

Universität Augsburg

Institut für Physik

Didaktik der Physik

Schriftliche Hausarbeit
zum ersten Staatsexamen für das Lehramt an Gymnasien

Thema:
„Die Energieversorgung einer Stadt im Physikunterricht
am Beispiel Augsburg“

eingereicht von: Ramona Merkle

eingereicht im: März 2013

Fach: Physik Didaktik

Dozent: Prof. Dr. Thomas Wilhelm

Vorwort

Zunächst soll klargestellt werden, dass in der vorliegenden Arbeit, um ein flüssiges Lesen und Schreiben zu gewährleisten, Begriffe wie beispielsweise Schüler für beide Geschlechter, also für Schüler und Schülerinnen stehen. Die Ausrichtung der Arbeit ist selbstverständlich geschlechtsneutral.

Die Quellen werden über Fußnoten angegeben, wobei die Fußnoten, die sich ausschließlich auf einen Satz beziehen, am Ende dieses Satzes vor dem Punkt stehen. Wird eine Quelle in einem ganzen Absatz mehrmals zitiert, so steht die zugehörige Fußnote am Ende des Absatzes. Direkte Zitate stehen in Anführungszeichen und sind durch *kursive* Schrift besonders hervorgehoben. Die Fußnoten werden in Kurzform angegeben und setzen sich, soweit möglich, aus Autor, Erscheinungsjahr und Seitenangabe zusammen. Ausführlich werden sie im Literaturverzeichnis im Anhang genannt. Beim Zitieren von Quellen aus dem Internet wird die vollständige URL angegeben, deren letztes Aufrufdatum der 3. März 2013 ist. Falls möglich, wird dabei ebenfalls ein Autor genannt und bei PDF-Dokumenten die jeweilige Seite, von der zitiert wurde. Die Angabe der Quellen für Abbildungen erfolgt in einem gesonderten Bildnachweis im Anhang, wobei dort nicht aufgeführte Darstellungen selbst angefertigt wurden.

Als Vorbereitung für diese Arbeit und zur Orientierung über die Thematik, war es mir möglich, ein Praktikum bei den Stadtwerken Augsburg zu absolvieren. So konnte ich einen Einblick in ein regionales Energieversorgungsunternehmen gewinnen und mir einen Überblick verschaffen. Ich war dabei hauptsächlich im Bereich Energieerzeugung und -einkauf der Stadtwerke Augsburg Energie GmbH. Da ich dort mit sehr vielen verschiedenen Personen zu tun hatte und die Kommunikation nicht immer offiziellen Charakter hatte, beziehen sich nicht mit Quellenangaben versehene Erkenntnisse über die Augsburger Energieversorgung ausnahmslos auf dieses Praktikum. Ich durfte oft einfach einen der dort Beschäftigten bei seiner Arbeit begleiten. Die Stadtwerke Augsburg werden im Text gelegentlich mit „swa“ abgekürzt.

Des Weiteren sei bemerkt, dass es in der Energietechnik gängige Ausdrücke gibt, die physikalisch nicht exakt oder sogar falsch sind. Derartige Begriffe, die nicht sinnvoll ersetzt werden können, werden in dieser Arbeit bewusst verwendet. Wichtige Hinweise dazu finden sich im Abschnitt 3.2 .

Abschließend sei noch bemerkt, dass die Auswahl der behandelten Aspekte der Energieversorgung in dieser Arbeit vor allem auf die Gegebenheiten in Augsburg ausgerichtet ist. Ohne diese Einschränkung würde der Rahmen der Arbeit gesprengt. Außerdem ist es für Schüler am interessantesten, über die konkrete Versorgungslage ihrer Region Bescheid zu wissen. Dennoch ist vor allem der Teil zu den physikalischen und technischen Grundlagen allgemein genug gehalten, um ihn auch auf andere Regionen zu beziehen. Allerdings erfolgte die Themenauswahl der vertieften Teilaspekte nach dem Gesichtspunkt der in Augsburg bestehenden großen Anlagen, nämlich einer Gasturbine, Wasserkraftwerken, Heizwerken und Dampfheizkraftwerken, die mit verschiedenen Brennstoffen

befeuert werden. Des Weiteren wurde bewusst auf Windkraft- und Photovoltaikanlagen verzichtet, da darüber bereits ausführliche Literatur besteht. Im Übrigen erfolgt keine explizite Unterscheidung der beiden Landkreise Augsburg Land und Augsburg Stadt. Auch die angrenzenden Landkreise werden, falls passend, miteinbezogen, da die Grenzen der Versorgungsgebiete einzelner Kraftwerke nicht immer mit den Landkreisgrenzen übereinstimmen. Dennoch beschäftigt sich die Arbeit, abgesehen von einigen Ausblicken in die „Region Augsburg“, hauptsächlich mit dem Versorgungsgebiet der Stadtwerke Augsburg, das in etwa mit dem Gebiet der Stadt Augsburg übereinstimmt. Außerdem soll noch darauf hingewiesen werden, dass vorwiegend auf die, für die Versorgung in Augsburg wichtigsten, Energiearten bzw. Energieträger Strom, Fernwärme und Erdgas eingegangen wird.

Die Arbeit beginnt mit einer Einführung in das Thema. Daran schließt ein Kapitel an, in dem die physikalischen und technischen Grundlagen diskutiert werden. Nachfolgend werden didaktische Aspekte beleuchtet und fünf Vorschläge für Unterrichtsstunden etwas genauer ausgeführt.

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung.....	9
1.1 Motivation.....	9
1.2 Eingliederung in den Lehrplan.....	10
1.3 Historisches zur Energieversorgung einer Stadt (Beispiel Augsburg).....	11
2 Physikalische und technische Grundlagen.....	14
2.1 Grundlegendes zur Physik.....	14
2.1.1 Energieformen und Energieumwandlungsketten.....	14
2.1.2 Energieerhaltung und Erster Hauptsatz der Thermodynamik.....	15
2.1.3 Enthalpie.....	15
2.1.4 Zustandsänderung idealer Gase.....	15
2.1.5 irreversible Vorgänge und Wirkungsgrad.....	16
2.1.6 Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik und Entropie.....	17
2.1.7 Kreisprozesse (Carnot-, Dampfkraft- und Gasturbinenprozess).....	17
2.1.8 Das h-s- bzw. Mollier-Diagramm für Wasser.....	21
2.2 Grundlegendes zur Energieversorgung.....	23
2.2.1 Stromnetz und Spannungsebenen.....	23
2.2.2 Die Netzfrequenz des Stromnetzes.....	25
2.2.3 Grund-, Mittel- und Spitzenlast.....	26
2.2.4 Regelzonen und Regelleistung (Regelenergie) des Stromnetzes.....	27
2.2.5 Netzlastprognosen für Strom.....	29
2.2.6 Bedarfsprognosen für Wärme und Gas.....	33
2.2.7 Fernwärme und Fernwärmenetz.....	33
2.2.8 Erdgasnetz	36
2.2.9 Energiespeicher.....	36
2.3 Kraftwerkstechnik und Kraftwerkstypen zur Energieerzeugung.....	39
2.3.1 Energiequellen.....	39
2.3.2 Energieumwandlung in Kraftwerken.....	40
2.3.3 Energieverbrauch bei der Energiegewinnung.....	41
2.3.4 Anforderungen an Kraftwerke im Verbundnetz und Regelung.....	41
2.3.5 Dampfkraftwerke.....	42
2.3.6 Verbrennungstechnik und Feuerungsanlagen.....	44

