

Analyse des elektrischen Energieverbrauchs und der Energieeffizienz von international verteilten Beschleunigeranlagen

Studienarbeit

Stanislav Leis | 1541584

Elektrische Energieversorgung unter Einsatz Erneuerbarer Energien



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Stansilav Leis

Matrikelnummer: 1541584

Studiengang: Master of Science Wirtschaftsingenieurwesen – Elektro- und Informationstechnik

Studienarbeit

Thema: "Analyse des elektrischen Energieverbrauchs und der Energieeffizienz von international verteilten Beschleunigeranlagen"

Eingereicht: 21. August 2015

Betreuer: M.Sc. Damian Batorowicz

Prof. Dr.-Ing. Jutta Hanson

Fachgebiet Elektrische Energieversorgung unter Einsatz Erneuerbarer Energien

Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik

Technische Universität Darmstadt

Landgraf-Georg-Straße 4

64283 Darmstadt

Vorwort

Ich möchte mich hiermit bei meinem Betreuer Herrn M.Sc. Damian Batorowicz, vom Fachgebiet Elektrische Energieversorgung unter Einsatz Erneuerbarer Energien bedanken, der mir mit vielen Ideen und ausführlicher Hilfestellung stets zur Seite gestanden hat. Ich bedanke mich bei Frau Prof. Dr.-Ing. Hanson, die mir das Verfassen der Arbeit ermöglicht hat. Zudem danke ich den Teilnehmern der Studie, mit denen ich zu den Fragebögen in Kontakt stand. Die Zeit der Studienarbeit war eine sehr erfahrungsreiche Zeit.

Ehrenwörtliche Erklärung

Ich erkläre hiermit ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig angefertigt habe. Sämtliche aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit wurde bisher keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und noch nicht veröffentlicht.

Darmstadt, den 21. August 2015

Inhaltsverzeichnis

Vorwort.....	I
Abbildungsverzeichnis.....	II
Tabellenverzeichnis.....	III
Abkürzungsverzeichnis.....	IV
1 Einleitung.....	1
2 Konzeptionelle Grundlagen.....	3
2.1 Grundlagen zur Leistung.....	3
2.2 Normen im Hinblick auf die Energieeffizienz	4
2.3 Energiemanagement	5
2.4 Netzqualität	9
2.5 Gebäudetechnik.....	12
2.6 IT-Systeme.....	13
2.7 Das betrachtete Netz.....	14
2.8 Elektrische Energie durch Eigenerzeugung.....	15
2.9 Angenommene Preise.....	16
2.10 Mögliche Schwierigkeiten zum Thema Energieeffizienz	18
3 Der Aufbau der Umfrage.....	19
4 Betrachtete Anlagen	23
5 Effizienzpotentiale.....	30
5.1 Aufteilung der Strompreise	30
5.2 Gegebene und bestimmte Leistung.....	31
5.3 Betriebszeiten	33
5.4 Elektrischer Energieverbrauch.....	38
5.5 Transformatoren, Kurzschlussleistung und eigene Energieerzeugung	41
5.6 Gesamtkosten für elektrische Energie.....	44
5.7 Effizienzmessung	45
5.8 Überblick und eine Gesamtanalyse.....	47
6 Hebel zur Erhöhung der Effizienz	50
7 Ausblick zur Umfrage	59
8 Zusammenfassung der Ergebnisse.....	61
Anhang	V
Literaturverzeichnis.....	XXXVI

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Zeigerdiagramm der Leistung bei beliebigem Winkel.....	3
Abbildung 2: Energiemanagement als Mittel zur Kostenreduzierung.	6
Abbildung 3: Vereinfachtes Netz zur Versorgung von priorisierten Verbrauchern.....	11
Abbildung 4: Skizzenhafte Annahme für das Betriebsnetz einer Teilchenbeschleunigeranlage.	21
Abbildung 5: Erhaltene und selbstausgefüllte Fragebögen von Beschleunigeranlagen.	23
Abbildung 6: Verhältnisse der Preiskomponenten für elektrische Energie in europäischen Ländern.	31
Abbildung 7: Berechnete und gegebene Leistungen.	32
Abbildung 8: Sämtliche Leistungsangaben.....	33
Abbildung 9: Gegebenen und berechnete Nutzungsdauern nach Formel 5 in h.....	34
Abbildung 10: Normale Betriebszeit nach Beschleuniger in h.	35
Abbildung 11: Anteil der Vorbereitungszeit an der Betriebszeit.	36
Abbildung 12: Durchschnittlicher elektrischer Energieverbrauch pro Anlage.	38
Abbildung 13: Verbrauchsanteile der elektrischen Energie nach Anlagearealen.	40
Abbildung 14: Minimale und maximale Kurzschlussleistung des Hauptanschlusses.	41
Abbildung 15: Fragen nach eigener Energieversorgung und Notfallgeneratoren.	43
Abbildung 16: Gesamtkosten für elektrische Energie und durchschnittliche Leistung während des Betriebes.....	44
Abbildung 17: Anlageneffizienz mithilfe der Gesamtkosten und Spitzenleistung während des Betriebes.....	46
Abbildung 18: High-Level Benchmark zu vorhandenen Daten.....	48
Abbildung 19: Häufigkeitsverteilung der Leistung für PSI inklusive Flächenberechnung.	51
Abbildung 20: Veränderliche Faktoren der Häufigkeitsverteilung für Szenariobildungen.	55

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Verhältnis des Endenergieverbrauchs für Informations- und Kommunikationstechnik zum gesamten Endenergieverbrauch von 2008 bis 2012 in Deutschland.....	14
Tabelle 2: Dezentrale Stromerzeugungstechnologien und Möglichkeit der KWK.	16
Tabelle 3: Währungsfaktoren, Strom- und Blindleistungspreise für jeweils betrachtete Jahre.	17
Tabelle 4: Sämtliche betrachtete Anlagen aufgeteilt nach Anlagenart, erstem Betriebsjahr und Art des Fragebogenausfüllens.....	25
Tabelle 5: Spannungslevel der Verbindung zum externen Netz.....	42
Tabelle 6: Ergebnisse der Berechnung nach Formel 7.	53
Tabelle 7: Jährliche Kostenänderung für elektrische Energie bei Veränderung des kWh-Preises.	54
Tabelle 8: Ergebnisse der Szenariobildungen zur Effizienz.	56
Tabelle 9: Veränderungen zwischen den Szenarien der Intensität.....	58

Abkürzungsverzeichnis

EVU	Energieversorgungsunternehmen
THD	Total Harmonic Distortion
UPS	Uninterruptible Power Supply
ÜNB	Übertragungsnetzbetreiber
KWK	Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen
VNB	Verteilnetzbetreiber

1 Einleitung

Das Thema Energieeffizienz spielt besonders in Europa, mit höherem Energieverbrauch und höheren -preisen eine große Rolle. So müssen heute vor allem große Anlagen, mit meist erhöhtem Effizienzpotential, näher betrachtet werden. Große Konzerne haben hierbei die Möglichkeit spezielle Effizienzprogramme aufzulegen, wie beispielsweise die Merck KGaA mit dem Edison-Projekt [1]. Die zumeist durch öffentliche Hand finanzierten, wissenschaftlichen Großanlagen sind weniger mit solchen finanziellen Möglichkeiten ausgestattet, großangelegte Effizienzmaßnahmen nach der Zeit der Inbetriebnahme einzuführen. Beschleunigeranlagen decken ein breites Forschungsgebiet ab, angefangen von Materialwissenschaften, bis hin zu Life Science und Medizin. Damit stehen Anlagenbetreiber theoretisch weniger im Wettbewerb, wie zum Beispiel Industrieunternehmen. Ein internationaler Austausch bietet sich an. Die Betreiber können offener mit ihren Daten zum Energieverbrauch und der Infrastruktur umgehen. Dadurch lassen sich Synergieeffekte im Hinblick auf den Informationsaustausch generieren. Zudem nimmt die Zusammenarbeit beim Aufbau solcher Anlagen zu. Solche Kollaborationen von mehreren Ländern, wie bei der neuen Anlage FAIR mit zehn Ländern, waren bis vor drei Generationen nicht üblich [2]. Hierbei bringen einzelne Teilnehmerländer idealerweise ihre individuellen Erkenntnisse, auch in Themen der Energieversorgung ein. Die Eingliederung der verschiedenen Anlagenarten kann sich als schwierig erweisen. Die internationale Zusammenarbeit birgt somit technologische Schwierigkeiten, die es zu meistern gilt. Teilchenbeschleunigeranlagen weisen eine Zeitkonstante von 30 Jahren auf, vom ersten Entwurf bis zum tatsächlichen Bau der Anlage [3]. Diese Zeit ist nötig um solch komplexe Anlagen zu entwickeln. Energieeffizienz spielte in dieser Zeit bei der Entwicklung, vor allem der älteren Anlagen, häufig kaum eine Rolle. Mit neuen Technologien kann das Verbesserungspotential als groß angenommen werden. Zudem geht bei der Neuentwicklung von Beschleunigeranlagen die Wissenschaft an die Grenzen des physikalisch möglichen [3]. Beschleunigeranlagen werden durch immer größere Anlagen und Anwendung neuer Technologien, leistungsfähiger. Die jährlichen Betriebskosten der Anlagen nehmen, zeitlich gesehen mit der Leistung und Preise für elektrische Energie zu. Das Thema Energieeffizienz rückt in der Prioritätsliste der Betreiber höher. Heute spielen zunehmend Investitionen, wie in Steuerung und Regelung, eine Rolle.

Große Teilchenbeschleunigeranlagen weisen mit mindestens etwa 35 GWh, während des Betriebes den durchschnittlich elektrischen Energieverbrauch von etwa 8000 Einwohnern auf [4]. Sie sind von ihrem Betrieb her sehr unterschiedlich. Es gibt verschiedene Anlagenarten,

wie Synchrotron, Speicher-Ring oder Linear-Beschleuniger. An Forschungszentren werden diese schließlich in unterschiedlichster Form miteinander verknüpft. Ein Benchmarking¹ wird dadurch herausfordernd. So ist es als sinnvoll zu erachten eine möglichst hohe Stichprobe von Beschleunigeranlagen zu erhalten, um Unterschiede kenntlich zu machen. Mithilfe von definierten Kennzahlen kann ein solcher betrieblicher Vergleich vorgenommen werden [7]. Diese Arbeit dient einem Überblick über wichtige Eigenschaften der elektrischen Energie von internationalen Beschleunigeranlagen. Es wird nicht darauf abgezielt auf sämtliche Anlagen im Detail einzugehen, da dies den Rahmen der Arbeit sprengen würde. Der Detailgrad kann in den Schritten nach dieser High-Level-Auswertung erhöht werden. Mit dieser Arbeit können teilnehmende Betreiber ihre Anlage im internationalen Vergleich eingliedern und bei Auffälligkeiten gegenüber anderen Anlagen, Effizienzmaßnahmen verwirklichen.

¹ Benchmarking ist ein Instrument zur Wettbewerbsanalyse [5]. Dieses Verfahren wird häufig bei Industrieunternehmen eingesetzt. Es sollen Leistungslücken zu den Klassenbesten systematische geschlossen werden. Dabei sind die Unternehmen häufig sehr unterschiedlich und können durch geschickte Kennzahlenfindung miteinander verglichen werden [6]. Eine Übertragung des Verfahrens auf wissenschaftliche Großanlagen wird als sinnvoll erachtet.

2 Konzeptionelle Grundlagen

Bevor auf das konkrete Thema eingegangen wird, werden zunächst in diesem Kapitel konzeptionelle Grundlagen definiert. Hierfür werden für die Energieeffizienz relevante Begriffe erklärt. Grundsätzlich werden alle Formeln und Grafiken auf Englisch festgehalten. Dies dient der Möglichkeit einer einfacheren, späteren Folgenutzung, bedingt durch die internationale Orientierung dieser Studienarbeit.

2.1 Grundlagen zur Leistung

Das Energieversorgungsnetz besteht aus Lasten, Kabeln etc., die eine eigene Impedanz, als komplexe Zahl \underline{Z} in die Betrachtung mit einbringen [8]. Die Impedanz hat einen Wirk- (R) und einen Blindanteil (jX). Zudem hat jeder Generator einen Leistungsfaktor $\cos(\varphi)$. Dieser Leistungsfaktor entsteht aus dem Verhältnis der Wirk- (P) und Scheinleistung (\underline{S}). Dabei ist das Leistungsverhältnis nach [9] in Abbildung 1 aufgebaut.

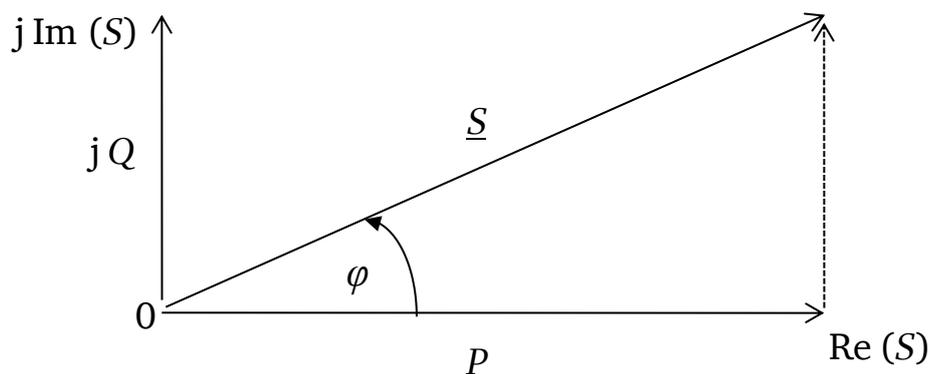


Abbildung 1: Zeigerdiagramm der Leistung bei beliebigem Winkel [10].

Das gezeigte Leistungsdreieck stellt dabei folgenden Zusammenhang der Leistungsaufteilungen nach Formel 1 her:

$$|\underline{S}| = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (1)$$

$$|\underline{S}| = P \cdot \cos(\varphi) = Q \cdot \sin(\varphi) = U \cdot I \cdot \cos(\varphi) \cdot \cos(\varphi) = U \cdot I \quad (1 - \text{phasig})$$

mit \underline{S} : Scheinleistung in VA

P : Wirkleistung in W

Q : Blindleistung in Var²

Die abgegebene Wirkleistung P bei effektiver Spannung und Stromstärke ist somit nur ein durch $\cos(\varphi)$ gegebener Faktor der Scheinleistung \underline{S} . Zwischen Spannungsquelle und Verbrauchern verläuft die Blindleistung jQ . Der Faktor $\cos(\varphi)$ kann theoretisch zwischen Null und Eins liegen. Mit einer Vergrößerung wird der Anteil der Wirkleistung P an der Scheinleistung \underline{S} erhöht und der Blindleistungsanteil gesenkt. Um dies zu bewirken, kann die Blindstromkompensation eingesetzt werden. Zumeist wird von VNBs vertraglich ein Wert von $\cos(\varphi)$ von 0,9 gefordert [11]. Wird ein geringerer Wert erreicht, wird die durch den Zähler erfasste Blindleistungsaufnahme in Rechnung gestellt.

2.2 Normen im Hinblick auf die Energieeffizienz

Zum Thema Energiemanagement, welches mit der Energieeffizienz direkt in Verbindung steht, gibt es Normen, wie DIN ISO 14001, DIN 15900, DIN ISO 50001, DIN EN 16231 oder EMAS – Eco Management and Audit Scheme [12]. In diesem Unterkapitel sollen zwei dieser Normen näher beschrieben werden. Diese wurden gewählt, da sie die besten Voraussetzungen für den internationalen Vergleich von Teilchenbeschleunigeranlagen in Bezug auf Energieeffizienz bieten.

Die DIN ISO 50001-Norm „(...) legt die Anforderungen zur Einführung, Verwirklichung, Aufrechterhaltung und Verbesserung eines Energiemanagementsystems fest, mit dem Ziel, eine Organisation in die Lage zu versetzen, durch einen systematischen Ansatz eine kontinuierliche Verbesserung der energiebezogenen Leistung, einschließlich der Energieeffizienz, des Energieeinsatzes und des Energieverbrauchs, zu erzielen.“ [13], S. 7. Hierbei soll in einem kontinuierlichen Verbesserungsprozess nach dem PDCA³-Prinzip vorgegangen werden. Beim ersten Schritt (Plan) wird das gesamte Konzept in einem Handbuch festgehalten. Zu diesem Schritt kann die Erstellung des für diese Arbeit

² Volt Ampere reaktiv [8].

³ PDCA bedeutet hierbei „plan-do-check-act“.

vorliegenden Fragebogens gezählt werden. Die Einführung des Konzeptes folgt darauf (Do). Darunter versteht sich die Abfrage der Anlagen durch den Fragebogen selbst. Kennwerte für den Vergleich der einzelnen Anlagen werden festgelegt. Abweichungen der gemessenen Energiewerte vom Richtwert werden in Berichtsform dokumentiert (Check). Hierunter fällt die Analyse der eingeführten Kennwerte der Kapitel 5 und 6 dieser Arbeit. Die erlangten Erkenntnisse können eingesetzt werden, um einen Maßnahmenplan zu beschließen (Act). Dieser Schritt folgt nach dem Ergebnis dieser Studienarbeit. Die Anlagenbetreiber sollten die gefundenen Hebel nutzen, um die Effizienzlücken zu schließen. Ein Vorteil ist, dass diese Norm eine internationale ist [14]. Damit wird die Vergleichbarkeit von internationalen Anlagen vereinfacht. Mit einer Gesamtanalyse der Prozesse werden kontinuierliche Verbesserungen möglich. Zur Informationsgewinnung für kann ein Benchmark eingesetzt werden.

Der nächste Vorgang zur Untersuchung und dem Vergleich der Anlagen sollte die DIN EN 16231-Norm miteinbeziehen. Diese beinhaltet eine sogenannte „Energieeffizienz-Benchmarking-Methodik“ und legt „(...) Anforderungen und Prozesse für Energieeffizienz-Benchmarking-Methoden zur Energienutzung in Industrie und anderen Sektoren fest.“ [15]. Die Anforderungen dieser Norm betreffen: „(...) Beteiligung, Grenzen, Korrekturfaktoren, Datenerhebung, Datenverarbeitung und Berichterstattung.“ [15]. Sie kann als eine Anleitung zum Vergleich von Anlagen verstanden werden. Der Schwerpunkt dieser Norm ist die Fertigungsindustrie, somit ein besonders energieintensiver Bereich. Sie kann aber ausdrücklich auch auf andere Sektoren angewendet werden. Eine Anwendung auf energieintensive Teilchenbeschleunigeranlagen wird, durch den ebenfalls energieintensiven Betrieb, als sinnvoll erachtet.

2.3 Energiemanagement

Nach [16] verursachen die steigenden Energiekosten und die Forderung der Politik nach Senkung des CO₂-Ausstoßes, eine Senkung des Energiebedarfs und somit auch der Kosten. Dieser positive Effekt ist jedoch mit Aufwand eines jeden Anlagenbetreibers verbunden. Dieses Ziel führt zum Energiemanagement als Mittel zur Kostenreduzierung. Das Energiemanagement beinhaltet die folgenden Möglichkeiten der Abbildung 2.

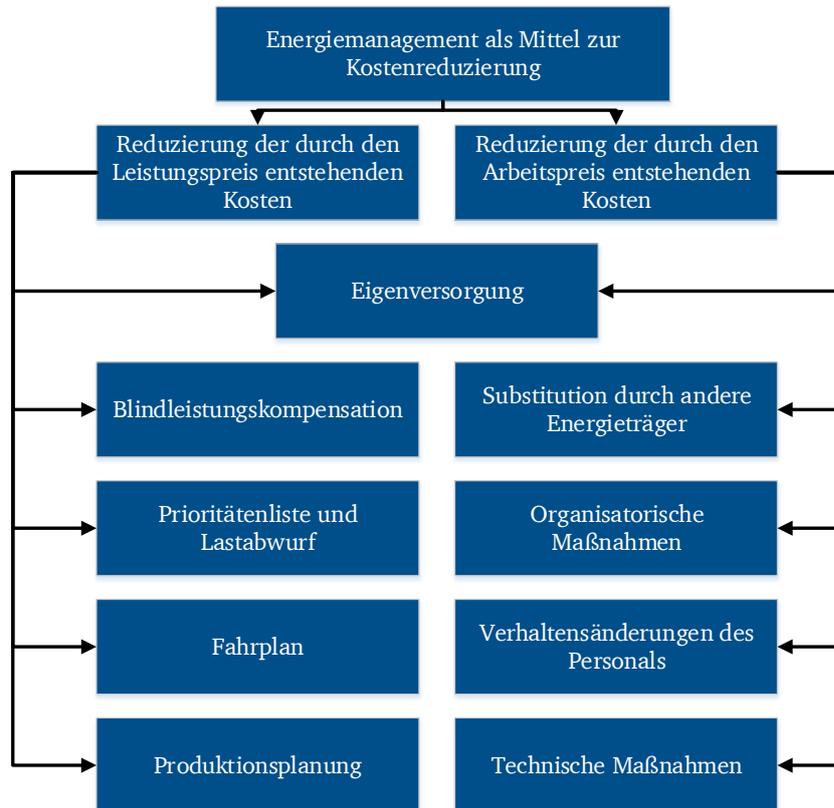


Abbildung 2: Energiemanagement als Mittel zur Kostenreduzierung [16].

Mit dem Ansatz auf der linken Seite der Abbildung 2 wird der Leistungspreis in Euro pro Kilowatt reduziert. Im rechten Ansatz ist es der Arbeitspreis, also Stromverbrauch in Cent pro Kilowattstunde, der betrachtet wird. Der Einsatz von eigener Energieerzeugung kann sowohl zur Reduzierung des Leistungspreises, als auch zur Reduzierung des Arbeitspreises führen. Auf die Versorgung durch eigene Anlagen wird in Unterkapitel 2.8 näher eingegangen.

Durch die Blindleistungskompensation werden die durch den Leistungspreis entstehenden Kosten verringert. Grundsätzlich lässt sich hierbei festhalten, dass bei Beschleunigeranlagen eine Installation von Blindleistungsanlagen im Nachhinein schwierig ist zu gestalten [3]. Durch das Lastmanagementsystem⁴ werden gewisse Verbraucher automatisiert abgeschaltet, damit ein gewisser Leistungspreis eingehalten wird. Dieses sorgt für eine Reduzierung, beziehungsweise Vermeidung von Lastspitzen [18]. Hierfür wird eine Priorität der Verbraucher festgelegt, nach der diese ausgeschaltet werden [16]. Im Unterkapitel 2.8 wird näher auf eine solche Priorisierung von Verbrauchern eingegangen. Da Energieversorgungsunternehmen (EVU) den Mittelwert aus Viertelstundenwerten als Grundlage für ihre Berechnung heranziehen, ist es irrelevant, wenn innerhalb dieser

⁴ Das Lastmanagement dient als eine Bezugsüberwachung mit Vergleich von Vertragsverhältnissen und dem tatsächlichen Verbrauch zur Verbrauchssteuerung [17].

Zeitspanne der maximale Leistungsbezug für kurze Zeit überschritten wird. Nur im Viertelstunden-Mittel muss das Lastmanagementsystem die Einhaltung der Leistungsgrenze gewährleisten. Hierzu verwendet das System für den Rest des Viertelstundenwertes eine Prognose mithilfe einer Trendberechnung, wie die exponentiellen Glättung oder das einfache Mittelwertverfahren. Zur Messung sind idealerweise Smart Meter⁵ einzusetzen. Abschaltungen sind für solch sensible Verfahren, wie Beschleunigungsdurchgänge, die in erster Linie von vielen einzelnen Verbrauchern abhängig sind und deren Funktionssicherheit gewährleistet werden muss, gegebenenfalls schwierig durchzuführen. Jedoch wird es für möglich gesehen, gewisse Verbraucher zu identifizieren, die während eines festgelegten Leistungspegels ausgeschaltet werden können, ohne dass das betreffende wissenschaftliche Experiment gefährdet wird. Für Beschleunigeranlagen ist dies, wegen einer Vielzahl an Verbrauchern, zwar mit viel Aufwand verbunden, jedoch an sich einfach zu gestalten.

Auf der Experimentenplanung der Beschleunigeranlage basierend, kann ein Fahrplan entwickelt werden, mithilfe dessen das EVU auf dem Strommarkt einkauft [20]. Dabei entstehen dem Kunden, dem Teilchenbeschleunigeranlagenbetreiber Kosten, die sich für das Überschreiten des Fahrplanes an den geforderten Regelenergiepreisen orientieren. Hier sind wieder adäquate Prognosen notwendig, die ein mögliches Überschreiten früh identifizieren und mithilfe des Lastmanagements unterbinden können. Dies kann bei solch intensivem Betrieb, wie bei Teilchenbeschleunigeranlagen, nur in Zusammenarbeit über mehrere Abteilungen geschehen.

Betrachtet man die Beschleuniger-Experimente als produzierendes Gut, so können erforschte Ansätze aus dem produzierenden Gewerbe eingesetzt werden. Sinnvoll ist beispielsweise die Organisation der Experimente so zu gestalten, dass häufige An- und Ausschaltvorgänge von großen Anlagen vermieden werden. Es sollte eine gleichmäßige Auslastung, möglichst ohne häufige, abrupte Unterbrechungen angestrebt werden.

Bei der Reduzierung der Kosten, durch Senkung des Arbeitspreises, kann auf die Substitution durch andere Energieträger gesetzt werden. Hierbei sind vor allem die regenerativen Energieträger zu nennen, die durch eine Vergütung die jährlichen Kosten für elektrische Energie im besten Falle senken können [21]. Durch die große Fläche, die eine Beschleunigeranlage in Anspruch nimmt, sind vor allem die Installation von Windkraftträdern oder Photovoltaikanlagen zu nennen.

⁵ Durch den Einsatz von Smart Metern lässt sich der individuelle Energieverbrauch überwachen, analysieren und aktiv steuern [19].

Für die drei Senkungsmöglichkeiten der organisatorischen, der technischen Maßnahmen und einer Verhaltensänderung des Personals, ist die Einführung von Kennzahlen zum Energieverbrauch sinnvoll [16]. Diese beinhaltet eine kontinuierliche Verbesserung. Es werden in regelmäßigen Meetings der leitenden Mitarbeitern Vorschläge zur sinnvollen Verhaltensänderung des Personals, unter Hinzunahme der Kennzahlen unterbreitet. Das Ändern des Verhaltens der Mitarbeiter, bei großen Beschleunigeranlagen mit rund 2.000 Mitarbeitern kann als schwierig angesehen werden. Die Kennzahlen helfen zudem nötige, technische Maßnahmen zu identifizieren.

Eine wichtige Kennzahl ist beispielsweise die Nutzungsdauer. Sie spiegelt die Auslastung der Anlage wider. Je niedriger die Nutzungsdauer, desto unregelmäßiger erfolgt der Leistungsbezug aus dem Stromnetz und desto wirksamer ermöglichen Lastmanagementsysteme eine Optimierung [16]. Endkunden mit einer hohen Nutzungsdauer stellen für EVUs attraktive Kunden dar. Dies liegt an der Tatsache, dass EVUs die bestellte Anschlussleistung vorenthalten müssen. Wird diese während vieler Betriebsstunden genutzt, was eine hohe Benutzungsdauer impliziert, kann man beim EVU davon ausgehen, dass diese in vielen Stunden auch tatsächlich genutzt wird. Das EVU kann somit seine Ressourcen effizienter einsetzen und dem Abnehmer einen günstigeren Strompreis anbieten. Die Berechnung der Nutzungsdauer erfolgt nach [20] mit folgender Formel 2. Diese Formel wird später in Unterkapitel 5.3 verwendet und validiert so die Anlagenangaben, beziehungsweise erweitert die Daten.

$$T_{\text{annual}} = \frac{E_{\text{annual}}}{P_{\text{peakop}}} \quad (2)$$

mit T_{annual} : Jährliche Betriebszeit in h

P_{peakop} : Spitzenleistung während des Betriebes in MW

E_{annual} : Jährlicher Energieverbrauch in MWh

EVUs können damit ihre Kunden in Lastbereiche klassifizieren. Die Nutzungsdauer lässt sich einteilen in Grund-, Mittel- und Spitzenlast [20] und besitzt folgende Grenzwerte im Hinblick auf das Gesamtjahr:

-
- Grundlast: $T_{\text{annual}} > 5.000 \text{ h}$
 - Mittellast: $T_{\text{annual}} < 5.000 \text{ h}$
 - Spitzenlast: $T_{\text{annual}} < 2.100 \text{ h}$

Dabei erhalten die Verbraucher mit der Kategorisierung Grundlast, die für sie günstigsten Vertragskonditionen, denn das EVU kann mit diesen bestmöglich planen. Hervorzuheben ist, dass Beschleunigeranlagen physikalisch betrachtet nicht über eine Strahlzeit von etwa 6.000 h kommen können [3]. Die genauen Betriebszeiten und die Auswirkung auf den Preis sind Unterkapitel 5.3 zu entnehmen.

Das Energiemonitoring kann als System sowohl beim Verbraucher, als auch beim Erzeuger eingesetzt werden. Dieses ist genauer: „Ein Energiemonitoringsystem (EMS) ist ein zentrales übergeordnetes System, das mit anderen, im Betrieb bereits vorhandenen Systemen Informationen austauscht. Vorhandene Systeme können z. B. Prozessleitsysteme, Umweltdatenerfassung und -auswertung, Betriebszeitenkalender, Produktionsplanung, Kostenabrechnung, Lastmanagement sein. Zu der Schnittstellenfestlegung gehört auch die Frage, welche existierenden Systeme in das EMS eingebunden bzw. durch das EMS ersetzt und welche Aufgaben zukünftig eingebunden werden sollen.“ [22], S. 19. Hierzu gehören Aufgaben, wie die Berücksichtigung von abschaltbaren Lieferverträgen oder die Reservebetrachtung. Das System bedarf der Betrachtung über drei Zeithorizonte. Bei der langfristigen Planung (innerhalb eines Jahres) konzentriert man sich auf Lieferverträge. Dabei kann der beschriebene Fahrplan verwendet werden. Die mittelfristige Planung (24 bis 72 Stunden) werden Details ausgehandelt. Hier können energieintensive Experimente, die nicht langfristig eingeplant wurden, berücksichtigt werden. Bei der kurzfristigen Planung wird schlussendlich der Energiebedarf auf die Viertelstunde genau analysiert.

2.4 Netzqualität

Das im Unterkapitel 2.3 beschriebene Energiemanagement bedarf der genauen Betrachtung der Netzqualität. Eine optimale Spannungsversorgung erfolgt durch eine sinusförmige Grundschwingung. Diese ideale Spannungsqualität kommt jedoch nicht in der Realität vor. Es ergeben sich nach [23] folgende Probleme mit der Spannung, wie Einbrüche, Überhöhungen, Unterbrechungen, Unterhöhungen, Oberschwingungen, Schwankungen, Frequenzabweichungen oder Transiente Überspannungen. Für die Oberschwingungen kann der Anteil der Abweichung zur reinen Sinusschwingung summiert werden. Diese Summe

bildet den sogenannten Total Harmonic Distortion-Anteil (THD) [23]. An einem Verknüpfungspunkt müssen je nach Normung bestimmte Pegel für die Oberschwingungen eingehalten werden [24].

Durch die Blindleistungskompensation wird der Anteil der Blindleistung Q verringert und der Anteil der Wirkleistung P erhöht [16]. Bei EVUs gilt die nach Unterkapitel 2.1 beschriebene Grenze für das $\cos(\varphi)$ von 0,9. gibt mehrere Möglichkeiten Blindleistung Q zu kompensieren:

- Kompensationsanlagen mit Kondensatoren
- Aktive Filter
- Motoren mit passender Nennleistung

Kompensationsanlagen sind Niederspannungsanlagen [25]. Diese werden besonders bei großen Verbrauchern eingesetzt, die einen wesentlichen Anteil am gesamten Leistungsbezug haben. Nutzen mehrere Verbraucher einen gemeinsamen Einspeisepunkt, kann die Anlage für diese Verbrauchergruppe genutzt werden. Die Kompensationsanlage wird hierzu an zentraler Einspeisestelle errichtet. Für einen wirtschaftlich effizienten Einsatz, müssen die Kosten für die Blindleistung Q über die Abschreibungsdauer der Kompensationsanlage, wie zum Beispiel von zehn Jahren, die Investitionskosten, von etwa 8.000 € dieser Anlage überschreiten [25]. Diese besteht üblicherweise aus Leistungskondensatoren, Schaltern und einer Regelung.

Aktive Filter analysieren die in den nichtlinearen Verbrauchern entstehenden Oberschwingungen und liefern einen Kompensationsstrom gegenphasig hierzu [11]. Hierbei gibt es nach [26] Filter, angefangen von der 2. bis zur 49. Harmonischen und höher. Um ein Ergebnis vorweg zunehmen, haben nicht alle Anlagen Filter installiert. Dies ist Thema des Unterkapitels 5.5.

Eine reine ohmsche Last tritt in der Praxis nicht auf [11]. Es wird ein Strom benötigt zum Umpolen und zum Aufbau von magnetischen Feldern. Dieser pendelt als Blindstrom zwischen Generator und Verbraucher. Überdimensionierte Motoren führen dabei zu einem niedrigen $\cos(\varphi)$. Es sollten Motoren mit passender Nennleistung eingesetzt werden [16].

Wichtig ist die richtige Auslegung von Transformatoren. Bei einer zu hohen Auslastung ist mit hohen Energieverlusten zu rechnen [27]. Mit gering ausgelasteten Transformatoren lässt sich die Spannungsqualität verbessern. Grundsätzlich ist es sinnvoll bei Neueinrichtungen eine überschlägige Abschätzung der Verbraucher aufzustellen. Dazu können Verbraucher priorisiert werden nach der gewünschten Ausfallsicherheit. In Abbildung 3 ist ein vereinfachtes Netz zur Verbraucherversorgung dargestellt.

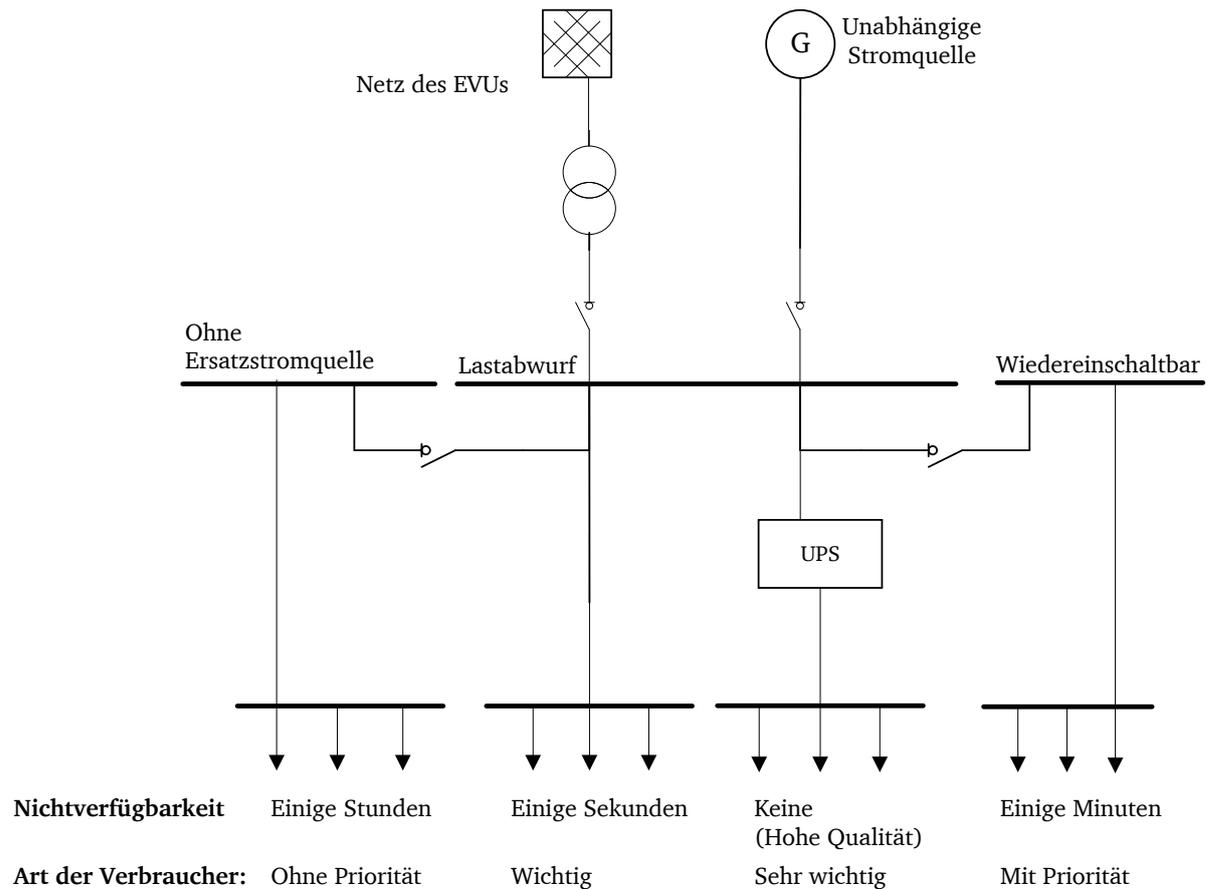


Abbildung 3: Vereinfachtes Netz zur Versorgung von priorisierten Verbrauchern [28].

So gibt es nach Abbildung 3 folgende Verbraucherarten und deren gewünschte Ausfallsicherheiten:

1. Verbraucher, deren Funktion über einen längeren Zeitraum unterbrochen werden kann. Für diese Verbraucher gibt es keinerlei Priorität.
2. Verbraucher mit einer Priorität werden wieder eingeschaltet, wenn die wichtigen Verbraucher in Betrieb sind.
3. Wichtige Verbraucher werden schnellstmöglich wieder eingeschaltet, sobald die Spannung und die Frequenz der Ersatzstromquelle stabilisiert sind.
4. Verbraucher, für die eine absolute Verfügbarkeit benötigt wird, werden zusätzlich durch ein Uninterruptible Power Supply (UPS)-System versorgt.

Einerseits wird durch die Priorisierung eine Überdimensionierung des Netzes verhindert, wenn beispielsweise für gewisse Verbraucher kein Anschluss zu einer unabhängigen Stromquelle benötigt wird. Zum anderen nützt diese, um festzustellen welche Verbraucher für den Betrieb unabdingbar sind, das heißt ein UPS-System benötigen.

