehlt die Teraflo-Kühlung. Diese wurde im Sommer 2012 installiert, die NSHV-Pläne jedoch nicht aktualisiert.

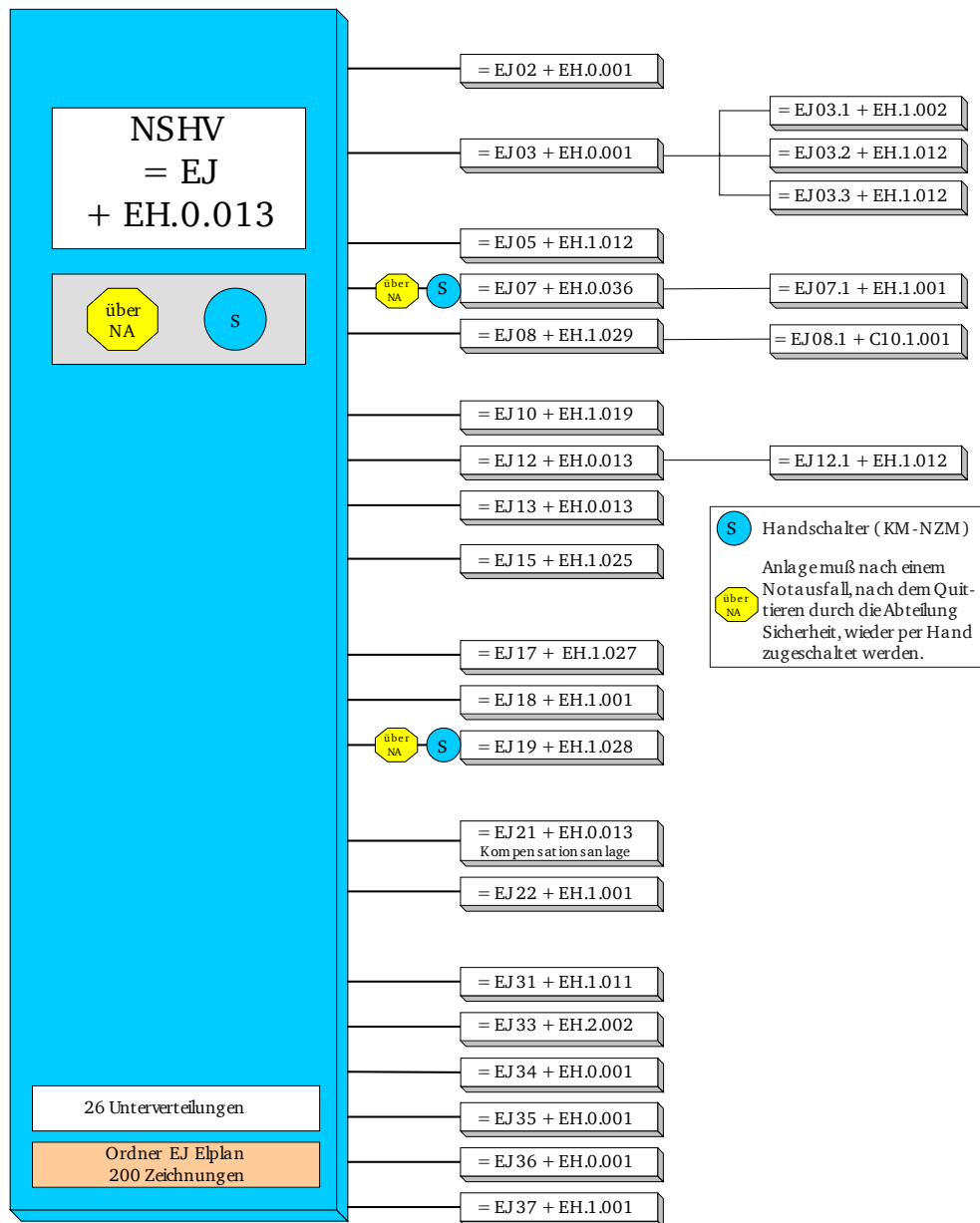


Abbildung 28: Die hier dargestellt NSHV EJ ist exemplarisch für die NSHV Pläne, der Großteil der Abgänge sind nicht weiter dokumentiert, um mittels einer Analyse der Wirkleistungsdaten diskrete Verbraucher zu benennen ist dies allerdings notwendig.

E Auszug aus der GSI-Funktionskennzeichnung nach DIN 40719 Teil 2

Tabelle 8: Die Tabelle ist ein Auszug aus der GSI-Funktionskennzeichnung nach DIN 40719 Teil 2 und zeigt Standort und andgedachten Verwendungszweck der einzelnen NSHVn des Alt- und Neubaus [19]. Die NSHVn ohne FRAKO-Bus sind mit einem *) gekennzeichnet.

NSHV	Gebäudestandort und Verwendung laut Funktionskennzeichnung	NSHV	Gebäudestandort und Verwendung laut Funktionskennzeichnung
EA	NSHV-BH in VR.1.001	IA	Medienversorgung im BG NSHV in BG.1.003
EB	NSHV-LN in VR.1.001	IB ^{*)}	Magnetstrom und Kicker NSHV in BG.1.010
EC	NSHV-Allgemein in VR.1.001	IC ^{*)}	HF und Ringtunnel NSHV in BG.1.021
ED	NSHV-Mess u. Steuernetz in VR.1.001	ID ^{*)}	AN für BG und RT NSHV in EX.2.009
EE	NSHV-BR in BR3.1.117	IE	Magnetstrom EX NSHV in EX.2.009
EF	NSHV-EHSE 1, EHSE 2 in SE.0.036	IF ^{*)}	AN für ESR und TH NSHV in EX.2.006
EH	NSHV-EH Nord 1 in EH.0.013	IG	ESR NSHV in EX.1.003
EJ	NSHV-EH Nord 2 in EH.0.013	IH	Medienversorgung TR EX TH NSHV in EX.1.003
EK	NSHV-SB in SB2.1.218	IK ^{*)}	Netzgeräte Strahlführung NSHV in EX.2.007
EL	NSHV-RZ in SB2.1.218	IL ^{*)}	Experimente TH NSHV in TH.1.003
EM	NSHV-EZ 1 u. EZ 2 in EZ.1.703	IM	Magnetstrom NSHV in BG.1.003
EN	NSHV-SH 1 in SH1.1.001	IN ^{*)}	FRS NSHV in BG.1.016a
EP ^{*)}	NSHV-KRYO in BH2.1.007	IP ^{*)}	Netzgeräte Strahlführung NSHV in EX.3.007
		IR ^{*)}	RZ ALICE Tier 2 in BG.3.001
		IS	TES HF
		IT	TES DL, UHV; Kicker
		IU	TES TeraFlop-RZ NSHV