2.3.7 Dampferarten, Dampferzeuger, Überhitzung und Kondensator.....	45
2.3.8 Turbinen.....	47
2.3.9 Erzeugung elektrischer Energie und Frequenz durch Generatoren.....	49
2.3.10 Speisewasserversorgung.....	50
2.3.11 Kraft-Wärme-Kopplung (KWK).....	50
2.3.12 Biomassekraftwerke.....	51
2.3.13 Nutzung der Abwärme einer Müllverbrennungsanlage.....	53
2.3.14 Heizwerke.....	55
2.3.15 Gasturbinenkraftwerke (GT-Kraftwerke).....	55
2.3.16 Wasserkraftwerke (Laufwasserkraftwerke).....	57
2.3.17 Weitere Kraftwerkstypen.....	59
2.4 Überblick über die Energieversorgung in der Stadt Augsburg.....	61
2.5 Regionale Energieversorgung in der Zukunft.....	63
2.5.1 Bau eines Wasserkraftwerks am Hochablass.....	63
2.5.2 Neue Speichertechnologie - „Power to Gas“.....	65
2.5.3 Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (KWKK).....	68
2.5.4 Nutzung von Bioabfällen zur Energiegewinnung.....	70
2.5.5 Smart Grid – Intelligentes Stromnetz.....	70
3 Didaktische Überlegungen.....	72
3.1 Vorkenntnisse der Schüler aus dem regulären Unterricht.....	72
3.2 Irreführende, aber gebräuchliche Begriffe in der Energiewirtschaft.....	73
3.3 Bemerkung zur Einheit Wattstunden (Wh).....	74
3.4 Das Thema als wissenschaftspropädeutisches Seminar in der Oberstufe.....	76
3.5 Außerschulische Lernorte und Betriebserkundungen in Kraftwerken.....	77
3.6 Unterrichtsvorschlag zur Netzfrequenz bei der Stromversorgung.....	79
3.6.1 Allgemeines zum Thema.....	79
3.6.2 Vorschlag für einen Stundenverlauf.....	79
3.6.3 Erweiterungsmöglichkeiten.....	80
3.7 Unterrichtsvorschlag zur Fernwärme.....	83
3.7.1 Allgemeines zum Thema.....	83
3.7.2 Vorschlag für einen Stundenverlauf.....	83
3.7.3 Erweiterungsmöglichkeiten.....	85

3.8 Unterrichtsvorschlag zur Funktionsweise von Dampfkraftwerken.....	86
3.8.1 Allgemeines zum Thema.....	86
3.8.2 Vorschlag für einen Stundenverlauf.....	86
3.8.3 Versuch zu Dampfturbine und Dampfkessel.....	89
3.8.4 Erweiterungsmöglichkeiten.....	93
3.9 Unterrichtsvorschlag zu Laufwasserkraftwerken.....	94
3.9.1 Allgemeines zum Thema.....	94
3.9.2 Vorschlag für einen Stundenverlauf.....	94
3.9.3 Versuch zur Wasserturbine.....	96
3.9.4 Erweiterungsmöglichkeiten.....	98
3.10 Unterrichtsvorschlag zur regionalen Energieversorgung in der Zukunft.....	99
3.10.1 Allgemeines zum Thema.....	99
3.10.2 Vorschlag für eine Unterrichtseinheit.....	99
3.10.3 Erweiterungsmöglichkeiten.....	100
4 Schlusswort.....	101
5 Quellenverzeichnisse.....	102
5.1 Literaturverzeichnis.....	102
5.1.1 Gedruckte Literatur.....	102
5.1.2 Internetseiten.....	103
5.2 Abbildungsverzeichnis.....	107
5.3 Bildnachweis.....	109
6 Danksagung.....	112
7 Selbstständigkeitserklärung.....	114

1 Einführung

1 Einführung

Hier soll zunächst die Motivation, das Thema Energieversorgung einer Stadt im Physikunterricht zu behandeln, dargelegt werden. Anschließend wird die Verortung im Lehrplan erläutert und nachfolgend die historische Entwicklung der Energieversorgung in Augsburg besprochen.

1.1 Motivation

Die Diskussion um die Zukunft der Energieversorgung ist heutzutage in den Medien allgegenwärtig. An Begriffen wie Energiewende, Erneuerbare oder Regenerative Energiequellen, Nachhaltigkeit, Klimawandel, Schwinden fossiler Energiequellen, Atomausstieg etc. kommt man, bei aktiver Teilnahme an der heutigen Gesellschaft, nicht vorbei.

Betrachtet man das Thema Energieversorgung einer Stadt aus der Perspektive von Wolfgang Klafkis Didaktischer Analyse, so ist die Frage nach der Gegenwartsbedeutung des Inhalts leicht zu beantworten: Jeder Mensch hat in unserer Gesellschaft, bewusst oder unbewusst, täglich mit Energie zu tun, beispielsweise beim elektrischem Licht, bei der Beheizung von Räumen oder beim Kochen. Außerdem ist die Wahrscheinlichkeit groß, dass im Umfeld der Schüler jemand eine Photovoltaikanlage auf dem Dach installiert hat oder ein Haus nach den neuesten Richtlinien zur Energieeffizienz baut. Da die fossilen Energiequellen zur Neige gehen und auch der Atomausstieg beschlossen ist, wird die Suche nach Alternativen ein beherrschendes Thema der nächsten Jahre sein, womit auch die Zukunftsbedeutung des Themas für die Schüler gegeben ist. Aus dem Rahmenthema müssen exemplarisch Aspekte herausgegriffen werden, beispielsweise die Funktionsweise eines Kraftwerkstyps, stellvertretend für alle anderen Arten von Kraftwerken. Die Zugänglichkeit des Inhalts ist dadurch gegeben, dass Gesichtspunkte der Energieversorgung in den Medien omnipräsent sind und jeder täglich mit Energie zu tun hat. Zur Struktur des Inhalts ist zu sagen, dass das Rahmenthema Energieversorgung einer Stadt komplex ist und viele Teilaspekte beinhaltet, die unterschiedlich tief behandelt werden können.¹

Außerdem kann man davon ausgehen, dass das Thema für die Schüler motivierend ist, da die Relevanz des Gelernten erkennbar und ein unmittelbarer Bezug zur Lebenswelt der Schüler vorhanden ist. Motivation für technische Belange ist nicht zuletzt deshalb wünschenswert, weil auf dem Arbeitsmarkt zunehmend Kräfte mit naturwissenschaftlicher Ausbildung gewünscht sind.

Laut dem Fachprofil im Lehrplan des Gymnasiums, muss der Physikunterricht *„den Heranwachsenden durch Vermittlung naturwissenschaftlicher Grundkenntnisse geeignete Orientierungshilfen mit auf den Weg (...) geben“*². Denkt man hier an die zunehmende Dezentralisierung der Energieversorgung und daran, dass nun auch in vielen kleineren Gemeinden eine Diskussion nach dem Bau von zum Beispiel einer Windkraftanlage oder eines Biogaskraftwerks aufkommt, so liegt die Bedeutsamkeit dessen auf der Hand, dass die Schüler als mündige Bürger einer demokratischen Ge-

1 Wiater, 2011, S. 63f

2 <http://www.isb-gym8-lehrplan.de/contentserv/3.1.neu/g8.de/index.php?StoryID=26382>

1.1 Motivation

sellschaft zu rationalen, wissenschaftlich begründbaren Entscheidungen fähig sind. Das Wissen um Zusammenhänge und Einzelaspekte der Energieversorgung soll die Schüler befähigen, Projekte auf diesem Gebiet kritisch beurteilen, bewerten, einordnen und gegebenenfalls sogar darüber entscheiden zu können.

1.2 Eingliederung in den Lehrplan

Die folgenden Bemerkungen zur Eingliederung des Themas in den Lehrplan beziehen sich alle auf den aktuellen Lehrplan des ISB für das achtjährige Gymnasium im Fach Physik.

Im Fachprofil wird betont, dass der Physikunterricht Grundlagen zum Verstehen technischer Zusammenhänge vermitteln soll, nicht zuletzt, damit die Schüler mit Informationen umgehen und diese auch bewerten können. Außerdem sollen gesellschaftlich wichtige Fragen, wie zum Beispiel auch die nach der Versorgungssicherheit im Bereich der Energie besprochen werden. Eine Behandlung des Themas Energieversorgung passt also gut zum Profil des Faches Physik.³

Sowohl von den Vorgaben des Jahrgangsstufen-Lehrplans, als auch von den Vorkenntnissen der Schüler her gesehen, eignet sich die Thematisierung der Energieversorgung besonders gut für die 8. und 9. Jahrgangsstufe. Für den Physikunterricht der 8. Klasse sieht der Lehrplan unter dem Inhalt „*Elektrische Energie*“ einen „*Einblick in die Energieversorgung*“ vor, wobei vor allem die Energiequellen, der Einfluss auf die Umwelt, das Energieverhaltensverhalten und ein Ausblick in die Zukunft behandelt werden sollen⁴. Darüber hinaus gibt es im Lehrplan der 8. Jahrgangsstufe noch den Vorschlag, im Profilbereich des Naturwissenschaftlich-technologischen Gymnasiums (NTG) das Thema „Energietechnik“ durchzunehmen, das unter anderem die Aspekte „*Aufbau und Modelle verschiedener Kraftwerkstypen, Turbinen, Energie- und Umweltproblematik*“ einschließt⁵. In der 9. Klasse wird das Thema „*Elektrik*“ behandelt, unter das das Prinzip der Induktion und die Funktionsweisen von Elektromotor bzw. Generator sowie Transformator fallen⁶. Auch hier macht insbesondere der Profilbereich des NTG unter dem Überbegriff „*Elektrotechnik*“ Vorschläge zu Fragen, die die Energietechnik betreffen, wie „*regionale und globale Energieversorgung, Hochspannungstechnik zur Energieübertragung, Kraftwerkstechnik, Einsatz regenerativer Energiequellen, Kraft-Wärme-Kopplung (...)*“⁷. Des Weiteren ist es auch sehr gut denkbar, die Energieversorgung zum Thema eines W-Seminars in der Oberstufe zu machen. Konkreteres hierzu findet sich im Kapitel 3 .