Eine erhöhte Anzahl an durchschnittlichen Blackouts spiegelt die Möglichkeiten der Qualitätssteigerung des Netzes und dessen Verbindung wider. Nach Formel 3 ergibt sich zudem die Stundenzahl der Blackouts pro Jahr:

$$D_{\text{annual}} = \sum_{i=0}^n BA_{ij} \quad (3)$$

mit D_{annual} : Gesamtdauer sämtlicher Blackouts im Jahr in h

BA : Blackout i im Jahr j , mit $n \in \mathbb{N}^+$

Für die Priorisierung der Verbraucher nach Abbildung 3 kann festgehalten werden, dass die Beschleunigeranlage an sich ganz links im Bild angesetzt sein wird. Dieses ist absolut abhängig vom Netz des EVUs und kann nicht allein durch eine unabhängige Stromquelle oder ein UPS versorgt werden. Zudem fällt die Anlage aus, bis der Fehler behoben wurde und dahinter steht kein lebensnotwendiger Prozess, der beispielsweise den Einsatz eines UPS nötig macht.

2.5 Gebäudetechnik

Bei der Gebäudetechnik ergeben sich erhebliche Einsparpotentiale für den Einsatz elektrischer Energie. Diesbezüglich wurde der Energieverbrauch im Fragebogen auch für diesen unterteilt. In diesem Kapitel wird auf folgende Komponenten der Gebäudetechnik, die als höchster Potentialträger gesehen werden eingegangen:

1. Lüftungs- und Klimaanlage
2. Beleuchtung
3. Steuerungs- und Regelungstechnik
4. Elektrische Anlagen

Lüftungsanlagen werden zu einem großen Anteil in der Industrie eingesetzt. Auch öffentlich-wissenschaftliche Einrichtungen bedürfen dieser Technik. Die Stromkosten bei der Luftbeförderung haben im Allgemeinen einen Anteil von etwa 20 bis 30 Prozent [10]. Wird darauf abgezielt eine Effizienzsteigerung in diesem Bereich zu erhalten, müssen die Druckverluste minimiert werden. Eine Erneuerung von ineffizienten Anlagen sollte unter der Beachtung, dass 30 bis 60 Prozent der Jahresbetriebskosten von Klimaanlage durch Ventilatoren entstehen, unter dem Gesichtspunkt der Kostenreduktion untersucht werden

[29]. Es ergibt sich die Möglichkeit die Zuluft bedarfsgerecht zu regeln. So gibt es weitläufige Einsparmöglichkeiten während der Stillstandzeiten. Die Betrachtung der Mitarbeiterbelegung sollte hier integriert werden. So kann der bedarfsgerechte Betrieb noch weiter sensibilisiert werden [30]. Bei der Beleuchtung ist zu beachten, dass einfache Glühbirnen, im Verhältnis zu Energiesparlampen einen vierfach, Leuchtstofflampen einen sechsfach niedrigeren Wirkungsgrad aufweisen [27]. Eine weitläufige Nutzung von Tageslicht ist eine pragmatische, jedoch effiziente Weise den Stromverbrauch zu reduzieren. Für die Beleuchtung kann zudem die Steuer- und Regelungstechnik eingesetzt. Dadurch kann der Energiebedarf um 50 Prozent gesenkt werden [31]. Generell kann die Erhöhung der Energieeffizienz erreicht werden, indem möglichst viele Komponenten, im Sinne von Erzeugern und Verbrauchern der Gebäude vernetzt sind. Dies kann mithilfe einer zentralen Leittechnik realisiert und die Betrachtung eines Gesamtsystems zur Effizienzsteigerung kann garantiert werden [32]. Besonders für Klimaanlage, die überwiegend nicht in Voll-, sondern in Teillast betrieben werden, ist eine Regelung wichtig. Es sollten spezielle Nacht- und Wochenendprogramme eingerichtet werden. Sämtliche, große elektrische Anlagen sollten an diese Leittechnik angeschlossen werden. Wärmespeicher, Batterien, Hebe- oder Fördermittel können außerhalb von Spitzenzeiten elektrisch aufgeladen werden. Zudem sollte ein Leerlaufbetrieb von Anlagen vermieden werden.

2.6 IT-Systeme

In 2012 sind rund zwei Prozent am weltweiten CO₂-Ausstoß durch Rechenzentren entstanden. Dieser entsprach dem weltweiten CO₂-Ausstoß durch den Luftverkehr, der bei 2,2 Prozent lag. PCs und Monitore verursachen in den USA beispielsweise im Jahr so viel CO₂-Ausstoß, wie etwa rund 44 Millionen Autos. Zudem ist ein steigender Endenergieverbrauch, am Beispiel von Deutschland für Informations- und Kommunikationstechnik nach Tabelle 1 festzustellen.

Tabelle 1: Verhältnis des Endenergieverbrauchs für Informations- und Kommunikationstechnik zum gesamten Endenergieverbrauch von 2008 bis 2012 in Deutschland [33].

Jahr	2008	2009	2010	2011	2012
Verhältnis von Endenergieverbrauch der Informations- und Kommunikationstechnik zum gesamten Endenergieverbrauch für Gewerbe, Handel und Dienstleistung	5,14%	5,96%	5,55%	5,87%	6,16%

Der Energieverbrauch durch Informations- und Kommunikationstechnik macht im Verhältnis zum Verbrauch durch Raumwärme (etwa 40 Prozent), mit sechs Prozent wenig aus. Jedoch ist Raumwärme ein Grundbedürfnis, bei dem sich der Verbrauch nicht ohne Weiteres absenken lässt. Deshalb wird es als sinnvoll erachtet bei der IT die Effizienzpotentiale für eine Verbrauchsreduzierung zu schließen.

Die Reduktion des Energieverbrauchs durch IT kann durch effizientere Hardware erfolgen. Jedes Watt an Hitze führt zur Erhöhung des Verbrauchs und somit zu mehr Bedarf an Kühlleistung. Die Kühlung beansprucht einen Anteil am Gesamtstromverbrauch von 60 Prozent [34]. In der folgenden Arbeit werden die genutzten IT-Systeme der Anlagenbetreiber ebenfalls untersucht.

2.7 Das betrachtete Netz

Teilchenbeschleunigeranlagen-Komplexe haben einen Bedarf an Pulsleistung⁶. Bei manchen Anlagen wird dieser Bedarf mithilfe eines zusätzlichen Netzes befriedigt, wie bei der GSI nach Anhang 1 [36]. Manch andere Anlagen haben hierfür keinen eigenen Netzanschluss, wie bei der geplanten Anlage ESS [37]. Durch immer höhere Leistung steigt die weltweite Nachfrage nach Pulsleistung im Zeitverlauf an [38]. Mit dieser Technologie sind hohe Parameter möglich: „(...) tremendous parameters: powers up to 10^{14} W, voltages up to 10^6 - 10^7 V, and currents as high as 10^6 A and even higher.“, [39, S. 13]. Diese Leistung wird in einer sehr kurzen Zeit angelegt. Mithilfe der Pulsleistung lassen sich Beschleunigeranlagen in kleiner und kompakter

⁶ Pulsleistung ermöglicht einen schnelle, etwa 2-5 Millisekunden und leistungsstarken Impuls, der benötigt wird um gewisse Experimente zu versorgen [35]. Jedoch ist bei Teilchenbeschleunigeranlagen, wie bei der GSI dieser Impuls etwas langsamer – Die Zeit dieses liegt in etwa bei zehn ms bis zehn s [3].

Bauweise, im Vergleich zu konventionellen Teilchenbeschleunigeranlagen bauen, was die Effizienz steigert.

Das Netz für die Pulsleistung ist jedoch weniger geeignet für Effizienzmaßnahmen, da die Pulslast für manche Experimente unumgänglich ist und Maßnahmen hier den Betrieb stören würden. Der wissenschaftliche Nutzen aus solchen Anlagen soll möglichst wenig durch Effizienzmaßnahmen beeinträchtigt werden. Aus diesem Grund wird in der Arbeit von Maßnahmen die Pulslast betreffend abgesehen.

2.8 Elektrische Energie durch Eigenerzeugung

Bei großen Anlagen macht die Eigenversorgung Sinn, sei es beispielsweise zur Erbringung von Notstrom, wie nach Unterkapitel 2.4 beschrieben oder um die jährlichen Energiekosten zu senken. Zu Eigenversorgungsanlagen zählen unter anderem der Betrieb von Generatoren zur Sicherheitsstromversorgung, Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen (KWK), auf fossilen oder regenerativen Energieträgern basierend [16], oder von Gas-und-Dampf-Kombikraftwerken [40]. Diese Nutzung kann ein Einhalten des vertraglich festgelegten Bezugslimits beim EVU sichern und somit den zu zahlenden Leistungspreis reduzieren. Bei der Energieerzeugung durch regenerative Energieträger kann der erzeugte Strom in das Netz des Verteilnetzbetreibers (VNB) vorrangig eingespeist werden. Die Vergütung erfolgt nach dem jeweils geltenden Gesetz des Landes, in Deutschland nach dem Erneuerbaren-Energien-Gesetz (EEG), unter Voraussetzung der Befuerung mit regenerativer Energie.

Grundsätzlich ist zu überprüfen, ob die eigens erzeugte Energie zu einer solchen Einspeisung ins Allgemenetz oder zur direkten Eigenversorgung genutzt werden soll. Allgemein ist die zweite Möglichkeit vorzuziehen, wenn es sich beim eigenen Leistungsbezug um einen stark schwankenden handelt. Für Teilchenbeschleunigeranlagen trifft dies mit täglichen Leistungsspitzen von beispielsweise im Mittel von rund 25 kW bei der GSI in 2011 nach Anhang 2. Durch die Verringerung dieser Leistungsspitzen können die durch den Leistungspreis verursachten Kosten reduziert werden.

Mittlerweile werden KWK-Anlagen über 2 MW, bis hin zu 100 MW Wirkleistung P installiert [41]. Nach Anhang 3 leisten KWK-Anlagen in Deutschland ca. zehn Prozent der Stromerzeugung. Sie können dazu genutzt werden, entweder einen Teil der Grundlast oder der Spitzenlasten zu übernehmen [16]. Dabei muss die Leistung der KWK-Anlage an die zu reduzierende Spitzelast angeglichen werden. Mit einem Wirkungsgrad von über 90 Prozent ist

eine solche Anlage zudem als äußerst effizient einzustufen. Vor allem ist der Einsatz von KWKs sinnvoll bei Anlagenbetreiber mit Notstromdieselanlagen [16]. Dabei wird der durch die KWK-Anlage erzeugte Strom, von den eigenen Verbrauchern genutzt und reduziert somit mögliche Lastspitzen. Eine Auswahl an Möglichkeit zur KWK-Nutzung ist in folgender Tabelle 2 enthalten.

Tabelle 2: Dezentrale Stromerzeugungstechnologien und Möglichkeit der KWK [27].

Kenngroßen	Brennstoffzelle	Dieselmotor	Gasmotor	Mikrogasturbine	Kleine Gasturbine	Stirling Motor
Leistungsbereich[kW]	50 - 1.000+	20 - 10.000+	50 - 5.000+	30 - 200	1.000+	0,03 - 200
Investition ohne Wärmeauskopplung [EUR/kW]	1.900 - 3.500	350 - 500	600 - 1.000	600 - 1.100	650 - 900	1.000 - 1.500
Zusätzliche Investition für Wärmeauskopplung [EUR/kW]	Bereits beinhaltet	n.a.	75 - 150	75 - 350	100 – 200	k.A.
Stromerzeugungskosten [EUR-ct/kWh]	11,1 - 14,4	12,5 - 16,1	5,7 - 9,2	6,8 - 9,0	5,6 – 10	k.A.

Ein flexibles Kraftwerk, welches nicht durch KWK genutzt werden kann, ist der Dieselmotor. Dieser bietet jedoch im Verhältnis zu anderen Anlagen der Tabelle 2 eine hohe Leistung. Ein solcher hat desweiteren den Vorteil, dass er schnell und unkompliziert einsatzfähig ist. Als dezentrale Einheit bieten sie mit zehn MW Leistung eine ideale Unterstützung zur Versorgung von Teilchenbeschleunigeranlagen.

2.9 Angenommene Preise

Die Strompreise werden in der jeweiligen Landeswährung angegeben. Um diese auf den Euro zu vereinheitlichen, werden Währungsumrechnungsfaktoren für das jeweilige Betrachtungsjahr verwendet. Für die Länder, in denen Anlagenbetreiber Gesamtkosten für die elektrische Energie angegeben haben, sind die Währungsfaktoren, Strom- und Blindleistungspreise der betrachteten Jahre ermittelt.

Tabelle 3 enthält sämtliche Währungsfaktoren, die Strompreise für die betrachteten Jahre der Kapitel 5 und 6. In Unterkapitel 5.1 liegen schließlich die exakten, angenommenen Aufteilungen der Strompreise nach Kosten für Energie, nach Steuern und Abgaben und nach Kosten für den Transport, beziehungsweise das Netz bereit.

Tabelle 3: Währungsfaktoren, Strom- und Blindleistungspreise für jeweils betrachtete Jahre [42], [43], [44], [45].

	D	CH	FRA	UK	SWE	ESP
Währungsumrechnung in €	1	0,82 (Mid. 2012)	1	1,2 (Mid. 2008- 2012)	Nicht benötigt, da Angaben in €	1
Industrie-Strompreis incl. MWSt. in €-Cent/kWh, abzgl. ca. 2 €-Cent/kWh	13,00	9,50	7,00	11,00	6,00	10,00
Blindleistungspreis in €-Cent/kVarh (Benötigt für Betrachtung für D, CH, FRA in Kapitel 5)	6,00	5,27	5,27	Nicht benötigt	Nicht benötigt	Nicht benötigt

Manche Anlagenbetreiber haben kein Bezugsjahr genannt. In diesem Falle wird der Fehler der Berechnung minimiert, indem der Durchschnitt der Währungsumrechnungsfaktoren über mehrere Jahre gebildet wird.

Bei den Strompreisen der Industrie werden zusätzlich zwei €-Cent pro kWh abgezogen. Dies resultiert daraus, dass bei solch großen Abnehmern, wie bei Teilchenbeschleunigeranlagen durch eine regelmäßig hohe Energieabnahme die Vertragsbedingungen, in den meisten Fällen zugunsten der Anlagenbetreiber festgesetzt werden können. Die Eingliederung in die Grundlast nach Unterkapitel 2.3 spielt hierbei eine Rolle. Der angenommene Preis für Deutschland kommt dem am Ende gelieferten Preis durch die GSI für das Jahr 2014 sehr nahe: 12,45 €-Cent pro kWh. So kann davon ausgegangen werden, dass die aus dem Preis mit 13 €-Cent pro kWh resultierenden Kosten eher konservativ bemessen wurden. Eine Blindleistungsanspruchnahme muss zusätzlich gezahlt werden. Für Deutschland werden Zahlen von Tennet angenommen (erweiterter Bereich) 6,00 €-Cent pro kVarh [43]. Für die Schweiz und Frankreich werden einheitlich 5,27 €-Cent pro kVarh verwendet [46].

2.10 Mögliche Schwierigkeiten zum Thema Energieeffizienz

Das Thema Energieeffizienz birgt, neben der Möglichkeit den Energieverbrauch zu senken, auch negative Aspekte. Folgende Schwierigkeiten können sich bei diesem Thema ergeben:

1. Anlagenbetreiber deklarieren ihre Anlage nach außen als „grün“, befolgen dieses nach Innen jedoch nicht. Das Phänomen wird in der Unternehmenswelt auch als „Greenwashing“⁷ bezeichnet.
2. Die Anlage ist tatsächlich effizient, wird deswegen jedoch umso intensiver betrieben. Ein Beispiel wäre hierzu, wenn LEDs installiert sind und diese deshalb durchgängig betrieben werden. Ein weiteres Beispiel wäre die Installation einer hocheffizienten Kühlungsanlage, die im Betrieb im Vergleich wenig Energie benötigt, jedoch vollständig auf eine bedarfsgerechte Regelung verzichtet wird.
3. Die Wissenschaft konzentriert sich durch das in der Öffentlichkeit immer wichtigere Thema der Energieeffizienz, ausschließlich auf verbrauchsarme Versuche. Dazu trägt der internationale Vergleich der Anlagen bei.

Die erste Schwierigkeit lässt sich vor allem durch Analysen und Benchmarks beheben. Spätestens, wenn die tatsächlichen Jahreszahlen für den Energieverbrauch veröffentlicht werden, kann im Vergleich zu anderen Anlagen ein Missstand erkannt werden. Hierfür sollten jedoch tatsächlich Benchmarks, wie dieses durchgeführt werden.

Beim zweiten Punkt ist es schwieriger einen Missstand ausfindig zu machen. Die betreffende Anlage kann eventuell trotz übermäßigem Betrieb, durch effizientere Maschinen etc., weniger verbrauchen als andere Anlagen. Hierbei wird eine weitläufigere Analyse, wie der einzelnen Betriebszeiten notwendig.

Das drittgenannte Phänomen wird mit knapper werdenden Ressourcen in den kommenden Jahren zunehmen. Jedoch sollte die Wichtigkeit von solch bedeutsamen wissenschaftlichen Versuchen, die zu einem großen Teil den Fortschritt der Menschheit absichern, nicht zu sehr untergraben werden. Es ist als bedenklich anzusehen, wenn die Energieeffizienz in den absoluten Mittelpunkt der Betrachtung rückt. Wissenschaftler sollten weitestmöglich, zunächst bei der Ideenentwicklung keinen zu großen Restriktionen ausgesetzt werden, um den Fortschritt nicht zu gefährden. Jedoch ist dies ein extremes Bild – Eine ausgeglichene Betrachtung zwischen Forschungsdrang und Ressourcenschonung ist möglich.

⁷ Nach dem Gabler Wirtschaftslexikon ist unter Greenwashing zu verstehen: „Greenwashing bezeichnet den Versuch von Unternehmen, durch Marketing- und PR-Maßnahmen ein „grünes Image“ zu erlangen, ohne allerdings entsprechende Maßnahmen im Rahmen der Wertschöpfung zu implementieren.“ [47].

3 Der Aufbau der Umfrage

Grundsätzlich ist die Auswertung eines solchen Fragebogens, im Rahmen dieser Arbeit, mit der Vielzahl an Teilnehmern auf hoher Ebene sinnvoll. Es werden in manchen Fällen Annahmen getroffen und es lassen sich keine Ergebnisse der absoluten Erkenntnis finden. Mit der Recherche wurde festgestellt, dass es zum Thema Energieeffizienz in Verbindung mit Teilchenbeschleunigeranlagen noch keine Forschungen oder Studien gibt. Bei der Rückgabe von ausgefüllten Fragebögen der Beschleunigeranlagen ergab sich eine Quote von rund 70 Prozent.

Ziel der Studie ist es Erkenntnisse zum Energieverbrauch, Schwierigkeiten von großen Forschungseinrichtungen zu diesem Thema zu erlangen und daraus Rückschlüsse zur Verbesserung und Effizienzsteigerungen zu ermöglichen. Die Erhebung von Daten aus der wissenschaftlichen Branche der Teilchenbeschleunigeranlagen, zur Generierung von Effizienzsteigerungen, kommt dem Benchmarking aus der Industrie nahe. Grundlegende Qualitätsverbesserungen, in diesem Sinne in der Energieeffizienz, können demnach nur erreicht werden, wenn „(...) Dinge grundlegend anders gemacht werden.“ [48, S. 42]. Auf Basis von Vergleichen zu anderen Unternehmen oder in diesem Falle wissenschaftlichen Großanlagen, wird es leichter sich zu positionieren [49]. Der Vergleich von Parametern zeigt die eigenen Stärken und Schwächen. Die Aufzeichnung solcher Parameter ist Voraussetzung zur Bestimmung des eigenen Erfolgs oder Misserfolgs. Nur über eine Feststellung von solchen Parametern können Optimierungsmaßnahmen sichtbar gemacht werden und der Weg zur Verbesserung motivierend für die Betreiber wirken. Mithilfe dieser Studie sollen Parameter gefunden und die Anlagen somit vergleichbar gemacht werden. Dabei besteht, durch die individuellen Anlagentypen und Baujahre, eine Schwierigkeit der Vergleichbarkeit der Anlagen. Deshalb wird besonderen Wert auf Ausreißer gelegt. Werden Ausreißer bemerkt, wird versucht Verknüpfungen zu anderen Werten im Fragebogen herzustellen. Hierbei werden die Interpretation sowohl einzelner Ausreißer, als auch die Angaben im Verbund mit anderen Anlagen angegangen.

Es wurde ein Fragebogen aufgesetzt, um die wichtigsten energietechnischen Eigenschaften der Anlagen abzufragen. Der Fragebogen, der im Anhang 4 vorliegt, ist in folgende Parts aufgeteilt:

-
1. Grundlegende Beschreibung der Anlage
 - 2a. Basisparameter zu Betrieb, Energieverbrauch und Leistung
 - 2b. Anlagendaten
 3. Fragen zur Energieeffizienz

Zunächst werden im ersten Teil die Grunddaten erfasst. Hier sind der Anlagentyp, das erste Betriebsjahr und die Aufgabe der Forschungseinrichtung zu nennen. Im Fragebogen Part 2a folgen die Basisparameter. Hierzu zählen sämtliche Zeiten der Anlagen, wie die Standby-, Betriebs- oder Vorbereitungszeit und der Energiekonsum dieser, aufgeteilt nach Anlagenarealen. Die Angaben erfolgen unter einem bestimmten Referenzjahr, welcher vom Betreiber festgelegt werden kann. Mit kurzer Vorwegnahme des Studienergebnisses, wäre es aus heutiger Sicht geschickter gewesen, ein spezielles Jahr vorzugeben, damit die Vergleichbarkeit erleichtert wird. Im selben Part folgt eine detaillierte Beschreibung des Energieverbrauchs. Beim Energieverbrauch werden die Leistungen angegeben, welche sich aufteilen in Grund-, Durchschnitts- und Spitzenlast. Die Angaben können entweder bezogen werden auf einen Tag oder zu einer festgelegten Aufnahmezeit t_{rec} , die häufig bei 10 oder 15 Minuten liegt, orientiert an den gegebenen Werten des EVU. Zudem wird unterschieden nach den Leistungen im Betrieb und im Standby.

Es folgt Part 2b des Fragebogens. Nachdem die wichtigsten Grunddaten in den ersten beiden Teilen abgefragt wurden, geht es hier um die detaillierten Daten der Anlage. Diese bestehen aus der Verbindung zum externen Netzwerk, dem internen Netzwerk, der eigenen Energieerzeugung, den Verbrauchern und den Schwankungen des Verbrauchs, nach Abbildung 4. Damit kann das Anlagennetz mit dem Part 2b des Fragebogens grob umschrieben werden.

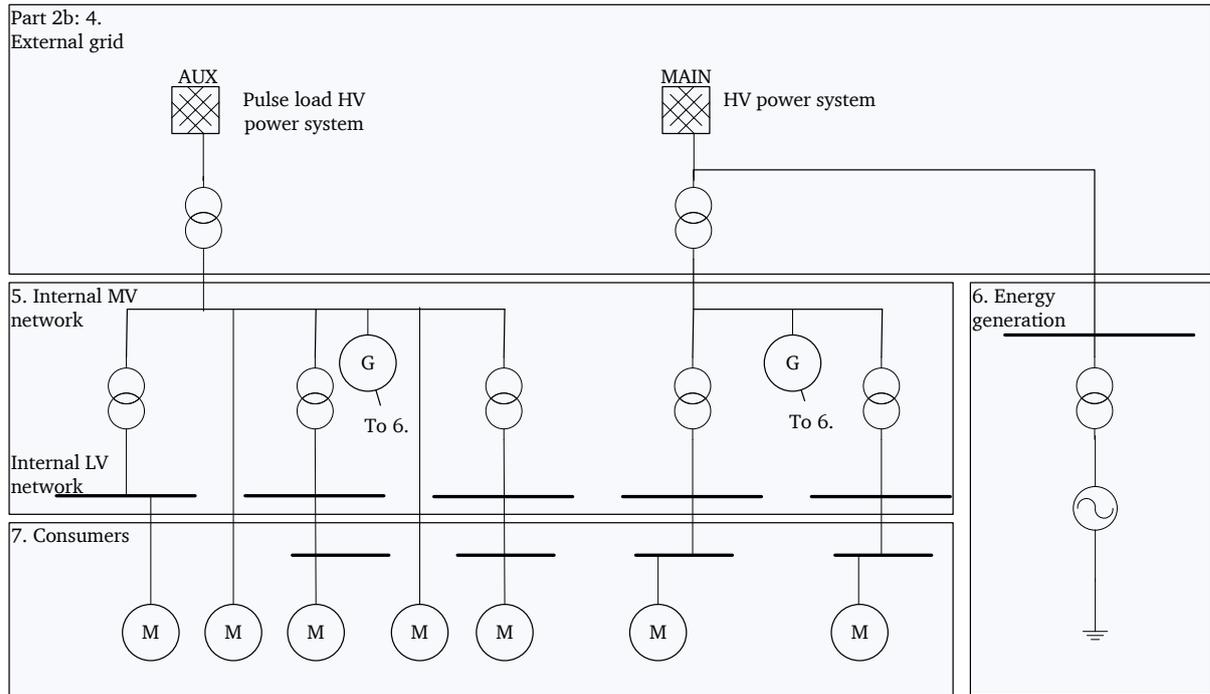


Abbildung 4: Skizzenhafte Annahme für das Betriebsnetz einer Teilchenbeschleunigeranlage.

Die Verbindung zum öffentlichen Netz wird eingeteilt in die Haupt-, Zusatz- und Dritt-Verbindung. Eine wichtige Differenzierung ist die zwischen den verschiedenen Spannungsebenen. Die dreiphasige Spannungsebene wird unterschieden in low voltage (LV), medium voltage (MV) und high voltage (HV), die je nach Bemessungsspannung eingegliedert werden. Die LV-Ebene liegt zwischen 400 V und 1 kV. Danach folgt die MV-Ebene bis 60 kV. Die HV-Ebene liegt höher 60 kV. Im Fragebogen weiter wird nach der unterbrechungsfreien Energieversorgung gefragt. Zwei Fragen zum öffentlichen Netz betreffen den Blackout dieses.

Neben dem externen, ist weiter das interne Netzwerk interessant. Hierbei können die Befragten Daten zu drei verschiedenen Verbindungen angeben, die jeweils in die Spannungsebene und zusätzlich in die UPS aufgeteilt werden. Neben der Kurzschlussleistung, können Angaben zur maximalen und minimalen Belastung gemacht werden. Nach der Definition des Netzanschlusses und des internen Netzes, folgen Fragen zur Eigenerzeugung von elektrischer Energie und der größten drei Konsumenten der Anlage. Schlussendlich kommen Fragen zur Volatilität. Diese sind interessant, da festgestellte Unregelmäßigkeiten im Netz erkannt werden können und danach gegebenenfalls Auswirkungen auf andere Kennzahlen sichtbar werden, wie beispielsweise auf die Blackout-Zeit.

Als letztes folgen in Part 3 Fragen zur Energieeffizienz. Die erste Frage betrifft mögliche unerwünschte Spannungs- und Frequenzänderungen, die durch Verbraucher verursacht werden. Daraus lässt sich schließen, dass das Netz nicht ideal ausgelegt ist oder gewisse

Verbraucher dieses effizienzmindernd belasten. Darauf basierend wird nach möglichen Netztrennungen gefragt. Die Unregelmäßigkeiten, zum Beispiel verursacht durch Verbraucher, können sich summieren und eine Netztrennung verursachen. Eine Verbrauchssenkung erfolgt in erster Linie durch Absenkung der Verbraucherleistung. Anschließend wird nach bisherigen Bemühungen, den Verbrauch zu senken gefragt. Hier kann man die Ambition des Anlagenbetreibers erkennen, Energieeffizienz mit den zur Verfügung stehenden Mitteln zu steigern. Sinnvoll kann es sein den Energieverbrauch von gewissen Anlagenteilen, auf Anfrage durch den EVU, zu senken. Hierfür müssen Verbraucher zunächst durch eine Priorisierung nach Unterkapitel 2.4 festgesetzt werden. Durch ein solches Lastmanagement, das durch einen Fahrplan unterstützt wird, gewinnt das EVU an Flexibilität, was sich in den jährlichen Kosten für den Teilchenbeschleunigeranlagenbetreiber positiv widerspiegelt. Schließlich wird nach den Gesamtkosten für elektrische Energie im letzten Punkt gefragt.

Nachdem die Grundlagen beschrieben, der Fragebogen analysiert wurden, folgen konkret die in die Studie einfließenden Anlagen, bevor auf die Ergebnisse an sich eingegangen wird.

4 Betrachtete Anlagen

Die kontaktierten Anlagenbetreiber sind Abbildung 5 zu entnehmen. Aufgeteilt ist die Karte nach Anlagen (rot umrandet), deren Betreiber selbst einen Fragebogen ausgefüllt haben und nach Anlagen (blau umrandet), für die nach Recherche öffentlicher Daten ein Fragebogen ausgefüllt wurde. Sämtliche Teilchenbeschleunigeranlagenbetreiber, die den Fragebogen selbst ausgefüllt zurückgesendet haben, kommen vom europäischen Kontinent. Die enge Zusammenarbeit zwischen den Auftraggebern, dem PSI und der GSI, und diesen Anlagenbetreibern ist hier sichtbar.

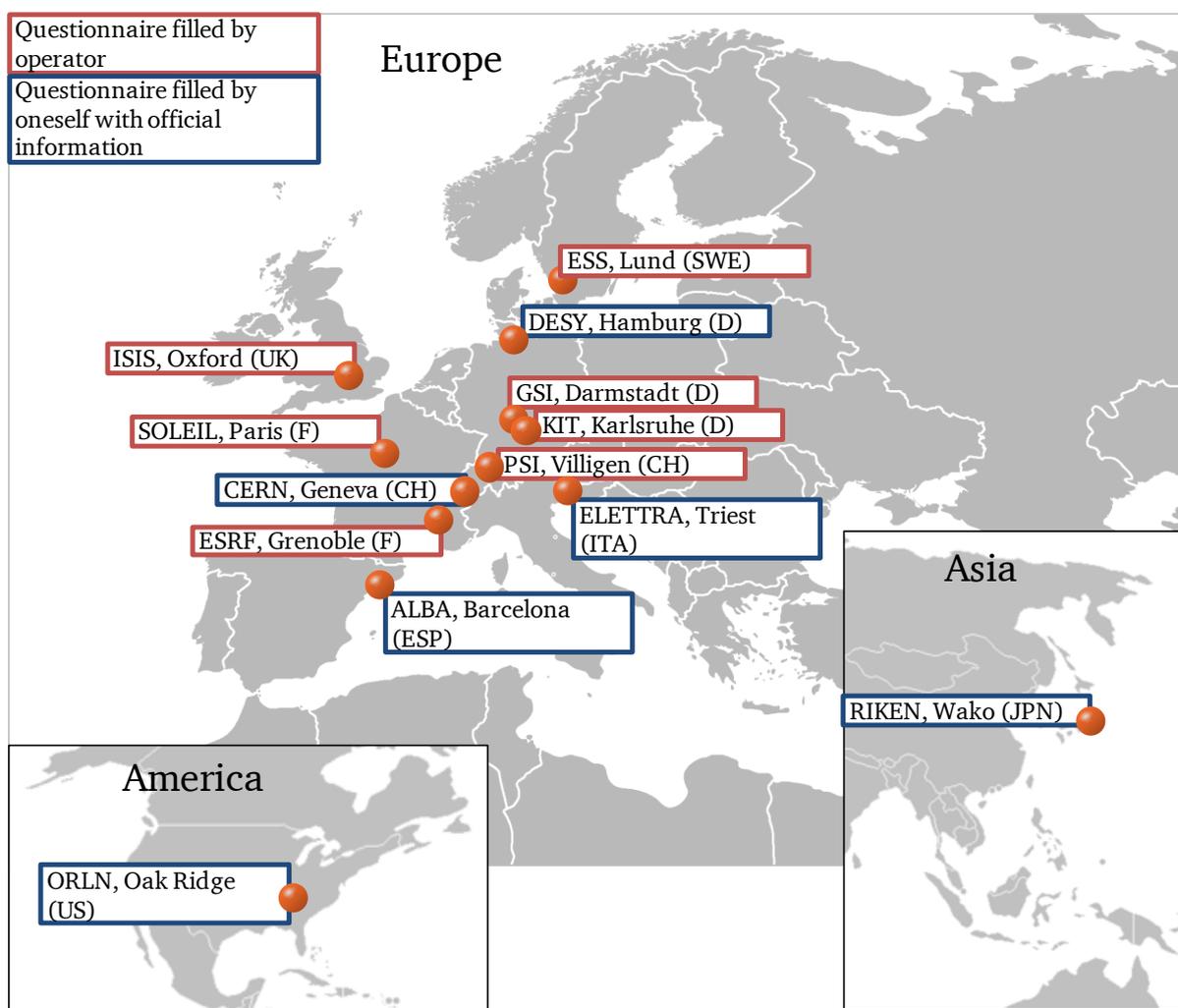


Abbildung 5: Erhaltene und selbstaufgefüllte Fragebögen von Beschleunigeranlagen.

Von den angeschriebenen Anlagenbetreibern haben sieben einen ausgefüllten Fragebogen zurückgesendet. Aus den durch Recherche ermittelten Fragebögen ergaben sich zusätzliche, sechs ausgefüllte Fragebögen.

Kosteneinsparung im öffentlichen Sektor sind häufig nicht das absolute Ziel, während im privaten Sektor Effizienz von Beginn an eine große Rolle einnimmt. Bereits früh zu Beginn der Studie wurde die Idee entwickelt nicht nur Betreiber von Teilchenbeschleunigeranlagen zu befragen, sondern auch Betreiber von industriellen Forschungsanlagen. Dafür sollten Synergieeffekte aus Informationen der Industrie gewonnen werden. Obwohl der Fragebogen umgearbeitet und an private Betreiber angepasst wurde, konnten keine neuen Erkenntnisse gewonnen werden. Da Industrieunternehmen mit solchen kritischen Informationen vertraulich umgehen, konnte keiner der Vertreter einen Fragebogen ausgefüllt zurücksenden. „(...) nach Rücksprache mit den verantwortlichen Kollegen, sehen wir leider keine Möglichkeit an Ihrer Studie teilzunehmen.“ [50], war eine der Antworten, die die gesamte Rückmeldung der angeschriebenen Industriebeteiligten prägnant umschreibt. Neben dem Datenschutz, ist ein solcher öffentlich zugänglicher Benchmark zu anderen, eventuell ähnlichen Unternehmen, nicht im Interesse der Befragten. Benchmarks werden heute erstellt, jedoch von speziellen Anbietern, wie beispielsweise Unternehmensberatungen, die sich der Diskretion verschreiben [6].

Eine weitere Quelle wurde mit Nicht-Beschleunigeranlagen aus öffentlicher Hand in Betracht gezogen. Hierbei ergab sich eine Zusammenarbeit mit dem hessischen Hochschulrechenzentrumsverbund HPC. Diese Informationen wurden mit in die Betrachtung genommen, da Rechenzentren auch bei Beschleunigeranlagen ein Faktor zur Energieeffizienz sind.

Die in Abbildung 5 enthaltene Karte kann nun ergänzt werden durch Angaben nach Anlagentyp und dem ersten Betriebsjahr. Folgende Tabelle 4 enthält sämtlich betrachtete Anlagen. Hinzu kommt der Rechnerverbund HPC, der in dieser Tabelle aufgelistet ist.

Tabelle 4: Sämtliche betrachtete Anlagen aufgeteilt nach Anlagenart, erstem Betriebsjahr und Art des Fragebogenausfüllens.

Name	Hauptanlagentyp	Erstes Betriebsjahr
GSI	Synchrotron	1975
ISIS	Synchrotron	1984
ELETTRA	Synchrotron	1993
ESRF	Synchrotron	1998
KIT	Synchrotron	2000
PSI	Synchrotron	2001
SOLEIL	Synchrotron	2006
DESY	Synchrotron	2009
ALBA	Synchrotron	2010
ORLN	Linac	2006
RIKEN	Linac	2006
CERN	Linac	2008
ESS	Linac	2019
HPC	Rechenzentrum	2013
Legende:	Fragebogen durch Betreiber ausgefüllt	Öffentliche Informationen

Die Anlagekomponenten werden in diese zwei Bereiche aufgeteilt: Synchrotron und Linac. Das Synchrotron ist ein Kreisbeschleuniger [51]. Dabei werden Ionen oder Elementarteilchen mit einer hohen Geschwindigkeit beschleunigt. Sie erhalten so eine hohe Energie. Eine Sonderform des Synchrotrons ist der Speicherring, womit Teilchen über längere Zeit gespeichert werden können. Heute können diese auch für relativ schwere Teilchen, wie Protonen, Antiprotonen oder Ionen eingesetzt werden.

Beim Linearbeschleuniger, oder kurz Linac werden Teilchen durch hochfrequente Wechselspannung längs einer geraden Strecke beschleunigt [51]. Hierbei gibt es bereits gewisse Trends die Effizienz zu steigern, wie mithilfe des „Energy Recovery Linac“⁸.

In diesem Kapitel soll, neben einer kurzen Beschreibung, auf die Besonderheiten der Anlagen eingegangen werden. Hervorzuheben ist, dass es im Hinblick auf die Energieversorgung für große Anlagen, wie PSI und ESS, einfacher ist ihren Energieverbrauch zu reduzieren [3]. Nach der Bezeichnung der Anlage, wird auf die Hauptaufgabe und den Anlagentyp dieser eingegangen. Wenn verfügbar, wird die Mitarbeiterzahl genannt. Danach folgen die zur Verfügung stehenden Besonderheiten der Anlagen. Die Reihenfolge ist chronologisch nach dem ersten Betriebsjahr aufgebaut. Zunächst werden die Anlagen mit den Hauptanlagentypen

⁸ Der Energy Recovery Linac nutzt die Energie der Elektronen, welche im Speicherring zirkulieren [52]. Die Elektronen werden abgebremst, anstatt beschleunigt und daraus die Energie gewonnen.

des Synchrotrons beschrieben, danach die der Linacs und zum Schluss das Rechenzentrum HPC.