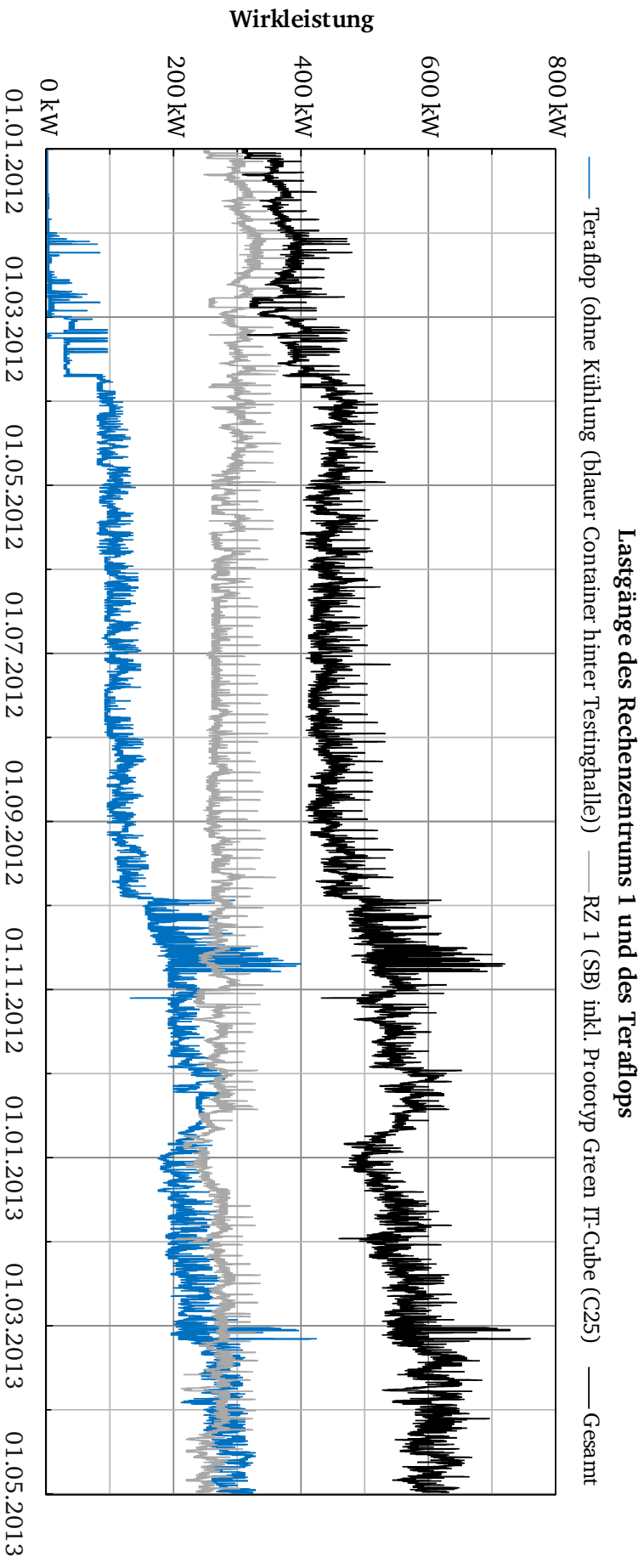


Abbildung 29: Dargestellt sind die Lastgänge des Rechenzentrums 1 und des Teraflops-Rechenzentrums ohne Kühlung. Der Leistungsbezug des Rechenzentrums 1 ist nahezu konstant, die vielen Peaks des Lastgangs sind auf ein Notkühlsystem zurückzuführen, welches zwecks Instandhaltung jeden Dienstag und Donnerstag für vier Stunden eingeschaltet werden muss. Der Lastgang des Teraflops steigt äquivalent zu seinem Ausbau an. Die sehr hohen, aber zeitlich nur kurz benötigten Leistungsbezüge im Oktober 2012 und Anfang März 2013 sind auf Benchmark-Tests zurückzuführen.

G Wirk-, Blindleistung und $\cos(\varphi)$ der NSHVen mit einem Grundlast-Energiebedarf pro Jahr von mehr als 1 GWh

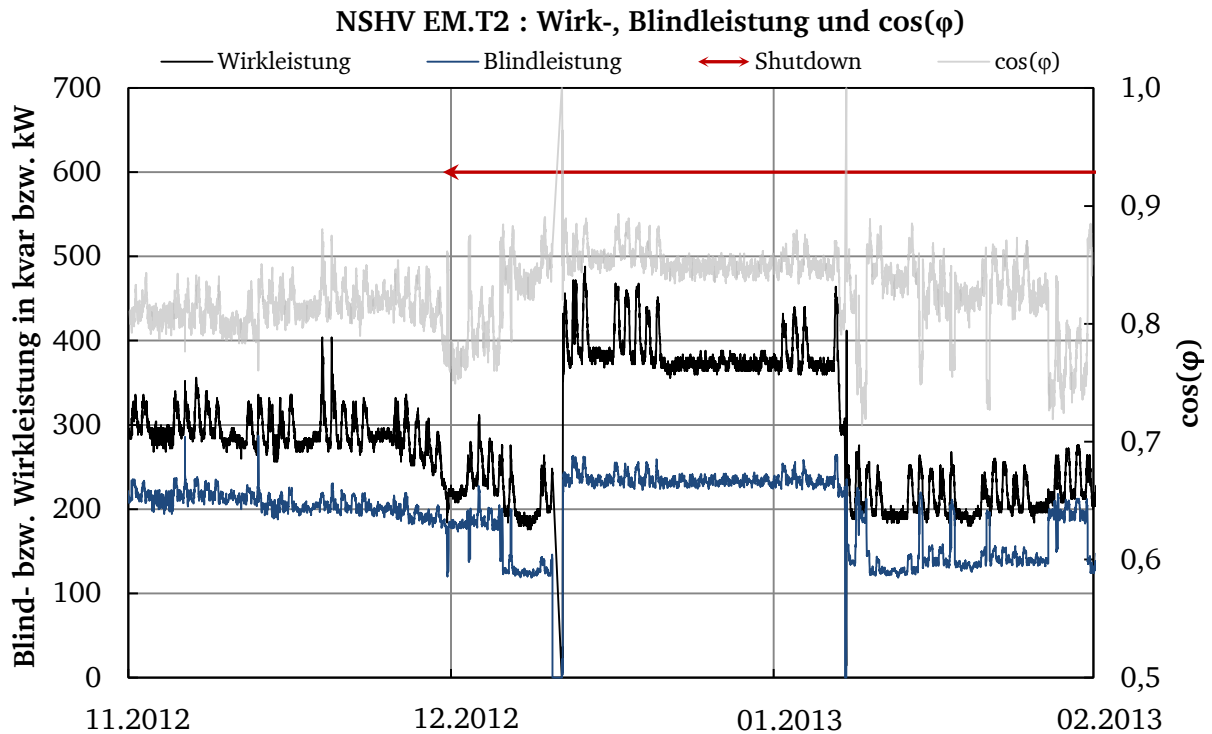


Abbildung 30: Wirk-, Blindleistung (schwarz und blau) und der $\cos(\varphi)$ (grau) der NSHV EM.T2, während des Zeitraums Anfang November 2012 bis Ende Januar 2013. Dieser Zeitraum beinhaltet sowohl Beschleunigerbetriebszeit, den Zeitraum des Shutdowns und den Zeitraum der Betriebsferien, der die Grundlast der GSI definiert.