3 <http://www.isb-gym8-lehrplan.de/contentserv/3.1.neu/g8.de/index.php?StoryID=26382>

4 <http://www.isb-gym8-lehrplan.de/contentserv/3.1.neu/g8.de/index.php?StoryID=26437>

5 <http://www.isb-gym8-lehrplan.de/contentserv/3.1.neu/g8.de/index.php?StoryID=26437>

6 <http://www.isb-gym8-lehrplan.de/contentserv/3.1.neu/g8.de/index.php?StoryID=26438>

7 <http://www.isb-gym8-lehrplan.de/contentserv/3.1.neu/g8.de/index.php?StoryID=26438>

1.3 Historisches zur Energieversorgung einer Stadt (Beispiel Augsburg)

1.3 Historisches zur Energieversorgung einer Stadt (Beispiel Augsburg)

Der Beginn einer systematischen Energieversorgung fand im 19. Jahrhundert statt. Dazu trug maßgeblich die Industrialisierung und eine Reihe neuer Erfindungen bei. Zunächst wurde, hauptsächlich zu Beleuchtungszwecken, mit einer Gasversorgung in den größeren Städten begonnen. In Deutschland nahm die erste Gasanstalt und Straßenbeleuchtung ihren Betrieb 1825 in Hannover auf. Zu diesem Zeitpunkt hieß das Gas „Leuchtgas“ und wurde mittels Verkoksung von Kohle produziert. Die Speicherung und Druckhaltung des Gases erfolgte in großen Türmen, sogenannten Gasometern. Mit der Erfindung des Glühstrumpfes 1885 wurde die Gasbeleuchtung so gut, dass sich die elektrische Beleuchtung zunächst nicht etablieren konnte. Schließlich nahm die Bedeutung des Gases für das Kochen und Heizen noch zu und das „Leuchtgas“ wurde, nicht zuletzt zu Vermarktungszwecken, in „Stadtgas“ umbenannt. Ab der Mitte des 20. Jahrhunderts setzte sich nach und nach die Nutzung von Erdgas durch, das einen wesentlich höheren Heizwert hat^{8, 9}

Etwas später als die Gas- setzte die Stromversorgung ein. Durch Erfindungen, wie das Telefon, wurde eine effektive Erzeugung elektrischer Energie erstrebenswert. Mit Siemens Entdeckung des elektrodynamischen Prinzips im Jahre 1866 wurde der Weg für den Gleichstrommotor geebnet. Ab etwa 1890 setzten sich dann zunehmend Wechselstrommotoren durch. Diese Motoren lösten sehr schnell die Dampfmaschinen mit Transmission in der Industrie ab, da ein Antrieb mit Strom flexibler war, als mit einem Riemengetriebe. Zunächst wurden die Motoren mit Dampfmaschinen und Wasserturbinen betrieben, bis sich ab circa 1900 die Dampfturbine als Antrieb für die Generatoren durchsetzte. Zugleich nahm die elektrische Beleuchtung an Bedeutung zu und der Aufbau eines Netzes wurde notwendig.¹⁰

Die Versorgung mit thermischer Energie, in Form von heißem Wasser oder Dampf, resultierte aus dem Bestreben, die Wärmeverluste bei der Stromerzeugung sinnvoll zu nutzen. Wobei die Idee der Abwärmenutzung wesentlich älter ist. Schon 1784 verwendete der Erfinder der Dampfmaschine, James Watt, zur Raumbeheizung den Abdampf einer Dampfmaschine. Die erste Fernwärmeversorgung erfolgte mit Dampf als Träger der thermischen Energie. In Deutschland wurde die erste Fernwärmeleitung 1924 in Braunschweig installiert. Diese Art der Beheizung hatte den Vorteil, dass der Schadstoffausstoß in Großstädten und die Brandgefahr reduziert wurden.¹¹

Auch in Augsburg gewann die Energieversorgung im 19. Jahrhundert zunehmend an Bedeutung. Da schon lange vor der Industrialisierung im Bereich des Hochablass Bäche vom Lech abgezweigt und durch die Stadt geleitet wurden, entwickelte sich entlang dieser Gewässer bereits ab dem Mittelalter Gewerbe. So wurde die Wasserkraft der städtischen Kanäle im Jahr 1761 von 78 Mühlwerken mit insgesamt 163 Wasserrädern genutzt. Die Lage von Augsburg auf einer Erhebung vor dem Zusam-

8 Leuschner, <http://www.udo-leuschner.de/pdf/gasversorgung.pdf>, S. 22

9 Leuschner, <http://www.udo-leuschner.de/pdf/gasversorgung.pdf>, S. 5ff

10 Heuck, 2010, S. 1f

11 <http://www.bs-energy.de/engagement/engagement-fuer-nachhaltigkeit/unsere-fernwaerme/geschichte-der-fernwaerme/>

1.3 Historisches zur Energieversorgung einer Stadt (Beispiel Augsburg)

menfluss von Lech und Wertach machte die Stadt schließlich auch als Standort für die Industrie interessant. Die Stadtbäche werden am Hochablass aus dem Lech ausgestaut und fließen im Bereich der Wolfzahnau wieder in den Lech bzw. die Wertach. Dabei beträgt die potentielle Leistung des abgezweigten Lechwassers 9.000 kW. Zum einen wegen der großen, verfügbaren Wassermengen, zum anderen wegen dem Gefälle von rund 26 Metern zwischen Hochablass und Wolfzahnau. So siedelten sich im 19. Jahrhundert zahlreiche Textil-, Papier- und Maschinenfabriken entlang der Augsburger Stadtkanäle an. Anfangs erzeugten die Fabriken jeweils selbst ihre zur Produktion benötigte Energie, zunächst mit Wasserkraft oder Dampfmaschinen, später mit durch Turbinen der Lechbäche oder Dampfmaschinen in großen Kesselhäusern betriebenen Generatoren. Den Anfang bei der Erzeugung elektrischer Energie machte die Maschinenfabrik Augsburg Nürnberg (MAN) im Jahr 1882. 1898 fuhr die erste Straßenbahn mit Strom, anstatt wie vorher mit Pferdegespann. Das erste Wasserkraftwerk zur Stromerzeugung entstand 1901 in Gersthofen im Norden von Augsburg, hauptsächlich zur Versorgung des Chemiewerks Hoechst. Öffentliche Stromversorgung aus einem Netz war in Augsburg allerdings erst ab 1902 von einer Vorgängerfirma der heutigen LEW verfügbar.^{12 13}