Mit den Anlagenbetreibern der GSI konnte ein persönliches Treffen stattfinden. Dadurch können Mehrinformationen, gegenüber anderen Anlagen in diese Studie einfließen. Bei der GSI, die in Darmstadt installiert ist, sind etwa 1.350 Mitarbeiter beschäftigt und es kommen jährlich etwa 1.000 Wissenschaftler für die Experimente hinzu [53]. Mit dem ersten Betrieb in 1975 ist sie die älteste unter den betrachteten Teilchenbeschleunigeranlagen. Die wichtigsten installierten Großgeräte sind: Schwerionensynchrotron SIS, Linearbeschleuniger UNILAC, Experimentierspeicherring ESR und Fragmentseparator FRS. Der genaue, aktuelle Aufbau der Gesamtanlage ist Anhang 5 zu entnehmen. Für die Energieeffizienz ist nennenswert, dass das UNILAC, in Relation zu anderen GSI-Anlagen, eine energieintensive Apparatur ist. Das verdeutlicht sich im Verhältnis von etwa 70 Prozent Stromverbrauch zu 30 Prozent wissenschaftlichem Output [3]. Für diese Anlage lässt sich die Effizienz kaum steigern, was mitunter am Alter dieser liegt. Derzeit ist eine neue Beschleunigeranlage, namens Facility of Antiproton and Ion Research (FAIR) mit Unterstützung von insgesamt 16 internationalen Partnern in Bau. Diese wird einen Doppelring-Beschleuniger von 1100 Metern Umfang beherbergen. Der erweiterte Aufbau ist Anhang 6 zu entnehmen. Dabei erhöht der Parallelbetrieb von bis zu vier Forschungsprogrammen die Effizienz. Für die Anlage wird ein Anschluss für die Pulsleistung bereitgestellt, welche für den Betrieb des alten und des neuen SIS benötigt wird [36]. Ein Paradebeispiel von effizientem IT-Einsatz des Kapitels 2.6 ist der bei der GSI vor kurzem installierte „Green Cube“. Dies ist ein umweltfreundliches Höchstleistungsrechenzentrum, das durch eine spezielle Technologie, bei der mit Wasser anstatt mit Luft gekühlt wird. Damit kann eine erhebliche Kostenreduzierung bei hohen Leistungen, im Vergleich zu herkömmlichen Rechenzentren erreicht werden. Der „Green Cube“ kann eine Reduzierung der elektrischen Kühlleistung von 90 Prozent, gegenüber normalen Rechnern erzielen [54]. Zudem ergibt sich durch weitere Neubauten, wie eines Bürogebäudes, eine erhöhte Energieeffizienz. In diesem Fall konnte eine Effizienzerhöhung, gegenüber den älteren Gebäuden durch Versorgung mit einer Erdwärmepumpe erzielt werden [3]. Der Einsatz neuartiger Technologien macht sich somit bemerkbar.

ISIS ist eine nahe Oxford, UK installierte Forschungseinrichtung mit den Schwerpunkten der Energie, Umwelt, Pharmazie, Gesundheit, bis hin zu Nanotechnologie und Material Science [55]. Der Aufbau dieser liegt Anhang 7 vor. Den Kern der Anlage bildet ein Synchrotron, worin ein Linac und Speicherring integriert sind. Die ISIS-Betreiber haben,

neben dem ausgefüllten Fragebogen, Zusatzinformationen verschickt. Diese Informationen fließen in die nächsten beiden Kapiteln 5 und 6 der Ergebnisse ein.

Die Anlage ELETTRA ist installiert in Trieste, Italien. Die Gesamtanlage besteht aus zwei großen Teilanlagen, aus einem Synchrotron und einem Linac [56]. Der Aufbau des elektrischen Netzes liegt Anhang 8 vor. Die Schwerpunkte der Forschung sind Material, Biomaterial Science, Plasma-, Nanophysik, Chemie, Life Science und Umwelt [57]. Diese Anlage weist als einzige eine Photovoltaik-Anlageinstallation auf. Das Ziel der maximalen Energieeinsparung ist festgehalten, was bei solchen wissenschaftlichen Anlagen nicht selbstverständlich ist [57].

Das ESRF, installiert in Grenoble, France besteht hauptsächlich aus einem Synchrotron. Ein Linac ist, ähnlich wie bei den vorherigen Anlagen, ebenfalls installiert. ESRF ist seit 1998 in Betrieb. Es arbeiten 600 feste Mitarbeiter, plus in etwa 7000 jährlich rotierende Wissenschaftler an der Anlage [58].

Am KIT finden an zwei Standorten Beschleunigeraktivitäten statt [59]. Hier befassen sich Wissenschaftler allgemein mit den Themen Materie, Material und Technologie. Der Hauptanlagentyp ist ein Synchrotron. Die Anlage wurde 2000 in Betrieb genommen.

Am Paul-Scherrer-Institut (PSI) in Villigen, Schweiz befassen sich Wissenschaftler mit den Forschungsschwerpunkten Material, Energy, Environment, Life und Health Science [60]. Dort sind 1900 Mitarbeiter, neben 2200 jährlich wechselnden Wissenschaftlern beschäftigt. Der erste Betrieb fand im Jahre 2001 statt. Zu den Großgeräten des PSI gehören vor allem die Swiss Light Source (SLS), ein Synchrotron. Bei der PSI wurde nach [61] in 2012 ein Energie-Monitoring durchgeführt, wodurch identifiziert werden soll wie sich der Energiebedarf bei unterschiedlichem Betrieb unterscheidet. Dies kann als ein positiver Schritt in Richtung energieeffizienter Großanlage gesehen werden.

Die Anlage SOLEIL besteht hauptsächlich aus einem Synchrotron, neben einem Linac und Speicherring und ist installiert in der Nähe von Paris, France. Die Anzahl der festen Mitarbeiter beläuft sich auf 400 [58].

Die Anlage DESY in Hamburg hat einen Speicherring und einen Linac installiert. Mit dem ersten Betriebsjahr in 2009, ist sie einer der neuesten Synchrotrons im Vergleich. Sie beherbergt im Jahr 2015, in etwa 2300 Mitarbeiter und 3000 Gastforscher jährlich [62]. Bei dieser Anlage werden drei hybride Kühltürme eingesetzt, mit einer Gesamtleistung von 5,4 MW [63]. Der Wasserkonsum der Türme kann auf 75 Prozent herabgesetzt werden. Zudem kann die Dampfbildung vollständig vermieden werden. Aus Effizienzgründen wird der

Wasserkreislauf ohne eine zusätzliche Anti-Frost-Einrichtung verwendet – Dies wird durch Abwässern automatisiert.

Das neueste Synchrotron ALBA ist seit dem Jahre 2010 in Betrieb und ist in Spanien, nahe Barcelona installiert. Der Schematische Aufbau der Anlage kann in Anhang 9 eingesehen werden. Von den Betreibern werden genaue Angaben zum jährlichen Energiekonsum gemacht. Der Anteil der Energiekosten beläuft sich auf 23 Prozent der gesamten laufenden Kosten [64]. Der Energieanteil für elektrische Energie am Gesamtenergieverbrauch liegt bei 53 Prozent. Dieser macht mit 77 Prozent den größten Teil der Energiekosten aus. Es wird von den Betreibern angemerkt, dass es hierbei Potential zur Verbesserung gibt. 2013 wurde hierfür bereits eine Energieeffizienzoptimierung durchgeführt, wie ein Upgrade der Kühlungsanlage.

Das ORNL besteht hauptsächlich aus einem Linac und einem Speicherring und ist installiert in Oak Ridge, USA. Sie beherbergt jährlich mehr als 3200 Wissenschaftler [65]. Die Wissenschaftsschwerpunkte der Anlage sind die Biotechnologie, Chemie und Engineering-Materialien, Nanotechnologie, komplexe Fluide.

RIKEN ist ein wissenschaftliches Institut, mit einem installierten Linac und Synchrotron, gelegen in Tokio, Japan. Die Betreiber konzentrieren sich in erster Linie auf die Medizin, Life Science. Installiert ist zudem Japans leistungsfähigster Supercomputer [66].

Durch die Größe der Anlage CERN, installiert in Genf, Schweiz wird nur der Anlagenteil des LHC, eines Linacs detailliert betrachtet. Das LHC ist derzeit die neueste Anlage, unter den betrachteten Linacs. Das schematische Netz liegt Anhang 10 vor. Das wissenschaftliche Ziel ist die Entdeckung von bisher unbekanntem Elementarteilchen und Materialzuständen [67]. Durch die kürzliche Inbetriebnahme bilden die gegebenen Angaben nicht die zukünftigen realen Verhältnisse ab, denn die gegebenen beinhalten nur den schrittweisen Start [68]. Bei dieser Anlage ist das „Waste Heat“ heute bereits ein Thema [3]. Hierbei soll in Zukunft die Abwärme der Detektoren verwendet werden [67].

ESS ist eine Anlage, die von Beginn an nach dem Thema „Green Machine“ entwickelt wurde [37]. Dadurch wird sie politisch stark forciert [3]. Der Forschungsschwerpunkt liegt auf dem Material- und dem Life-Science. Der Hauptanlagenpunkt ist ein Linac. Bei der Anlage hat man sich das Ziel gesetzt: „(...) Responsible, Renewable, Recyclable and Reliable (...)“ [37, S. 7], zu sein. Ähnlich, wie bei der Anlage CERN, ist die Nutzung von Waste Heat geplant. Im Linac bleiben Zweidrittel der Energie ungenutzt. Diese äußert sich hauptsächlich in Wärme. Der zweitgrößte Abwärmeerzeuger, ist die Kryoplanze. Die Anlage soll an das örtliche Wärmenetz

angeschlossen und somit Abwärme genutzt werden. Es soll ein Windpark entstehen mit einer Gesamtleistung von 100 MW. Daneben werden Photovoltaik und Biomasse-Anlagen installiert. Die Anwendung von Energiemanagementsystemen nach Unterkapitel 2.3 wird ebenfalls wahrgenommen. Für ESS sind die Angaben zunächst nur Annahmen, beziehungsweise Schätzwerte, da die Anlage voraussichtlich erst in 2019 in Betrieb gehen wird.

Das Hessische Kompetenzzentrum für Hochleistungsrechnen (HPC) ist ein Verbund an Hochleistungsrechnern der Universitäten Darmstadt, Frankfurt, sowie an Standortrechnern der Universitäten Gießen, Kassel, Marburg [69]. Das HPC ermöglicht parallele Codes zu erzeugen, sie weiterzuentwickeln und effizient einzusetzen. Dies ist die einzige Anlagenart, außerhalb der von Teilchenbeschleunigeranlagen. Die Betrachtung dieser ist aus folgendem Grund gewählt worden. Teilchenbeschleunigeranlagen erzeugen eine große Vielzahl an Daten und bedürfen deshalb stets einer sehr guten IT-Infrastruktur – Sie sind ein wichtiger Faktor der elektrischen Energieeffizienz. Durch die Analyse lässt sich ein Anteil der elektrischen Energie detaillierter betrachten, als dass es durch die ausschließliche Befragung von Teilchenbeschleunigeranlagenbetreibern möglich wäre. Es lassen sich mögliche Schwierigkeiten und Chancen dieses Anlagenteiles für Teilchenbeschleunigeranlagen untersuchen. Durch die Verhältnisbildung aus Standby- und Betriebszeit lässt sich erkennen, dass ein Rechenzentrum durchgängig betrieben wird. Im Verhältnis zu der Leistung mit dem Rechenzentrum beispielsweise von CERN, ist dieses nur zu einem Bruchteil so groß. Das Rechenzentrum von CERN hat einen jährlichen, elektrischen Energieverbrauch von 31 GWh und HPC nur 3,3 GWh. Bei der GSI liegt der Anteil des IT-Verbrauchs nach [61] bei etwa zehn Prozent, bei CERN fünf Prozent. Das Effizienzpotential ist jedoch, gegeben durch die schnelle Entwicklung der letzten Jahre im IT-Bereich, hoch. Eine detaillierte Betrachtung eines Rechenzentrums wird durch die Daten des HPC ermöglicht und für diese Studie als sinnvoll erachtet.

5 Analyse von Energieeffizienzpotentialen

In diesem Kapitel werden die für die Energieeffizienz wichtigsten Informationen aus der Auswertung der Fragebögen dargestellt. Zur Verifizierung der Daten werden Angaben miteinander verglichen. Zunächst wird der wichtige Faktor für die Gesamtkosten, der Strompreis analysiert. Danach folgen Kennzahlen der Anlagen, wie die Leistung, der Energieverbrauch, die Betriebszeiten etc.. Im darauffolgenden Kapitel werden schließlich gegebene Lastgangkurven analysiert und daraus Rückschlüsse für die Energieeffizienz gebildet.

5.1 Aufteilung der Strompreise

Um Effizienzpotentiale zu ermitteln, müssen die Anlagen auf die gleiche Strompreisbasis gebracht werden, unabhängig von den jeweiligen Landespreisen. Dafür werden die Strompreise im europäischen Vergleich genau untersucht. Die Aufteilung der Strompreise erfolgt nach Kosten für Energie, nach Steuern und Abgaben und nach Kosten für den Transport, beziehungsweise das Netz [70]. Hierbei werden die Aufteilungen für die Industrie betrachtet.

Eine grafische Darstellung zu den berechneten Aufteilungen ist Abbildung 6 zu entnehmen. Die Betreiber der Beschleunigeranlage ESRF haben ihre Aufteilung angegeben. Diese wird als Referenzwert für Beschleunigeranlagen genommen und auf die Aufteilungen der einzelnen Länder bezogen. Nach dem Vergleich mit diesem Referenzwert wird der Anteil für die Energiekosten an sich erhöht. Diese Annahme erscheint als sinnvoll, da der Bezug von elektrischer Energie für solch große Abnehmer zu vergünstigten Konditionen erfolgt und dieser Anteil daher steigt.

So ist zunächst zu erkennen, dass die deutsche Industrie im europäischen Vergleich am schwersten mit Steuern und Abgaben belastet wird. Diese liegen beispielsweise mit 31 Prozent in Deutschland, gefolgt mit 30 Prozent in Italien, am höchsten. In der Schweiz ist der Anteil der Kosten für den Energietransport am größten. Diese Anteile lassen sich zumeist nicht durch den einzelnen Anlagenbetreiber nicht beeinflussen.

Die Betrachtung des Preisanteils kann zusätzlich dazu genutzt werden, die Angaben der BA-Betreiber zu validieren. Eine Auffälligkeit konnte bei der Anlage PSI bemerkt werden. Die nachfolgende Vergleichsrechnung in Unterkapitel 5.2 und Kapitel 6 bestätigt diese These. So wurden die Angaben, der Annahme nach der Frage im Fragebogen (Part 3: 4.) ohne Steuern,

Abgaben und Kosten für Transport gemacht. Es fehlen rund 40 Prozent der Kosten. Verwendet man die bestimmte Verhältnisbildung, ergeben sich angepasst Kosten von rund 16 Millionen €.

Distribution of costs for electric energy for accelerator facilities in European countries

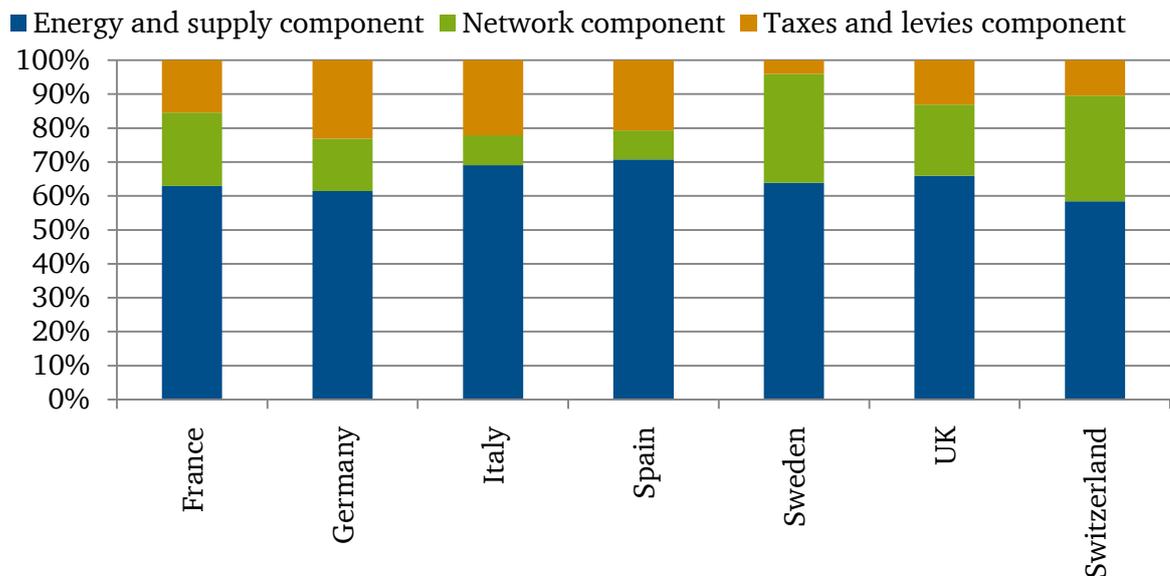


Abbildung 6: Verhältnisse der Preiskomponenten für elektrische Energie in europäischen Ländern.

In Deutschland beispielsweise ist der Preis für elektrische Energie um ein Drittel teurer als in Frankreich. So müssen dort für SOLEIL im Gegenzug zur GSI, bei halber installierter Leistung, in etwa nur ein Drittel der Stromkosten aufgebracht werden. Der niedrigere Strompreis ist jedoch nicht das einzige Element im Unterschied beim Vergleich der Anlagen. SOLEIL ist mit dem ersten Betrieb im Jahre 2006, rund 30 Jahre jünger als die GSI. Dies ist, trotz regelmäßigen Erneuerungsmaßnahmen ein bedeutsamer Effizienzfaktor. Somit gilt es im Folgenden weitere Faktoren der Energieeffizienz, neben dem Strompreis, zu identifizieren.

5.2 Gegebene und bestimmte Leistung

Die ausgefüllten Fragebögen enthalten gewisse Lücken. Um diese zu schließen und die Daten zu validieren, wird ein Weg verwendet, mit dem man die Leistung berechnen kann. Im folgenden Diagramm der Abbildung 7 sind sämtliche angegebenen Leistungen zu P_{av} in der normalen Betriebszeit nach Frage 3.2 enthalten (grüne Balken).

Mithilfe der Formel 4 ergibt sich ein Weg für die Berechnung der durchschnittlichen Leistung. Hierzu werden die Angaben zu den Gesamtkosten für elektrische Energie verwendet. Hinzu kommen die jeweiligen Preise pro kWh.

$$P_{\text{average}} = \frac{C_{\text{annual}}}{c_{\text{kWh}} \cdot 8760h} \quad (4)$$

mit C_{annual} : Kosten für elektrische Energie in €/a

c_{kWh} : Preis für elektrische Energie in €/kWh

In Abbildung 7 ergibt sich, dass die Angaben, außer beim PSI, relativ gering unterscheiden. Mithilfe der Validierung kann festgestellt werden, dass sämtlich eingebrachte Variablen zu einander passen. Desweiteren können die durch die Formeln berechneten Leistungen, auch bei Anlagen ohne Leistungsangabe, für die weitere Betrachtung verwendet werden. So werden etwa die Leistungen von ISIS und ALBA nachträglich eingetragen.

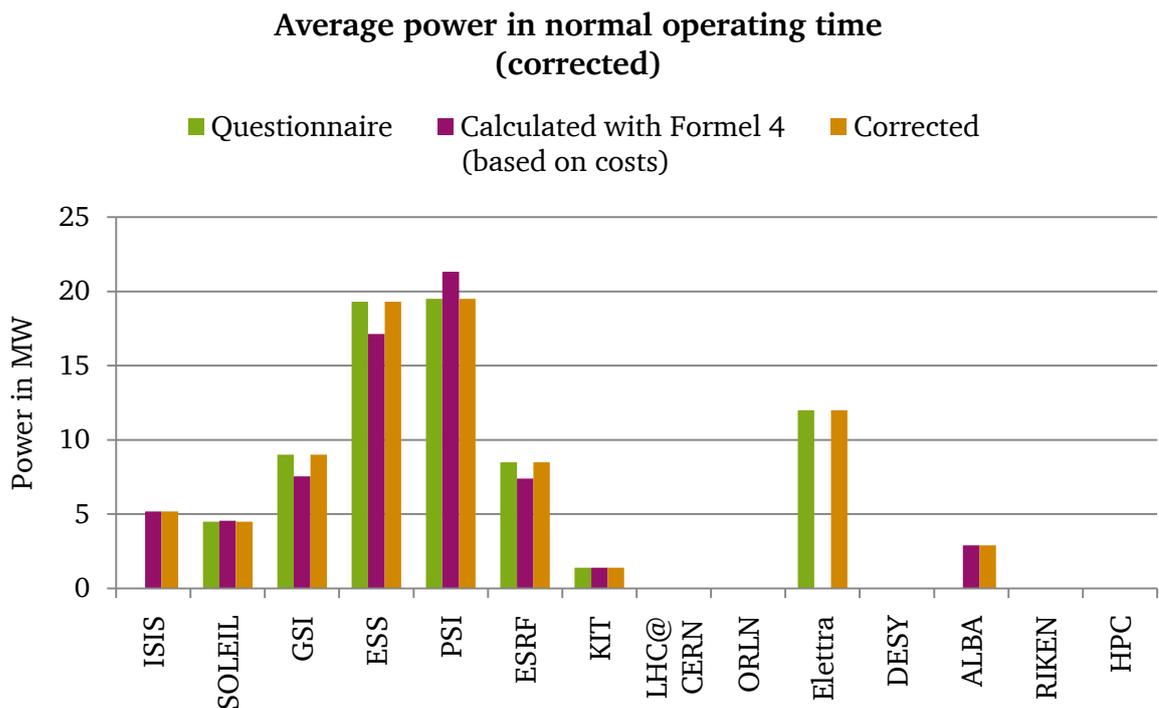


Abbildung 7: Berechnete und gegebene Leistungen.

Zudem sind in Abbildung 8 sämtliche angegebenen und errechneten Leistungen, also P_{peak} , P_{average} und P_{base} enthalten.

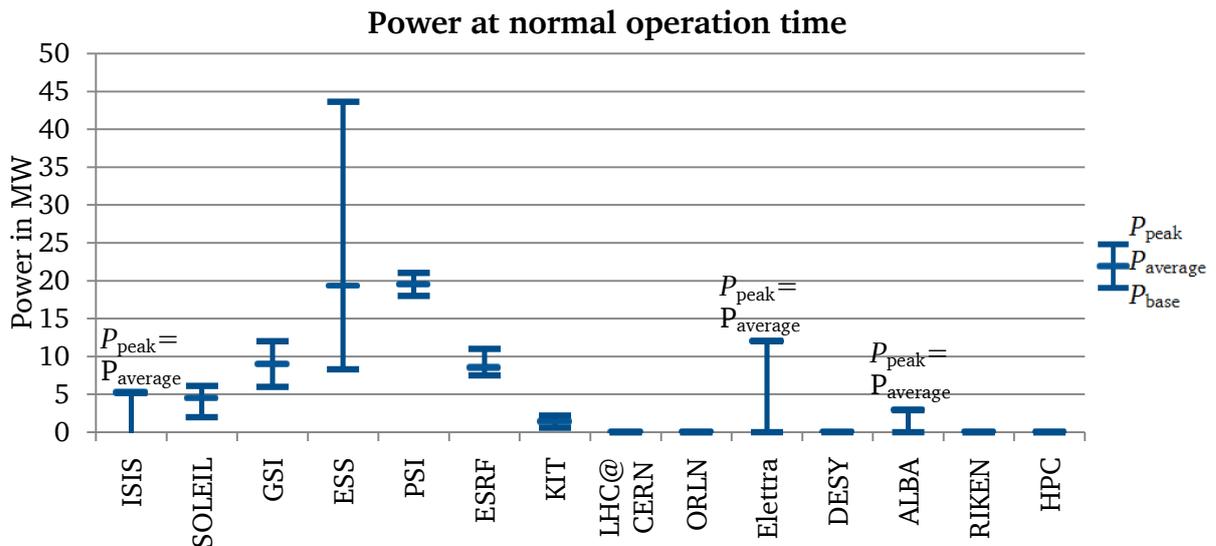


Abbildung 8: Sämtliche Leistungsangaben.

Die Größenordnung der Anlagen wird in diesem Diagramm angedeutet. Die Anlagen GSI, SOLEIL, ESRF, ISIS und ELETTRA lassen sich nach dem Kriterium der Leistung gut miteinander vergleichen. Diese haben zudem ein Synchrotron als Hauptanlagentyp. Die beiden Anlagen ESS und PSI liegen ebenfalls in derselben Größenordnung. Der Anlagenbetreiber des ISIS weist ausdrücklich daraufhin, dass es bei ihm keinen Unterschied gibt zwischen dem Peak-Wert und dem Mittelwert der Leistung im Maschinenbetrieb. Anhand der großen Leistungen der Anlagen ESS und PSI, sind dort höhere, absolute Energiesenkungen durch Abschaltung wesentlicher Verbraucher möglich, als beispielsweise bei der Anlage SOLEIL mit anderen Größenordnungen. Es ist ein großer Unterschied, ob eine Anlage, wie ESS mit 289 GWh im Jahr für eine Urlaubszeit abgeschaltet wird oder eine Anlage, wie KIT mit 10,85 GWh. Daraus ergibt sich eine Differenz von rund elf GWh, die bei einer zweiwöchigen Abschaltung bei ESS mehr eingespart werden, als bei KIT. Die Größe der neuen Anlagen und der damit höhere Energieverbrauch ist ein wesentlicher Faktor für die zunehmende Rolle von Energieeffizienz bei Beschleunigeranlagen.

5.3 Betriebszeiten

Im Fragebogen wurde nach den Betriebszeiten gefragt (2.2-2.6). Die Betrachtung dieser ist wichtig, da eine hohe Auslastung der Anlagen zumeist zu einer höheren Effizienz führt. Ähnlich, wie bei der Leistung, kann die Betriebszeit zusätzlich, mithilfe von weiteren Angaben verifiziert werden. Diese sind der gesamte Energieverbrauch E_{annual} (2.7-2.12) und die

Betriebsspitzenleistung P_{peakop} (Frage 3.2). Formel 5 enthält die Berechnung der jährlichen, sogenannten Nutzungsdauer nach [20]. Die Berechnung dieser liegt den Grundlagen in Unterkapitel 2.3 vor.

$$T_{\text{annual}} = \frac{E_{\text{annual}}}{P_{\text{peakop}}} \quad (5)$$

mit T_{annual} : Jährliche Betriebszeit in h

P_{peakop} : Spitzenleistung zur normalen Betriebszeit in MW

E_{annual} : Jährlicher Energieverbrauch in MWh

Die berechneten Betriebszeiten, oder Nutzungsdauern der Abbildung 9 kommen, außer beim PSI, nahe an die angegebenen Betriebszeiten. Die Betriebszeit von CERN wird, wie in Kapitel 0 beschrieben, durch einen in 2014 nur stufenweisen Betrieb der neuen Anlage begrenzt. Die beiden Anlagen SOLEIL und ESRF sind die mit Abstand am weitesten ausgelasteten Anlagen. Dies macht sich, zumindest für ESRF, auch bei der Effizienz nach dem kommenden Unterkapitel 5.7 bemerkbar.

Operating times of accelerators

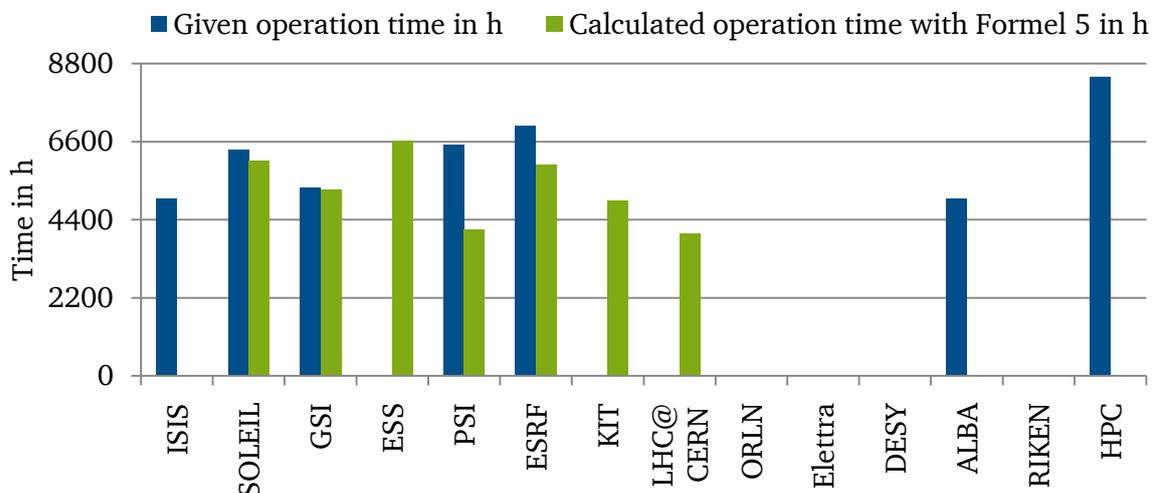


Abbildung 9: Gegebenen und berechnete Nutzungsdauern nach Formel 5 in h.

Das HPC, als einzige Nichtbeschleunigeranlage, ist nahezu durchgehend das ganze Jahr über in Betrieb. Es ist davon auszugehen, dass dies ebenfalls auf die zentralen Server der Teilchenbeschleunigeranlagen zutrifft.

Mithilfe dieser Angabe der Nutzungsdauer können Energieversorger ihre Kunden nach Grund-, Mittel-, und Spitzenlastkunden klassifizieren. Die Schritte der Klassifizierung sind

ebenfalls in Unterkapitel 2.3 enthalten. Fast alle betrachteten Anlagen, außer mit dem berechneten Wert des PSI, weisen eine Nutzungsdauer von mindestens 5.000 Stunden auf. Damit werden die Anlagen bei den EVUs als Grundlastkunden eingestuft und die Anlagenbetreiber können mit positiven Vertragskonditionen rechnen, wie einem verminderten kWh-Preis. Sie sind für die EVUs besonders rentabel, da sie mit einer über das Jahr hinweg dauerhaften Abnahme von erzeugter elektrischer Energie rechnen können. Damit ist eine gewisse Prognosesicherheit gewährleistet. In der heutigen Zeit der erneuerbaren Energien, ist dies bei der großen Fluktuation für EVUs von großer Bedeutung. Dieser fließt bei der Berechnung mit einem Abzug von zwei Cent pro kWh vom durchschnittlichen Industriepreis in Unterkapitel 5.1 ein. Wird zusätzlich zu dieser hohen Betriebszeit, der Verbrauch gesenkt werden, lässt sich die Effizienz erheblich steigern.

Jedoch besteht nach der Betrachtung der Zeiten für einzelne Anlagen die Gefahr, dass die Ausnutzung größtenteils nur bestimmten Arealen des Anlagenkomplexes stattfindet. Bei der GSI beispielsweise beträgt die Betriebsdauer nach Abbildung 10 des SIS18 (Facility 2) weniger als 4.000 Stunden und die des ESR und FRS (Facility 3) gar weniger als 2.000 Stunden. Bei der ESR liegt zumindest daran, dass sie nur teilweise für den Betrieb Energie benötigt. Das Speichern an sich findet parallel, über die Betriebsdauer hinaus statt [3]. Erwähnenswert ist, dass bereits heute bei der GSI ein Parallelbetrieb stattfindet. Mit der Neuinstallation der FAIR wird dies weiter intensiviert, was voraussichtlich zu einer Effizienzsteigerung führen wird.

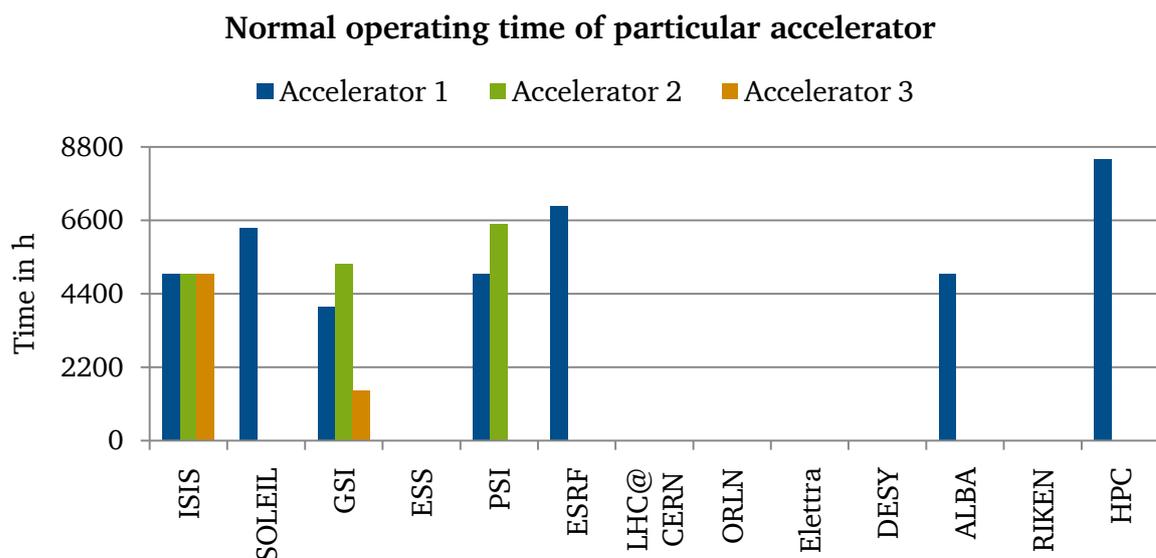


Abbildung 10: Normale Betriebszeit nach Beschleuniger in h.

Wenige der Betreiber haben Angaben zur Vorbereitungszeit nach Abbildung 11 gemacht. Hierzu lässt sich festhalten, dass es für die GSI und PSI wenig Verbesserungspotential gibt. Die Vorbereitung ist bereits effizient gestaltet. Daraus lässt sich schließen, dass der Normalbetrieb kaum von einer Vorbereitung abhängig ist. Diese liegen beide unter acht Prozent im Vergleich zur Betriebszeit, was im Vergleich zur ISIS oder ESRF nach Abbildung 11 ein geringer Wert ist. Bei einem Rechenzentrum nach HPC bedarf es einer gewissen Vorbereitungszeit Nutzeraccounts anzulegen oder diese zu verlängern. Die Vorbereitungszeit ist hier vernachlässigbar.

Relationship of preparation time to normal operation time

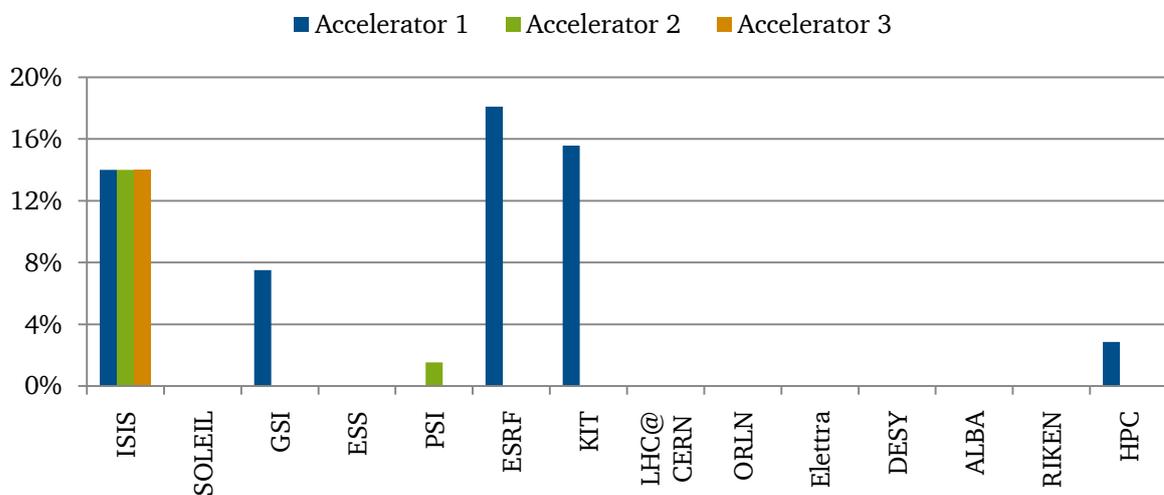


Abbildung 11: Anteil der Vorbereitungszeit an der Betriebszeit.

Die Fragen zu Blackouts zum externen Netz, nach Frage 4.6 des Fragebogens, sind sehr homogen beantwortet worden. Kein Betreiber hat, laut den Antworten, längere Blackouts als eine Stunde erfahren. Die Betreiber der ISIS haben Erfahrung in partiellen Stromausfällen. Diese liegen in einer Zeitspanne von einer Sekunde. Fallen dadurch Geräte aus, dauert es acht Stunden bis zum Wiedereinschalten [71]. Ansonsten ergaben sich keine Angaben zu Einschaltzeiten der Notfallversorgung nach Frage 6.4. Einerseits scheint eine Notstromversorgung bei den Anlagen kein wichtiges Thema zu sein oder es kann die Angabe zu dieser von den Betreibern zu betriebskritisch gesehen worden sein. Ein weiteres Nachverfolgen, außerhalb dieser Studie wird als sinnvoll erachtet, um mögliche Probleme der Anlagen oder des Netzes zu identifizieren. Grundsätzlich kann man von einer Möglichkeit der Übertragung der Angabe der ISIS auf die anderen Anlagen ausgehen, dass die Anlage den kompletten Ausschaltvorgang über noch etwa drei Quartale Energie konsumiert. Ein komplettes Herunterfahren der Anlage wird jedoch nicht gefördert: “During most shutdowns,

most of the ancillary plant systems (e.g. cooling-water circulation systems) are kept running. This, together with maintenance/testing work on powered-up systems, means that the electrical power consumed by ISIS does not fall to zero, but on average to ~20–25% of the full-operation power.”, (ISIS Fragebogen: 5.10). Auch bei der GSI wurden in der Vergangenheit gewisse Anlagen ausgeschaltet. Dies wirkte sich jedoch offensichtlich zu sehr auf den Strahlungsbetrieb aus, sodass von einem weiteren Ausschalten abgesehen wurde. Ähnlich ist die Erfahrung bei der Anlage der ISIS. Einige Leistungsreduzierungen wurden durchgeführt, wie das Herunterfahren der Protonenstrahlmagnete für eine gewisse Zeit. Jedoch erwies sich das Herunter- und Hochfahren als Problem mit den älteren Anlagen [71]. Und so wurde dieser Versuch der Einsparung ebenfalls unterbunden.

Die GSI-Betreiber sehen es als sinnvoll an die Kühlungsanlage, die eine Leistung von 1,4 MVA (7.4) und mit 8500 Stunden Betriebszeit nahezu das gesamte Jahr über durchgängig in Betrieb ist, Versuche zu unternehmen die Betriebszeit zu reduzieren. Dies wurde nach (2a) bereits versucht, was jedoch dazu führte, dass Betriebsstörungen auftraten. Eine andere Möglichkeit wäre es die Leistung während dieser Betriebszeit zu reduzieren, um eine Energiesparmaßnahme zu ermöglichen. Eine detaillierte Nachverfolgung dieses Vorfalls ist erstrebenswert.