Abbildung 30 stellt die Wirk-, Blindleistung und den $\cos(\varphi)$ der NSHV EM.T2 während des Analysezeitraums, der in Abschnitt 4.2.4 definiert wurde, dar. Die NSHV EM ist redundant in zwei Transformatoren aufgeteilt, deren Bezeichnung EM.T1 bzw. EM.T2 ist. Diese versorgen die primären Kühl- und Lüftungskreisläufe des UNILAC und der Quellen. Für EM.T1 liegen keine Messdaten vor, da es seit dem 12.12.2012 Probleme mit dem FRAKO-Bus von EM.T1 gibt. Der große Sprung der Wirkleistung von EM.T2 auf das hohe Niveau zwischen dem 12.12.2012 und dem 07.01.2013 ist auf das Zuschalten des EM.T1-Transformators auf den EM.T2-Transformator zurückzuführen. Dies ermöglicht es, die Gesamtgrundlast von EM (373 ± 6) kW nur über EM.T2 zu bestimmen. Die Grundlast von EM.T2 beträgt während des Beschleunigerbetriebs am Wochenende ($279,1 \pm 5,4$) kW. Unter der Woche sind die Werktagspeaks zu erkennen, d.h. es werden auch Arbeitsplätze versorgt. Jedoch beträgt der $\cos(\varphi) \approx (0,81 \pm 0,01)$ am Wochenende. Dies zeigt, dass ein erheblicher Anteil der NSHV Wirkleistung durch Kühl- oder Lüftungskreisläufe bezogen wird. Während des Shutdowns ist der Wirkleistungsbezug reduziert und beträgt ($188,4 \pm 5,0$) kW, der $\cos(\varphi) = (0,84 \pm 0,01)$. Hieraus ist zu schließen, dass ein Teil der Kühl-, Lüftungskreisläufe während des Shutdowns gedrosselt ist. Dies liegt an der Problematik, dass der Druck im Kühlkreislauf nicht zu stark absinken darf, da sonst bei einem Wiederhochfahren die alten Dichtungen kaputt gehen würden [12]. Hier sollte überprüft werden, ob es rentabel ist, die Dichtungen zu erneuern, um die Pumpen während eines Shutdowns komplett abschalten zu können. Momentan entstehen nur während des Zeitraums von 10 Tagen zwischen den Jahren Kosten von 5300€ jedes Jahr.

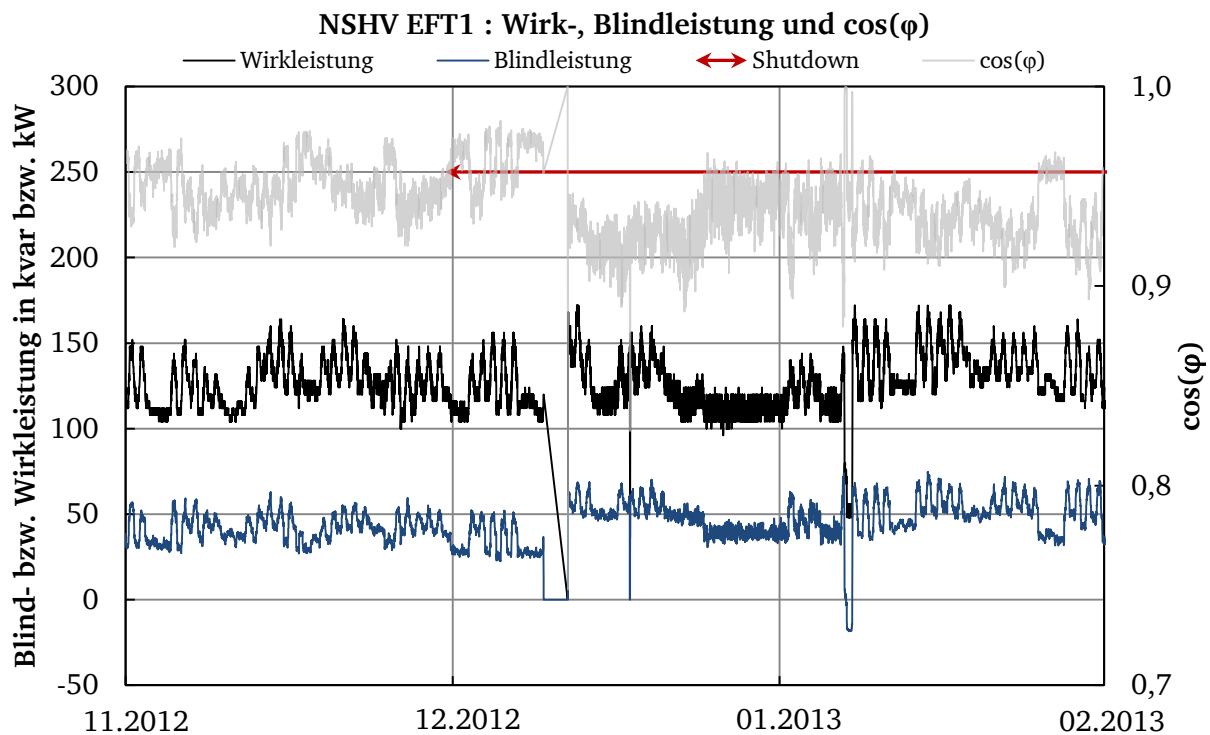


Abbildung 31: Wirk-, Blindleistung (schwarz und blau) und der $\cos(\varphi)$ (grau) der NSHV EF.T1 während des Zeitraums Anfang November 2012 bis Ende Januar 2013. Dieser Zeitraum beinhaltet sowohl Beschleunigerbetriebszeit, den Zeitraum des Shutdowns und den Zeitraum der Betriebsferien, der die Grundlast der GSI definiert.