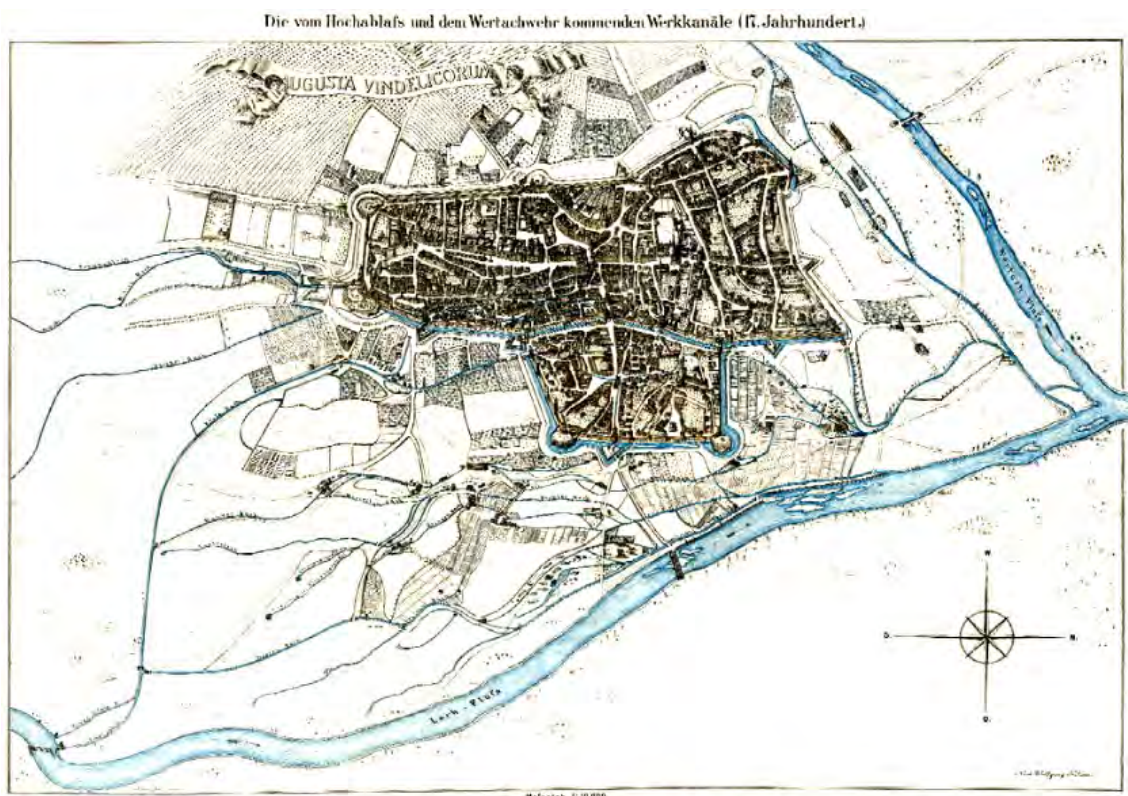


Abbildung 1: Augsburg im 17. Jahrhundert mit Lech (unten), Wertach (oben rechts) und ihren vielen Seitenkanälen

12 Ruckdeschel, 1984, S. 64ff

13 Ganser

1.3 Historisches zur Energieversorgung einer Stadt (Beispiel Augsburg)

Bei der Versorgung mit Gas war Augsburg relativ fortschrittlich und hatte nach Nürnberg 1848 als zweite Stadt in Bayern eine Straßenbeleuchtung mit Gas. 1848 wurde auch das erste und 1863 das zweite Gaswerk gebaut. Das heute noch erhaltene Gaswerk in Augsburg-Oberhausen entstand zwischen 1913 und 1915. Wegen der Dominanz der Gasproduktion wurde die Straßenbeleuchtung auch erst 1915 „elektrifiziert“. Im zuletzt gebauten Gaswerk wurde noch bis 1978 „Leuchtgas“ produziert. Auf dem Gelände befinden sich vier verschiedene noch erhaltene Gasbehälter. Der imposanteste ist 86 Meter hoch, wurde 1953 gebaut und ist ein Scheibengasbehälter. Er funktioniert wie ein riesiger Zylinder, in dem ein kolbenförmiger Deckel je nach Füllung steigt oder sinkt und so durch sein Gewicht für den konstanten Druck des Gases sorgt. 1973 wurde Augsburg zum ersten Mal mit russischem Erdgas beliefert.^{14 15}



Abbildung 2: Das Gaswerk in Augsburg Oberhausen 1932 von oben, rechts sind zwei Gasometer zu erkennen

Die Stadtwerke Augsburg gingen 1937 aus dem für die Stromversorgung im Stadtgebiet zuständigen städtischen Betriebsamt hervor. Im Jahr darauf wurde auch noch die Wasserversorgung und die Straßenbahn dazugenommen.¹⁶

Die erste Fernwärmeleitung in Augsburg entstand 1954 zunächst, um städtische Gebäude zu versorgen. Bald danach kamen auch private Kunden hinzu. 1966 und 1977 wurde jeweils eine Dampfturbine installiert und damit zusätzliche Stromerzeugung möglich. Dadurch wurde aus einem ursprünglichen Heizwerk zur Erhitzung von Fernwärmewasser ein Heizkraftwerk mit Kraft-Wärme-Kopplungsverfahren. 1987 wurden das Heizwerk Süd und West in Betrieb genommen. Eine Übernahmestation für Fernwärme kam Ende der 90er Jahre bei der Abfallverwertung hinzu. Die aktuellsten Neuerungen sind eine 2002 in Betrieb genommene Gasturbinenanlage und ein 2006 fertig gestelltes Biomasse-Heizkraftwerk. Beide arbeiten mit Kraft-Wärme-Kopplung.¹⁷

¹⁴ <http://www.sw-augsburg.de/downloads/unternehmensbrosch.pdf>, S. 30f

¹⁵ Ganser

¹⁶ <http://www.sw-augsburg.de/downloads/unternehmensbrosch.pdf>, S. 30f

¹⁷ <http://www.sw-augsburg.de/downloads/unternehmensbrosch.pdf>, S. 30f

2 Physikalische und technische Grundlagen

In diesem Kapitel werden zunächst physikalische Aspekte ausgeführt, die im Unterricht entweder gar nicht oder nicht in der Tiefe behandelt werden. Im Anschluss daran werden insbesondere Themen behandelt, die mit dem Energietransport, der Speicherung und dem Prognostizieren des Bedarfs zu tun haben. Auf diesen Abschnitt folgen Inhalte zur Energieerzeugung und zur Kraftwerkstechnik. Der letzte Teil dieses Kapitels beschäftigt sich schließlich mit der Energieversorgung in Augsburg und gliedert damit die in den vorhergehenden Abschnitten diskutierten Teilaspekte in einen Gesamtkontext ein.

2.1 Grundlegendes zur Physik

Im Folgenden werden einige Grundlagen der Thermodynamik zusammengefasst. Es wird allerdings kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben, da dies den Rahmen sprengen würde. Hier sollen nur die Aspekte behandelt werden, die unmittelbar mit der anschließend ausgeführten Energietechnik zu tun haben.

2.1.1 Energieformen und Energieumwandlungsketten

Man kann die verschiedenen Energieformen in vier Klassen einteilen, die alle ineinander umwandelbar sind und die mechanische, elektrische, chemische und thermische Energie einschließen. Unter mechanischer Energie kann man die Formen kinetische und potentielle Energie zusammenfassen. Die elektrische Energie ist ein Überbegriff für die elektromagnetische, die magnetische, und die „eigentliche“ elektrische Energie. In der Energietechnik finden sich eine Vielzahl von Umwandlungsketten, die aus einer Folge von verschiedenen Energieformen bestehen. Ein Beispiel für eine für Kraftwerke typische Energieumwandlungskette wäre Folgendes: Chemische Energie wird durch Verbrennung in Thermische Energie überführt. Diese wird in einer Wärmekraftmaschine in mechanische Energie umgewandelt, aus der durch Induktion elektrische Energie resultiert.^{18 19}