Einen nachweislichen Shutdown gab es bei ELETTRA in 2014 für 2256 Stunden und bei der GSI in 2011 für etwa 4000 Stunden [3]. Bei der GSI wird die Anlage regelmäßig zu Weihnachten und bei ISIS zwischen August und Weihnachten heruntergefahren nach dem Fragebogen (Part 2b: (8a) 6.2). Ein solcher verhilft, wie eingangs erwähnt, zu einer höheren Effizienz.

Bei der ORLN wurden sämtliche Anlagenkomponenten modernisiert, die zu einem nur unregelmäßigen Betrieb geführt haben. Hierzu gehören Kondensatoren, Verbindungen, Kabeln und das gesamte Kühlungssystem für Luft, Wasser und Öl [72]. Dies ist beispielsweise ein radikaler Schritt, um möglichen Unregelmäßigkeiten zu begegnen.

Nachdem die Betriebszeiten und die Leistung untersucht wurden, folgt nun die Analyse des elektrischen Energieverbrauchs.

5.4 Elektrischer Energieverbrauch

In diesem Unterkapitel folgt die Statistik des Energieverbrauchs der einzelnen Anlagen. Die Angaben nach Anlagenart wurden selten einzeln für jede Anlage gemacht, eher im Ganzen als Anlagenkomplex. Abbildung 12 enthält eine logarithmische Darstellung der Angaben.

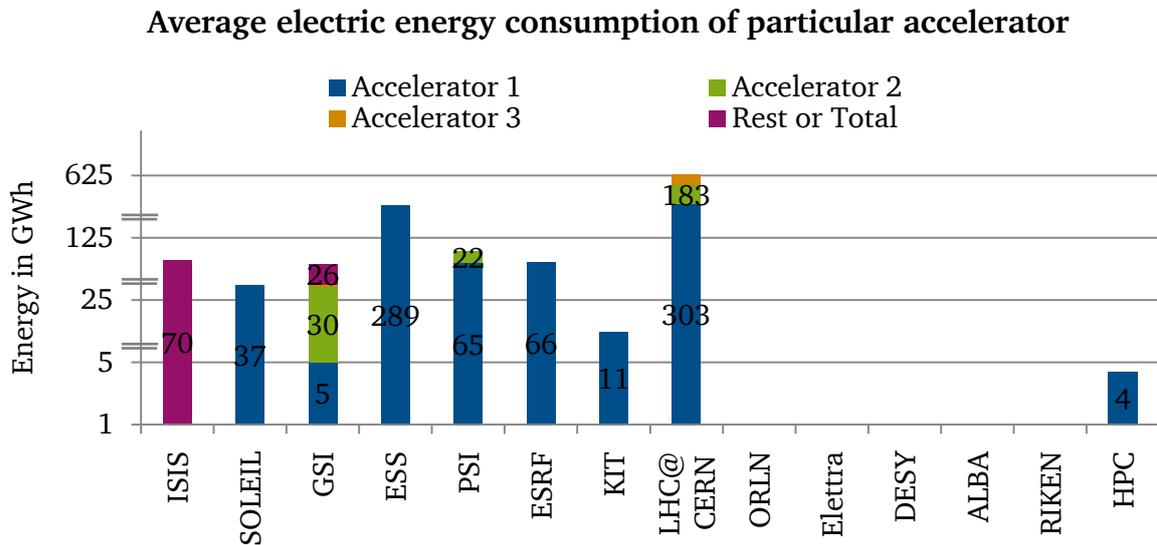


Abbildung 12: Durchschnittlicher elektrischer Energieverbrauch pro Anlage.

So lässt sich bei der GSI und dem PSI ein Effizienzpotential durch die genaue Aufteilung, ermitteln. Die GSI hat ein solches hohes bei der zweiten Anlage, nämlich dem UNILAC. Jedoch ist dies nach [3] nicht weitläufig veränderbar. So bleibt der GSI als Effizienzpotential das Synchrotron und vor allem mit 26 GWh der Verbrauch für den Rest. Jedenfalls ist dies ein Beispiel von spezifischen Anlageneigenschaften, die es gilt bei der weiteren Potentialfindung zu berücksichtigen. Beim Synchrotron gäbe es die Möglichkeit die Versuche mit hohem Energieverbrauch in die Sommermonate, mit tendenziell geringerer Auslastung zu verlegen.

Verteilt man die Gesamtkosten für elektrische Energie auf die angegebenen Werte zum Energieverbrauch nach den Fragen 2.7 bis 2.12, ergeben sich die Aufteilungen der Kosten auf die einzelnen Anlagenbereiche nach Anhang 13.

Im Fragebogen wurde nach dem Konsum während des Betriebes gefragt. Somit kann eine ausführliche Betrachtung des Konsums während des Standby-Betriebes nicht mit einfließen. Anzunehmen ist deshalb eine Steigerung der Kosten für Personal und Gebäude, da diese einen wesentlichen Faktor des Standby-Verbrauchs darstellen. Da in der Rubrik Cooling-System hauptsächlich die Kühlung der Anlagen während der Experimente gemeint ist, wird dieses voraussichtlich nicht weiter steigen.

Die Betrachtung dieser Studie beschränkt sich auf die Verbrauchsdaten. Die Anlagenkomponenten, werden hierfür, wie es bei ESS umschrieben wurde (7.9), als „black boxes“ betrachtet. Eine Erhöhung der einzelnen Komponenten bedarf der genauen Analyse jedes einzelnen Anlagenbetreibers.

Den normalen Betriebszustand betrachtend fällt wie erwartet, der größte elektrische Energiekonsum auf die Beschleuniger an sich zurück. Ihr Anteil weist bei sämtlichen Anlagen mindestens 40 Prozent auf. In Summe sämtlicher Anlagen ergibt sich als zweitgrößter Verbraucher die Kühlung der Anlagen. Der Betrieb bedarf der Funktion von Magneten, die beispielsweise durch Helium bei Temperaturen um die 4,2 K herab gekühlt werden müssen [51]. Erst danach folgen die beiden Verbrauchergruppen: Experimente und Laboratorien, Gebäude und Personal.

Auffällig ist der hohe Energieverbrauch bei der GSI und dem ESRF für Gebäude und Personal. Dieser wird noch größer, bezieht man die Standby-Zeit mit ein, wie im Vorhinein beschrieben. Hier ergibt sich ein relativ großes Effizienzpotential nach Kapitel 2.5. Bei CERN liegt der elektrische Energieverbrauch für das Rechenzentrum bei etwa fünf Prozent am EE-Gesamtverbrauch. Bei der GSI sind es im Vergleich etwa zehn Prozent [61]. Der Prozentsatz der GSI wurde jedoch noch vor der Installation des sogenannten „Green Cubes“ ermittelt. Hier wurde somit bereits ein Effizienzpotential entdeckt. Der Verbrauch der Rechenzentren ist anscheinend stark abhängig von den Nutzeraktivitäten, wie das HPC für die Volatilität beschreibt nach dem Fragebogen (Part 2b: (8a) 6.1a und 6.1b). Dies gilt es ebenfalls, beispielsweise durch Nutzungsprofile, für die Effizienz zu berücksichtigen.

Für die GSI liegt die maximale Leistungsviertelstundenabweichung der gesamten Anlage für das Jahr 2011 nach Anhang 2 vor. Dabei wird eine saisonale Volatilität durch Frage 6.1 des Fragebogens bestätigt. Zur Weihnachtszeit wird die Anlage vollständig abgeschaltet. Hierbei wird nach dem Fragebogen (Part 2b: 6.2) die Anlagenleistung auf 2,5 MW heruntergefahren, was einer Reduzierung von ca. 70 Prozent zum $P_{\text{averageop}}$ im Betrieb entspricht.

Für die vier Anlagenbereiche und vier hierzu vollständig ausgefüllte Fragebögen der Anlagen ergeben sich in der nächsten Darstellung in Abbildung 13 folgende Effizienzpotentiale.

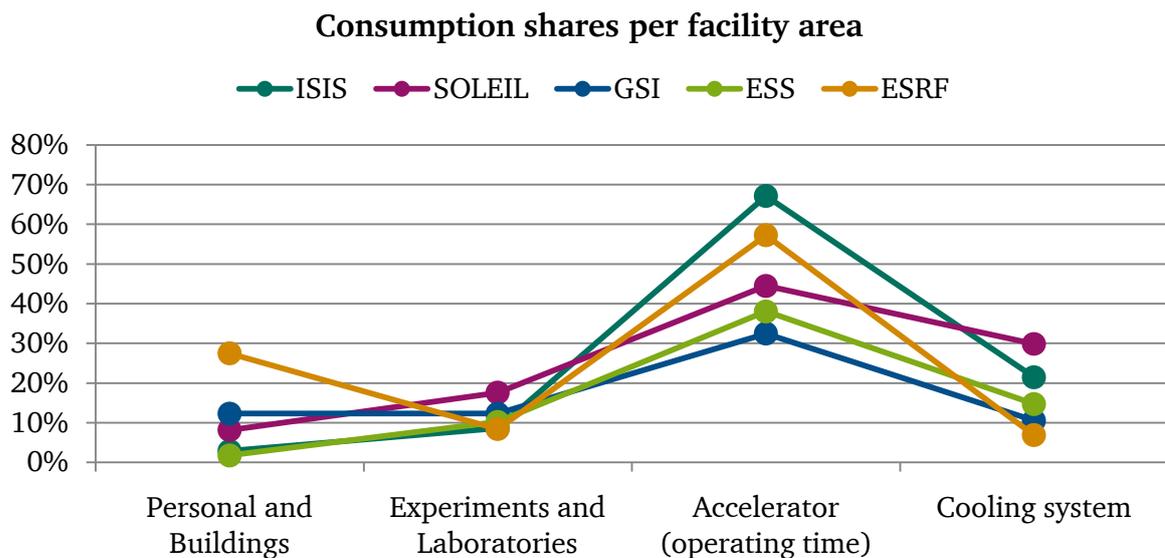


Abbildung 13: Verbrauchsanteile der elektrischen Energie nach Anlagearealen.

Die Anlage ESRF weist vergleichsweise den höchsten Verbrauchsanteil für das Areal Personal und Gebäude auf. Mit einem Abstand von 20 Prozent zur nächsten Anlage, GSI ist dieser besonders große und sollte versucht werden zu senken. Die Anlage SOLEIL hingegen hat eine verbrauchsintensive Kühlung installiert. Hier liegt der Effizienzhebel der Anlage. Positiv hervorzuheben ist die Anlage ISIS, die den höchsten Verbrauch beim Beschleuniger selbst aufweist. Das heißt der Verbrauch wird tatsächlich für Versuche aufgewendet, was positiv zur Effizienz beiträgt.

In Anhang 14 sind zudem sämtliche Anteile des Energieverbrauchs dargestellt. Beispielhaft kann man an den drei Anlagen SOLEIL, GSI und ESS das Jahr des ersten Betriebsstartes, am anteiligen Verbrauch für Personal und Gebäude erkennen. Die Anlage der GSI, die mit Abstand die älteste der Anlagen ist, wurde Mitten in den beiden Ölkrisen zwischen 1973 und 1979 fertiggestellt. Bei der Planung hatte das Thema Energieeffizienz kaum eine Rolle gespielt [3]. Dies wirkt sich auf den Verbrauch von experimentell nicht existenzwichtigen Anlagenteilen aus. Die Anlage SOLEIL, fertiggestellt 2006 hat dagegen bereits eine höhere Gebäude-Effizienz.

Bei der im Bau stehenden „Sustainable Research Facility“ ESS wurde die Effizienz als wichtig angenommen, was sich in der Verbrauchsaufteilung erkennen lässt. Hier ist beispielsweise, wie in Kapitel 0 erläutert, die Nutzung von Abwärme im thermischen Bereich zu erwähnen.

5.5 Transformatoren, Kurzschlussleistung und eigene Energieerzeugung

Die Kurzschlussleistung spielt eine wesentliche Rolle bei der Beanspruchung der Anlage. Die GSI hat nach Abbildung 14 eine im Verhältnis niedrige minimale Kurzschlussleistung. Dies kann zu Störungen durch schnelle Spannungsänderungen, Spannungsasymmetrien oder Oberwellen zu Spannungseinbrüchen führen [28]. Beispielsweise ergaben sich vor einem Update der Leistungstransformatoren bei Leonhartz der GSI Probleme bei den in Darmstadt benachbarten Druckereibetrieben. Wenn die Anlage hochgefahren wurde, sind dort bei der Produktion gelegentlich Zeitungen gerissen [3].

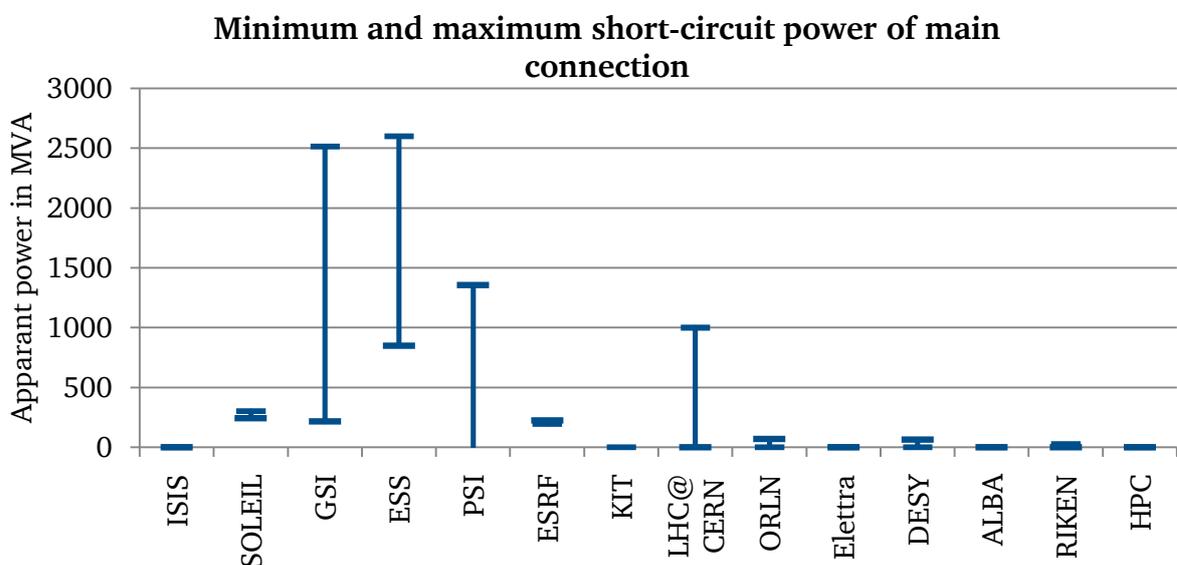


Abbildung 14: Minimale und maximale Kurzschlussleistung des Hauptanschlusses.

Grundsätzlich ist es sinnvoll, wenn Transformatoren in der Nähe von elektrischen Großverbrauchern liegen [10]. CERN hat nach Abbildung 14 einen schwachen Hauptnetzanschluss. Mit dem geplanten Upgrade der Anlage des FCC in 30 Jahren werden bei CERN hohe Installationskosten notwendig. Die geringe Leistung wird dann voraussichtlich nicht mehr ausreichen.

Eine weitere Effizienzsteigerung lässt sich durch die Abwärmenutzung von großen Transformatoren ermöglichen. Um die Leistungsverluste zu vermindern, sollte zur Übertragung eine höhere Spannung gewählt werden. Ein Vergleich der Spannungsebenen als Anschluss zum externen Netz ist Tabelle 5 zu entnehmen.

Tabelle 5: Spannungslevel der Verbindung zum externen Netz.

		Voltage level of connection to external grid in kV						
		20	50	66	100	132	161	220
ISIS					Main			
SOLEIL	Main, Aux							
GSI	Main							Aux
ESS	Main, Aux							
PSI		Main						
ESRF	Main, Aux							
CERN					Main			
ORLN							Main, Aux	
ELETTRA	Main							
DESY								
ALBA								
RIKEN				Main				
HPC								

Bei der aufgelisteten Matrix fällt auf, dass die Anlagen in Zentraleuropa niedrigere Anschlussspannungen aufweisen, als die Anlagen ORLN in der USA oder RIKEN in Japan. Hier sticht nur die Anlage CERN, gegeben durch ihre Größe, heraus. Nach Anhang 15 gibt es bei der GSI einen Anschluss zum externen 220 kV-Netz. Dieser ist im Verhältnis zu den anderen Anlagen ungewöhnlich hoch und dient der Versorgung mit Pulslast. Seine minimale Kurzschlussleistung ist mit 6,5 GVA, bedingt durch die hohe Spannung, deutlich höher als die der Anschlüsse anderer Anlagen. Jedoch ist die minimale Kurzschlussleistung des 20 kV-Hauptanschlusses, nach Abbildung 14 mit 215 MVA im Verhältnis niedrig.

Bei der GSI wurde die Erfahrung mit einer Abschaltung vom externen Netz gemacht. Dabei ergab sich ein Erdfehler durch ein 30 Jahre altes 20kV-Erdkabel. Zudem gab es zweimal einen externen Kurzschluss durch einen internen Fehler. Diese Anlage ist, unter den betrachteten Anlagen mit 40 Jahren, mit Abstand von neun Jahren zur nächsten, die älteste. Das

Durchschnittsalter der anderen Anlagen liegt bei rund elf Jahren. Unter diesen Umständen ist die Wahrscheinlichkeit durch altersbedingte Ausfälle bei der GSI erhöht.

Im Fragebogen wurde nach möglichen Erzeugern gefragt (6.). Diese Frage konnte nach nur von zwei Anlagen bejaht werden.

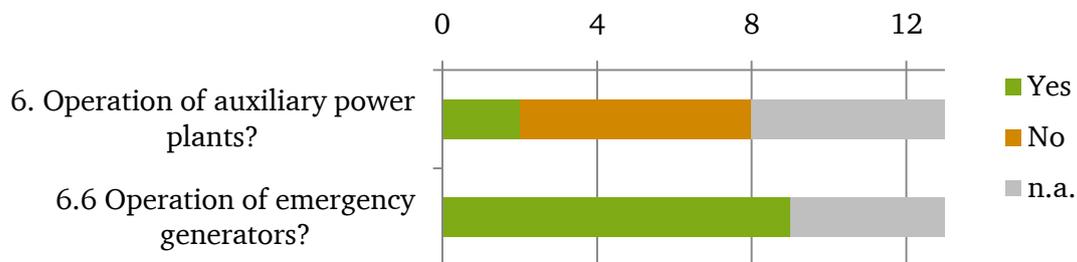


Abbildung 15: Fragen nach eigener Energieversorgung und Notfallgeneratoren.

Sechs der Anlagenzentren verfügen über eigene Dieselgeneratoren, in Verbindung mit einem Generator zur Erzeugung von elektrischer Energie. Diese werden zur Notstromgewinnung betrieben. Hierzu werden beispielsweise bei CERN Spannung und Strom ständig erfasst (6.6). Eine hardwarebasierte Steuerung zum Zu- und Abschalten von Komponenten ist installiert. Die Anlage verfügt über eine Sicherheitseinrichtung, bestehend aus Dieselgeneratoren, die bei einem Kurzschluss innerhalb von 20 bis 30 Sekunden einsatzbereit ist [73]. Als Notstromaggregate ist zum Beispiel UPS für die Rechenzentren bei SOLEIL installiert und eine Batterie beim Rechenzentrum des HPC.

Bei ELETTRA werden Photovoltaik-Anlagen zur Eigenversorgung verwendet. Darauf wurde in Unterkapitel 2.8 eingegangen. Auffällig ist bei ESRF, dass sie keine zusätzlichen Kraftwerke zur Absicherung nutzen. Dieses beeinflusst jedoch offensichtlich nicht die jährliche Ausfallzeit, denn diese ist pro Jahr niedriger als die von anderen Anlagen (4.6). Desweiteren ist eine KWK-Anlage installiert, die für die Wärme, Kühlung und Stromerzeugung zuständig ist [74].

Ein Fernziel bei der GSI ist die Verwirklichung einer Art des virtuellen Kraftwerks [3]. Mit dem Bau von FAIR, können installierte, dezentralen Stromerzeugern zur höheren Energieeffizienz beitragen. Bei der Anlage der ESS werden voraussichtlich KWK-Anlagen auf Basis von Biomasse installiert. Es wird zudem über eine Alternative mit Brennstoffzellen nachgedacht [37]. ISIS hält eine KWK-Anlage für ihren nur unregelmäßigen Betrieb für unrentabel (6.5). Eine genaue Analyse der Anlagegegebenheiten wäre hier sinnvoll.

5.6 Gesamtkosten für elektrische Energie

In diesem Unterkapitel folgt die Betrachtung der Gesamtkosten für elektrische Energie und die Verbindung zu energietechnischen Kennzahlen der Anlagen. Abbildung 16 enthält ein Diagramm zur Betrachtung der Gesamtkosten und der durchschnittlichen Leistung während des Betriebes. Um eine Vergleichbarkeit, unabhängig von den Länderspezifikationen zu ermöglichen, werden sämtliche Angaben vereinheitlicht auf das Land des Auftraggebers dieser Studie, Deutschland mit der GSI. Dies erfolgt indem die Energiepreise in Relation gesetzt werden.

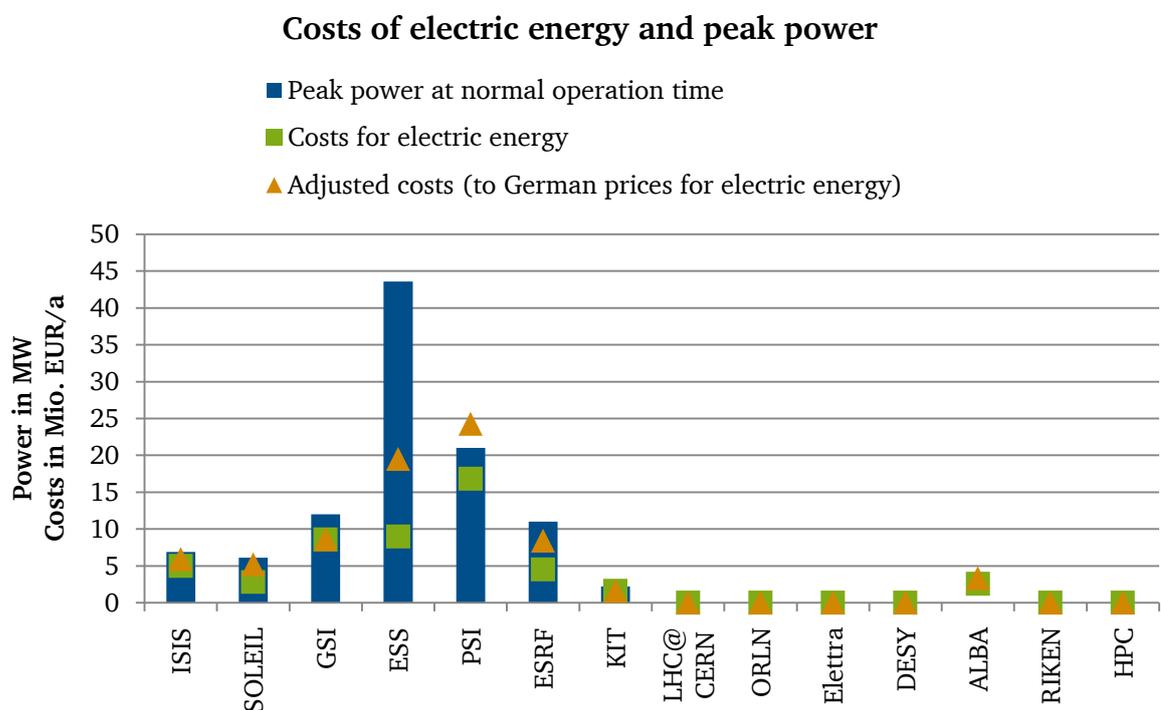


Abbildung 16: Gesamtkosten für elektrische Energie und durchschnittliche Leistung während des Betriebes.

Im Unterkapitel 5.1 wurden die Kosten des PSI berichtigt. Unter dieser Voraussetzung weist das PSI, im Vergleich die höchsten Kosten für elektrische Energie auf. Ein möglicher Fehler der Berechnung sollte nicht ausgeschlossen werden. Gegeben durch die Tatsache, dass PSI und ESS in diesem Diagramm die leistungsstärksten Anlagen sind und ESS in Schweden, mit den günstigsten Strompreisen liegt, erscheint diese erste Platzierung des PSI als realistisch. Die Kosten des PSI sind, nach Vereinheitlichung die höchsten. Das sind die beiden größten Anlagen, für die es genügend Daten für eine Aussage gibt.

Die anderen Anlagen weisen nahezu ein Eins zu Eins-Verhältnis von MW zu Millionen €, nach Vereinheitlichung auf den deutschen Preis auf. Festzuhalten ist, dass mit Erhöhung der Anlagenleistung, dieses Eins zu Eins-Verhältnis nicht gehalten werden kann. Dies ist, in Anbetracht zukünftiger Anlagen, mit immer höheren Leistungen (siehe beispielsweise Anhang 21) und steigenden Energiepreisen hervorzuheben. Die Energieeffizienz spielt somit eine immer wichtigere Rolle. Idealerweise sollte die Effizienz soweit erhöht werden, dass die steigenden Strompreise ausgeglichen werden können, damit die jährlichen Gesamtkosten nicht zunehmen. Nicht zu vernachlässigen sind dabei die Investitionskosten für die Effizienzmaßnahmen.

Werden die Gesamtkosten und die Leistung der Anlage nun in Relation gesetzt, ergibt sich eine im nächsten Unterkapitel entwickelte Darstellung. Damit kann eine Art der Effizienz angegeben werden. Wie effizient kann jede Anlage die verursachten Kosten in Leistung wandeln. Somit werden der Input, mit dem eingesetzten Kapital und Output, mit der erzielten Leistung betrachtet.

5.7 Effizienzmessung

Energieeffizienz kann nach unterschiedlichen Gesichtspunkten untersucht werden. Grundsätzlich ist sie das „Verhältnis oder eine andere quantitative Beziehung zwischen einer erzielten Leistung bzw. einem Ertrag an Dienstleistungen, Gütern oder Energie und der eingesetzten Energie“ [13, S. 8]. Eine Anwendung dieser Definition ist die Verhältnisbildung aus Leistung, die erzielte nach obiger Definition, zu den jährlichen Kosten für elektrische Energie, was die eingesetzte Energie auf Kostenbasis ist. Als Leistung wurde P_{peakop} gewählt. Eine Bedingung für die Anwendung der vorläufigen Definition von Effizienz ist: „Sowohl Einsatz als auch Ertrag müssen quantitativ und qualitativ klar spezifiziert und messbar sein.“ [13, S. 8]. Das Ergebnis, dargestellt im Per-Unit-System, direkt und bezogen auf die kWh-Preise in Deutschland, ist Abbildung 17 zu entnehmen. Die Höhe der blauen Balken stellen dabei die unangepassten und die grünen Balken die an die deutschen Preise angepassten Effizienzgrade dar.

Efficiency of power per total costs

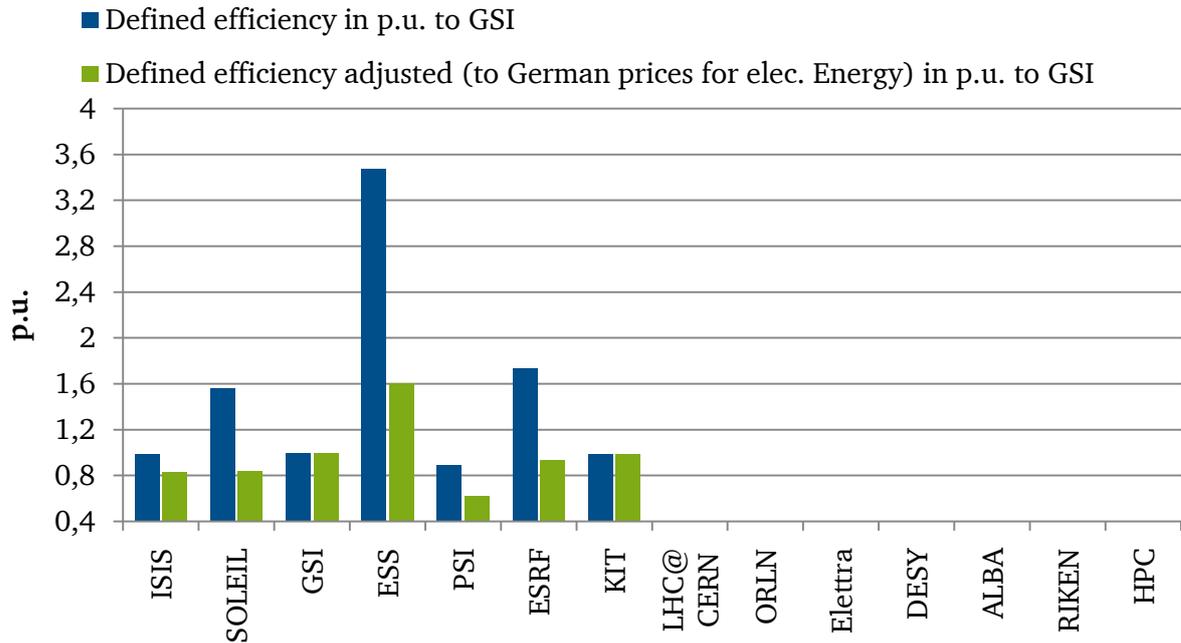


Abbildung 17: Anlageneffizienz mithilfe der Gesamtkosten und Spitzenleistung während des Betriebes.

Die hier definierte Effizienz wird nach Formel 6 berechnet. Je höher die Balken sind, umso größer ist das Verhältnis aus Output, der erzeugten Leistung und dem Input, den dafür eingesetzten Kosten. Bei der Darstellung ist zu beachten, dass keine reine Energieeffizienz betrachtet wird. Es fließen Effekte, wie die Vertragsbedingungen mit dem lokalen Stromlieferanten oder erhobene Netzkosten ein. Diese können maßgeblich zur Veränderung einer solchen Effizienzbildung beitragen.

$$Utilization = \frac{P_{peakop}}{C_{total}} \quad (6)$$

mit *Utilization*: Nutzungsgrad zwischen Input (C_{total}) und Output (P_{avop}) in MW/€

P_{peakop} : Spitzenleistung zur normalen Betriebszeit in MW

C_{total} : Kosten für elektrische Energie in €

Das PSI weist die niedrigste Effizienz auf. Hierbei könnte ein gewisser Fehler bei der Berechnung der Gesamtkosten in Kapitel 5.1 eine Rolle spielen. Die Tendenz sollte jedoch stimmen, denn grundsätzlich ist hier eine berechnete niedrigere Effizienz von großen Anlagen erkennbar. Gegebenenfalls können weitere Hintergründe dieses Ergebnisses, aufgeteilt nach

Beschleunigerart, mit detailliertem Fachwissen dieser weiter untersucht werden. SOLEIL und ESRF haben durch den günstigen Energiepreis in Frankreich den größten Standortvorteil.

Vor und nach Normierung auf die höhere Belastung, durch den im Vergleich höchsten Strompreis in Deutschland, liegt das ESS auf dem Spitzenplatz. So erweist sich diese geplante Anlage als die im Verhältnis effizienteste. Bei ihrer höchsten technologischen Effizienz mit Anlagen, die eigens erzeugten Strom nutzen und teilweise in das öffentliche Netz einspeisen und die Stromrechnung drücken, bemerkbar. Dadurch können die jährlichen Stromkosten nach dem Fragebogen (Part 3: 4.) um etwa 30 bis 45 Prozent gesenkt werden. Unabhängig vom Standort, folgt bereits die GSI (grüne Balken). Dieser kommt ihre kompakte Bauweise zu Gute. Sie bietet eine relativ hohe Leistung für das jährlich eingesetzte Kapital, in Form von Betriebskosten für elektrische Energie. Nach der kleinen Anlage KIT, folgt die ESRF. ESRF zeichnet sich durch eine hohe Leistungsbeständigkeit aus, so formuliert nach [3]: „Wenn sie einmal läuft, dann läuft sie.“

Feststeht, dass wiederum die Größe der Anlage die Effizienz, durch den schnelleren Anstieg der Kosten im Verhältnis zur Leistung, tendenziell negativ beeinflusst. Die voraussichtlich erst 2019 fertiggestellte Anlage ESS gilt hier, vor allem durch ihre Eigenerzeugung nach Unterkapitel 5.5 als Ausnahmeanlage.

Im nächsten Unterkapitel wird ein Überblick über bereits beschriebene, aber auch nicht ausführlich in dieser Arbeit erörterte Kennzahlen geschaffen. Im Kapitel 6 folgen schließlich die gefundenen Effizienzhebel, beispielhaft für drei Anlagen mit gegebenen Lastgangkurven.

5.8 Überblick und eine Gesamtanalyse

Ein übergeordneter Benchmark sämtlicher Anlagen gestaltet sich, bei den individuellen Eigenschaften als schwierig. Große, neue Anlagen, mit hohen Leistungen lassen sich kaum mit kleinen, alten Anlagen vergleichen, vor allem wenn der wissenschaftliche Output im Mittelpunkt steht. Zur Übersicht wird im nächsten Diagramm ein High-Level Benchmark der wichtigsten Kennzahlen dargestellt. Hier liegt bewusst keine Gewichtung der Faktoren vor. Eine nachträgliche Bewertung sollte, durch die Einzigartigkeit der Anlagen, von jedem Anlagenbetreiber individuell durchgeführt werden, um aus den Informationen der durchgeführten Studie bestmögliche Rückschlüsse zu ziehen.

Eingeflossen in das Übersichtsdiagramm in Abbildung 18 sind folgende Faktoren:

1. Peak Power: Je höher die Leistung der Anlage, desto höher ist die Platzierung.
2. Energy for accelerator: Je höher der Anteil des Energieverbrauchs, der für die Beschleuniger verwendet wird, desto effizienter wird die Anlage für die Versuche an sich verwendet.
3. Energy for building: Eine Anlage, die anteilig mit weniger Energie für Gebäude oder Personal auskommt, wird mit einer höheren Platzierung belohnt.
4. Energy for cooling: Dies ist ein sehr versuchsabhängiger Faktor. Eine Anlage mit weniger Energie für das Kühlen, wird ebenfalls mit einer höheren Platzierung belohnt.
5. Energy consumption total: Der Energieverbrauch soll insgesamt reduziert werden. Daher werden Anlagen mit einem geringeren Verbrauch besser bewertet.
6. Efficiency: Dies ist die im vorigen Unterkapitel 5.7 behandelte Effizienz.
7. Operation time: Eine höhere Betriebszeit der Beschleuniger wird angestrebt, was die Effizienz in den meisten Fällen erhöht.

Punkte, die exakt auf der Nulllinie liegen, sind Antworten ohne Angaben. Diese wurden nicht berücksichtigt und fließen nicht in das Gesamtergebnis ein. Sämtliche Faktoren orientieren sich dabei an den Benchmark-Führenden, dieser liegt auf 100 Prozent. Nicht enthalten sind die Anlagen ORLN, ELETTRA, DESY, ALBA, das LHC am CERN und RIKEN. Es liegen nicht genügend Daten bereit. Zudem ist das Rechenzentrum HPC nicht enthalten. Dieses würde die Platzierungen zu sehr verzerren, da es eine Nicht-Beschleunigeranlage ist, damit einen geringen Energieverbrauch aufweist und nahezu durchgängig in Betrieb ist, wie in Unterkapitel 5.3 beschrieben.

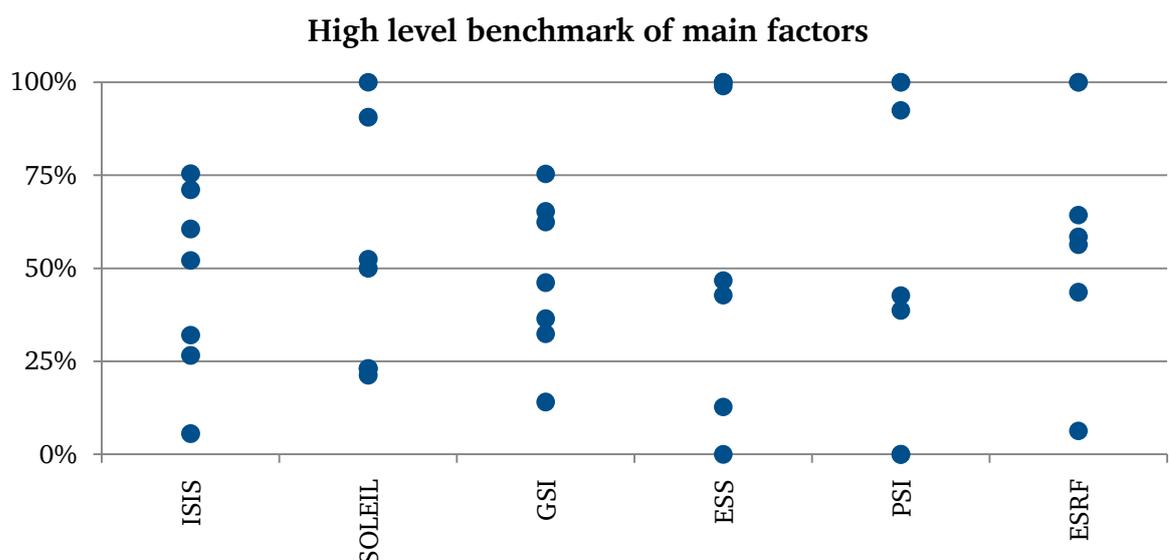


Abbildung 18: High-Level Benchmark zu vorhandenen Daten.

Nimmt man alle Faktoren ohne Gewichtung zusammen, ist die Anlage PSI mit dem höchsten Gesamtwert. Danach folgen ESS, ESRF und SOLEIL. Beim PSI sind die besonders hohe Betriebszeit und die hohe Leistung ausschlaggebend. Der geringe Energieverbrauch, trotz der hohen Leistung trägt zu der hohen Platzierung bei. Das ESS ist bei den Kennzahlen Durchschnittsleistung, Verbrauch für Gebäude und der Effizienz ganz oben. Danach folgt die kleinere Anlage ESRF, die beim Verbrauch für die Beschleuniger an sich und beim niedrigen Verbrauch für das Kühlsystem die besten Platzierungen erreicht.

Den Vergleich schließen die GSI und ISIS ab. Bei der Anlage ISIS spielt die geringe Leistung, bei gleichzeitig hohem Energieverbrauch eine Rolle. Zudem ist die Betriebszeit vergleichsweise niedrig. Bei der GSI sind es vor allem der hohe Energieverbrauch für Gebäude und der Gesamtverbrauch, mitbegründet durch das Alter der Anlage, die die Platzierung drücken.