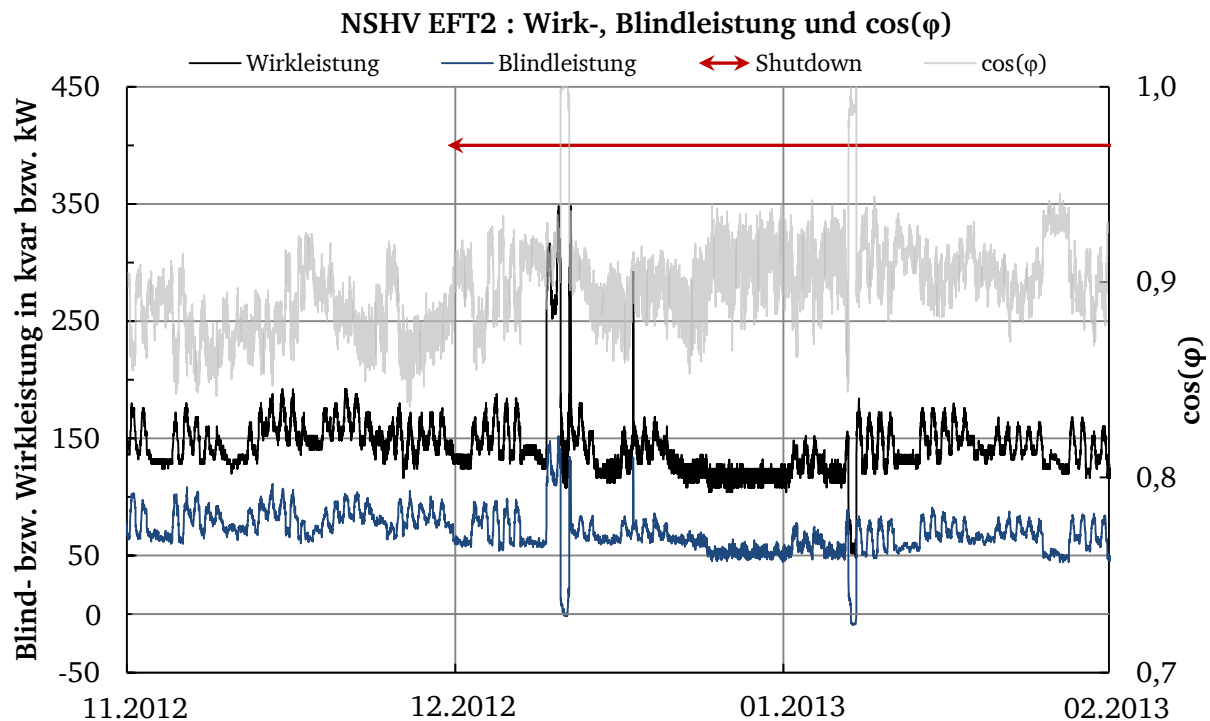


Abbildung 32: Wirk-, Blindleistung (schwarz und blau) und der $\cos(\varphi)$ (grau) der NSHV EF.T2 während des Zeitraums Anfang November 2012 bis Ende Januar 2013. Dieser Zeitraum beinhaltet sowohl Beschleunigerbetriebszeit, den Zeitraum des Shutdowns und den Zeitraum der Betriebsferien, der die Grundlast der GSI definiert.

Die NSHV EF versorgt das Gebäude SE sowie einen Teil der Experimentierhalle 1. Sie ist auf zwei redundante Transformatoren aufgeteilt. Die Wirk-, Blindleistung (schwarz und blau) und der $\cos(\varphi)$ beider Transformatoren T1 und T2 sind in Abbildung 30 bzw. Abbildung 31. dargestellt. Die Grundlast der beiden NSHV-Segmente beträgt während des Shutdowns (112 ± 6) kW für EM.T1 und (117 ± 6) kW für EM.T2. Beide Lastgänge weisen Werktagspeaks auf, siehe Abschnitt 14, und versorgen dementsprechend Arbeitsplätze. Eine Korrelation zwischen Beschleunigerbetrieb und Shutdown ist nicht zu erkennen, wobei diese NSHV ein Teil der Experimentierhalle versorgt, wodurch direkt wieder die fehlende Regelungstechnik ersichtlich wird. Es wird weder zwischen kurzen Perioden ohne Personal, z.B. nachts, und längeren Perioden, am Wochenende, unterschieden, noch zwischen den elementaren Betriebszuständen Beschleunigerbetrieb oder Shutdown. Wobei hier der weitaus größere Anteil der Wirkleistung auf die Experimentierplätze, die ihre Elektronik nicht ausschalten, zurückzuführen ist als auf die TGA. Da der $\cos(\varphi) > 0,9$ bei EM.T1 ist und bei EM.T2 $\cos(\varphi) \approx 0,9$ ist, ist der Anteil an drehenden Maschinen nicht so groß im Vergleich zu anderen NSHVen wie z.B. NSHV EM. Um hier eine effizientere Nutzung zu realisieren, sollten vor allem die Experimentatoren immer wieder darauf aufmerksam gemacht werden, bei Nichtverwendung ihrer Elektronik diese abzuschalten. Zudem sollte es auch hier zum Standard werden, entsprechende Regelungstechnik der TGA nachzurüsten.

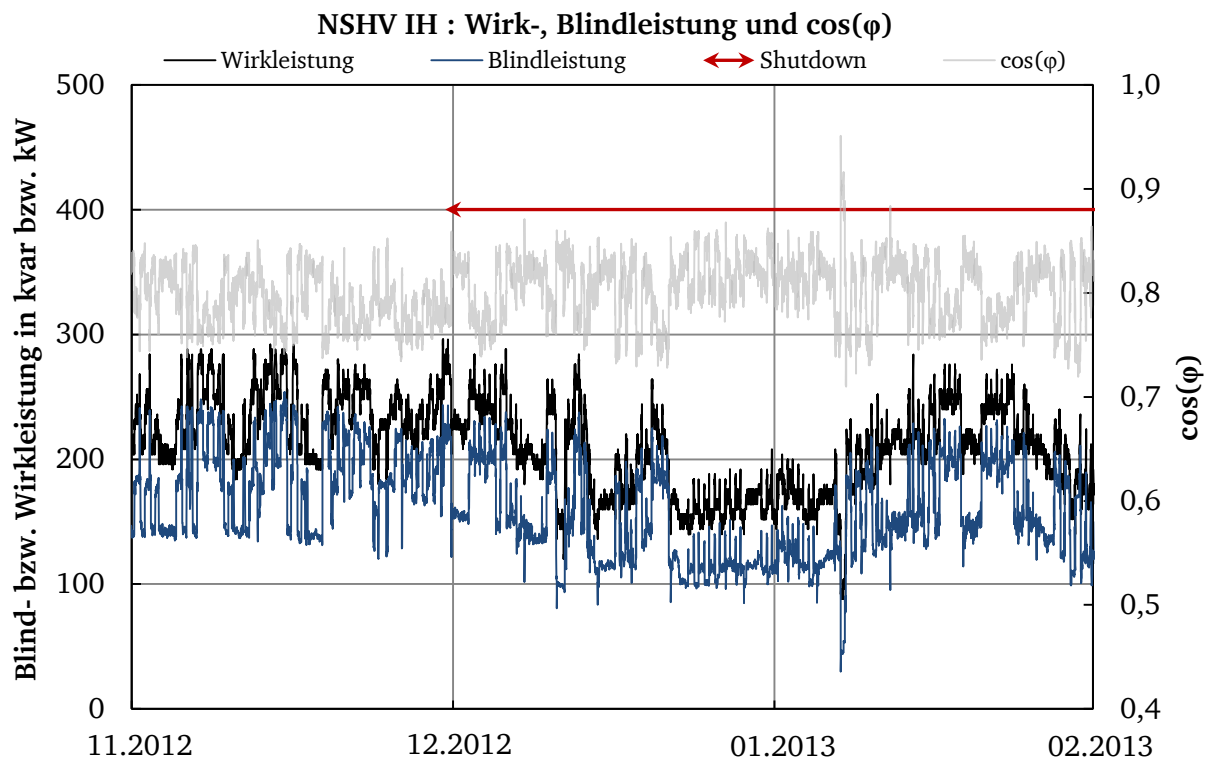


Abbildung 33: Wirk-, Blindleistung (schwarz und blau) und der $\cos(\varphi)$ (grau) der NSHV IH während des Zeitraums Anfang November 2012 bis Ende Januar 2013. Dieser Zeitraum beinhaltet sowohl Beschleunigerbetriebszeit, den Zeitraum des Shutdowns und den Zeitraum der Betriebsferien, der die Grundlast der GSI definiert.