Bei keinem Energieumwandlungsprozess geht Energie verloren. Allerdings treten Energieformen auf, die nicht genutzt werden können. Durch den Quotienten von Energie der gewünschten Energieform nach der Umwandlung E_{Soll} zu gesamter umzuwandelnder Energie E_{Ges} wird der sogenannte Umwandlungswirkungsgrad η_{Um} festgelegt:²⁰

$$\eta_{Um} = \frac{E_{Soll}}{E_{Ges}} \cdot$$

18 Zahoransky, 2010, S. 17

19 Zahoransky, 2010, S. 5

20 Zahoransky, 2010, S. 17

2.1.2 Energieerhaltung und Erster Hauptsatz der Thermodynamik

2.1.2 Energieerhaltung und Erster Hauptsatz der Thermodynamik

In der Energietechnik ist sehr oft die Bilanzierung der verschiedenen Energieformen eines Prozesses von Interesse. Die Grundlage hierfür bildet einerseits der Energieerhaltungssatz, der besagt, dass Energie weder erzeugt, noch vernichtet werden kann. Andererseits ist die Aussage des Ersten Hauptsatzes der Thermodynamik von Belang: „Die Energie eines adiabatisch abgeschlossenen Systems ist konstant.“²¹ Das bedeutet, die Gesamtenergie in einem isolierten System, das weder Materie, noch Energie mit der Umgebung austauscht, ändert sich nicht. Die gesamte, im System enthaltene Energie wird auch als innere Energie U bezeichnet. Damit gilt nach dem Ersten Hauptsatz: $\Delta U = 0$. Für ein geschlossenes System, das zwar keine Materie, aber Energie mit der Umgebung austauschen kann, heißt der Erste Hauptsatz: $\Delta U = \Delta Q + \Delta W$. Das heißt, die Änderung der Gesamtenergie des Systems ΔU setzt sich aus zu- oder abgeführte Wärme ΔQ und zu- oder abgeführte Arbeit ΔW zusammen.^{22 23}

2.1.3 Enthalpie H

Aus praktischen Gründen wird, um die Energie eines thermodynamischen Systems auszudrücken, seine innere Energie U und seine Verdrängungsarbeit $p \cdot V$ (p : Druck, V : Volumen) zu einer neuen Zustandsgröße, der Enthalpie H zusammengefasst: $H = U + p \cdot V$. Die Einheit der Enthalpie sind Joule.^{24 25}

2.1.4 Zustandsänderung idealer Gase

Ideales Gas ist ein theoretisches Konstrukt, um thermodynamische Phänomene einfacher erklären zu können und besteht aus Massenpunkten, die weder ein eigenes Volumen haben, noch miteinander wechselwirken²⁶. Hier sollen nur die Zustandsänderungen idealer Gase betrachtet werden, da beispielsweise der Carnot-Prozess auf diesen beruht.

Die Zustandsgleichung für ideale Gase lautet: $p \cdot V = n \cdot R \cdot T = N \cdot k_B \cdot T$ (wobei p Druck, V Volumen, n Molzahl, T Temperatur in Kelvin, R allgemeine Gaskonstante, N Teilchenzahl, k_B Boltzmann-Konstante)²⁷.

Für die Energietechnik sind die vier im Folgenden vorgestellten Zustandsänderungen idealer Gase von besonderer Bedeutung, vor allem wenn es um die Beschreibung von Kreisprozessen geht. Erfolgt eine Zustandsänderung bei konstanter Temperatur T , so nennt man sie isotherm. Aus der Zustandsgleichung folgt damit, dass $p \cdot V = \text{const.}$. Die Zustandsänderung wird dann als isobar bezeichnet, wenn sie bei gleichbleibendem Druck p erfolgt, womit $V \propto T$ gilt. Eine iso-

21 Strauß, 2009, S. 3

22 Strauß, 2009, S. 3

23 Nolting, 2010, S. 164f

24 Strauß, 2009, S. 4

25 Lüders, 2009, S. 275

26 Nolting, 2010, S.140

27 Nolting, 2010, S.141f

2.1.4 Zustandsänderung idealer Gase

chore Zustandsänderung liegt vor, wenn das Volumen V während dem Vorgang konstant bleibt und somit $p \propto T$ ist. Adiabatisch nennt man eine Zustandsänderung dann, wenn sie ohne Wärmeaustausch mit der Umgebung erfolgt, wenn also $\Delta Q = 0$ ist. Bei der Beschreibung von Kreisprozessen werden die adiabatische und die isentrope (d.h. Konstanz der Entropie) Zustandsänderung oft synonym verwendet, was daher rührt, dass reversible adiabatische Abläufe gleichzeitig isentrop sind^{28, 29, 30}.

2.1.5 irreversible Vorgänge und Wirkungsgrad

In der Physik werden reversible und irreversible Vorgänge unterschieden. Erstere sind dadurch gekennzeichnet, dass sie für ihre Umkehr keine Energiezufuhr von Außen benötigen, keine bleibenden Zustandsänderungen der beteiligten Komponenten verursachen und ihr Ausgangszustand durch die Umkehr des Prozesses wieder hergestellt wird³¹. Ein Beispiel dafür ist ein reibungsfrei gelagertes, schwingendes Pendel. Im Gegensatz dazu haben irreversible Vorgänge in abgeschlossenen Systemen bleibende Zustandsänderungen zur Folge. Außerdem geht ein Teil der Energie als Erwärmung der beteiligten Körper für eine Nutzung verloren, wobei der Prozess freiwillig, also ohne äußere Energiezufuhr, nur in eine Richtung stattfinden kann. Beispiele für irreversible Vorgänge sind die Reibung zwischen Reifen und Straße beim Auto fahren oder das Mischen zweier Gase. Alle in der Natur vorkommenden Prozesse sind insgesamt irreversibel, können aber reversible Elemente enthalten^{32, 33}.

Damit verbunden ist auch, dass bei natürlichen Vorgängen die investierte Energie immer größer als die nutzbare resultierende ist. Auch eine Wärmemenge Q setzt sich aus einem Beitrag zusammen, der als Arbeit genutzt werden kann, die sogenannte Exergie E_{Ex} , und aus einem Beitrag, der Anergie E_{An} , der verloren geht. Damit teilt sich die Wärme wie folgt auf: $Q = E_{Ex} + E_{An}$ ³⁴.

Das Verhältnis von nutzbarer zu aufgewendeter Arbeit wird als Wirkungsgrad bezeichnet. Der Wirkungsgrad η eines Kreisprozesses wird wie folgt definiert:³⁵

$$\eta = \frac{\text{vom System geleistete Arbeit}}{\text{zugeführte Wärmemenge}} = \frac{-\Delta W}{\Delta Q_{zu}}$$

Beispiele für Wirkungsgrade sind die Photosynthese von Getreide mit 1-2 %, ein Zugpferd mit 10-15 %, ein Dieselmotor mit 30-35 % oder eine Windturbine mit 35-45 %³⁶.

28 <http://de.wikipedia.org/wiki/Isentrop>

29 Lüders, 2010, S. 283ff

30 Nolting, 2010, S. 169ff

31 Lüders, 2009, S. 339f

32 Lüders, 2009, S. 342

33 Lüders, 2009, S. 340f

34 Strauß, 2009, S. 70

35 Nolting, 2010, S. 173

36 Strauß, 2009, S. 26

2.1.6 Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik und Entropie

2.1.6 Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik und Entropie S

Wie oben bereits beschrieben, bestehen natürliche Prozesse aus reversiblen und irreversiblen Anteilen. Um die Irreversibilität messen zu können, wurde die Zustandsgröße Entropie S eingeführt. Ähnlich der potentiellen Energie, bei der beispielsweise das Potential einer Kugel auf einem Turm bezogen auf den Erdboden, auf dem der Turm steht, berechnet wird, kann die Entropie nicht absolut angegeben werden, sondern nur im Bezug auf einen frei wählbaren Ausgangszustand. Es kann also lediglich etwas über die Entropieänderung ΔS ausgesagt werden. Diese kann nicht direkt gemessen werden, sondern wird wie folgt errechnet (wobei S_1 bzw. S_2 die Entropie des Zustandes 1 bzw. 2, ΔQ die zu- oder abgeführte Wärme und T die absolute Temperatur in Kelvin ist):³⁷

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \frac{\Delta Q}{T} \quad \text{mit der Einheit} \quad [S] = 1 \frac{J}{K}$$

Übersetzt bedeutet diese Formel, dass sich die Entropie eines Systems in Abhängigkeit seiner Temperatur ändert, wenn Wärme zu- oder abgeführt wird. Je niedriger die Temperatur des Systems dabei ist, desto mehr ändert sich die Entropie.