Das HPC schneidet im Vergleich am besten beim Anteil der Energie für den Accelerator zur Gesamtenergie ab, da es sich hierbei vor allem um eine Einzelanlage handelt. Sie weist im Vergleich den geringsten Verlust auf und liegt beim Zielerreichungsgrad des Energieverbrauchs insgesamt vorne. Bei der Betriebszeit ist sie ebenfalls ganz vorne. Wäre sie im Diagramm enthalten, ergäbe sich eine zu große Verzerrung der anderen Daten. Es kann davon ausgegangen werden, dass die einer Installation eines hocheffizienten Rechenzentrums, den Gesamteffizienzgrad anteilig enorm steigert.

Auffällig sind die Streuungen. Bei der GSI sind die Faktoren mittig gestreut. Das heißt die Anlage hat keine extremen Schwächen, ist jedoch auch mit keinem der Faktoren auffällig effizient. Die Faktoren der Anlage ISIS sind ebenfalls nah gestreut. Bei dieser liegt aber die bereits erwähnte Schwäche, der Energieverbrauch besonders schlechtplatziert. Faktoren der Anlage ESS sind hingegen weit verstreut. Damit zeigt sich, dass es die Größe, bei einer solch effizienten Anlage, technisch nicht zulässt in jeder Hinsicht effizient zu sein.

Als sinnvoll wird angesehen, Gewichtungen einzubringen, wenn Extremen bekannt sind, wie beispielsweise dass bei der ESRF die Versuche wenig Kühlung benötigen. Diese Kennzahl kann, in dem Falle mit einem kleineren Faktor gewichtet werden.

6 Hebel zur Erhöhung der Effizienz

In dem vorherigen Kapitel wurde auf die einzelnen Effizienzpotentiale eingegangen. Nun folgen konkrete Hebel, beispielsweise an sieben Anlagen. Drei davon haben eine Laststundenkurve geliefert. Diese drei Anlagen sind GSI, PSI und ESRF. Hinzu kommen die vier Anlagen: ISIS, ESS, SOLEIL und KIT, für die zwar keine Laststundenkurve vorliegt, die jedoch genügend Informationen, bezüglich der Betriebszeiten und den Leistungen geliefert haben, woraus mit gewissen Annahmen ebenfalls Hebel identifiziert werden können.

Aus den Laststundenverläufen lässt sich eine Häufigkeitsverteilung bilden [20]. Aus dieser lässt sich wiederum erkennen, welche Auswirkungen eine Effizienzsteigerung mit sich bringt. Anhang 16 enthält die ermittelten Häufigkeitsverteilungen der GSI. Der gemittelte Wert aus den Verteilungen der Jahre 2009, 2010 und 2011 steht in Anhang 17 zur Verfügung. Zusätzlich werden die Leistungsangaben P_{Peak} , $P_{Average}$ und P_{Base} der Betreiber verwendet. Die Verteilungen der ESRF und des PSI liegen Anhang 19 und Abbildung 19 vor.

Vergleicht man die einzelnen Verläufe der Abbildung 19, des Anhang 17 und Anhang 19, wird ersichtlich, dass die GSI mit einem maximalen Wert von 1,6 p.u. über P_{baseop} den steilsten Verlauf der drei Verteilungen aufzeigt. Je steiler die Kurve in diesem Bereich der niedrigen Benutzungsdauern ist, desto weniger Viertelstundenwerte, mit vergleichsweise hohem Leistungsbezug, traten im Erfassungszeitraum auf und desto eher lohnt sich das Lastmanagementsystem nach [16]. Verläuft die Kurve dagegen bei den niedrigen Benutzungsdauern flach, werden über lange Zeiträume relativ hohe Leistungen benötigt. Zudem ist es sinnvoll einen Stufenbetrieb einzurichten. Damit werden mit jedem zusätzlichen Versuch gewisse Anlagen hinzugeschaltet, welches sich in einem stufenweisen Verlauf der Häufigkeitsverteilung ausdrückt.

In Abbildung 19 ist beispielweise die Häufigkeitsverteilung für die Anlage des PSI enthalten. Dieser Verlauf kann in Verbindung zu den Gesamtkosten gesetzt werden. Diese wurden im Fragebogen (Part 3: 4.) abgefragt. Damit lassen sich die Gesamtkosten mit den Verläufen und Formel 7 validieren.

Power frequency distribution for PSI

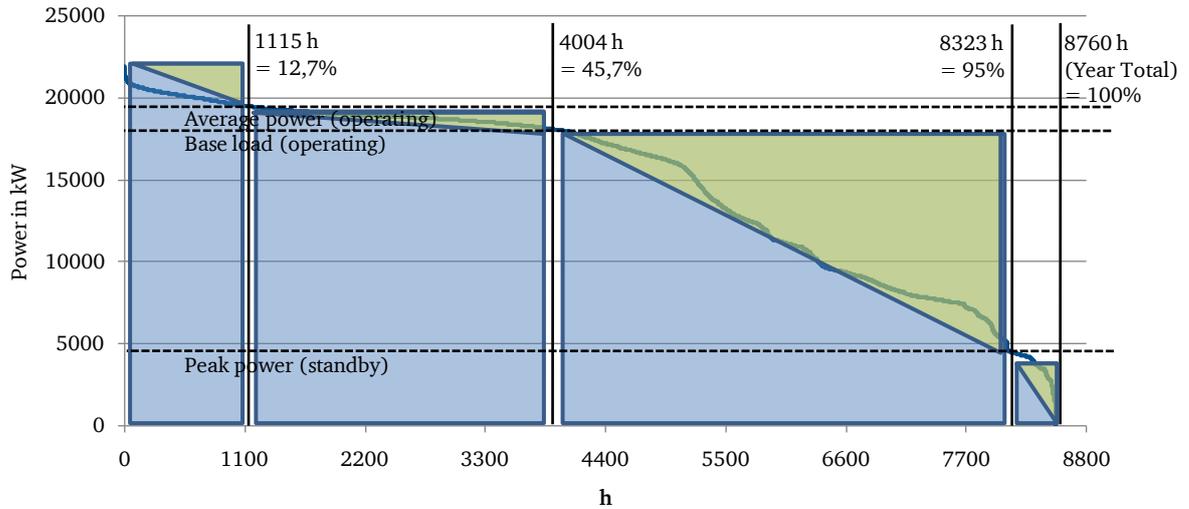


Abbildung 19: Häufigkeitsverteilung der Leistung für PSI inklusive Flächenberechnung.

$$C_{\text{annual}} = (1 + A_{\text{pulsepower}}) \cdot \{ c_{\text{kWh}} [(t_{\text{peakop}} \cdot (P_{\text{peakop}} - \frac{1}{2} \cdot (P_{\text{peakop}} - P_{\text{avop}})) + t_{\text{avop}} \cdot (P_{\text{avop}} - \frac{1}{2} \cdot (P_{\text{avop}} - P_{\text{baseop}})) + t_{\text{baseop}} \cdot (P_{\text{baseop}} - \frac{1}{2} \cdot (P_{\text{baseop}} - P_{\text{peaksby}})) + (t_{\text{peaksby}} \cdot (P_{\text{peaksby}} - \frac{1}{2} \cdot (P_{\text{peaksby}} - P_{\text{averagesby}})))] + (c_{\text{kVarh}} \cdot t_{\text{kVarh}} \cdot P_{\text{kVarh}}) \} \cdot 10^3 \cdot 8760h \quad (7)$$

mit C_{annual} : Gesamtkosten für elektrische Energie pro Jahr in Mio. €/a

$A_{\text{pulsepower}}$: Berechneter Anteil der Kosten für Pulsleistung (Nur für GSI gegeben) in %

t : Bestimmte Dauern für entsprechende Abschnitte durch Häufigkeitsverteilungen und Fragen 3.2-3.3 in %

P : Leistung gegeben durch 3.2-3.3 in MW

c_{kWh} : Preis für elektrische Energie in [€/kWh

c_{kVarh} : Zusätzlich gezahlter Preis für Blindleistungsbereitstellung in €/kVarh

Indizes:

peakop/sby: Spitzenleistung während der normalen Betriebs-/ Standby-Zeit

avop: Durchschnittliche Leistung während normaler Betriebszeit

baseop: Grundlast während normaler Betriebszeit

kVarh: Daten zur Blindleistung, derzeit unbekannt

Nach Formel 7 kommen bei der GSI die Kosten für die Pulslast hinzu. Der Verlauf dieser ist nur für die GSI nach Anhang 18 vorhanden. Die Kosten werden mithilfe Formel 7 und ähnlich den gegebenen Flächen in Abbildung 19 berechnet. Der Anteil der Kosten für die Pulslast zum jetzigen Zeitpunkt wird zu den Kosten für die normale Last addiert. Dieser Anteil $A_{\text{pulsepower}}$ beträgt rund 14 Prozent. Der Unsicherheitsfaktor zu diesem Anteil, bezogen auf die anderen Anlagen, wird als hoch eingeschätzt, weshalb die Pulsleistung nur bei der GSI Berücksichtigung findet. Dadurch sollten die Anlagen, außer der GSI einen Puffer beim Ergebnis nach Formel 7, im Vergleich zu den angegebenen Kosten aufweisen.

Gewisse Verbraucher, wie Asynchronmotoren oder Drosselspulen benötigen zur Funktion ein magnetisches Feld [11]. Der Blindleistungspreis c_{kVarh} ist Unterkapitel 5.1 zu entnehmen. Jedoch sind keine Daten bekannt, wann Blindleistung in den jeweiligen Anlagen genau anfällt. Zudem wären Angaben zum $\cos(\varphi)$ reine Vermutungen. Bekannt ist, dass das $\cos(\varphi)$ voraussichtlich nicht unter 0,85 fällt, da es dann bereits zu erheblichen Störungen der Motoren an der Mittelspannungsschiene führen kann. Es wird davon ausgegangen, dass die Betreiber ein solches verhindern, um die Funktionsfähigkeit der Anlage zu gewährleisten. Jedoch wird wegen ungenügenden Informationen zur Blindleistung, die Rechnung ausschließlich mit der Wirkleistung P , nach Unterkapitel 2.1 angewendet. Der Vollständigkeit halber enthält die beschriebene Formel 7 die Blindleistung.

Die gegebenen Abstände t werden anhand der Häufigkeitsverteilungen bestimmt. Die Leistungsangaben hierzu werden den Ergebnissen aus dem Fragebogen (Part 2a: 2.7 bis 2.12) entnommen. Mit den Leistungen werden Schnittpunkte zur Kurve identifiziert und somit ein Prozentsatz im Verhältnis zum Gesamtjahr von 8760 Stunden gebildet. Hieraus ergeben sich die Faktoren t , die die Dauer der bestimmten Leistungen im Jahr angeben. Die Faktoren der Anlagen, zu denen keine Häufigkeitsverteilungen vorliegen, werden mithilfe der Leistungsangaben und den Zeitenangaben nach dem Fragebogen (Part 2a: 2.2 bis 2.6) ermittelt. Hierbei werden zudem die errechneten Leistungen nach Unterkapitel 5.2 genutzt. Hieraus lassen sich ebenfalls Schnittpunkte ermitteln, die für Formel 7 benötigt werden. Neben den Leistungen P und den jeweiligen Anteilsdauern t_i , kommen die Preise für die bezogene elektrische Energie in € pro kWh hinzu.

Aus der Formel 7 und den gegebenen Preisen der Unterkapitel 2.9 und 5.1, ergeben sich die nach Tabelle 6 unterschiedlichen Ergebnisse. Wenn man von der GSI ausgeht, bei der die

Pulslastkosten rund 15 Prozent der Gesamtkosten für elektrische Energie aufweisen, wird nach Tabelle 6 ersichtlich, dass die Ergebnisse der anderen Anlagen nahe an die gegebenen Kosten kommen. Die Rechnung kann somit als valide eingeschätzt werden. Eine genaue Nachforschung, mit Hinzunahme der jeweiligen Pulslasten, wird jedoch als sinnvoll erachtet.

Tabelle 6: Ergebnisse der Berechnung nach Formel 7.

Beschleunigeranlage (Angaben ohne Blindleistung und ohne Pulsleistung):		Gegebene Kosten In Mio. €	Berechnete Kosten mithilfe Formel 7	Delta in % von berechneten zu gegebenen Kosten
GSI	Ohne Pulsleistung		7,68	11 %
	Mit Pulsleistung (nur für GSI verfügbar)	8,60	8,72	-1 %
PSI	Ohne Steuern und Netzkosten	9,84		-21 %
	Strompreis mit Tax und Netzkosten (sämtliche anderen Anlagen enthalten ebenfalls den Preis mit Steuern&Netz)	16,84	12,52	26 %
ESRF (Ungewöhnlich hohes P_{peakop} enthalten)		4,53	5,37	-16 %
ISIS		5,00	4,44	11 %
ESS		9,00	8,06	10 %
SOLEIL		2,8	1,85	34 %
KIT		1,6	1,10	31 %

Da für die GSI der Pulslastverlauf vorhanden ist, sind die beiden Werte mit und ohne Pulslast eingetragen. Mit Pulslast kommt der Wert im Promille-Bereich auf die angegebenen Kosten. Der errechnete Wert, ohne Angaben zur Pulsleistung der restlichen Anlagen sollte kleiner dem gegebenen Wert sein. Damit ist ein Puffer für die Puls- und die Blindleistung gegeben. Beim PSI wurde unterschieden nach den direkt angegebenen Kosten von 9,84 Mio. €, oder 12 Mio. CHF und den mit Steuern und Netzkosten errechneten Kosten. Unter der Voraussetzung, dass beim PSI keine Pulslast in die Berechnung mit Formel 7 einfließt, erscheint der Abstand von 26 Prozent als ein realistischer. Bei der Anlage ESRF besteht eine große Wahrscheinlichkeit, dass das Jahr der Leistungsangaben nicht mit dem Jahr der Häufigkeitsverteilung zusammenfällt. Der Grund dieser Vermutung ist, dass nach dem Häufigkeitsdiagramm dieser Anlage sich ein relativ ungewöhnlich großes t_{peak} von rund 26 Prozent ergibt. Mit diesem Wert wird jedoch im weiteren Verlauf, unter Toleranz eines Fehlers von ca. 15 Prozent, gerechnet. Dies spiegelt die hohe negative Differenz von -16

Prozent, von gegebenen zu ermittelten Kosten wider. Die letzten vier Anlagen bieten mit einem Puffer von 10 bis 34 Prozent einen realistischen Wert zu den angegebenen Kosten.

Mithilfe Formel 7 und den gegebenen Werten können nun Szenarien zur Gesamtkostenberechnung für elektrische Energie betrachtet werden. Dies sind „(...) systematisch und nachvollziehbar, aus der gegenwärtigen Situation heraus entwickelte, mögliche Zukunftsbilder.“ [75]. In Anhang 20 ist dazu der sogenannte Szenariotrichter enthalten. Das Spektrum der eintreffenden Möglichkeiten öffnet sich und es ergibt sich diese Trichterform, die in der Literatur für Szenarien weit verbreitet ist. Dieser symbolisiert die Unsicherheit und Komplexität der Zukunft. Sämtliche zukünftigen Möglichkeiten befinden sich auf der Schnittstelle am Ende des Trichters. Aus der Gegenwart heraus werden die beiden Extremszenarien gebildet. Diese können beliebig viele sein. Die Realität wird voraussichtlich zwischen diesen Szenarien liegen, sodass man aus heutiger Sicht bereits sämtliche Eventualitäten berücksichtigen kann. Für die Szenariobildung werden jeweils mehrere Faktoren berücksichtigt. Diese Szenarien werden wie folgt gebildet:

1. Szenarien mit variablem Preis für elektrische Energie
2. Szenarien mit variablen Effizienzmaßnahmen
3. Szenarien mit variabler Nutzungsintensität

Die erste Gruppe der drei Szenariobildungen ergibt, durch den linearen Zusammenhang des Preises pro kWh in der Formel 7, eine lineare Veränderung der Gesamtkosten. So lässt sich festhalten, dass eine zehn-prozentige Veränderung folgende Auswirkungen auf die Gesamtkosten der drei Anlagen hat.

Tabelle 7: Jährliche Kostenänderung für elektrische Energie bei Veränderung des kWh-Preises.

Jährliche Kostenänderung bei zehn-prozentiger Variation des Preises für elektrische Energie	
GSI	0,87 Mio. €/a
PSI	1,25 Mio. €/a
ESRF	0,54 Mio. €/a
ISIS	0,44 Mio. €/a
ESS	0,81 Mio. €/a
SOLEIL	0,18 Mio. €/a
KIT	0,11 Mio. €/a

Die Unterschiedlichkeit der Veränderungen für jede Anlage nach Tabelle 7, ist zum Teil durch die jeweiligen Anfangskosten, vor allem aber durch die gegebene Häufigkeitsverteilung und die jeweiligen Leistungen gegeben. Das PSI weist nach Unterkapitel 5.2 die höchste

durchschnittliche Leistung aller betrachteten Anlagen auf. Daraus ergibt sich zum großen Teil der große Kostenunterschied, bei einer zehnpromzentigen Veränderung des kWh-Preises für das PSI. Das PSI ist somit vergleichsweise stark von Preisschwankungen abhängig. Die ähnlich große Anlage ESS, weist eine weniger volatile Kostenabhängigkeit auf. Dies steht in Verbindung zum relativ niedrigen Strompreis in Schweden.

Bei der zweiten Szenariogruppe bedarf es einer Untersuchung der Möglichkeiten der Energieeffizienz. Diese wird unterschieden nach folgenden Szenarien:

- a) Reduktion der durchschnittlichen Leistung, während des Betriebes P_{avop}
- b) Reduktion der Grundlast des Betriebes P_{baseop}
- c) Reduktion der durchschnittlichen Betriebszeit t_{avop}

Zur Veranschaulichung sind in Abbildung 20 die einzelnen Faktoren in der Häufigkeitsverteilung der Anlage von PSI eingetragen. Die Pfeile deuten an, welche bezeichneten Faktoren variiert werden.

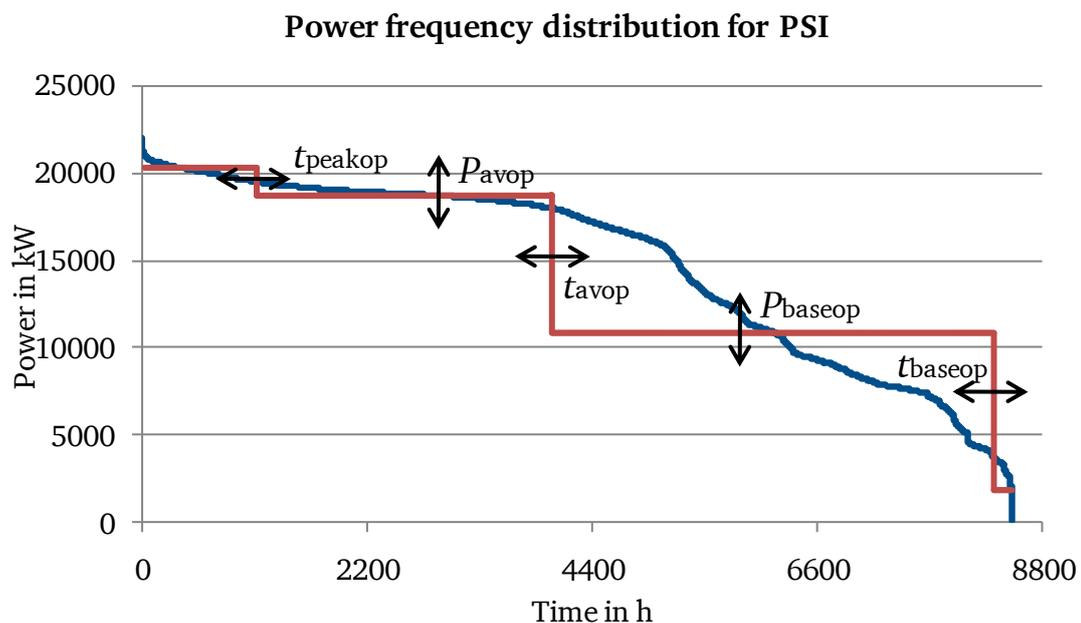


Abbildung 20: Veränderliche Faktoren der Häufigkeitsverteilung für Szenariobildungen.

Für eine Reduktion der durchschnittlichen Leistung P_{av} im Betriebszustand nach Unterpunkt a) ist eine Steigerung der Anlageneffizienz im Betrieb nötig. Dies geschieht beispielsweise durch modernere und effizienter arbeitende Motoren [10].

Die Reduktion der Grundlast P_{base} im Betrieb nach b) lässt sich beispielsweise durch neue Lichttechnik, wie durch den Austausch von Glühlampen gegen LEDs realisieren. Die

Erneuerung der IT-Infrastruktur durch effizientere Rechner ist ebenfalls sinnvoll. Eine Modernisierung der Steuerungstechnik, wie die Umstellung von analog zu digital wäre zusätzlich denkbar.

Bei der Betrachtung der Reduzierung von t_{avop} ist der jeweilige VNB miteinzubeziehen. Nach dieser Miteinbeziehung wurde im Fragebogen (Part 3: 3.) gefragt. Diese Frage haben drei von sieben Anlagenbetreibern mit „Ja“ beantwortet. Hier ist grundsätzlich die Hinzunahme des im Unterkapitel 2.3 beschriebenen Fahrplans sinnvoll. Doch auch weitere kurzfristige Abschaltungen auf Anfrage des VNBs sollen ermöglicht werden. Diese werden je nach Verbrauch oder Energiepreis reguliert. Bei der Anlage ISIS beispielsweise wurde diese Idee nach dem Fragebogen (Part 2b: (8a) 6.1) bereits angedacht, jedoch noch nicht verwirklicht.

Durch den linearen Zusammenhang der Faktoren in Formel 7, ergibt sich eine lineare Veränderung der Kosten. Hier kann, wie bei der vorigen Veränderung des kWh-Preises, für die Anlagen ein fester Kostenwert pro zehn-prozentiger Veränderung der betrachteten Szenariobildung dargestellt werden. Das Ergebnis der drei Szenariogruppen für zehn Prozent Variation der betrachteten Faktoren ist Tabelle 8 zu entnehmen. Der größte Hebel jeder Anlage ist jeweils farblich hervorgehoben.

Tabelle 8: Ergebnisse der Szenariobildungen zur Effizienz.

Verschiedene Effizienzhebel variiert	10% einer Variation eines Faktors bedeutet eine Veränderung der Gesamtkosten in Mio. €/a (und in % zu Gesamtkosten)						
	GSI	PSI	ESRF	ISIS	ESS	SOLEIL	KIT
1. Reduzierung von P_{avop}	-0,33 (-3,7%)	-0,51 (-4,1%)	-0,35 (-6,4%)	-0,18 (-4,2%)	-0,36 (-4,5%)	-0,11 (-5,9%)	-0,62 (-5,7%)
2. Reduzierung von P_{baseop}	-0,55 (-6,3%)	-1,12 (-9,0%)	-0,39 (-7,3%)	-0,28 (-6,4%)	-0,53 (-6,6%)	-0,11 (-5,7%)	-0,53 (-4,9%)
3. Reduzierung von t_{avop}	-0,50 (-5,7%)	-0,54 (-4,3%)	-0,28 (-5,2%)	-0,23 (-5,2%)	-0,46 (-5,8%)	-0,14 (-7,8%)	-0,58 (-5,3%)

Bei der einzelnen Betrachtung der Anlagen ist festzuhalten, dass Anlagenbetreiber der Anlagen GSI, PSI, ESRF, ISIS und ESS vor allem auf die Reduzierung von P_{baseop} achten sollten. Damit ist das Überprüfen auf ineffiziente Verbraucher, die nur indirekt mit den Experimenten in Verbindung stehen, sinnvoll. Mit einer solchen Maßnahme werden gleichzeitig P_{avop} und P_{peakop} gesenkt, denn die Reduzierung um einen Leistungswert von P_{baseop} wirkt sich direkt auf diese beiden Faktoren aus.

Bei der GSI, PSI, ISIS und ESS im Speziellen sollte als zweite Maßnahme die Reduzierung der durchschnittlichen Betriebszeit t_{avop} abgewägt werden. Damit sind Verhandlungen mit dem ÜNB über mögliche, zeitweilige Betriebszeitreduzierungen nötig. Die Reduzierung von t_{av} bietet bei diesen Anlagen den zweitgrößten Hebel. Zum Ergebnis des PSI liegt der folgende Kommentar von den Betreibern im Fragebogen (Part 2a: 3.5) vor: „Energy ordered minimum and maximum must be observed and if exceeded some experiments (not accelerator based) will be shutdown.“. Hiermit wurde das große Kostensenkungspotential durch Senkung von t_{avop} bereits erkannt. Die Bestätigung durch diese Berechnung des t_{avop} als großer Hebel, sollte dazu genutzt werden, das Potential auszuschöpfen und beispielsweise in moderne Steuerungstechnik investiert werden.

Beim PSI liegt zudem ein hohes Kostensenkungspotential durch die durchschnittliche Betriebsleistung P_{avop} vor. Dieses Ergebnis bestätigt eine vor kurzem getätigte Investition des PSI in ein neues HF-System⁹, welches P_{avop} verringert [3]. Dabei konnte eine Effizienzsteigerung von 13 Prozent erzielt werden. Mit genaueren Informationen zum Verbrauch dieses Anlagenteils am Gesamtverbrauch und dem hier ermittelten Kostensenkungspotential, lässt sich die Kostensenkung im Jahr bestimmen. Stellt man diese den Investitionskosten entgegen, lässt sich beispielsweise die Amortisationsdauer des neuen HF-Systems ermitteln. Die Anlage ESRF weist bei der Betriebsleistung P_{avop} den zweithöchsten Hebel auf. Die Reduzierung von t_{avop} sollte bei ESRF zuletzt, von den drei Hebeln, berücksichtigt werden.

Die Hebel der beiden Anlagen SOLEIL und KIT sind grundsätzlich anders verteilt. SOLEIL weist den größten Hebel bei t_{avop} auf. Somit sollte zunächst die Möglichkeit den ÜNB in die Planung der Betriebszeiten miteinzubeziehen angegangen werden. Erst danach folgt die Senkung der Leistungen. Das KIT hingegen kann durch die Senkung P_{avop} den größten Effekt bei der Kostenreduzierung erlangen. Jedoch ist der Hebel, im Vergleich zu anderen Anlagen kleiner. Dies hat in erster Linie damit zu tun, dass das KIT die leistungsschwächste Anlage in diesem Vergleich ist.

Übergeordnet ist festzuhalten, dass mit zunehmender Leistung der Anlage die Wirkung von Effizienzmaßnahmen tendenziell zunimmt. Dies zeigen vor allem die prozentualen Hebelwerte zwischen PSI und KIT.

⁹ Bei einem HF-System werden Leistungsverstärker durch Hohlraumresonatoren gespeist. Diese erzeugen intensive elektromagnetische Wellen. Geladene Teilchen durchqueren diesen Hohlraumresonator und werden durch das elektrische Feld beschleunigt [76].

Bei der dritten und letzten Szenariogruppe wird die Intensität der Anlagen erhöht. Dies geschieht, indem in kürzerer Betriebszeit mehr geleistet wird. Das heißt es wird in Formel 7 die Zeit t_{peaksby} und dabei gleichzeitig P_{avop} erhöht. Damit wird die Häufigkeitsverteilung gestaucht. In Tabelle 9 sind die Ergebnisse der Szenarienbetrachtung eingetragen. Beim ersten Szenario wird dabei von einer hohen Intensität ausgegangen, mit einer zwanzigprozentigen Erhöhung von t_{peaksby} und von P_{avop} im Vergleich zur Ausgangslage. Die Intensität nimmt mit den Szenarien, jeweils um zehn Prozent ab.

Tabelle 9: Veränderungen zwischen den Szenarien der Intensität.

Intensitäts- änderung (t_{peaksby} und P_{avop} größer)	Prozentuale Veränderung der Gesamtkosten bei 10- und 20-prozentiger Variation von t_{peaksby} und P_{avop} in %						
	GSI	PSI	ESRF	ISIS	ESS	SOLEIL	KIT
1. Szenario: Sehr hohe Intensität	6,1%	7,2%	11,6%	6,6%	7,2%	10,2%	8,5%
2. Szenario: Hohe Intensität	3,1%	3,7%	6,0%	3,4%	3,7%	5,4%	4,4%
3. Szenario: Niedrige Intensität	-3,7%	-3,7%	-6,6%	-3,7%	-4,1%	-6,0%	-4,8%
4. Szenario: Sehr niedrige Intensität	-7,4%	-7,5%	-13,6%	-7,7%	-8,4%	-12,8%	-10,2%

An den Prozentsätzen ist zu erkennen, dass angefangen mit dem ersten und intensivsten Szenario, hin zum vierten Szenario mit niedrigster Intensität, die Kosten bei sämtlichen Anlagen sinken. Dabei ist bei der Anlage ESRF die Volatilität am höchsten. Ratsam ist es die Effizienz der Anlage nicht durch Erhöhung der Intensität zu senken. Gleichzeitig kann vergleichsweise eine hohe Kostenreduzierung bei niedriger Intensität erreicht werden. Hierbei ist abzuwägen, ob beispielweise jährliche Betriebsschließungen kürzer ausfallen können. Damit können die Versuche über einem längeren Zeitraum stattfinden und die Intensität wird gesenkt. Für die Anlage SOLEIL gelten die Aussagen zur ESRF ebenfalls.

Die anderen Anlagen: GSI, PSI, ISIS, SOLEIL und KIT reagieren auf eine Intensitätsänderung ähnlich homogen. Beim KIT ist gegebenenfalls eine Intensitätssenkung in Betracht zu ziehen. Dieses bietet einen großen Hebel zu einer jährlichen Gesamtkostenreduzierung.

7 Ausblick zur Umfrage

Der gegebene Fragebogen hat einen Einblick in die Struktur der Beschleunigeranlagen verschaffen können. Vor allem der direkte Vergleich der internationalen Anlagen verhilft es den Betreibern ihre Diskrepanzen zu entdecken. Für eine maximale Erkenntnis sind weitere Analysen der Anlagenbetreiber notwendig. Die Betreiber kennen die energie- und anlagentechnischen Gegebenheiten ihrer Anlage. Sie wissen gegebenenfalls, dass manche Abweichungen auf spezielle Experimente, die nur bei ihnen stattfinden zurück zu führen sind.

Um nach dieser Studie fortschreitende Ergebnisse zu erzielen, ist es sinnvoll eine weitere Erhebungsrunde zu tätigen. Nach den Erfahrungen der ersten Erhebung, lohnt es sich einen weiteren Fragebogen zu erstellen, der vor allem die folgenden Fragen adressiert:

1. Anzahl an Personal
 - a. Feste Mitarbeiter mit Aufteilung nach Arbeitsbereichen
 - b. Im Jahr durchschnittlich an der Anlage forschende Wissenschaftler
2. Genaue Angabe der Kosten für EE
 - a. Genaues Verhältnis aus Kosten für Energie, Netzkosten, Steuern und Abgaben
 - b. Bezahlter Energiepreis
 - c. Bezahlter Blindleistungspreis
 - d. Vertragsbedingungen mit dem entsprechenden ÜNB, eventuell direkte Zahlen aus Rechnungen
3. In Anspruch genommene Blindleistung
4. Zu jeder Angabe, die jährlich variieren kann, wie den Konsum: Trends der letzten fünf Jahre
 - a. Gegebene Neuinstallationen, Instandhaltungsmaßnahmen
 - b. Leistungsviertelstunden-Verläufe
5. Energiekonsum zu Standby-Zeiten

Mit 1. ist es möglich näher auf die Energiekosten pro Person einzugehen. Enthalten muss das feste Personal sein, als auch tätige Wissenschaftler, die auf Zeit für ihr bestimmtes Experiment vor Ort sind. Damit ist ein weiterer Vergleich zwischen den Beschleunigeranlagen interessant. Beispielsweise könnte so ein mögliches Potential zur Erneuerung der IT-Infrastruktur entdeckt werden. Mit Investitionskosten pro PC und einer Serverinfrastruktur kann eine Kosten-Nutzen-Analyse durchgeführt werden.

Der 2. Punkt ist sinnvoll, um die tatsächlich anfallenden Kosten im Detail zu untersuchen. Hierunter zählt in erster Linie der gezahlte Preis für EE. Dieser ist besonders kritisch, da er

einen großen Einfluss auf die Gesamtkosten hat hervorruft. Ein weiterer Faktor ist der Preis für Blindleistung. Ist dieser, neben der Inanspruchnahme von Blindleistungskompensation des 3. Punktes genauer bekannt, lässt sich die exakte Rentabilität von Kompensationsanlagen bestimmen. Schließlich werden die Kosten für elektrische Energie sämtlicher Anlagen stark individuell von entsprechenden ÜNB verrechnet. Eine transparente Einsicht in diese Vertragsbedingungen ist erstrebenswert.

Zu 4. sollte ein Referenzjahr vorgegeben werden, damit eine Vergleichbarkeit besser gestaltet werden kann, falls keine Informationen zu mehreren Jahren, eine Trendbildung möglich ist. Interessant sind mögliche Neuinstallationen und ihre Auswirkung auf die Energieeffizienz zu begutachten. Leistungsviertelstunden-Verläufe nicht nur von einem Jahr, sondern von mehreren machen Ausreißer(jahre) sichtbar und verhindern deren Fehlereinfluss auf das Ergebnis.

Schließlich ist in 5. der Energieverbrauch, nicht nur im Operations-Betrieb, sondern ebenfalls im Standby-Betrieb für eine vollständige Interpretation von Interesse. Denn vor allem hier können große Einsparpotentiale liegen, da dies das gut vergleichbare Potential offenlegt. Die individuellen Versuche fließen so nämlich nicht in die Effizienzbetrachtung mit ein.

Desweiteren sollten Anreize geschaffen werden den Fragebogen gewissenhaft auszufüllen. Es sollte gegebenenfalls die Möglichkeit von Meetings zum Austausch abgewogen werden. Hier ist es sinnvoll Vertreter aus Wissenschaft der Energiebranche zu integrieren, um einen möglichst breiten Überblick zu erhalten. So können beispielsweise neueste Trends aus der Industrie mit eingebracht werden – Ein Tunnelblick rein auf Beschleunigeranlagen wird vermieden.

Eine Empfehlung ist zudem die nächste Runde mit genormten Informationsressourcen durchzuführen, wie der Norm DIN EN 16231 für Energieeffizienz-Benchmarking-Methoden des Unterkapitels 2.2. Ihre Anwendung erfordert einen grundlegenden Aufbau der Studie. Da mit dieser Studienarbeit der Fragebogen bereits entwickelt worden war, wurde von einem Gebrauch dieser abgesehen. Zudem liegt der Aufwand des Benchmarking-Aufbaus nicht im Rahmen einer solchen Arbeit.

Auch mit den bisher erzielten Informationen wurde durch den beschränkten Rahmen einer solchen Studienarbeit nicht das volle Erkenntnispotenzial ausgeschöpft. Es sollten weitere Auswertungen, vor allem durch Ableitungen von Ausreißern in Erwägung gezogen werden.

8 Zusammenfassung der Ergebnisse

Diese Studie dient dazu international verteilte Beschleunigeranlagen nach Kriterien des Energieverbrauchs und der –effizienz zu vergleichen. Die individuellen Gegebenheiten der Anlagen, das wissenschaftliche Ziel, das Alter und die Anlagenart erschweren einen Vergleich. Jedoch können Kennzahlen identifiziert werden, die die Anlagen auf einem High-Level miteinander vergleichbar machen lassen. Ziel ist es gewisse Effizienzpotentiale und Hebel hierfür zu identifizieren.

Es haben sich insgesamt sechs Beschleunigerbetreiber an der Studie beteiligt. Neben reinen Beschleuniger-, wurden auch Nichtbeschleunigerbetreiber angeschrieben. Davon ergaben sich weiterhin Daten zu einem Rechenzentrum, die ebenfalls jeweils in einer Anlage installiert sind. Hinzu kommen Anlagen, die durch öffentlich zugängliche Daten ergänzt wurden. Es ergibt sich eine Stichprobe von 14 Anlagen. Nichtvorhandene Daten der Fragebögen können durch Validierung und Vergleich ergänzt werden. Die aufkommenden jährlichen Energiekosten sind hauptsächlich von der Anlagenart, dem Alter und dem Standort abhängig. Die Standortpreise werden bei den angegebenen Kosten auf die höchsten Preise im europäischen Vergleich bezogen, denen aus Deutschland, um eine Vergleichbarkeit zu garantieren. Die Anlagenkomponenten, werden hierfür, wie es bei der ESS umschrieben wurde, als „black boxes“ betrachtet.

Sämtliche Anlagenbetreiber können durch ihre hohe Nutzungsdauer mit, für sie positiven Vertragskonditionen bei ihren Energieversorgungsunternehmen rechnen. Die Nutzungsdauer übertrifft nämlich 5.000 Arbeitsstunden. Damit werden sie als Grundlastkunden eingestuft. Besonders die beiden Anlagen ESRF und SOLEIL stechen hierbei, durch einen recht konstanten Betrieb positiv hervor.

Durch die genaue Aufteilung des Energieverbrauchs nach Anlagenart, konnte ermittelt werden bei welchen Anlagen Energie am meisten eingespart werden kann. Dabei ist auf die individuellen Gegebenheiten des Anlagenkomplexes zu achten. Die GSI hat eine große Einsparmöglichkeit bei der zweiten Anlage, nämlich dem UNILAC. Dieses bietet jedoch, gegeben durch die Wichtigkeit der Versuche, kein allzu großes Potential. Ein größeres weist das Synchrotron mit Verschiebung der Versuche auf die Sommermonate auf. Neben den Beschleunigern, erweist sich die Kühlung als zweitgrößte Möglichkeit zur Effizienzsteigerung. Danach kommt der Verbrauch für Gebäude und Personal. Auffällig hoch ist dieser Verbrauch bei der GSI und dem ESRF. In diesem Hinblick verhält sich die Verteilung der geplanten ESS

hervorragend. Hier ist der Ansatz „Sustainable Research Facility“, mit der Sie derzeit gebaut wird, erkennbar.

Ein weiteres Potential bietet die Eigenerzeugung. Bei ESS wird über den Brennstoffzelleneinsatz nachgedacht. Zudem senkt die Abwärmenutzung und Einspeisung ins öffentliche Netz die jährlichen Kosten. Nur in einem weiteren Fall von ESRF wird die Nutzung von KWK-Anlagen explizit erwähnt. Bei der ISIS beispielsweise wird das Argument gegen KWK gebracht, dass der elektrische Energieverbrauch immens höher ist, als der Wärmeverbrauch. Eine teilweise Einspeisung in das Wärmenetz wurde hier anscheinend nicht berücksichtigt oder ist vom Standort her nicht möglich. Eine Überprüfung dieser gekoppelten Nutzung erscheint bei sämtlichen Anlagen als angebracht.