Die NSHV IH befindet sich in der Experimentierhalle 2 und stellt laut GSI-Funktionskennzeichnung die Medienversorgung von TR, EX und TH dar [19]. Was genau dies alles beinhaltet, ist nicht weiter spezifiziert. Die Abbildung 33 zeigt die Wirk- und Blindleistung in Schwarz bzw. Blau und den $\cos(\varphi)$ in Grau der NSHV IH. Der relativ geringe $\cos(\varphi) \approx 0,8$ deutet darauf hin, dass es sich bei der Medienversorgung zum Großteil um drehende Maschinen handelt. Bei dieser NSHV ist bis auf den Zeitraum zwischen den Jahren, den Betriebsferien, nur eine geringe Korrelation zwischen Betriebszeit und Shutdown zu erkennen. Der Wirkleistungsbezug ist zwar zwischen den Jahren um ca. 30% geringer als während des Beschleunigerbetriebs, aber ist mit $(161,9 \pm 10,5) \text{ kW}$ immer noch sehr hoch. Hier ist im Weiteren zu prüfen, welche diskreten Anlagen diesen Wirkleistungsbezug verursachen und ob diese gegebenenfalls abgeschaltet bzw. gedrosselt werden könnten. Denn dadurch entstehenden jährliche Kosten von ca. 4500 € nur während der 10 Tage zwischen den Jahren.

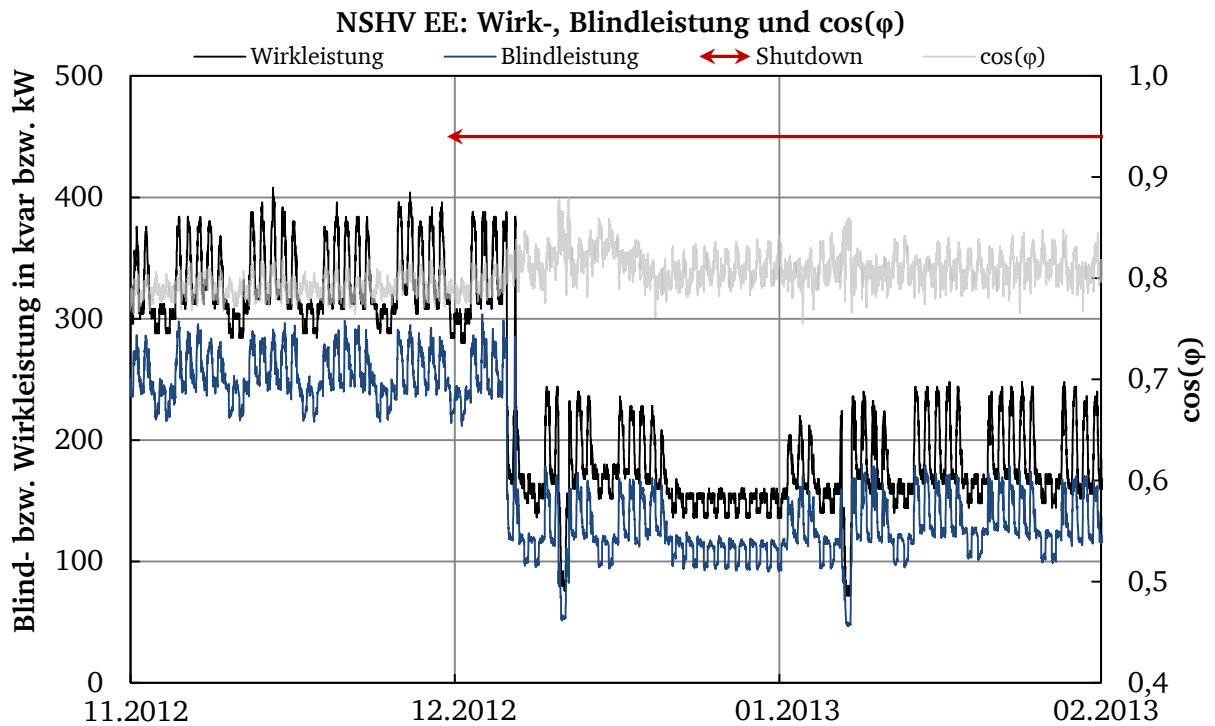
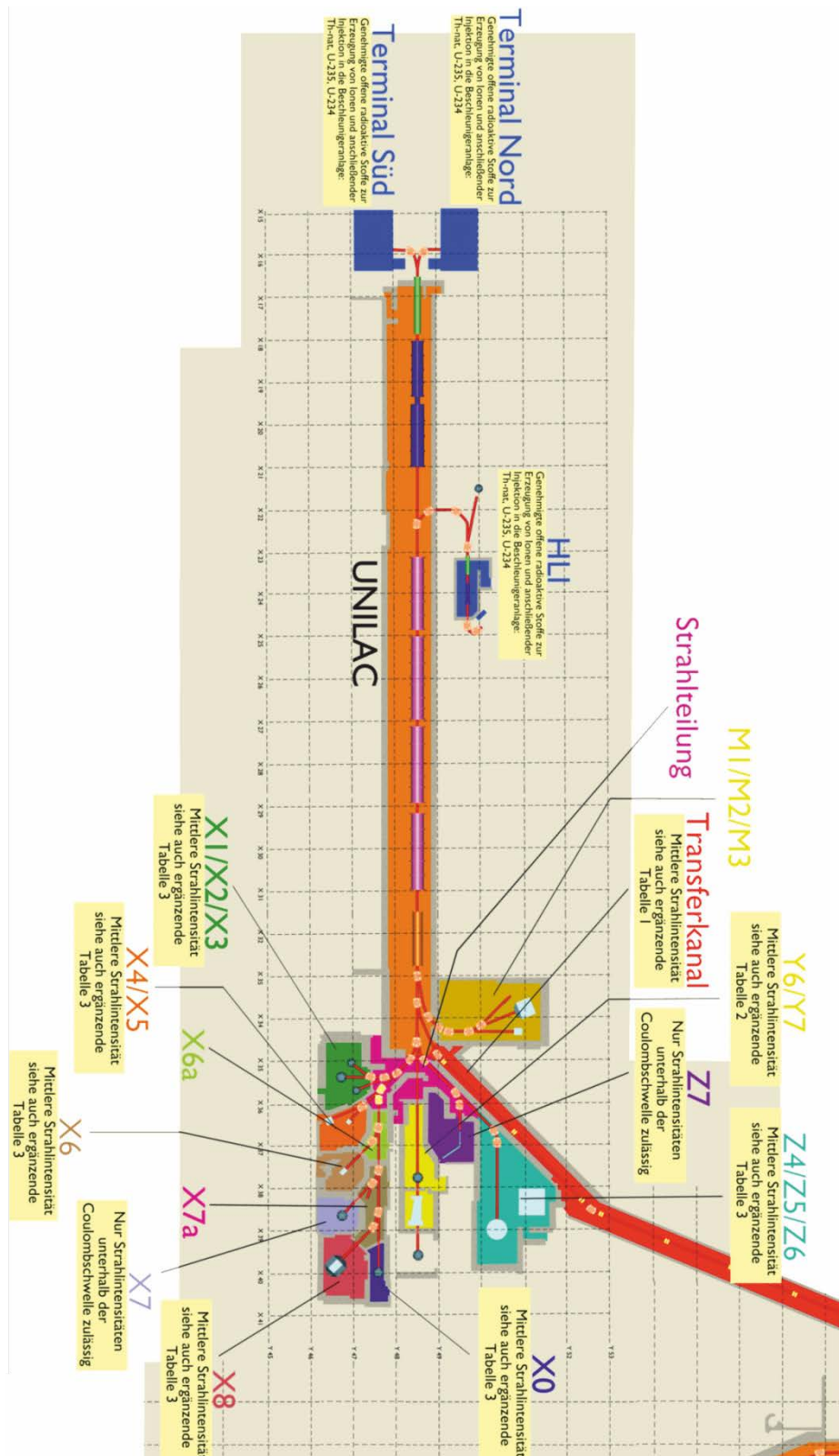