Mit der Entropie kann der Zweite Hauptsatz der Thermodynamik wie folgt ausgedrückt werden: „*Natürliche Vorgänge innerhalb eines abgeschlossenen Systems sind stets mit einer Zunahme der Entropie verbunden.*“³⁸. Das heißt, innerhalb eines geschlossenen Systems gilt stets $\Delta S \geq 0$. Eine andere, einfachere Interpretation des Zweiten Hauptsatzes ist, dass der Wärmefluss zwischen zwei Körpern nur in eine Richtung möglich ist, nämlich vom warmen zum kalten Körper. Damit sind auch keine Wärmekraftmaschinen möglich, die auf einem umgekehrten Wärmefluss basieren würden.³⁹

2.1.7 Kreisprozesse (Carnot-, Dampfkraft- und Gasturbinenprozess)

Die Umwandlung von Wärme in Arbeit erfolgt mittels sogenannter Kreisprozesse. Dabei durchläuft ein Arbeitsmittel nacheinander verschiedene Zustände, um am Schluss wieder den Ausgangszustand zu erreichen. Der Carnot-Prozess ist der Kreisprozess, der bei der Umwandlung von Wärmeenergie in Arbeit den höchsten Wirkungsgrad erzielt. Er ist allerdings nur theoretisch möglich, dient aber als Vergleich für alle anderen Kreisprozesse. Als Arbeitsmittel wird dabei ein ideales Gas genommen, das sich in einem Zylinder mit Kolben befindet. Nacheinander erfährt es, bezogen auf die Abbildung 3, die folgenden Zustandsänderungen:^{40 41}

37 Lüders, 2009, S. 342ff

38 Strauß, 2009, S. 7

39 Nolting, 2009, S. 172f

40 Strauß, 2009, S. 67ff

41 Zahoransky, 2010, S. 125

2.1.7 Kreisprozesse (Carnot-, Dampfkraft- und Gasturbinenprozess)

- 1 → 2: Das Gas wird im Zylinder isotherm komprimiert, gibt dabei die Wärme Q_{ab} ab und nimmt die Volumenarbeit W_{12} auf.
- 2 → 3: Nun erfolgt eine adiabatische bzw. isentrope Kompression des Gases, bei der die Volumenarbeit W_{23} aufgewendet werden muss und die eine Temperaturerhöhung zur Folge hat.
- 3 → 4: Unter Zufuhr von Wärme Q_{zu} expandiert das Gas isotherm und gibt die Volumenarbeit W_{34} ab, das heißt, der Kolben wird nach außen gedrückt.
- 4 → 1: Das Gas expandiert unter Abgabe der Volumenarbeit W_{41} adiabatisch bzw. isentrop und kühlt dabei ab.

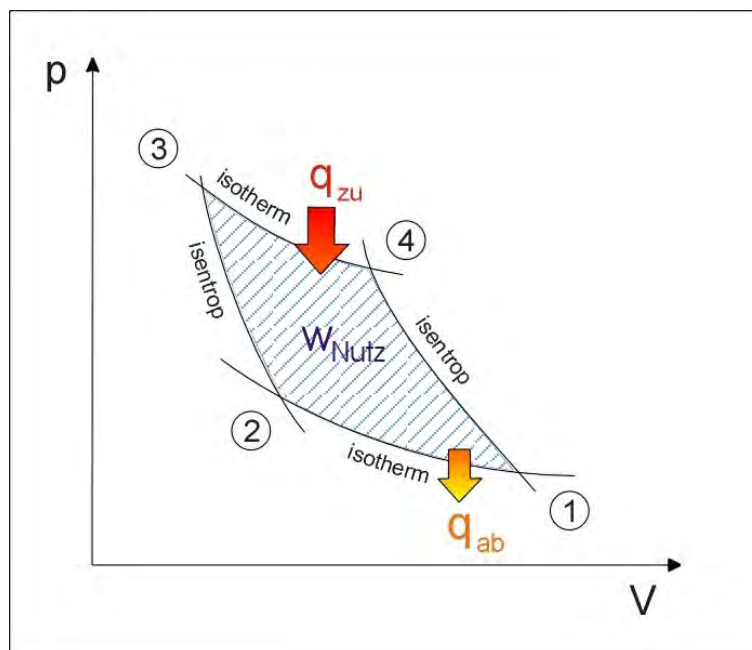


Abbildung 3: Carnot-Prozess im p-V-Diagramm

Der Carnot-Prozess läuft in einem geschlossenen System ab, d.h. mit der Umgebung ist nur ein Austausch von Energie möglich. Damit fordert der Erste Hauptsatz für diesen Vorgang:

$$\Delta U = \Delta Q_{zu} + \Delta Q_{ab} + \Delta W = 0 \quad \text{bzw.} \quad -\Delta W = \Delta Q_{zu} + \Delta Q_{ab} .$$

Der Wirkungsgrad, der aus dem Quotienten von resultierender zu aufgewendeter Arbeit errechnet wird, sieht dann wie folgt aus:

$$\eta = \frac{-\Delta W}{\Delta Q_{zu}} = \frac{\Delta Q_{zu} + \Delta Q_{ab}}{\Delta Q_{zu}} = 1 + \frac{\Delta Q_{ab}}{\Delta Q_{zu}}$$

Dass ΔQ_{zu} als dem System zugeführte Wärme positiv und ΔQ_{ab} als abgeführte Wärme negativ ist, gewährleistet, dass ihr Quotient negativ und der Wirkungsgrad somit immer kleiner 1 ist. Formt

2.1.7 Kreisprozesse (Carnot-, Dampfkraft- und Gasturbinenprozess)

man den Quotienten entsprechend um, so kann man den Wirkungsgrad nur durch die maximale und die minimale Temperatur, T_{max} bzw. T_{min} , ausdrücken: ⁴²

$$\eta = 1 - \frac{T_{min}}{T_{max}}$$

Im Folgenden werden nun noch die beiden Prozesse qualitativ vorgestellt, die in Dampfkraftwerken und Gasturbinenanlagen zur Anwendung kommen. Der Dampfkraft- oder Clausius-Rankine-Prozess arbeitet mit dem inhomogenen Medium Wasser, das zwischen flüssigem und gasförmigem Zustand wechselt. Der Prozess setzt sich aus zwei Isobaren und zwei Adiabaten bzw. Isentropen zusammen und hat den folgenden Verlauf, der auch in Abbildung 4 nachvollzogen werden kann: ^{43 44}

1 → 2: Der Dampf expandiert adiabatisch in der Turbine und gibt die Volumenarbeit W_{12} ab.

2 → 3: Danach folgt die isobare Kondensation des Dampfes und damit Wärmeabgabe Q_{ab} .

3 → 4: Das Wasser wird nun in flüssigem Zustand adiabatisch verdichtet. Im Kraftwerk entspricht dies der Druckerhöhung durch die Speisewasserpumpen.

4 → 1: Dem Wasser wird isobar Wärme Q_{zu} zugeführt, was im Kraftwerk den Schritten Vorwärmung, Verdampfung, Überhitzung entspricht.

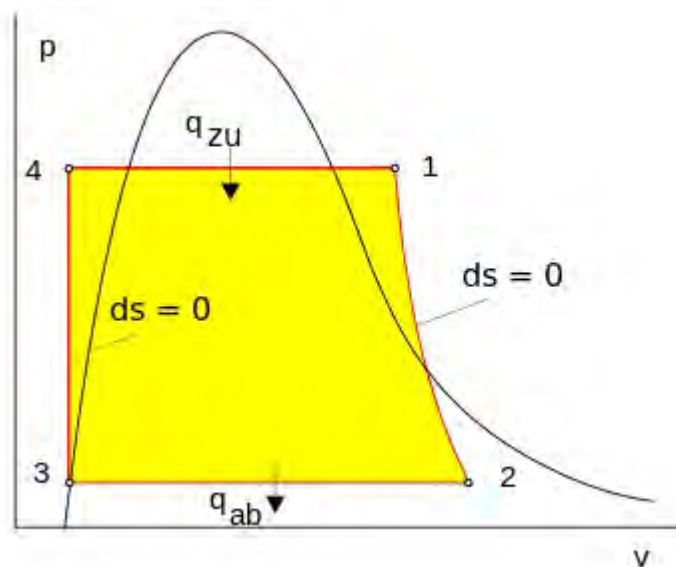


Abbildung 4: Clausius-Rankine-Prozess im p-V-Diagramm

42 Nolting, 2010, S. 174ff

43 Strauß, 2009, 71ff

44 Zahoransky, 2010, S. 29ff

2.1.7 Kreisprozesse (Carnot-, Dampfkraft- und Gasturbinenprozess)

Nun soll noch der Gasturbinen- bzw. Joule-Prozess erläutert werden, der mit einem homogenen Medium, nämlich Gas, arbeitet. Dieser Prozess setzt sich aus zwei Isobaren und zwei Adiabaten zusammen. Außerdem ist er offen, das heißt, es findet nicht nur Austausch von Energie, sondern auch von Materie mit der Umgebung statt. Bezogen auf die Abbildung 5, verläuft der Prozess folgendermaßen: ^{45 46}

- 1 → 2: Aus der Umgebung wird Luft angesaugt und unter Aufwendung der Volumenarbeit W_{12} im Verdichter isentrop komprimiert.
- 2 → 3: Dem Gas wird isobar Wärme Q_{zu} zugeführt, was im Kraftwerk dem Einspritzen von Brennstoff in die Brennkammer entspricht.
- 3 → 4: Das heiße Gas expandiert isentrop in der Turbine und verrichtet die Volumenarbeit W_{34} .
- 4 → 1: Nun wird die Wärme Q_{ab} isobar abgeführt, indem das expandierte Gas wieder an die Umgebung abgegeben wird.