Zur Vergleichbarkeit der Anlagen wurde eine Effizienzkennzahl aus der Spitzenleistung im Betrieb zu den gesamten Kosten für elektrische Energie festgelegt. Bei dieser Kennzahl ist die Anlage ESS bestplatziert. Bei ihr können voraussichtlich, zukünftig die jährlichen Kosten durch Eigenerzeugung von elektrischer Energie um 30 bis 45 Prozent gesenkt werden. Nach Normierung sämtlicher Anlagen auf die deutschen Strompreise folgt die Anlage der GSI. Es sollten die Anlagenbetreiber, ohne Rücksicht auf die Normierung, Anstrengungen unternehmen die Effizienz zu erhöhen. Dies ist nötig um den Standort wirtschaftlich halten zu können. Zudem ist aufgefallen, dass tendenziell die Effizienz der Anlagen mit Erhöhung der Anlagenleistung sinkt, bis auf die Ausnahme der in Zukunft fertiggestellten Anlage ESS. Als Beispiel sei hier das PSI genannt, welches die niedrigste hier definierte Effizienz aufweist. Dies ist, in Anbetracht zukünftiger Anlagen, mit immer höheren Leistungen und steigenden Energiepreisen, hervorzuheben. Erhöhte Volatilitäten im Netz können den Preis in Zukunft weiter negativ beeinflussen.

Es wurde ein Überblick zu den wichtigsten Effizienzkriterien, ohne jegliche Gewichtung erstellt. Hierbei kann sich, trotz des niedrigen Wertes bei der definierten Effizienz, die Anlage PSI behaupten und nimmt den ersten Rang in der Gesamteffizienz ein. Beim PSI sind die besonders hohe Betriebszeit und die hohe Leistung ausschlaggebend. Der geringe Energieverbrauch, trotz der hohen Leistung trägt zur Platzierung bei. Danach folgten der Reihe nach die Anlagen von ESS, ESRF, SOLEIL, GSI und ISIS. Das ESS ist bei den Kennzahlen Durchschnittsleistung, Verbrauch für Gebäude und der Effizienz im Vergleich ideal ausgelegt. Das ESRF weist eine besonders effiziente Kühlung auf oder die Versuche benötigen im Vergleich weniger Kühlleistung. Die Platzierung der Anlage ISIS ist damit begründet, dass sie eine im Vergleich geringe Leistung und gleichzeitig einen hohen

Energieverbrauch aufweist. Bei der GSI sind es vor allem der hohe Energieverbrauch für Gebäude und Personal und der Gesamtverbrauch, die die Platzierung drücken.

Zur Ermittlung von Hebeln für eine Effizienzerhöhung werden vorhandene Lastgangkurven, gegebene Informationen zur Betriebszeit, Leistung, Preise und jährlichen Gesamtkosten zur Hilfe genommen. Mit diesen lässt sich eine Formel definieren zur Ermittlung der Gesamtkosten. Zunächst lassen sich damit die gegebenen Gesamtkosten validieren. Danach folgt die Bildung von Szenarien, mit folgenden drei Szenariogruppen: Szenarien für den Preis für elektrische Energie, für Effizienzmaßnahmen und für eine variable Nutzungsintensität.

Als Resultat ergibt sich für die erste Szenariobildung, dass die Betreiber des PSI vergleichsweise stark von Preisschwankungen abhängig sind. Die ähnlich große Anlage ESS, weist durch den relativ niedrigen Strompreis in Schweden, eine weniger volatile Kostenabhängigkeit auf. Bei der zweiten Szenariogruppe hat sich herausgestellt, dass die Anlagen GSI, PSI, ESRF, ISIS und ESS auf die Reduktion der Grundlast des Betriebes P_{base} eingehen sollten. Der größte Hebel bietet sich beispielsweise mit Investitionen in neue Lichttechnik, wie LEDs oder mit neuer IT-Infrastruktur. Bei der GSI wurde dieser Hebel mit der kürzlichen Inbetriebnahme des hocheffizienten Rechenzentrums „Green Cube“ erkannt. Desweiteren sollte bei GSI, PSI, ISIS und ESS auf die durchschnittliche Betriebszeit t_{avop} geachtet werden. Diese kann reduziert werden, wenn die Anlage beispielsweise auf Anfrage des Verteilnetzbetreibers abgeschaltet wird. Beim PSI liegt ein hohes Kostensenkungspotential durch die Senkung der durchschnittlichen Betriebsleistung P_{avop} vor. Eine Senkung kann beispielsweise durch modernere und effizienter arbeitende Motoren erreicht werden. Die dritte Szenariobildung zeigt auf, dass bei der Anlage ESRF die Volatilität, abhängig von der Nutzungsintensität, am höchsten ist. Eine Verringerung der Betriebszeit bringt vergleichsweise hohe Mehrkosten mit sich.

Keinesfalls soll die Arbeit eine für den Vergleichsprozess abschließende sein, sondern aufzeigen, dass der Vergleich zwischen zunächst völlig unterschiedlichen Anlagen möglich und sinnvoll ist. Die Arbeit soll als Grundlage für Vertiefungen dienen, die identifizierten Potentiale und Hebel weiter im Detail zu betrachten. Eine Empfehlung wäre die Nutzung der Norm DIN EN 16231 für Energieeffizienz-Benchmarking-Methoden. Mithilfe dieser lassen sich die Erkenntnisse aus der ersten Fragerunde nutzen und darauf aufbauend die nächsten Schritte für ein möglichst detailliertes Benchmarking generieren.

Anhang

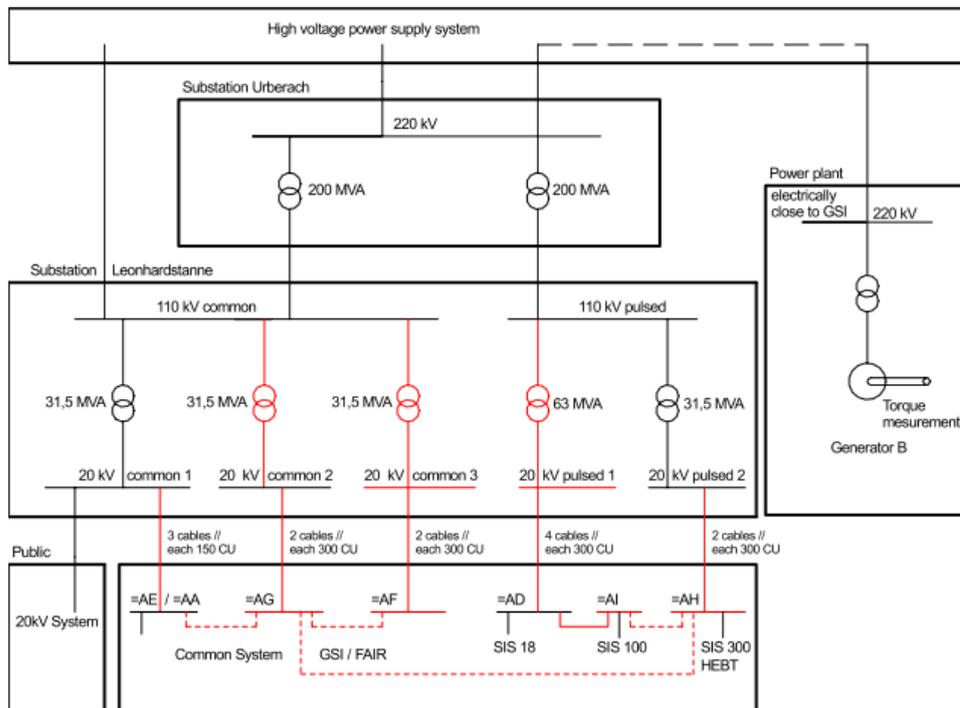
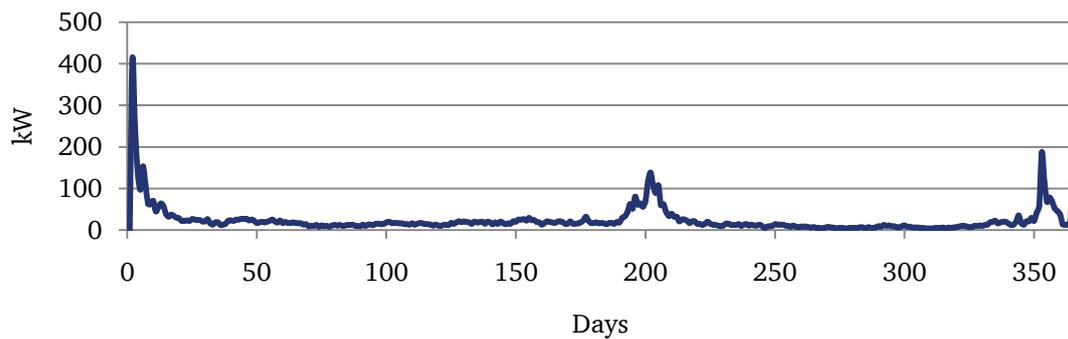


Figure 10.2-3 GSI/FAIR–power in the high voltage grid

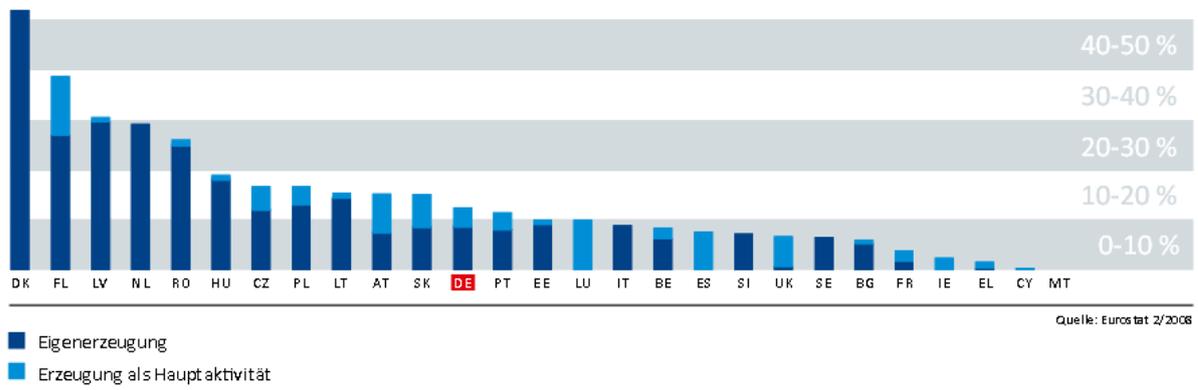
Anhang 1: Schematische Darstellung des Netzes des GSI/FAIR [22].

Maximal power deviation for GSI in 2011



Anhang 2: Maximale Varianz der Leistung bei der GSI in 2011.

Anteil der KWK an der Stromerzeugung in der EU 2005



Anhang 3: Anteil der KWK an der Stromerzeugung in der EU in 2005 [77].

Questionnaire

on Accelerator Electric Power Consumption and Efficiency

Contact		
Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung	Dr. Jens Stadlmann	j.stadlmann@gsi.de
Paul Scherrer Institut	Dr. Mike Seidel	mike.seidel@psi.ch
Technische Universität Darmstadt Elektrische Energieversorgung unter Einsatz Erneuerbarer Energien (E5)	Damian Batorowicz Christina Mahler Stanislav Leis	damian.batorowicz@e5.tu-darmstadt.de christina.mahler@e5.tu-darmstadt.de leis@stud.tu-darmstadt.de

Part 1: Description of the nature of your facility

	A	B
1.	Description of facility	
1.1	General	Name
1.2a	Particles and type of accelerator (e.g. e/synchrotron)	First operational year
1.2b		1. (major)
1.2c		2.
1.3	Type of research (e.g. matter and material, human health)	3.
		Main task
		Secondary task

Part 2a: Basic parameters on operation, energy and power consumption

Please state as many as you are able to define

(The visible space of the cells can be exceeded as we will later use the electronic version of the pdf document)

	A	B	C	D
2.	Basic parameters on operation			
	re 2.3: Normal operating time means sum of preparation, operation and experiment time, the accelerators are turned on re 2.2: Standby operation time means the accelerators are turned off			
2.1	<input type="checkbox"/> Reference year _____ or <input type="checkbox"/> Typical Value/ Average Value			
	Operating hours per year [h]	Accelerator 1	Accelerator 2	Accelerator 3
2.2	Standby operation time			Comments
2.3	Normal operating time			
2.4a	Preparation time			
2.4b	Operating time (Accelerating time)			
2.4c	Experiment time			
2.4d	_____			
2.5	_____			
2.6	_____			
		A	B	C
	Average energy consumption in normal operation time [GWh]	Accelerator 1	Accelerator 2	Accelerator 3
2.7	Total			Sum per year
2.8	Personal and Buildings			
2.9	Experiments and Laboratories			
2.10	Accelerator (operating time)			
2.11	_____ e.g. cooling system			
2.12	_____			
2.13	Comments			



		A	B	C			
Analysis of energy consumption							
re 3.1: t_{rec} vs. day: Distinction between average value during recording time of electrical measurements and average of whole day re 3.2:							
3.	Peak power: Maximum instantaneous value of electrical power consumption Average power: Average power consumption per day or recording time Base load: Minimum instantaneous value of electrical power consumption						
3.1	Recording time [min]	$t_{rec} =$ (eg. 15 min)					
Average load curve value of recording time t_{rec} or of day		Base load [MW]		Average power [MW]		Peak power [MW]	
		t_{rec}	day	t_{rec}	day	t_{rec}	day
3.2	Normal operation time (re 2.3)						
3.3	Standby operation time (re 2.2)						
3.4	Have you experienced any unique or exceptional value (above or below the expected value) in recent years which affected the normal operation?	Yes <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>		Yes <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>		Yes <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>	
3.5	Comments						

Part 2b: Data of the facility

		A	B	C
Specification data of the facility – Connection to external grid				
4.	MV	three-phase medium voltage (1 kV < rated voltage ≤ 60 kV)		
	LV	three-phase low voltage (0.4 kV < rated voltage ≤ 1 kV)		
	UPS	Uninterrupted Power Supply		
4.1	Nominal frequency of public grid [Hz]	$f_n =$		
	Grid connection point(s) (point of connection to the public grid)	1. Main connection (e.g. common power)	2. Auxiliary connection (e.g. puls power)	3. Third connection (e.g. MV cable connection to a grid)
4.2	Voltage level [kV]			
4.3	Minimum short-circuit power [MVA]			
4.4	Maximum short-circuit power [MVA]			
4.5	Average quantity of blackout per year			
4.6	Total time of blackout per year [h/a]			
Known problems with:				
4.7	Power quality (voltage)	Yes <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>	Yes <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>	Yes <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>
	Stability or nominal frequency	Yes <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>	Yes <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>	Yes <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>
	Reliability of the supply	Yes <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>	Yes <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>	Yes <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>

		A	B			C					
Specification data of the facility – Internal network											
re 5.4: Sum of rated power if minimal amount of loads is connected to the switchgear in normal operation mode (re 2.3)											
re 5.5: Sum of rated power if maximal amount of loads is connected to the switchgear in normal operation mode											
5.	MAIN	Main connection	1. MV switchgear			2. LV switchgear			3. DC (UPS local or grid) switchgears		
	AUX	Auxiliary connection									
	3RD	Third connection	MAIN	AUX	3RD	MAIN	AUX	3RD	MAIN	AUX	3RD
5.1	Voltage level [kV]										
5.2	Min. short-circuit power [MVA]										
5.3	Max. short-circuit power [MVA]										
5.4	Min. power of loads [MW/MVA]										
5.5	Max. power of loads [MW/MVA]										
5.6	Installed harmonic filter [Hz]										
Known recurrent issues:											
5.7	Power quality (voltage)		Yes <input type="checkbox"/>	No <input type="checkbox"/>		Yes <input type="checkbox"/>	No <input type="checkbox"/>		Yes <input type="checkbox"/>	No <input type="checkbox"/>	
	Stability of nominal frequency		Yes <input type="checkbox"/>	No <input type="checkbox"/>		Yes <input type="checkbox"/>	No <input type="checkbox"/>		Yes <input type="checkbox"/>	No <input type="checkbox"/>	
	Reliability of the supply		Yes <input type="checkbox"/>	No <input type="checkbox"/>		Yes <input type="checkbox"/>	No <input type="checkbox"/>		Yes <input type="checkbox"/>	No <input type="checkbox"/>	
5.8	Disconnection due to current		Yes <input type="checkbox"/>	No <input type="checkbox"/>		Yes <input type="checkbox"/>	No <input type="checkbox"/>		Yes <input type="checkbox"/>	No <input type="checkbox"/>	
	Voltage and frequency		Yes <input type="checkbox"/>	No <input type="checkbox"/>		Yes <input type="checkbox"/>	No <input type="checkbox"/>		Yes <input type="checkbox"/>	No <input type="checkbox"/>	
	Grounding protection		Yes <input type="checkbox"/>	No <input type="checkbox"/>		Yes <input type="checkbox"/>	No <input type="checkbox"/>		Yes <input type="checkbox"/>	No <input type="checkbox"/>	
5.9	Motor starting		Yes <input type="checkbox"/>	No <input type="checkbox"/>		Yes <input type="checkbox"/>	No <input type="checkbox"/>		Yes <input type="checkbox"/>	No <input type="checkbox"/>	
	Break or connection of a load		Yes <input type="checkbox"/>	No <input type="checkbox"/>		Yes <input type="checkbox"/>	No <input type="checkbox"/>		Yes <input type="checkbox"/>	No <input type="checkbox"/>	
	Harmonics		Yes <input type="checkbox"/>	No <input type="checkbox"/>		Yes <input type="checkbox"/>	No <input type="checkbox"/>		Yes <input type="checkbox"/>	No <input type="checkbox"/>	
5.10	Comments										

		A	B			C					
6. Specification data of the facility– Energy generation											
Do you operate any auxiliary power plants? (e.g. PV panels, combined heat and power plants)		<input type="checkbox"/> Yes <input type="checkbox"/> No if yes:									
		First power plant			Second power plant			Third power plant			
6.1	Type of the power plant										
6.2	Nominal apparent power [MVA]										
6.3	Nominal voltage of generator [kV]										
6.4	Full operating time per year [h]										
6.5	Direct connection to the facility		<input type="checkbox"/> Yes <input type="checkbox"/> No			<input type="checkbox"/> Yes <input type="checkbox"/> No			<input type="checkbox"/> Yes <input type="checkbox"/> No		
Do you operate any emergency generators or UPS on your site connected to MV or LV switchgears? (local ones excluded; e.g. emergency diesel generators)		<input type="checkbox"/> Yes <input type="checkbox"/> No if yes:									
		Connected to MV system			Connected to LV system			Other facility: _____			
6.6	Type of the emergency generator or UPS										
6.7	Nominal apparent power [MVA]										
6.8	Nominal voltage of generator [kV]										
6.9	Full operating time per year [h]										



		A	B	C
Specification data of the facility – Consumers				
7.	Large Consumer: The power of this consumer (consumer group) is much bigger than the average power of other consumers connected to the same switchgear			
	Are you able to single out any large power consumers in your facility connected to MV or LV switchgears? (e.g. motors, heaters)	<input type="checkbox"/> Yes <input type="checkbox"/> No if yes:		
		First consumer	Second consumer	Third consumer
7.1	Type of consumer			
7.2	Number of consumer in facility			
7.3	Rated voltage [kV]			
7.4	Rated apparent power [MVA]			
7.5	Rated power factor [1]			
7.7	Load factor in normal operation [%]			
7.8	Operating Hours [h]			
7.9	Comments			

8. Would you be able to provide any curve of the electric power consumption over a specified time period – known as load curve (e.g. power consumption)?
 yes no **If yes**, questions 8a) and 8b) are **optional**.
If no, please try to answer questions 8a) and 8b).

8a Do you experience any recurring **seasonal volatility** in your power consumption?
 yes no **If yes**, are they...

	A	B	C	D	
	Period	Base load [MW]	Average power [MW]	Peak power [MW]	Comments: to describe the potential cause of the effect Quality of evaluation: rough guess, qualified estimate, exact
6.1	<input type="checkbox"/> Season related (e.g. Winter, Summer)				
6.1a					
6.1b					
6.2	<input type="checkbox"/> Holiday related (e.g. summer break, Christmas time)				
6.2a					
6.2b					
6.3	<input type="checkbox"/> Operation related (e.g. beam time, laboratory)				
6.3a					
6.3b					
6.4	<input type="checkbox"/> of other origin (please specify: _____)				
6.4a					
6.4b					

8b Do you experience any recurring daily volatility in your power consumption?
 yes no **If yes**, could you give example values?

	A	B	C	D	
	Period	Base load volatility [MW]	Average power volatility [MW]	Peak power volatility [MW]	Comments: to describe the potential cause of the effect Quality of evaluation: rough guess, qualified estimate, exact
7.1					
7.2					

Part 3: Questions about energy efficiency

- 1a Did you experience any power quality issues in the form of undesired voltage or frequency changes (e.g. above average harmonics, voltage drops during motor start, overvoltages etc.) at any switchgear in the past caused by the interaction of different consumers on site?

yes no **If yes**, please specify:

- 1b Did you experience any switch off from grid?

yes no **If yes**, please quote the number of incidents per year:

- 2a If it would be economically beneficial, would you be able to change your power consumption on short notice provided that experiments and normal operation are not influenced? (e.g. by reducing cooling power for a short time period)

yes no **If yes**, please specify how:

- 2b Did you already do so in the past?

yes no **If yes**, please give an example:

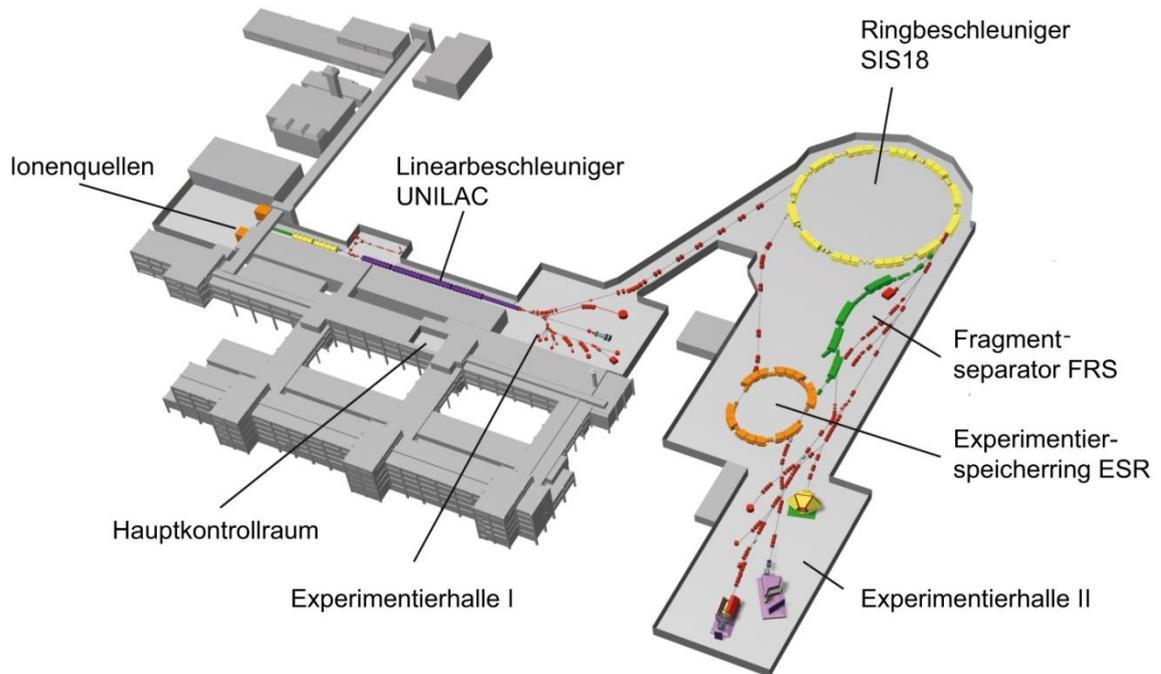
3. Are there any ongoing or past efforts to save electrical power or to adapt the power consumption to the Transmission System Operator's request? (e.g. shutdown in winter period)

yes no **If yes**, please specify:

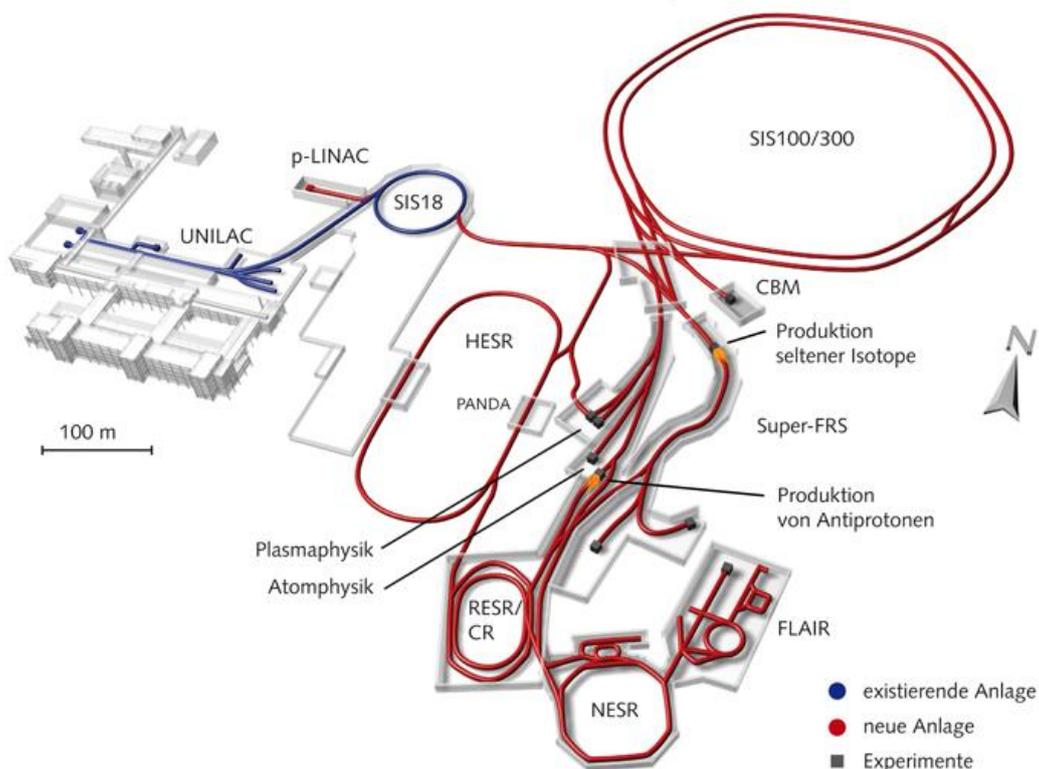
4. Can you specify the total price you spent for energy consumption for the particular reference year?

yes no **If yes**, please specify:

Anhang 4: Gesamter Fragebogen.



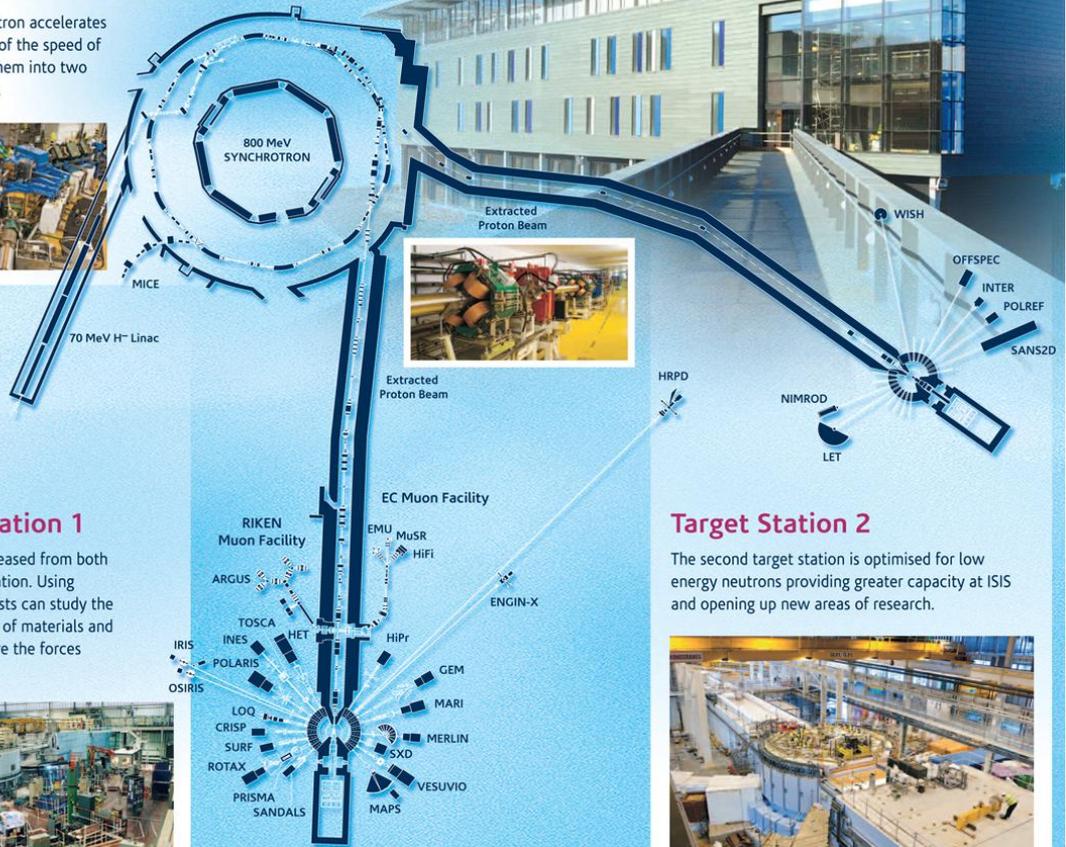
Anhang 5: Übersicht der aktuellen GSI-Anlage [78].



Anhang 6: Übersicht zur neuen Anlagen der GSI, inklusive FAIR [79].

ISIS is a high power accelerator that fires high energy protons into two targets to release neutrons for experiments.

The ISIS synchrotron accelerates protons to 84% of the speed of light then fires them into two tungsten targets.



Target Station 1

Neutrons are released from both targets via spallation. Using neutrons, scientists can study the atomic structure of materials and can even measure the forces between atoms.

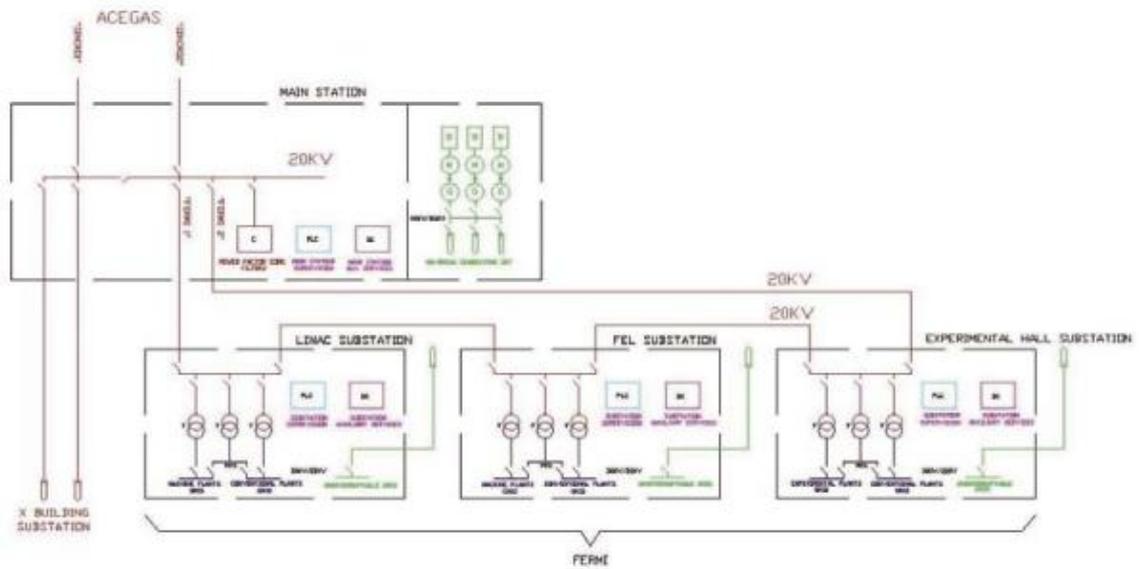


Target Station 2

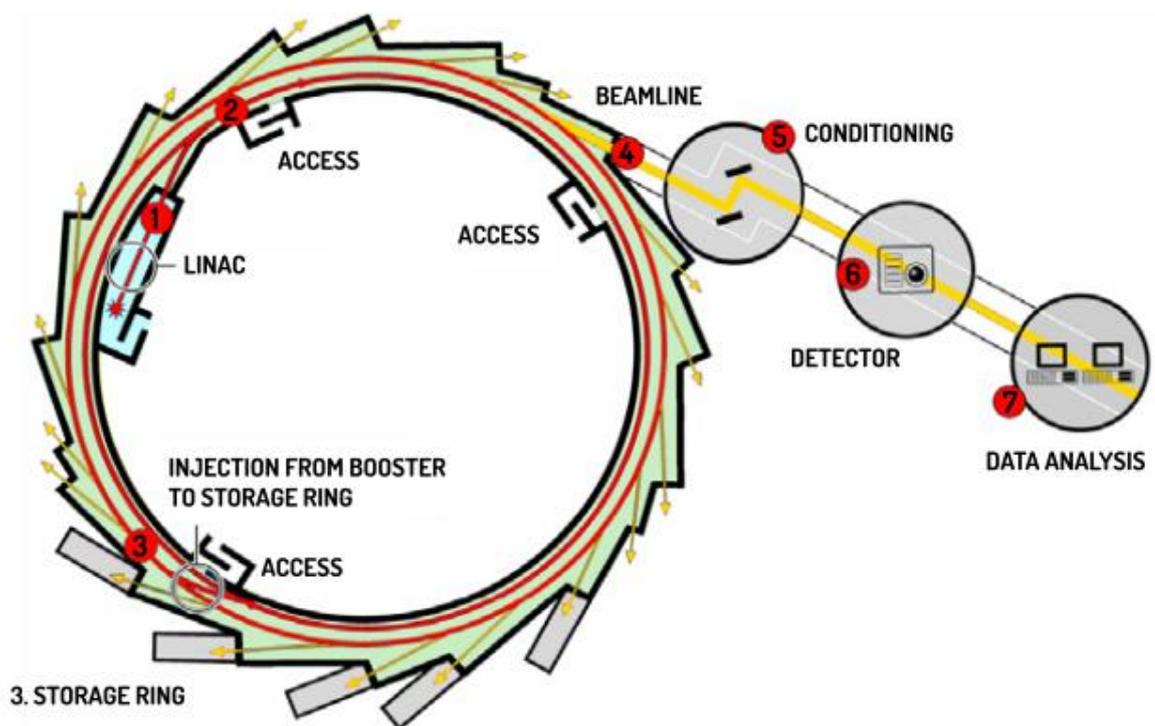
The second target station is optimised for low energy neutrons providing greater capacity at ISIS and opening up new areas of research.



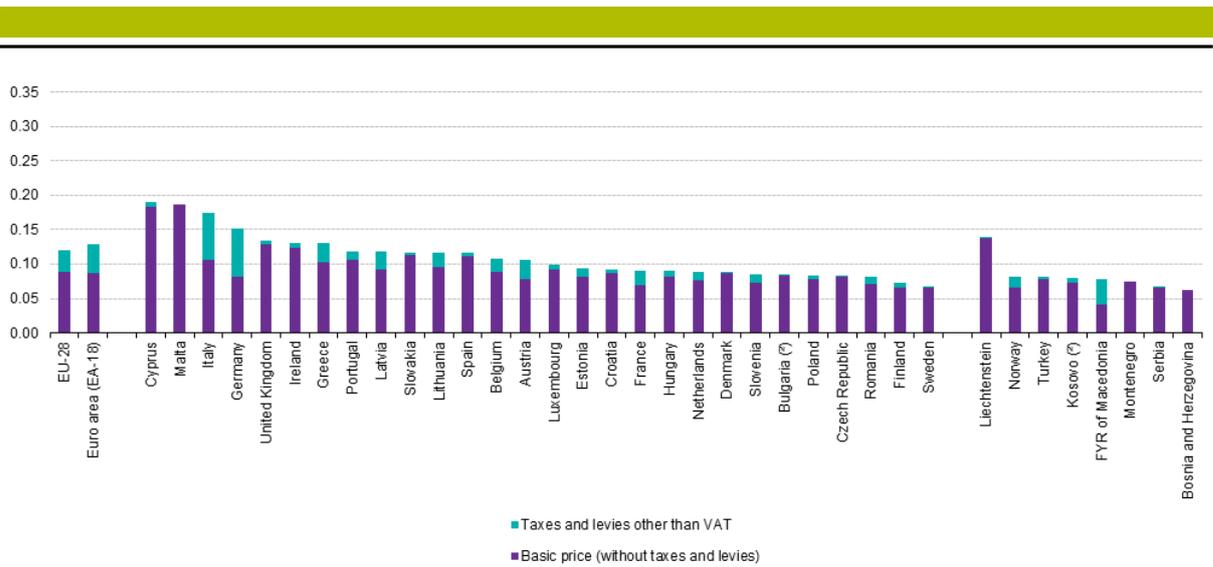
Anhang 7: Aufbau von ISIS [55].



Anhang 8: Elektrisches Versorgungsnetz der ELETTRA [57].



Anhang 9: Schematischer Aufbau der Anlage ALBA [64].