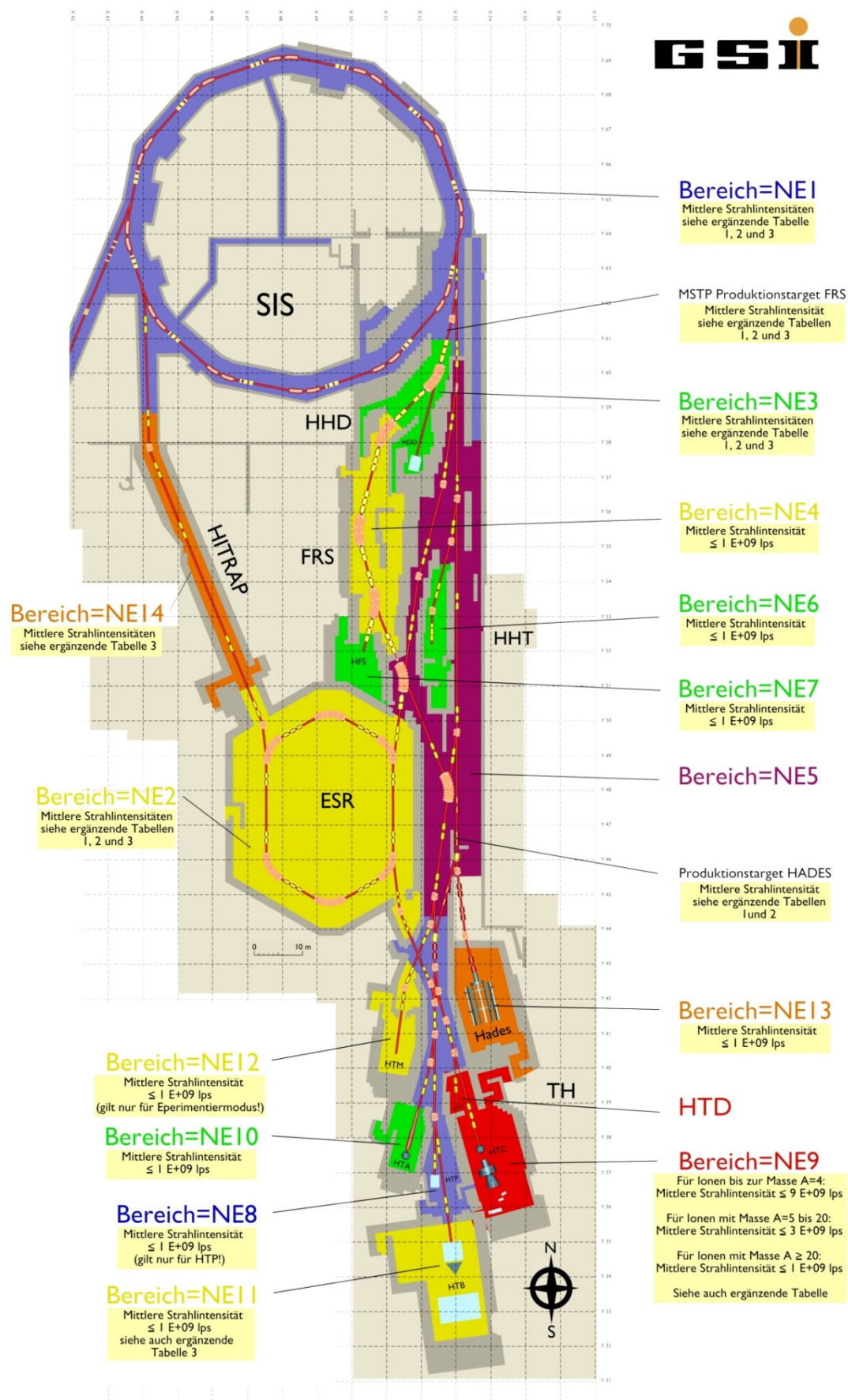
Abbildung 34: Wirk-, Blindleistung (schwarz und blau) und der $\cos(\varphi)$ (grau) der NSHV EE, während des Zeitraums Anfang November 2012 bis Ende Januar 2013. Dieser Zeitraum beinhaltet sowohl Beschleunigerbetriebszeit, den Zeitraum des Shutdowns und den Zeitraum der Betriebsferien, der die Grundlast der GSI definiert.