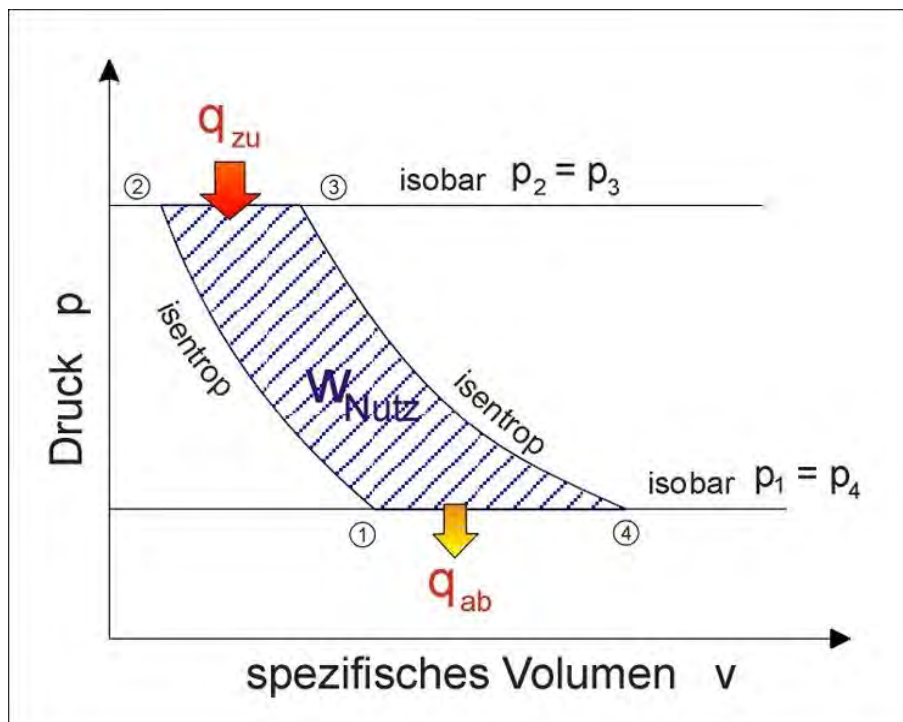


Abbildung 5: Gasturbinen- oder Joule-Prozess im p - v -Diagramm ($v = \text{Volumen/Masse}$)

45 Strauß, 2009, S.89f

46 Zahoransky, 2010, S. 29f

2.1.8 Das h-s- bzw. Mollier-Diagramm für Wasser

2.1.8 Das h-s- bzw. Mollier-Diagramm für Wasser

Betrachtet man adiabatische Prozesse, so ist das Mollier-Diagramm sehr nützlich, da es eine graphische Bestimmung der aus dem betrachteten Prozess resultierenden technischen Arbeit erlaubt. Auf der Ordinate wird die spezifische Enthalpie h und auf der Abszisse die spezifische Entropie s aufgetragen, für die gilt (wobei m : Masse des betrachteten Stoffs):⁴⁷

$$h = \frac{H}{m}, \quad s = \frac{S}{m}$$

Im h-s-Diagramm sind die Isobaren und Isochoren gekrümmt, während die Adiabaten Parallelen zur Ordinatenachse sind. Die Isothermen sind bei eher geringen Drücken bis etwa 0,5 MPa bzw. 5 bar parallel zur Abszissenachse. Für höhere Drücke sind aber auch sie gekrümmt. Insbesondere der parallele Verlauf der Adiabaten zur senkrechten Achse erlaubt es, die technische Arbeit, die aus einer Zustandsänderung des Arbeitsmittels gewonnen werden kann, direkt abzulesen. Die Abbildung 6 zeigt ein Mollier-Diagramm für Wasser, auf das sich auch das folgende Beispiel bezieht. Ein Kilogramm Wasserdampf mit einer Temperatur von 500°C und einem Druck von 4,0 MPa bzw. 40 bar wird adiabatisch auf einen Druck von 1,0 MPa bzw. 10 bar entspannt. Da der Vorgang adiabatisch abläuft, wird keine Wärme Q mit der Umgebung ausgetauscht, so dass $\Delta Q = 0$ ist. Außerdem gilt der Erste Hauptsatz der Thermodynamik $\Delta U = \Delta Q + \Delta W$, wobei sich die zu- bzw. abgeführte Arbeit ΔW wie folgt aus technischer Arbeit W_{tech} und Ausdehnungsarbeit zusammensetzt: $\Delta W = W_{tech} + p_1 \cdot V_1 + p_2 \cdot V_2$ ($V_{1,2}$ und $p_{1,2}$ sind dabei Volumen und Druck des Ausgangs- bzw. Endzustands). Nach Einsetzen in den Ersten Hauptsatz und Umformen erhält man: $\Delta Q + W_{tech} = \Delta U + p_1 \cdot V_1 + p_2 \cdot V_2$. Mit $\Delta U = U_2 - U_1$ folgt:

$$(U_2 + p_2 \cdot V_2) - (U_1 + p_1 \cdot V_1) = \Delta Q + W_{tech}.$$

Die Terme in den Klammern entsprechen dabei genau der Definition der Enthalpie und sollen mit H_2 und H_1 bezeichnet werden, so dass man $\Delta Q + W_{tech} = H_2 - H_1 = \Delta H$ schreiben kann. Da der betrachtete Vorgang adiabatisch abläuft, vereinfacht sich die Gleichung zu $W_{tech} = H_2 - H_1$. Es müssen also nur noch die Punkte der beiden Zustände im Diagramm gesucht und ihre Ordinatenwerte abgelesen werden. Im Diagramm in der Abbildung 6 ist der Punkt mit den Zustandsgrößen 40 bar und 500°C mit A und der mit 10 bar mit B eingezeichnet. In diesem Beispiel ergibt sich die technische Arbeit wie folgt:

$$W_{tech} = H_2 - H_1 \approx (3025 - 3440) \text{ kJ} = -415 \text{ kJ}.$$

Der Wert ist negativ, da die Arbeit bei der Zustandsänderung abgegeben wird.^{48 49}

Zur Abbildung 6 ist noch zu bemerken, dass in der unteren Hälfte Linien mit der Beschriftung $x = 1,0 \dots 0,5$ vorkommen. Damit wird der Dampfgehalt angegeben. Siedet das Wasser, dann hat es den Dampfgehalt $x = 0$, bei $x = 1$ liegt Satttdampf vor.