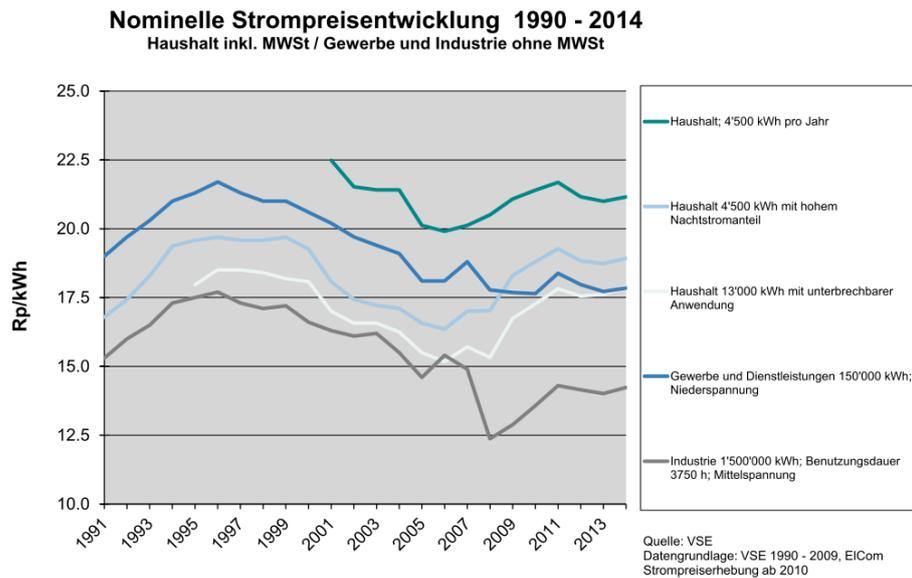


(*) Annual consumption: 500 MWh < consumption < 2 000 MWh. Excluding VAT.

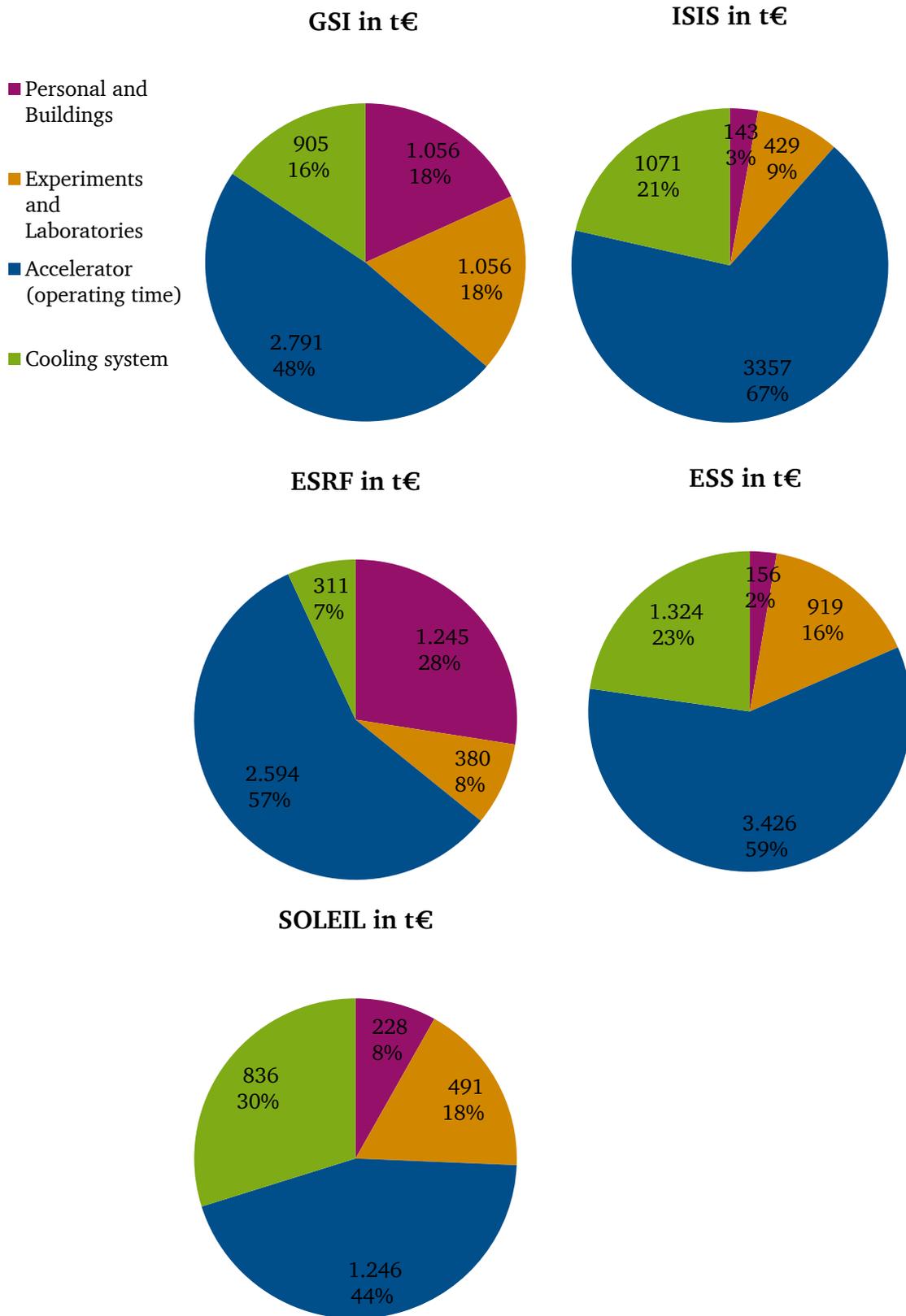
(*) Provisional.

Source: Eurostat (online data code: nrg_pc_205)

Anhang 11: Europäische Strompreise von Industriekunden der zweiten Jahreshälfte 2014 in EUR per kWh [42].

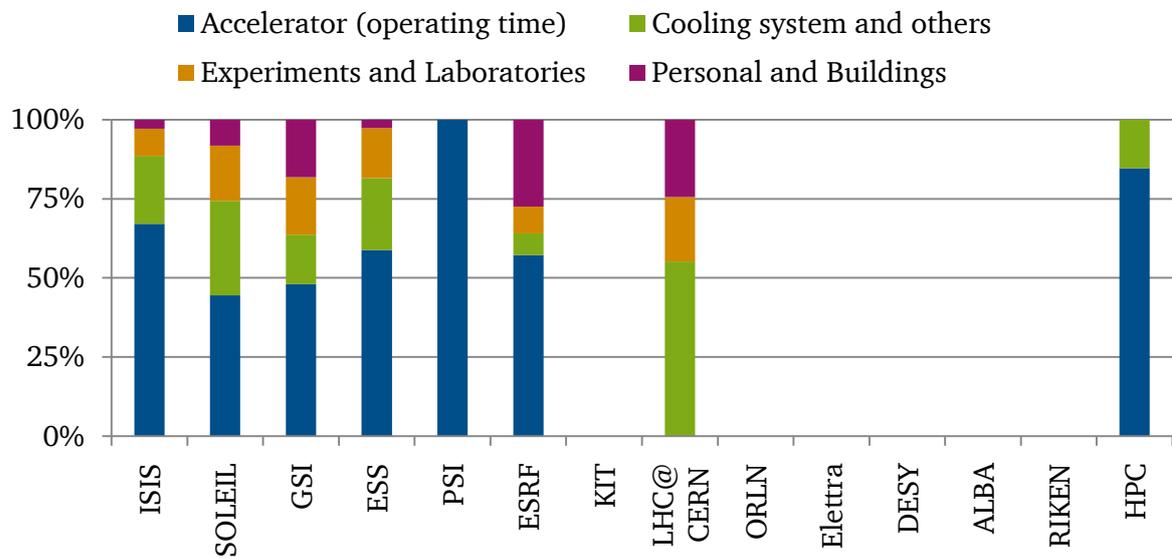


Anhang 12: Strompreisentwicklung in der Schweiz [45].



Anhang 13: Kosten für elektrische Energie nach Anlagenarealen.

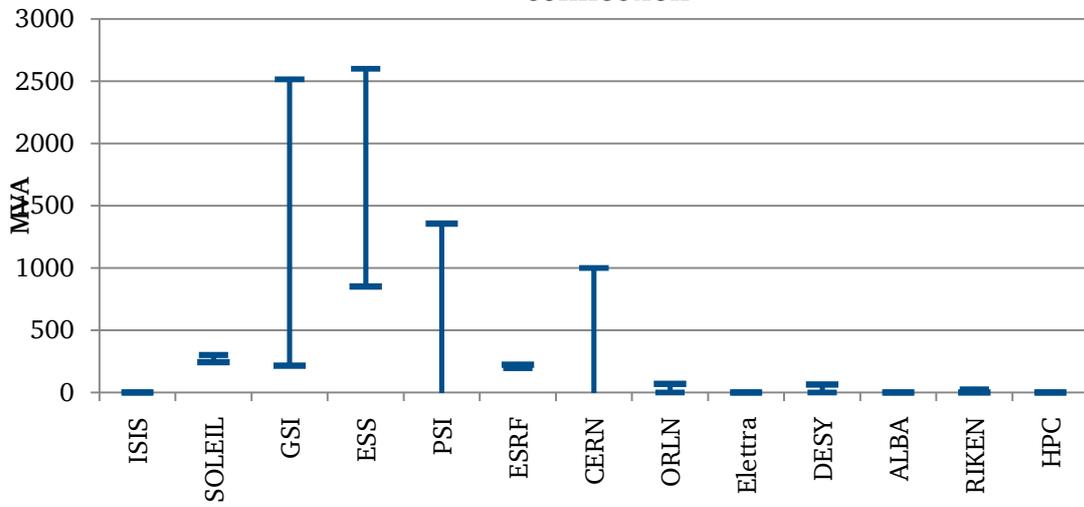
Average electrical energy consumption per facility area (shares)



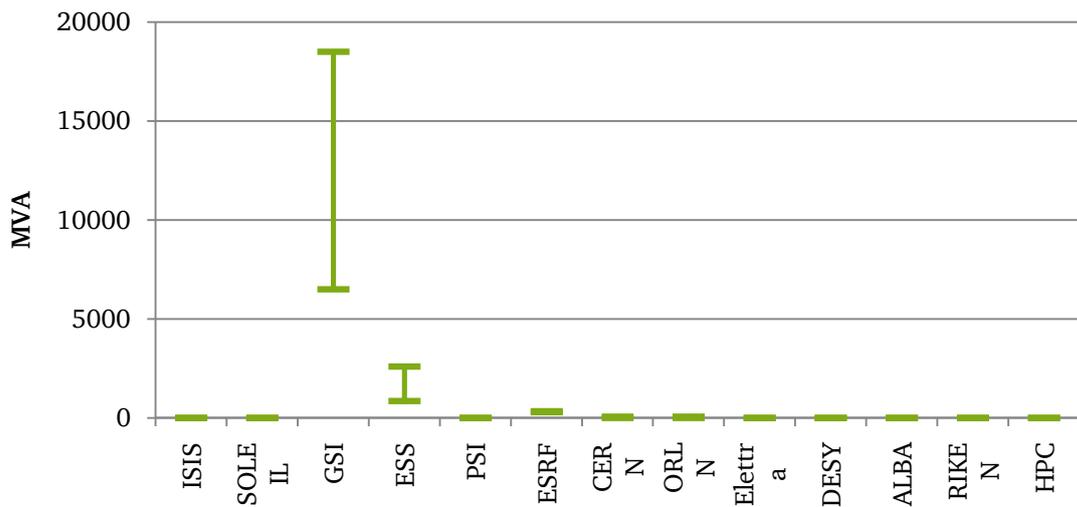
Anhang 14: Durchschnittlicher elektrischer Energieverbrauch pro Anlagenareal (anteilig).



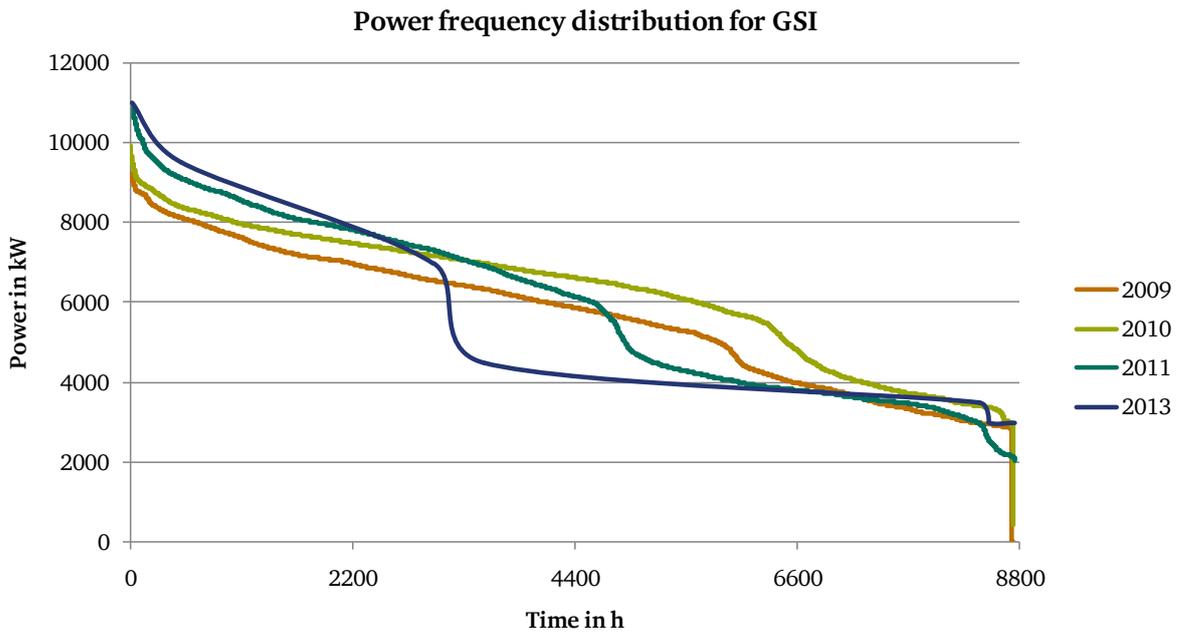
Minimum and maximum short-circuit power of main connection



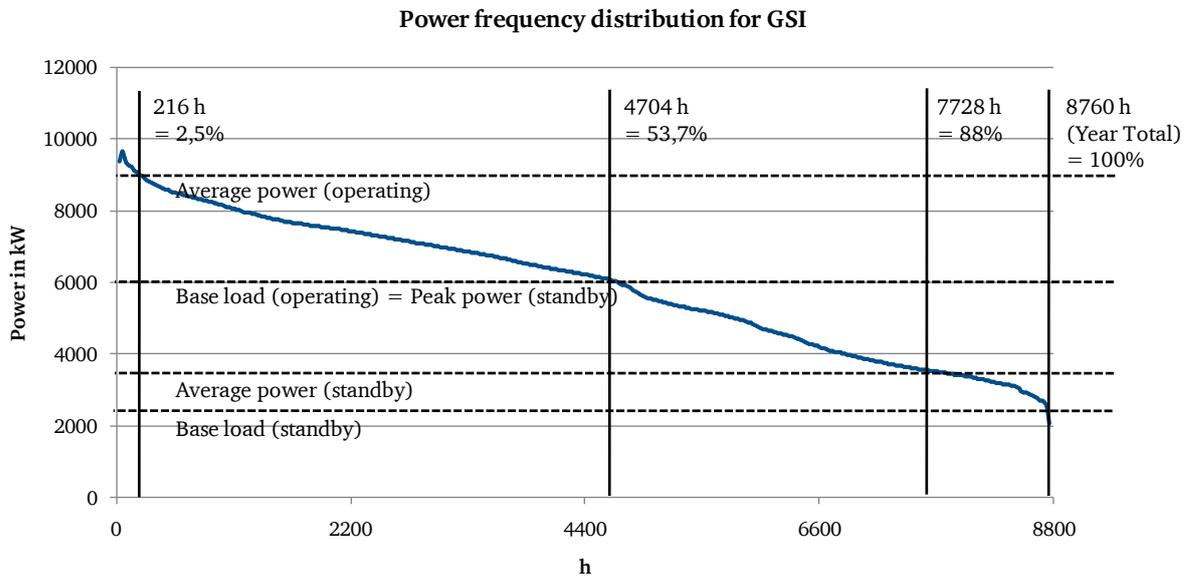
Minimum and maximum short-circuit power of auxiliary connection



Anhang 15: Minimale und maximale Kurzschlussleistung des Haupt- und Nebenanschlusses zum externen Netz.

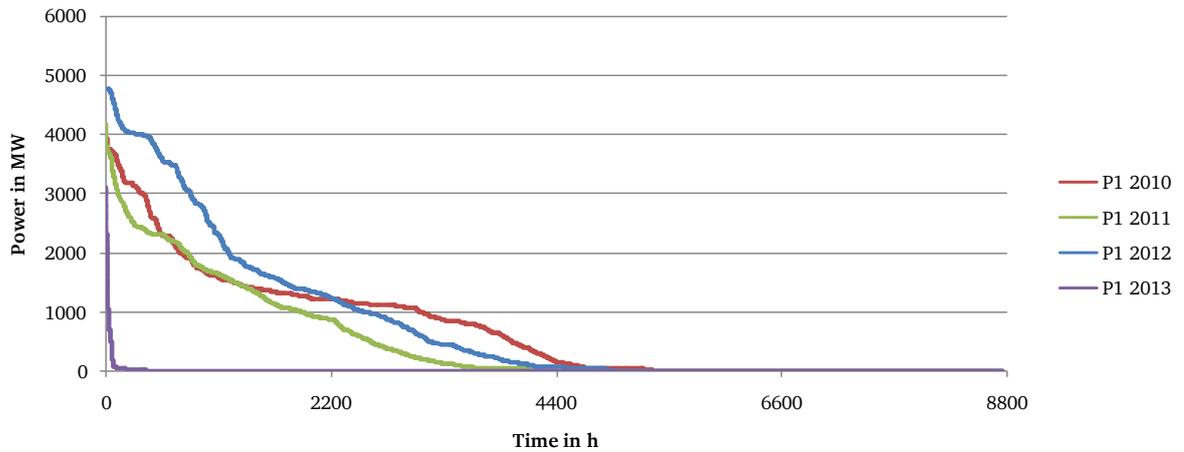


Anhang 16: Häufigkeitsverteilungen der GSI für 2009, 2010, 2011 und 2013.



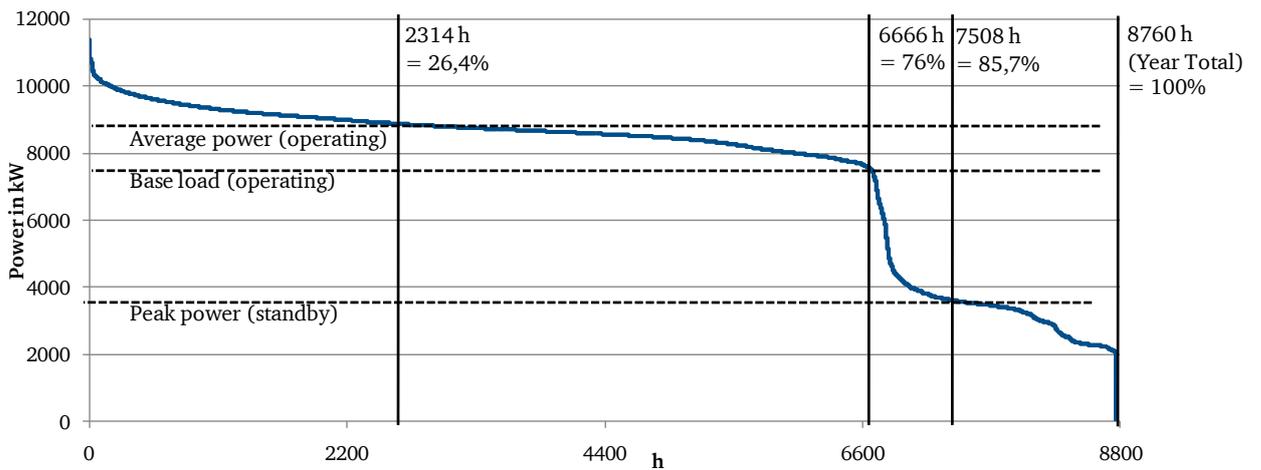
Anhang 17: Power frequency distribution for GSI.

Pulsed power frequency distribution for GSI

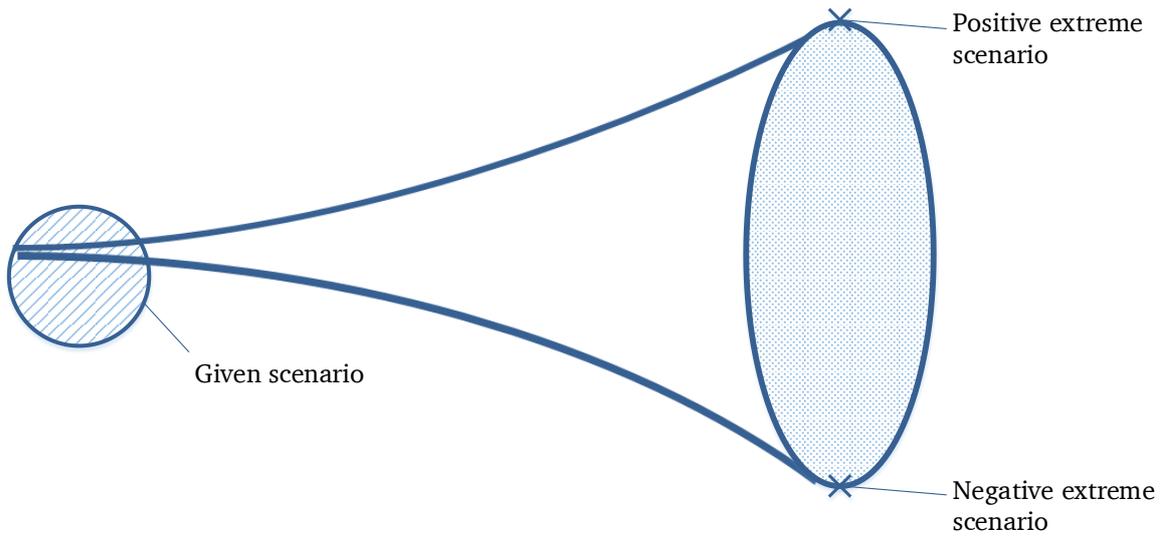


Anhang 18: Häufigkeitsverteilung für die pulsierende Leistung bei der GSI.

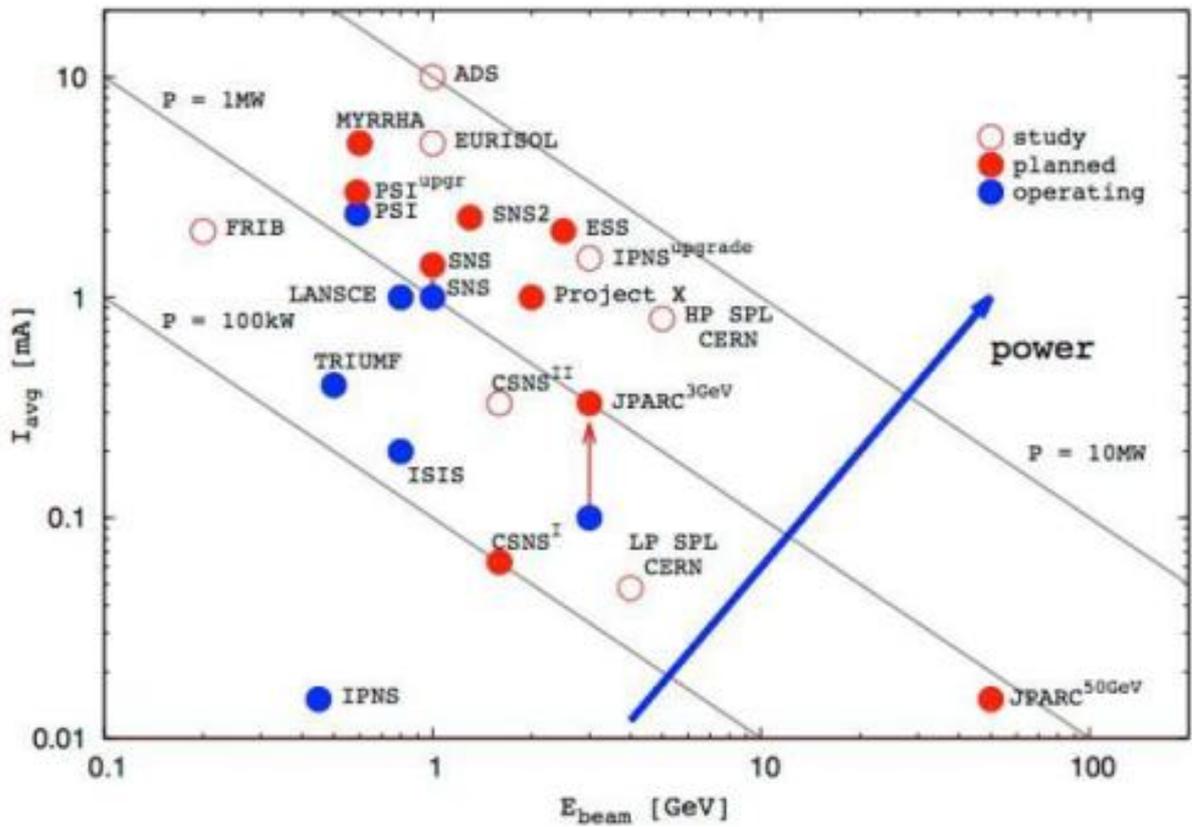
Power frequency distribution for ESRF



Anhang 19: Power frequency distribution for ESRF.



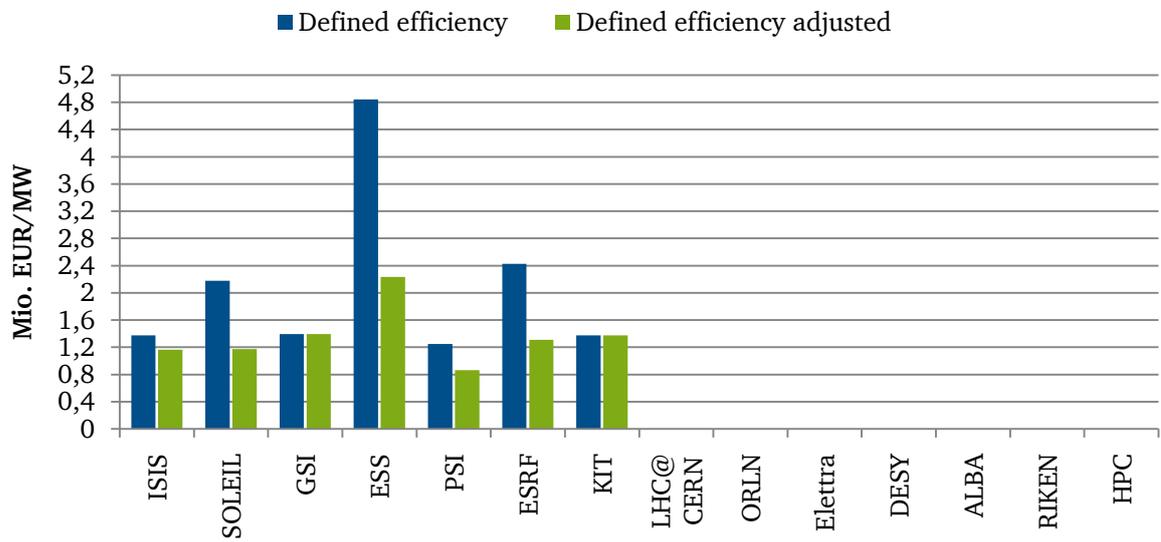
Anhang 20: Szenariotrichter.



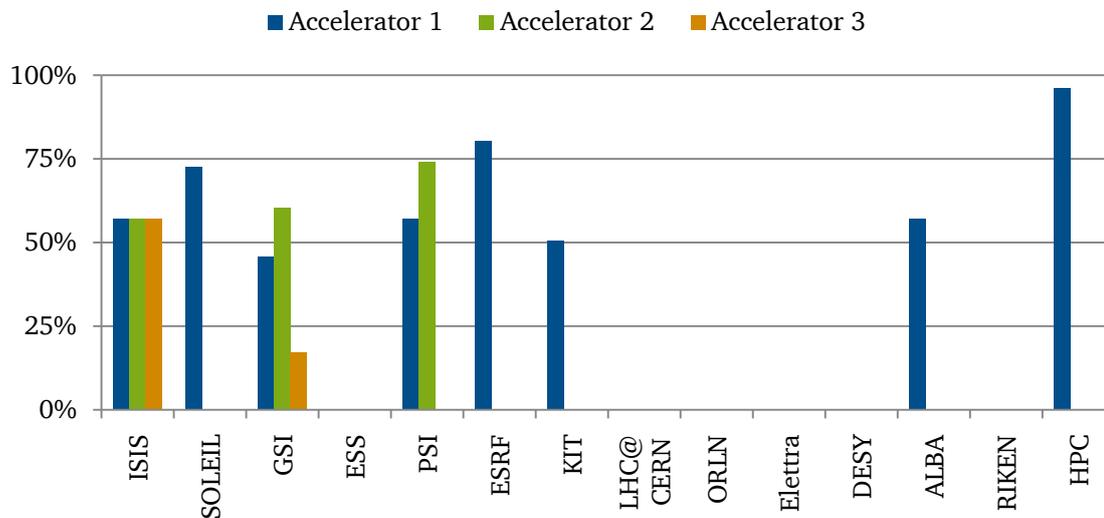
Anhang 21: Hadron Intensitätsgrenzen von internationalen Teilchenbeschleunigeranlagen [80]

Zusätzlich entwickelte Diagramme

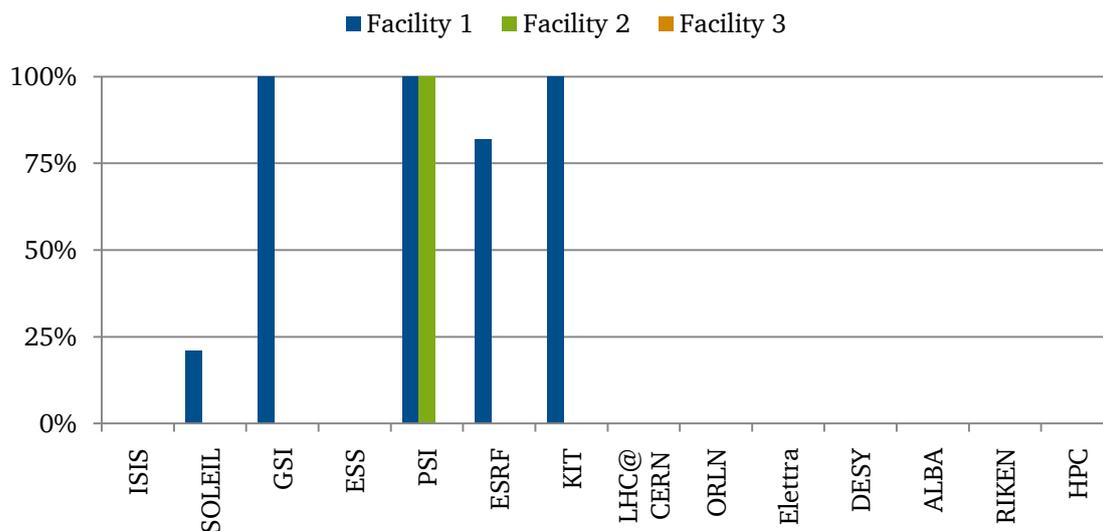
Efficiency of peak power per total costs for electric energy



Normal operating time in percentage compared to total year

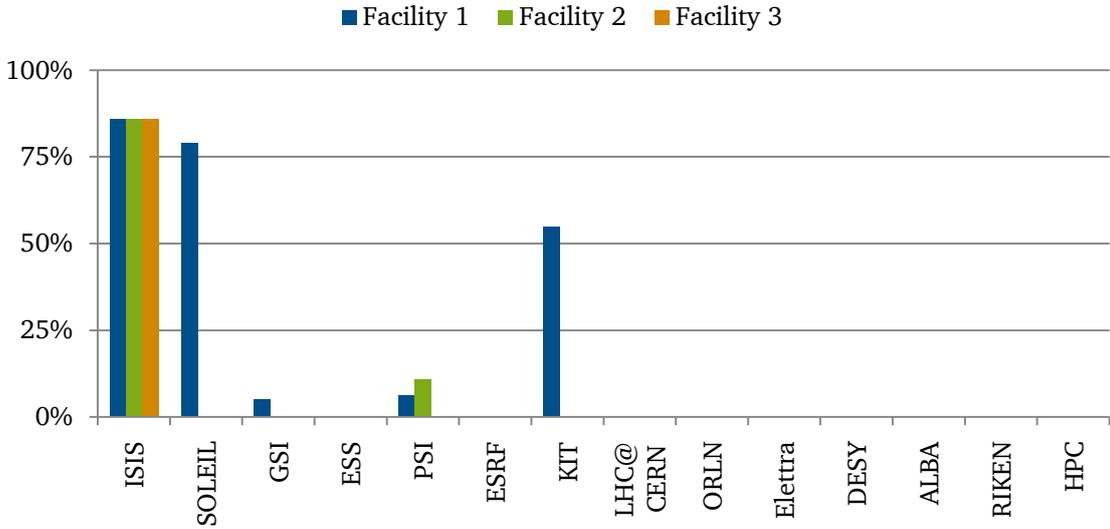


Accelerating time to normal operating time

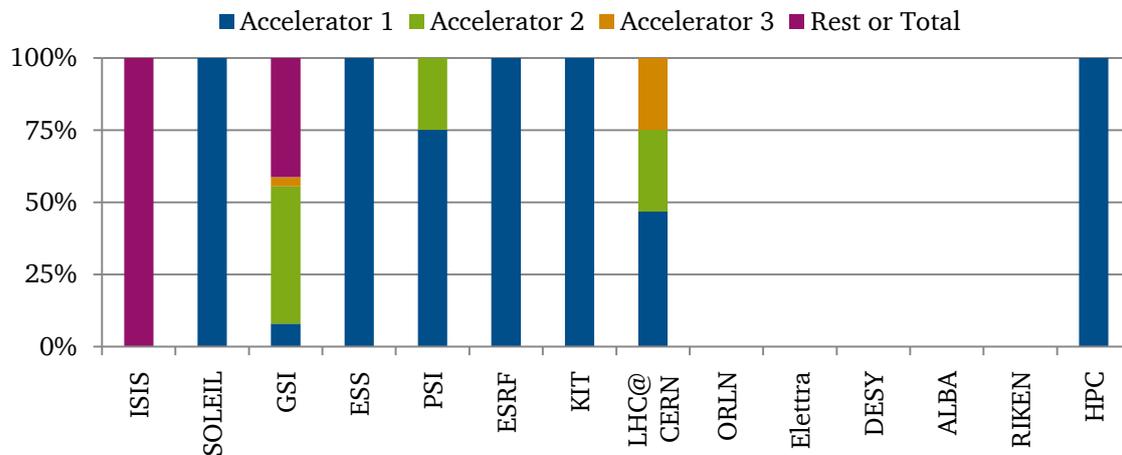




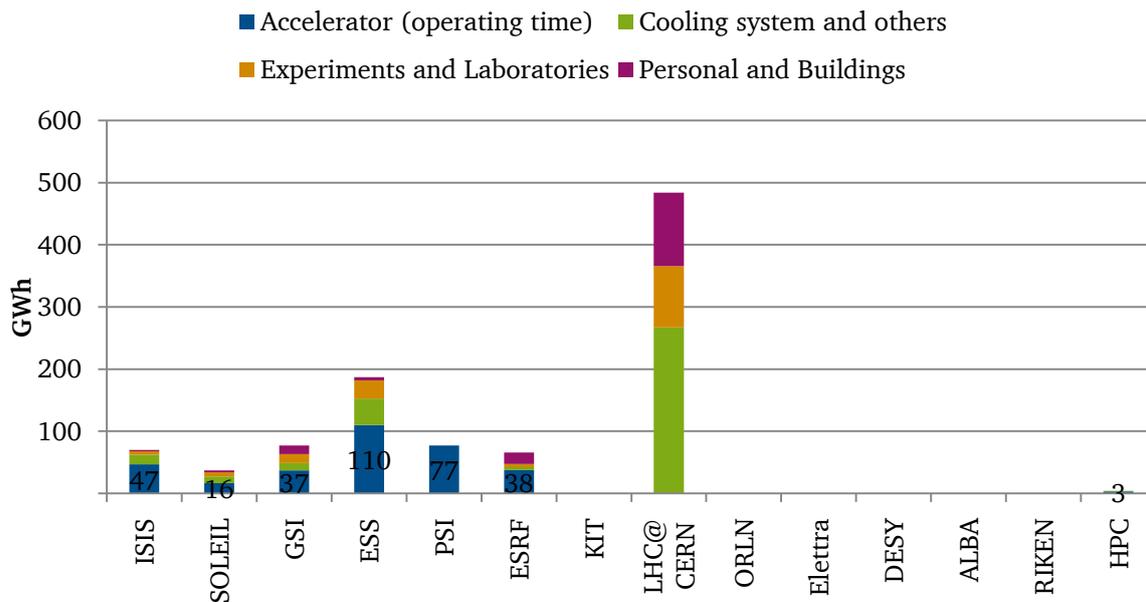
Experiment time to normal operating time



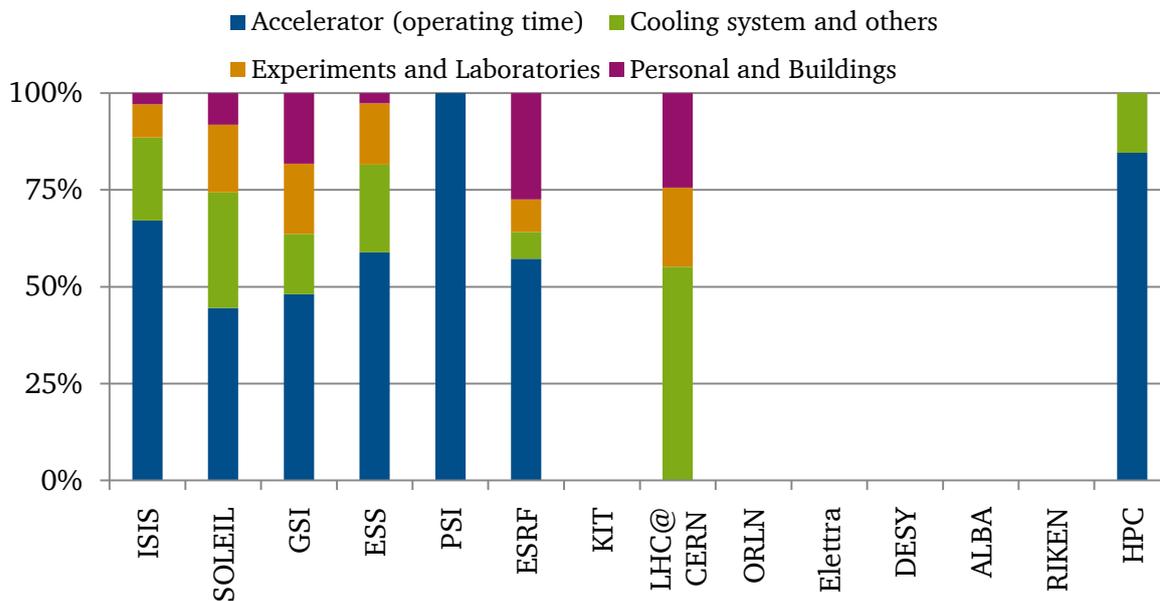
Average energy consumption per accelerator (shares)