Die NSHV EE, deren Wirk- und Blindleistung in Schwarz bzw. Blau und $\cos(\varphi)$ in Grau in Abbildung 34 dargestellt sind, befindet sich in Gebäude BR3. Sie versorgt alle drei Gebäudeteile des Nordbaus BR1, BR2 und BR3. Der Lastgang zeigt deutlich eine Korrelation zwischen Wirkleistungsbezug und Beschleunigerbetrieb. Unter anderem versorgt die NSHV die HF-Galerie auf der 400V-Ebene. Der $\cos(\varphi) \approx 0,8$ zeigt auch hier an, dass es sich um eine große Anzahl oder wenige leistungsstarke drehende Maschinen handelt, die ihre benötigte Leistung von der NSHV EE beziehen. Der starke Abfall der bezogenen Wirkleistung kurz nach Beginn des Shutdowns zeigt, dass ein Großteil der Verbraucher abgeschaltet wird. Allerdings fällt auf, dass während des Shutdowns von der Regelung der sich noch in Betrieb befindenden Anlagen keine Unterscheidung zwischen kurzer Abwesenheit der Arbeitnehmer (nachts) mittlerer Abwesenheit (Wochenenden) oder längeren Zeiträumen (Betriebsferien) gemacht wird. Der Wirkleistungsbezug ist in allen drei Fällen nahezu identisch und beträgt $(139,5 \pm 2,4)$ kW. Während längerer Phasen ist hier über entsprechende Regelung der Wirkleistungsbezug zu reduzieren. Eine weitere besondere Auffälligkeit dieser NSHV sind die markanten periodisch wiederkehrenden Sprünge der Wirk- aber auch der Blindleistung, die seit November 2011 auftreten. Ein Wirkleistungssprung zwischen 15 kW und 20 kW, der immer spät abends meist gegen 18.45 Uhr einsetzt und bis morgen 8.15 Uhr anhält, entsprechend genau entgegen den normalen Arbeitszeiten. Dieser Sprung im Lastgang ist an jedem Wochenendtag, jedem Feiertag und jeden Tag in den Betriebsferien zweifelsfrei zu identifizieren. Unter der Woche überlagert sich der Anstieg, bedingt durch den Arbeitsbeginn, über diesen Effekt und ist daher nicht zweifelsfrei nachzuweisen. Da die Blindleistung ebenfalls diesem Verlauf folgt muss es sich um eine drehende Maschine handeln. Eine Zuordnung, um welche Anlage es sich genau handelt, konnte nicht getroffen werden, da die vorhandene Dokumentation dies nicht ermöglicht. Auch Gespräche mit der Abteilung GA und der sich in dem Nordbau befindenden Grup-

pen Hochfrequenz und Quellen brachte keine weitere Information, um welche Anlage es sich hier handelt. Unter der Annahme, dass die Anlage nur an den zweifelsfrei nachweisbaren Tagen in Betrieb ist, entstehen hierdurch jährliche Kosten von ~ 3000 €.



I Strahlzweig Plan der Experimentierhalle 2



J Messung H. Vormann et. al Teil 1 [29]

Anlage	Abschnitt	Anmerkung		Magnete		Hochfrequenz (HF)		Magnete und HF		
Unilac	alle Wirkleistungsangaben in kW		UNILAC lange Pulse				UNILAC kurze Pulse, nur für SIS			
			Nieder Brho (A/q<25 res p. <6)		Hoch Brho (A/q >25 res p.>6)		Nieder Brho (A/q<25 res p. <6)		Hoch Brho (A/q >25 res p.>6)	
	HLI	Magnete DC, außer UU-Schalt- magnete	40Ar10+, Brho = 0,7Tm	30	64Ni9+, Brho=1,2Tm	140	40Ar10+, Brho=0,7Tm 1ms Puls (HLI immer 50Hz!)	45	64Ni9+, Brho = 1,2TM, 1ms Puls (HLI immer 50Hz!)	80
				45		95		30		95
	HSI	40Ar2+, Brho = 3,4Tm, 50Hz, 5ms Puls	350	238U4+, Brho = 10,2Tm, 5Hz, 1,2ms Puls	700	40Ar2+, Brho=3,4Tm 1Hz, 200µs Puls	22	238U4+ Brho=10,2Tm 1Hz, 200µs Puls	40	
			20		150		20		150	
	A1 - A2B	40Ar10+, Brho = 1,4Tm	630	64Ni9+, Brho=2,3Tm 50Hz, 5ms Puls	1990	Ar10+, BrRho = 1,4Tm	110	64Ni9+ Brho=2,3Tm 1Hz, 200µs Puls	150	
			130		210		130		210	
A1 - A4	40Ar10+, Brho = 1,95Tm	420	64Ni9+, A/q=7,11, Brho=3,5Tm 50Hz, 5ms Puls	1325	Ar10+, BrRho = 1,95Tm	75	64Ni9+ Brho=3,5Tm 1Hz, 200µs Puls	100		
		90		140		85		140		
ER	nur eine Messung Magnete und HF	5 ER-Tanks, 6Volt, 50Hz, 5ms		310		entfällt		entfällt		
EH	nur Magnete , nur 1Messung pro Strahlzweig , bei mittlerer Steifigkeit, Referenzeinstel- lung/Set Best, Leistung skalierbar			5,9 MeV/u	11,4MeV/u		5 MeV/u		11,4 MeV/u	
	UX8	5MeV/u, auch 11,4MeV/u	A/q=5,5, Brho=1,93Tm, 50Hz, 5ms	85	A/q=5,5, Brho = 2,68Tm 50Hz, 5ms	120	A/q=5,5 Brho = 1,8Tm 1Hz, 200µs	EH Ma- gnete sind DC!	A/q=5,5 Brho=2,7Tm 1Hz, 200µs	EH Ma- gnete sind DC!
	UY7	5MeV/u, Shipttrap 4,5... 5,4MeV/u	A/q=5,5, Brho = 1,93Tm, 50Hz, 5ms	70	entfällt		entfällt		entfällt	
	UZ6	6MeV/u, auch 11,4MeV/u; 48Ca17+, 3,6MeV/u Brho = 0,77 Tm; 11,4MeV/u 1,38Tm	A/q=5,5, Brho=1,93Tm, 50Hz, 5ms	35	entfällt		entfällt		entfällt	
	UM	5- 11,4MeV/u	entfällt		A/q=5,5, Brho = 2,68Tm, 50Hz, 5ms	75	entfällt		entfällt	

K Messung H. Vormann et. al Teil 2 [29]

Anlage	Magnete Allgemeinlast		Magnete Pulslast		alle Wirkleistungsangaben in kW				
TK	Sweeper, 11,4MeV/u , DC und gepulst (1-Strahl ggü. 2-Strahl-Betrieb)		A/q=5,5, Brho=2,68Tm		85	A/q=8,5 (U28+), Brho=4,14Tm			195
SIS	Messungen mit Zwei-Kavitäten-Betrieb; Standard: 6...10Tm, schnelle Extraktion	9,5Tm, schnelle Extraktion	330	18Tm, 3,7T/s, 10s Extraktion	3100	Niedrige Last: Exklusivbetrieb für ESR, 9,5Tm, schnelle Extraktion, alle min 1Schuß	10	typische mittlere Last: 9,5Tm, 3,7T/sec, 2s Extraktion (Zyklus 4s)	700
				18Tm, 3,7T/s, 5s Extraktion	3000				
				18Tm, 3,7T/s, 0,6s Extraktion	1600				
EH 2	HEST	HEST nur Vollast gefahren bei Test; (Dipole maximal, Quadrupole normal nach Referenz)	18Tm (Therapie kann nicht 18Tm)		185	10Tm entfällt			
	FRS	Magnete DC, 18Tm 22Ne10+ - >17B5+ (?): 1,35MW Magnetsröme zusammengerechnet (max). Rampen nur selten, tragen wenig bei. Typisch meist halbe Steifigkeiten	18Tm (Magnete 8Volt: 1200kW)		1350	10Tm			420
	FOPI	SC Magnet 0,5MW beim Hochfahren(?) FOPI 90kW (C.Schröder 31.08.2011)			90				
	Cave C			1500					
ESR	max 10Tm (mit Kühler 1000Gauss)				2000	5,2Tm (typische Zyklen: Hoch-Brho Injektion, Nieder-Brho Extraktion)			600
		Netzeile, Pumpen etc.							
Kühl-an-lagen	Leistung konstant, Last unabhängig		alle Kühlpumpen Unilac bei Normallast-Betrieb		1500	alle Kühlpumpen SIS bei Normallast-Betrieb			1200
Vaku-um		kein Test Grundlast geschätzt P.Horn				230	SD alleine braucht nur geringfügig, sinnvoller wäre Gesamtverbrauch SD+ komplette Elektronik incl. HKR		
Strahl-diag-nose		1000 Netzgeräte a 250W -> grob geschätzt (Ro. Fischer)				250			

9 Literaturverzeichnis

- [1] A. Moser, N. Roterling, W. Wellßow, H. Pluntke, M. Sterner und M. Kleimaier, „Bedarf an Energiespeichern und Netzausbau in Deutschland bei einem Ausbau der Erneuerbaren Energien gemäß dem Energiekonzept der Bundesregierung Teil A: Speicherungsbedarf“, *Conference: VDE-Kongress 2012 - Intelligente Energieversorgung der Zukunft*, Stuttgart, 2012.
- [2] M. Groth, „Eine kurze Einordnung: EEG-Umlage“, *Wirtschaftsdienst*, Bd. 92, Nr. 11, pp. 721-722, 2012.
- [3] FVEE - ForschungsVerbund Erneuerbare Energien, „Forschung senkt Energiewende-Kosten“, 2012.
- [4] FAZ, „Frankfurter Allgemeine Zeitung“, [Online]. [Zugriff am 15 Oktober 2013].
- [5] S. Peggs, „THE EUROPEAN SPALLATION SOURCE“, *IPAC2011*, Lund, Sweden, 2011.
- [6] „EU Projects Office“, [Online].
Available: http://cerneu.web.cern.ch/cerneu/eu_projects/fp7/#EuCARD-2
[Zugriff am 13 Februar 2013].
- [7] FAIR GmbH, „FAIR - Facility for Antiproton and Ion Research in Europe GmbH“, [Online]. Available: <http://www.fair-center.de/index.php?id=1&L=1>
[Zugriff am 14 Februar 2013].
- [8] VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt, VDI 4602-1:2007 Energiemanagement - Begriffe, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 10.2007.
- [9] ISO, *ISO 50001:2011 - Energy management systems. Requirements with guidance for use.*, Genf (ISO), 2011.
- [10] W. Kahlenborn und S. Kabisch, *Energiemanagementsysteme in der Praxis : ISO 50001: Leitfaden für Unternehmen und Organisationen*, Dessau: Deutschland / Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), 2012.
- [11] S. Krakowka und K. Jennrich, „Untermerkblatt zur Zertifizierung des Energieverbrauchs und der Energieverbrauchsminderungspotenziale“, Eschborn, 2011.
- [12] H. Ramakers, *private Kommunikation*, Abteilung Electric Power Systems, 2013.
- [13] M. Motitschke, *private Kommunikation*, Abteilung Electric Power Systems, 2012.
- [14] D. Y. Goswami und F. Kreith, *Energy Management and Conservation Handbook*, CRC Press, 2008.
- [15] F.-J. Fauestle, *private Kommunikation*, Abteilung Elektrotechnik, 2012.

-
- [16] J. Stadlmann, *private Kommunikation*, Abteilung Primary Beams, 2012.
- [17] G. Bellarmine, „Load Management Techniques“, *Proceedings of the IEEE Southeastcon 2000.*, 2000.
- [18] C. W. Gellings und J. H. Chamberlin, „Demand-Side Management: Concepts and Methods“, *The Fairmont*, 1988.
- [19] R. Becker, *Kennzeichnung nach DIN 40719 Teil 2 Funktionskennzeichnung in der GSI*, Stand: 04.07.2013.
- [20] E. Stiel, *private Kommunikation*, Abteilung Core-IT, 2013.
- [21] H. Kreiser, GSI Webseite, 28 Oktober 2008. [Online].
Available: <http://www-alt.gsi.de/documents/DOC-2008-Nov-52-1.ppt>. [Zugriff am 23 September 2013].
- [22] W. Keil, *private Kommunikation*, 2013.
- [23] D. Kaltwasser-Kaiser, *private Kommunikation*, Abteilung Einkauf und Materialwirtschaft, 2013.
- [24] U. Laier, *private Kommunikation*, Abteilung Ring RF, 2013.
- [25] C. Dimopoulou, *private Kommunikation*, Abteilung Beam Cooling, 2013.
- [26] M. Srinivas und L. Patnaik, „Genetic algorithms: a survey“, *Computer*, Nr. 27, pp. 17-26, Juni 1994, doi: 10.1109/2.294849
- [27] M. Seidel, *private Kommunikation*, PSI, Villigen, 2013.
- [28] R. Käch, „Effiziente Stromnutzung am Paul Scherrer Institut PSI für Büro- und Laborbereiche“, Villigen, Schweiz, 08/2012.
- [29] H. Vormann, *private Kommunikation*, Abteilung Linac & Operations LINAC, 2012.
- [30] C. Omet, *private Kommunikation*, Abteilung Primary Beams, 2013.
- [31] M. Kauschke, *private Kommunikation*, Abteilung Cryogenics, 2013.

Danksagung

Ich danke Professor Boine-Frankenheim und Frau Professor Hanson, dass sie mir dieses interessante wie anspruchsvolle Thema mit einem hohen Maß an eigenständiger Entwicklung von Methodiken und Zielsetzung ermöglicht haben zu bearbeiten. Vielen Dank an Jens Stadlmann für die vielen Diskussionen, Anregungen, für die immer offene Tür, Unterhaltungen abseits des Arbeitsthemas und den ein oder anderen Doppio. Ebenso gilt mein Dank Henning Zimmer für die Korrekturen und wichtige Anmerkungen, die mir sehr weitergeholfen haben. Vielen Dank an Carola Pomplun und meiner Schwester Valentina Ripp für das Korrekturlesen. Ein besonderer Dank gilt allen Mitarbeitern der GSI-Abteilungen LOEP, ET und dem gesamten Bereich GA, allen voran Jan Lindenberg, Herr Motitschke und Herr Fäustle, deren Zeit ich das ein oder andere Mal in Anspruch genommen habe und ohne deren Mitarbeit ich weder an Rohdaten noch an für die Analyse wichtige Informationen gekommen wäre.

Vielen Dank an meinen Eltern, die mich während der Jahre meines Studiums immer unterstützt haben. Danke Mama, dass du mich 2008 davon abgehalten hast das Studium zu schmeißen.



Erklärung zur Masterthesis

Hiermit versichere ich, die vorliegende Masterthesis ohne Hilfe Dritter nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt zu haben. Alle Stellen, die aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Darmstadt, den 30. Oktober 2013



(Christopher Ripp)