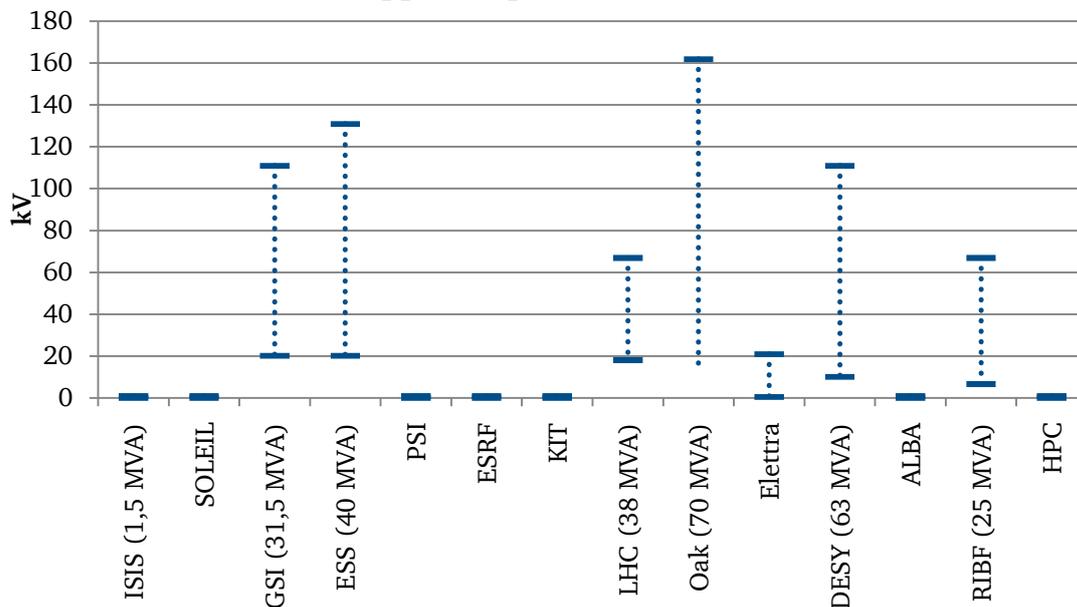
Average energy consumption per facility area



Average electrical energy consumption per facility area (shares)

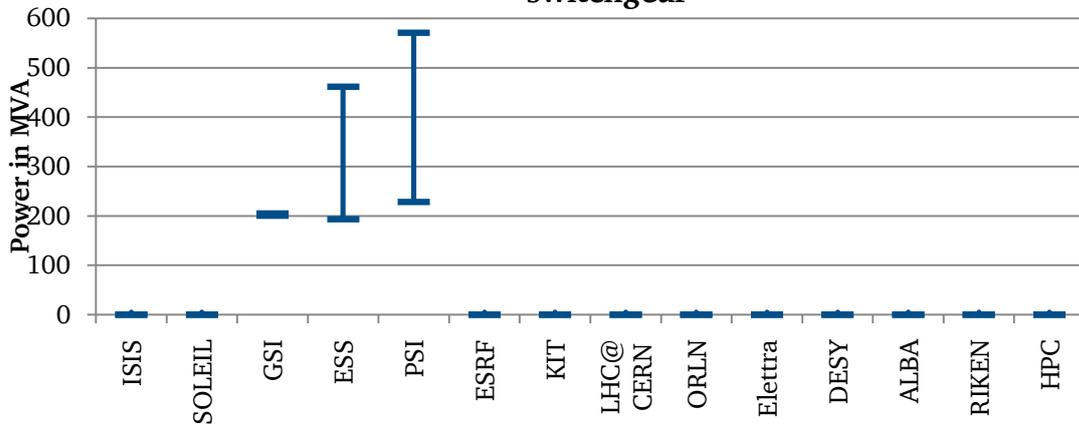


**Transformator primary and secondary voltage
(Apparant power in MVA included)**

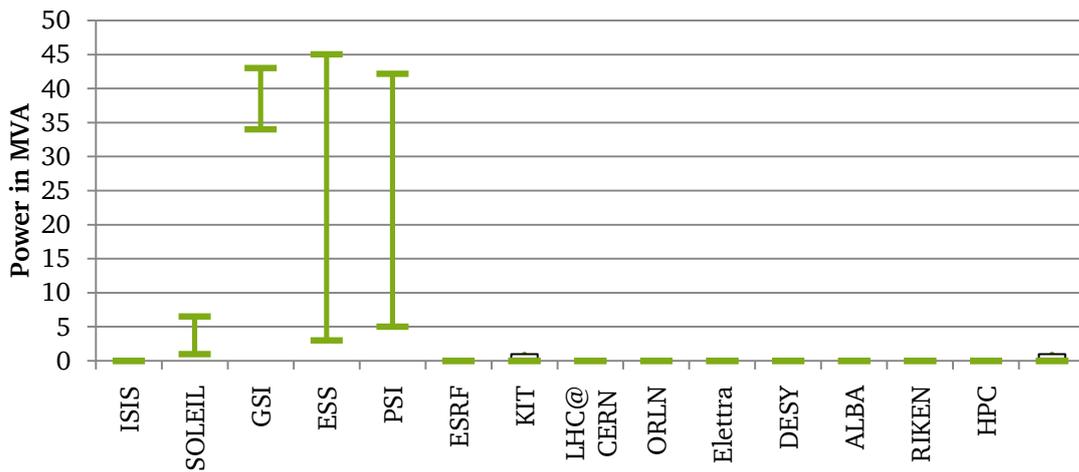


Voltage level of connection to internal grid in kV			
	0,4	11	20
ISIS	LV	MV	
SOLEIL			MV
GSI	LV		MV
ESS			MV
PSI			
			MV
ESRF			
KIT			
LHC@ CERN			
ORLN			
Elettra			
DESY			
ALBA			
RIKEN			
HPC			

Minimum and maximum short-circuit power of MV Main switchgear



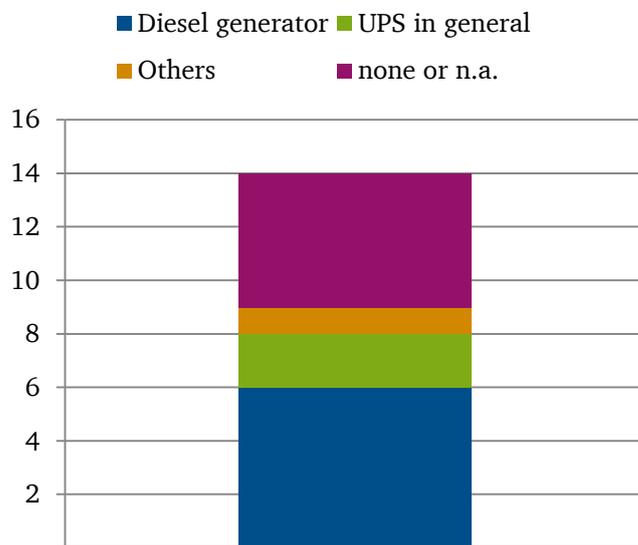
Minimum and maximum power of loads of MV Main switchgear



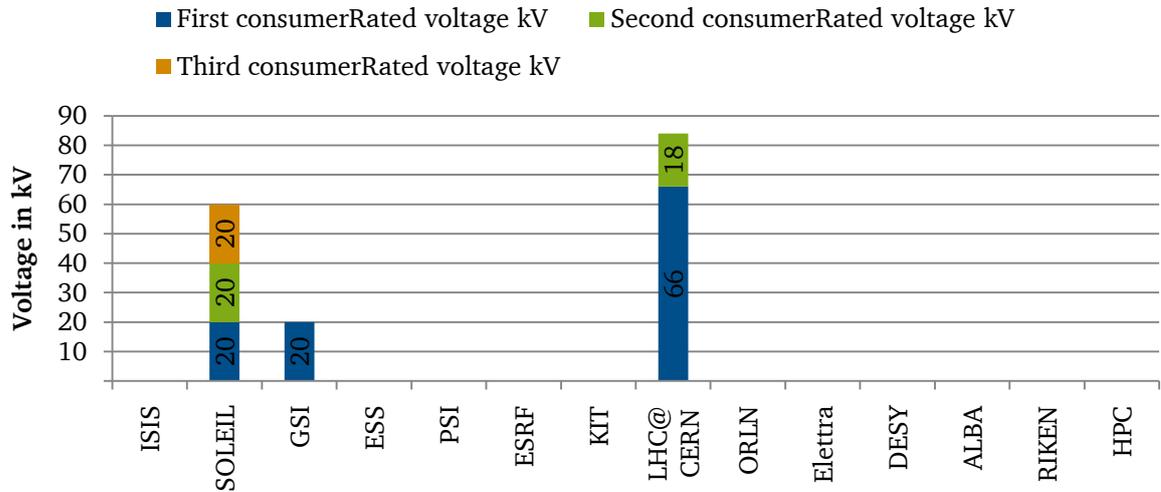


Installed harmonic filter							
	3th	5th	7th	11th	13th	>17th	No filter
ISIS							
SOLEIL							Main MV, LV
GSI	Main MV	Aux MV		3rd MV			
ESS							
PSI	Main MV	Aux MV	3rd MV	Main LV	Aux LV	3rd LV	
ESRF							
KIT							
LHC@ CERN							
ORLN							
Elettra							
DESY							
ALBA							
RIKEN							
HPC							

Type of emergency generator UPS



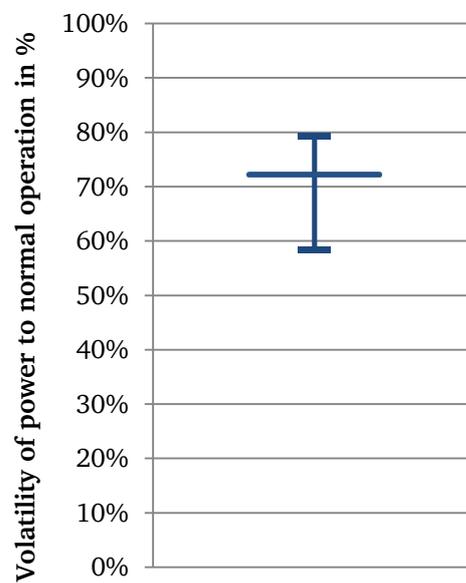
Rated voltage



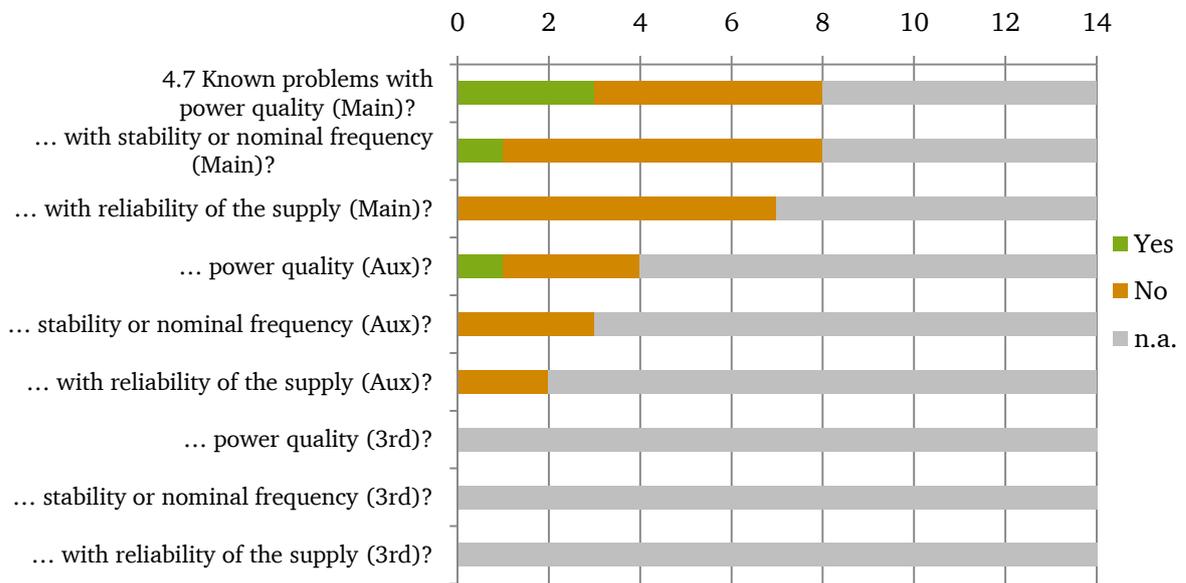
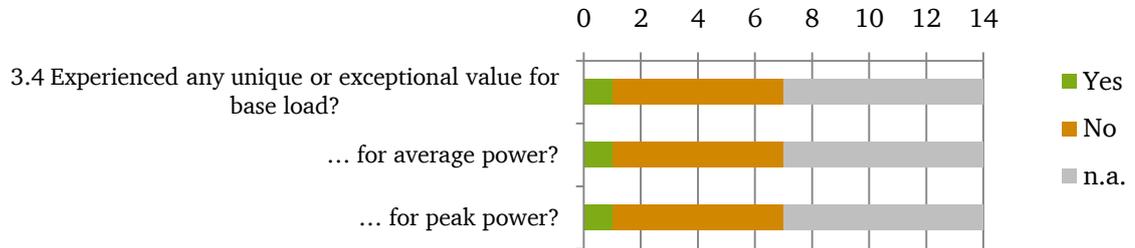
Rated apparent power of consumer in MVA				
	< 1	[1; 1,5]	(1,5; 2,5]	> 2,5
ISIS				
SOLEIL	3rd	2nd, 3rd		
GSI	3rd	2nd		1st
ESS				
PSI				
ESRF				
KIT				
LHC				
Oak				
Elettra				
DESY				
ALBA				
RIBF	1st		2nd	1st
HPC				

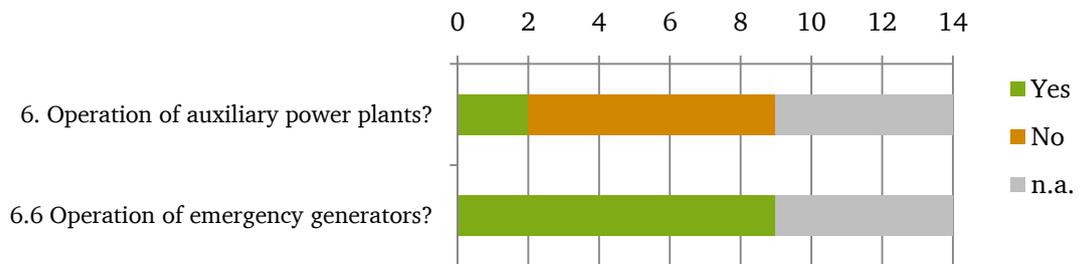
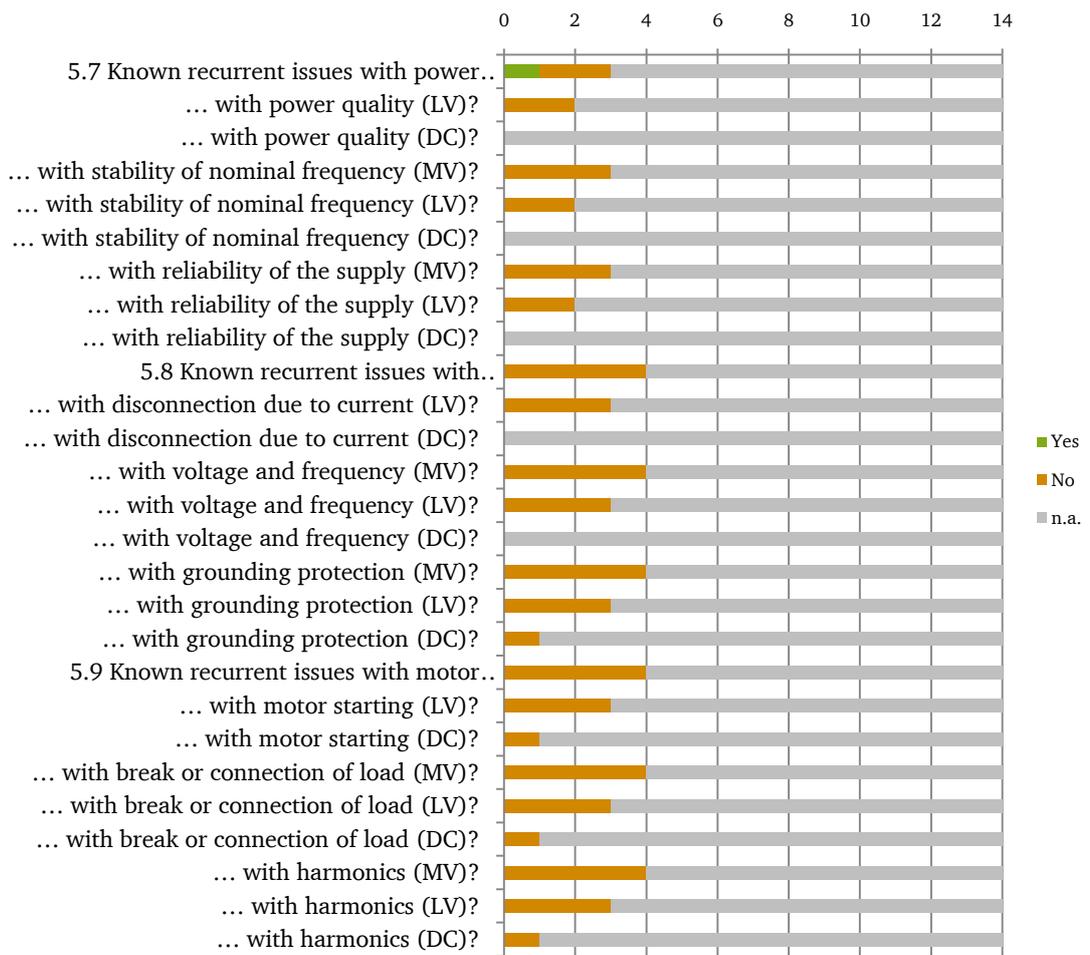
Operating hours per consumer in h				
	[5000; 6000]	(6000; 7000]	(7000; 8000]	(8000; 9000]
ISIS				
SOLEIL		2nd, 3rd		1st
GSI	1st			2nd, 3rd
ESS	1st, 2nd			3rd
PSI				
ESRF				
KIT				
LHC				
Oak				
Elettra				
DESY				
ALBA				
RIBF				
HPC				

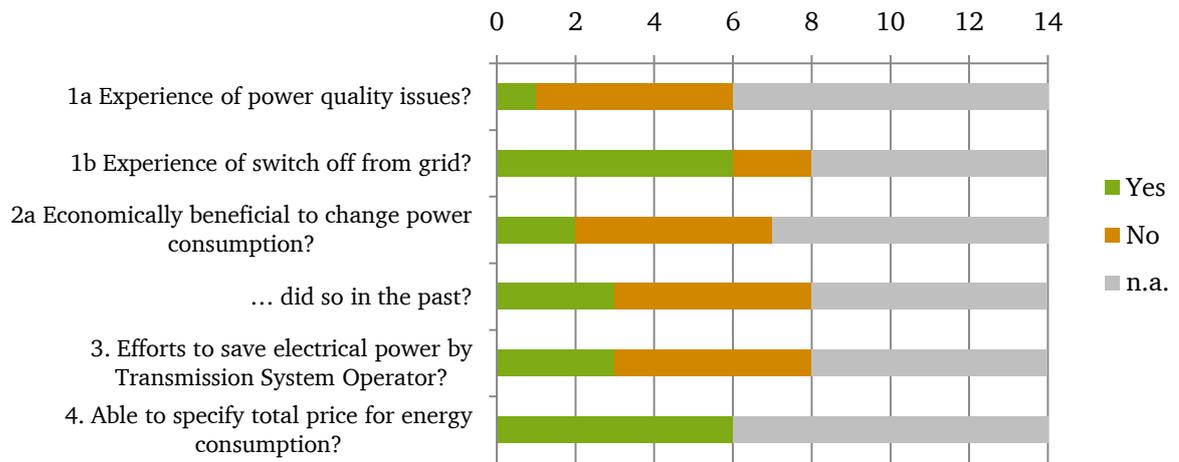
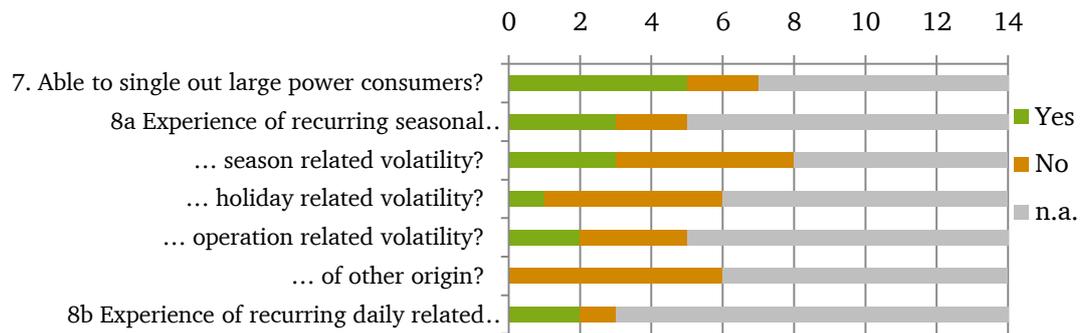
Holiday volatility for GSI



Yes/No Antworten







Literaturverzeichnis

- [1] MERCK: *Klimaschutz und Energieeffizienz*. URL <http://berichte.merck.de/2013/cr-bericht/fortschritt/klimaschutz-und-energieeffizienz.html>. - abgerufen am 2015-06-16
 - [2] FAIR: *FAIR-Partnerländer*. URL <http://www.fair-center.de/de/partner.html>. - abgerufen am 2015-05-18
 - [3] BATOROWICZ, DAMIAN: Private Kommunikation (2015)
 - [4] HANSON, JUTTA: *Vorlesungsskript Sommersemester 2012: „Power Systems“ des Fachgebiets Elektrische Energieversorgung unter Einsatz Erneuerbarer Energien (E5) an der TU Darmstadt, Frau Prof. Dr.-Ing. Jutta Hanson*. Darmstadt
 - [5] WÜBBENHORST, KLAUS: *Benchmarking*. URL <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Definition/benchmarking.html>. - abgerufen am 2015-05-13. — www.gabler.de
 - [6] TELZEROW, MIRJA: Gastvortrag von A.T. Kearney in der Vorlesung „Strategisches Controlling“ im WiSe 2010/2011: Prozessbenchmarking – Praktische Durchführung und Nutzen am Beispiel des A.T. Kearney Global Cost Benchmarking for Telecoms (2011)
 - [7] LORSON, PETER ; QUICK, REINER ; WURL, HANS-JÜRGEN ; BRAUN, STEFFEN: *Grundlagen des Controllings, Wiley-Lehrbuch*. 1. Aufl. Aufl. Weinheim : Wiley-VCH, 2013 — ISBN 9783527505739 9783527505739
 - [8] HARRISON, JOHN ANTHONY ; SCHOLZ, DETLEF: *Elektrische Energieversorgung: im Klartext, Im Klartext*. München : Pearson-Studium, 2004 — ISBN 9783827370990 382737099X 9783827370990
 - [9] BÖGE, W. ; PLABMANN, W. (Hrsg.): *Vieweg-Handbuch Elektrotechnik: Grundlagen und Anwendungen für Elektrotechniker; mit 281 Tabellen*. 4., überarb. Aufl. Aufl. Wiesbaden : Vieweg, 2007 — ISBN 9783834801364 3834801364 9783834801364
 - [10] DEHLI, MARTIN: *Energieeinsparung in Industrie und Gewerbe: praktische Möglichkeiten des rationellen Energieeinsatzes in Betrieben; mit 16 Tabellen, Kontakt & Studium*. Renningen-Malmsheim : expert-Verl, 1998 — ISBN 9783816914976 3816914977
 - [11] FRAKO, KONDENSATOREN- UND ANLAGENBAU GMBH: *Handbuch der Blindstrom-Kompensation*. Teningen, 2002
 - [12] BLESL, MARKUS ; KESSLER, ALOIS: *Energieeffizienz in der Industrie*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2013 — ISBN 978-3-642-36513-3, 978-3-642-36514-0
 - [13] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, DIN: *DIN EN ISO 50001 – Energiemanagementsysteme (2011)*
 - [14] KAHLNBORN, WALTER ; KNOFF, JUTTA ; RICHTER, INA: *Energiemanagement als Erfolgsfaktor – International vergleichende Analyse von Energiemanagementnormen*. Dessau-Roßlau, 2010
 - [15] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, DIN: *Kurzreferat (Deutsch) DIN EN 16231 – Energieeffizienz-Benchmarking-Methodik (2012)*
 - [16] HESSEL, VOLKER: *Energiemanagement: Maßnahmen zur Verbrauchs- und Kostenreduzierung, Förderprogramme, Vorschriften*. Erlangen : Publicis Publ, 2008 — ISBN 9783895783272 9783895783272
 - [17] HILLEMACHER, LUTZ: *Lastmanagement mittels dynamischer Strompreissignale bei Haushaltskunden*. Viersen, 2014
 - [18] SCHMITT, ROBERT ; GÜNTHER, SEBASTIAN ; PERMIN, ELKE: *Industrielles Energiemanagement: Tipps und Tricks zum Einstieg, Pocket Power*. München : Hanser, 2014 — ISBN 9783446437890 3446437894 9783446437890 9783446438415
 - [19] AICHELE, C. ; DOLESKI, O. D. (Hrsg.): *Smart Meter Rollout*. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013 — ISBN 978-3-8348-2439-4, 978-3-8348-2440-0
-

-
- [20] WEIß, MANFRED: *Datenauswertung von Energiemanagementsystemen: Datenerfassung, Messwertdarstellung und -interpretation, Kennwerte zur Energieverteilung, Praxisbeispiele*. Erlangen : Publicis Publ, 2010 — ISBN 9783895783470 9783895783470
- [21] LEIS, STANISLAV: *Bachelorarbeit am Institut für Elektrische Energiesysteme der TU Darmstadt zum Thema: „Untersuchung von Vergütungsmodellen für dezentrale Einspeiseanlagen ins Verteilungsnetz“*. Darmstadt, 2012
- [22] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE, VDI: *Energiemanagement Beispiele* (2013)
- [23] KUSKO, ALEXANDER ; THOMPSON, MARC T.: *Power quality in electrical systems*. New York : McGraw-Hill, 2007 — ISBN 0071470751 9780071470759
- [24] SCHLABBACH, JÜRGEN ; MOMBAUER, WILHELM: *Power Quality – Entstehung und Bewertung von Netzrückwirkungen, Netzanschluss erneuerbarer Energiequellen, VDE-Schriftenreihe - Normen verständlich*. Berlin [u.a.] : VDE-Verl, 2008 — ISBN 9783800729937 9783800729937 3800729938
- [25] STEIN, JOHANNES: *Energieeinsparung durch Blindleistungskompensation*. URL <http://www.zvei.org/Publikationen/Blindleistung.pdf>. - abgerufen am 2015-06-21
- [26] MATTHES, PETER: *Verbesserung der Netzqualität durch aktive harmonische Filter*. URL http://www.lea.tu-darmstadt.de/media/srt/srt_freunde_1/2015-04-30_TU_Darmstadt_Vortrag_aktive_Filter_Druckversion.pdf. - abgerufen am 2015-06-04. — www.tu-darmstadt.de
- [27] POSCH, WOLFGANG: *Ganzheitliches Energiemanagement für Industriebetriebe, Gabler Research Techno-ökonomische Forschung und Praxis*. 1. Aufl. Wiesbaden : Gabler, 2011 — ISBN 9783834925855 3834925853 9783834925855
- [28] LOGIACO, SYLVIE: *Technisches Heft Nr. 184 – Sicherheitsstudien für elektrische Anlagen* (1996)
- [29] SIEMENS, SCHWEIZ AG: *Energieeffizienz in der Gebäudeautomation – Applikationshandbuch für Lüftung und Klima* (2013)
- [30] BECKER, ANETTE: *Lüftungsanlagen, Die neue Meisterprüfung*. 2. Aufl. Würzburg : Vogel-Buchverl, 2011 — ISBN 9783834332547 9783834332547
- [31] TURNER, WAYNE C.: *Energy management handbook*. 5. ed. Aufl. Lilburn, Georgia: Fairmont Press, 2004 — ISBN 0824748123 0881734608 0824748123
- [32] MERZ, HERMANN ; HANSEMANN, THOMAS ; HÜBNER, CHRISTOF: *Gebäudeautomation: Kommunikationssysteme mit EIB/KNX, LON und BACnet; mit 109 Tabellen und 93 Aufgaben*. 2., neu bearb. Aufl. München : Fachbuchverl. Leipzig im Carl-Hanser-Verl, 2010 — ISBN 9783446421523 3446421521 9783446421523
- [33] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND TECHNOLOGIE: *Endenergieverbrauch nach Anwendungsbereichen*. URL <http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/Energiedaten/energiegewinnung-energieverbrauch.html>. - abgerufen am 2015-05-03
- [34] HINTEMANN, RALPH ; SKURK, HOLGER: *Energieeffizienz im Rechenzentrum*. In: LAMPE, F. (Hrsg.): *Green-IT, Virtualisierung und Thin Clients*. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag, 2010 — ISBN 978-3-8348-2624-4, 978-3-8348-9342-0, S. 19–56
- [35] KOLB, JÜRGEN: *Pulsed Power*. URL <http://www.pulsedpower.eu/index.html>. - abgerufen am 2015-05-26. — www.pulsedpower.eu
- [36] GSI: *Fair Baseline Technical Report* (2013)
- [37] ESS: *Proposal for a Sustainable Research Facility* (2013)
- [38] WELLEMAN, ADRIAAN: *Safe landing with pulsed power*. URL https://library.e.abb.com/public/cdc5200af866265ac12574b90036b47e/70-71%203m815_ENG72dpi.pdf. - abgerufen am 2015-05-17. — www.abb.com
- [39] MESYATS, G. A.: *Pulsed power*. New York : Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2005 — ISBN 0306486539 0306486547
-

-
- [40] PELTE, DIETRICH: *Die Zukunft unserer Energieversorgung: eine Analyse aus mathematisch-naturwissenschaftlicher Sicht*. 2. Aufl. Aufl. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2014 — ISBN 9783658058142 3658058145 9783658058142 9783658058159
- [41] STATISTA: Kraft-Wärme-Kopplung in Deutschland – Statista-Dossier (2014)
- [42] EUROSTAT: *Electricity prices for industrial consumers, second half 2014*. URL http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/File:Electricity_prices_for_industrial_consumers,_second_half_2014_%28%C2%B9%29_%28EUR_per_kWh%29_YB15.png#file. - abgerufen am 2015-06-02. — www.ec.europa.eu
- [43] TENNET: Netznutzungsvertrag (2012)
- [44] X-RATES: *X-Rates*. URL <http://www.x-rates.com/average>. - abgerufen am 2015-05-30. — www.x-rates.com
- [45] VSE: *Strompreisentwicklung*. URL http://www.strom.ch/fileadmin/user_upload/Dokumente_Bilder_neu/010_Downloads/Stromgrafiken/Strompreise/VSE_01_Strompreisentwicklung_1990-2014_01.pdf. - abgerufen am 2015-05-11. — www.strom.ch
- [46] EKS: Netznutzungsentgelte (2015)
- [47] GABLER: *Greenwashing*. URL <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Definition/greenwashing.html>. - abgerufen am 2015-05-22. — www.gabler.de
- [48] FAßHAUER, REINHARD: Die Bedeutung von Benchmarking-Analysen für die Gestaltung von Geschäftsprozessen. In: MERTINS, K. ; SIEBERT, G. ; KEMPF, S. (Hrsg.): *Benchmarking: Praxis in deutschen Unternehmen*. Berlin : Springer, 1995 — ISBN 9783642793943 9783642793943, S. 29–47
- [49] PIESKE, REINHARD: Die Auswahl von Benchmarking-Partnern. In: MERTINS, K. ; SIEBERT, G. ; KEMPF, S. (Hrsg.): *Benchmarking*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 1995 — ISBN 978-3-642-79394-3, 978-3-642-79393-6, S. 49–71
- [50] LEIS, STANISLAV: Kommunikation mit Anlagenbetreiber aus der Industrie (2015)
- [51] HINTERBERGER, FRANK: *Physik der Teilchenbeschleuniger und Ionenoptik*. 2. Aufl. Aufl. Berlin : Springer, 2008 — ISBN 9783540752813 3540752811 9783540752813 9783540752820
- [52] WERIN, S.: Energy Recovery Linacs. In: BRANDT, D. (Hrsg.): *CERN Accelerator School – Synchrotron radiation and free-electron lasers*, 2003, S. 227–238
- [53] GSI: *GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung*. URL https://www.gsi.de/de/ueber_uns.htm?nr=%2Fproc%2Fself%2Fenviron%27%22. - abgerufen am 2015-05-01
- [54] GSI: *Höchstleistungsrechenzentrum „Green Cube“ erhält hohe internationale Auszeichnung*. URL <https://www.gsi.de/start/aktuelles/detailseite/2015/06/03/hoechstleistungsrechenzentrum-green-cube-erhaelt-hohe-internationale-auszeichnung.htm>. - abgerufen am 2015-03-08
- [55] ISIS: ISIS Annual review 2013 (2013)
- [56] ELETTRA: *Elettra Systems*. URL <https://www.elettra.trieste.it/lightsources/elettra/gruppi-elettra.html>. - abgerufen am 2015-04-28. — www.elettra.trieste.it
- [57] ELETTRA: FERMI@Elettra – Conceptual Design Report (2007)
- [58] WAYFORLIGHT: *European Synchrotron Radiation Facility*. URL <http://www.wayforlight.eu/eng/synchrotrons/esrf.aspx>. - abgerufen am 2015-05-28. — www.wayforlight.eu
-

-
- [59] MÜLLER, A.: *KIT Lab-Report.* URL www.beschleunigerphysik.de/e77940/e139441/e211799/.../07_KIT.pdf. - abgerufen am 2015-07-01. — www.beschleunigerphysik.de
- [60] PSI: *PSI – Über uns.* URL <http://www.psi.ch/ueber-uns>. - abgerufen am 2015-06-04. — www.psi.de
- [61] RIPP, CHRISTOPHER: Masterthesis: Analyse des elektrischen Energieverbrauchs der GSI (2013)
- [62] DESY: *Über DESY.* URL http://www.desy.de/ueber_desy/desy/index_ger.html. - abgerufen am 2015-05-15. — www.desy.de
- [63] DESY: *PETRA III: A Low Emittance Synchrotron Radiation Source – Technical Design Report (2004)*
- [64] ALBA: *ALBA 2013 – Activity Report (2014)*
- [65] ORNL: *ORNL User Facilities.* URL <http://www.ornl.gov/researchers/user-facilities>. - abgerufen am 2015-05-18. — www.ornl.gov
- [66] RIKEN: *Research Environment.* URL <http://www.riken.jp/en/research/environment/>. - abgerufen am 2015-06-02. — www.riken.jp
- [67] CERN: *CERN Annual Report 2014 (2015)*
- [68] CERN: *CERN Electrical Power Consumption.* URL <http://en.web.cern.ch/sites/en.web.cern.ch/files/ElectricityFlyer2014.pdf>. - abgerufen am 2015-05-22. — www.cern.ch
- [69] HPC: *Hochleistungsrechnen in Hessen.* URL http://www.hpc-hessen.de/de/hessisches-kompetenzzentrum-fuer-hochleistungsrechnen/?no_cache=1. - abgerufen am 2015-05-02. — www.hpc-hessen.de
- [70] MAGYAR, ARMIN ; LORUBIO, GIUSEPPE: *Analysis of European Power Price Increase Drivers.* URL http://www.eurelectric.org/media/131606/prices_study_final-2014-2500-0001-01-e.pdf. - abgerufen am 2015-04-15. — www.eurelectric.org
- [71] FINDLAY, D.: *Supplementary information on response by ISIS to questionnaire on accelerator electrical power consumption and efficiency (2015)*
- [72] CUTLER, ROY I. ; ANDERSON, DAVID ; BARNETT, WILLIAM ; HICKS, JIM ; MIZE, JEFFERY ; MOSS, JOHN ; NORRIS, KEVIN ; PEPLOV, VLADIMIR ; RUST, KENNETH ; U. A.: *Conference Paper: Oak Ridge National Laboratory Spallation Neutron Source Electrical Systems Availability and Improvements (2011)*
- [73] CERN: *LHC Design Report Volume II.* URL <http://ab-div.web.cern.ch/ab-div/Publications/LHC-DesignReport.html>. - abgerufen am 2015-05-05. — www.cern.ch
- [74] ELETTRA: *Energy.* URL <https://www.elettra.trieste.it/it/technology/energy.html>. - abgerufen am 2015-06-05. — www.elettra.trieste.it
- [75] GESCHKA, H. ; HAMMER, R.: *Die Szenario-Technik in der strategischen Unternehmensplanung.* In: HAHN, D. ; TAYLOR, B. (Hrsg.): *Strategische Unternehmensplanung: Stand und Entwicklungstendenzen.* Heidelberg [u.a.] : Physica-Verl., 1986 — ISBN 3790803448 9783790803440
- [76] PSI: *HF-Systeme.* URL <http://www.psi.ch/ef/hf-systeme>. - abgerufen am 2015-06-20. — www.psi.ch
- [77] BUNDESVERBAND KRAFT-WÄRME KOPPLUNG E.V.: *Chance für Wirtschaft und Umwelt – Kraft-Wärme-Kopplung.* URL http://www.bkwk.de/fileadmin/users/bkwk/aktuelles/Broschur/BKWK_Chance_fuer_Wirtschaft_und%20Umwelt_Broschuere_A4_web.pdf. - abgerufen am 2015-05-19. — www.bkwk.de
- [78] GSI: *Über uns.* URL https://www.gsi.de/de/ueber_uns.htm?nr=%2Fproc%2Fself%2Fenviron%27%22. - abgerufen am 2015-05-04. — www.gsi.de
-

-
- [79] GSI: *Geplante Beschleunigeranlage FAIR.* URL
https://www.gsi.de/de/start/fair/aufbau_der_fair_beschleunigeranlage.htm?nr=%2Fproc%2Fself%2Fenvir. - abgerufen am 2015-05-18. — www.gsi.de
- [80] DANARED, HÅKAN: Presentaion on: The ESS Accelerator (2014)
-