47 Lüders, 2009, S.350

48 Lüders, 2009, S. 349ff

49 Lüders, 2009, S. 272ff

2.1.8 Das h-s- bzw. Mollier-Diagramm für Wasser

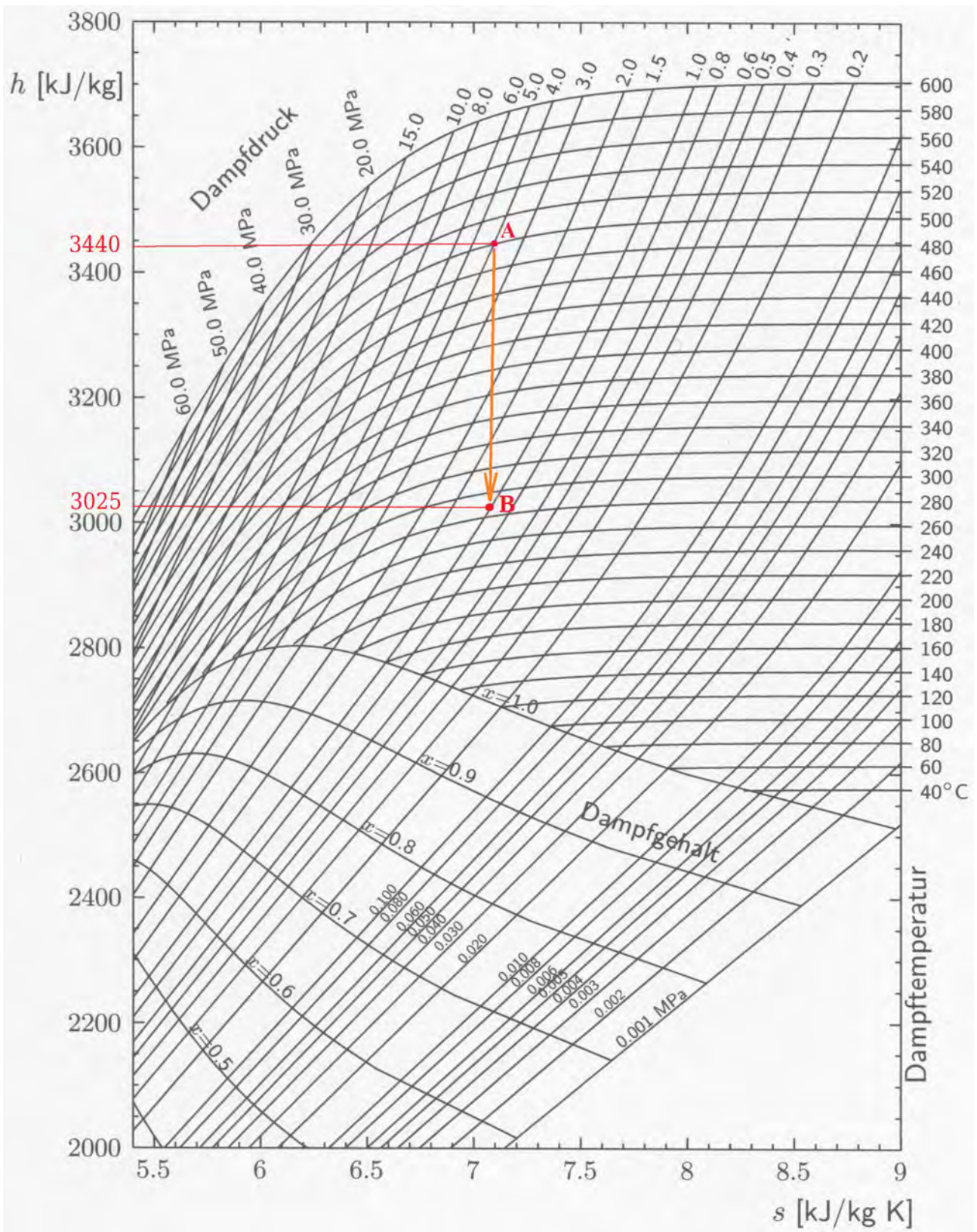


Abbildung 6: Mollier-Diagramm für Wasser

2.2 Grundlegendes zur Energieversorgung

2.2 Grundlegendes zur Energieversorgung

Die Energie muss zum Verbraucher transportiert werden, wobei Erdgas, Strom und Fernwärme leitungsgebunden geliefert werden können. Die Kennzeichen eines Netzes sind seine Transportkapazität, also wie viel Leistung befördert werden kann, die Kosten für den Energietransport und das Betreiben des Netzes, die Investitionskosten beim Neubau und der entfernungspezifische Wirkungsgrad, d.h. wie viel von der eingespeisten Energie beim Verbraucher ankommt. Ein Beispiel für den letzten Punkt ist die Fernwärmeversorgung, bei der die Wärmeverluste ab einer bestimmten Leitungslänge zu erheblich werden. Im Folgenden soll insbesondere auf das Stromnetz näher eingegangen werden. Erdgas- und Fernwärmenetz werden etwas kürzer behandelt.⁵⁰

2.2.1 Stromnetz und Spannungsebenen

In Deutschland existiert ein Verbundnetz mit einer Frequenz von 50 Hertz, das außerdem seit 1995 in das westeuropäische Netz, das von Dänemark bis Süditalien und Portugal reicht, eingebunden ist. Durch dieses sehr große Verbundnetz können unerwartete Bedarfsspitzen oder Erzeugungsausfälle durch die Trägheit des Netzes bis zu einem gewissen Grad aufgefangen werden, ohne dass es zu größeren Störungen der Netzfrequenz kommt. Der Stromtransport erfolgt hauptsächlich über Freileitungen, bei dem man sich die Isolationseigenschaft der Luft zu Nutze macht. Mit beispielsweise vier 380-kV-Stromkreisen auf einem Mast werden die Stromtrassen bestmöglich genutzt.⁵¹

Für den Transport verschieden großer elektrischer Leistungen gibt es jeweils eine Spannungsebene, die vom Materialaufwand und den Investitionen her am Besten geeignet ist. Je größer die Leistung ist, die übertragen werden soll, desto höher muss die Spannungsebene sein. Eine Erklärung hierfür ist, dass die Verlustleistung so gering wie möglich gehalten werden soll. Dies wird einerseits durch hohe Betriebsspannungen, andererseits durch einen geringen Leitungswiderstand erreicht. Mit folgendem Zusammenhang wird dieser Sachverhalt ersichtlich:

$$P_{\text{Verlust}} = U_{\text{Verlust}} \cdot I = R_{\text{Leitung}} \cdot I^2 = R \cdot \frac{P_{\text{gesamt}}^2}{U_{\text{Betrieb}}^2}$$

Wobei die Beziehung $U_{\text{Verlust}} = R_{\text{Leitung}} \cdot I$ gilt und P_{Verlust} die Verlustleistung, U_{Verlust} die Verlustspannung, I die Stromstärke, R_{Leitung} der Leitungswiderstand, U_{Betrieb} die Betriebsspannung und P_{gesamt} die gesamte Leistung ist.⁵²

Für den Transport und die Übertragung gibt es ein Leitungssystem mit hohen Spannungen und einer Ausdehnung über weite Strecken. Die Verteilnetze vor Ort beim Verbraucher weisen dagegen geringere Spannungen auf. Die Wahl einer bestimmten Spannungsebene hängt davon ab, wie viel Leistung über welche Strecken transportiert werden soll und wie dabei der Materialaufwand möglichst gering gehalten werden kann. Für Deutschland gibt es dabei eine Faustregel: Wenn die Höhe der

⁵⁰ Zahoransky, 2010, S. 377

⁵¹ Zahoransky, 2010, S. 380f

⁵² Private Mitteilung von Herrn Professor Dr. Thomas Wilhelm

2.2.1 Stromnetz und Spannungsebenen

Spannung in kV ungefähr mit der Länge der Leitung in km übereinstimmt, ist ein Transportnetz ausreichend dimensioniert.⁵³

Damit ergibt sich ein Netz mit vier verschiedenen Spannungsebenen, die durch Umspannwerke miteinander verbunden sind:

Bezeichnung	Abkürzung	Spannung
Höchstspannung	HöS	380 bzw. 220 kV
Hochspannung	HS	110 kV
Mittelspannung	MS	10 bzw. 20 kV
Niederspannung	NS	230 bzw. 400 V

*Tabelle 1: Die vier in Deutschland vorkommenden Spannungsebenen*⁵⁴

Im Zuge der Liberalisierung des Strommarktes mussten Netzbetreiber von Energieerzeugung und -vertrieb getrennt werden. Das hat den Grund, dass die Verbraucher nicht mehr wie vorher von dem Energieversorger Strom beziehen müssen, an dessen Netz sie angeschlossen sind, sondern ihren Anbieter frei wählen können. Die Trennung wurde also vollzogen, um auszuschließen, dass der lokale Versorger und Netzeigentümer übervorteilt wird. Seither setzen sich die Stromkosten für den Kunden aus dem gelieferten Strom und sogenannten Netznutzungsentgelten zusammen. Diese Trennung ist im Grunde nur eine rechtliche, da die Netzbetreiber zumeist Tochterfirmen der Versorgungsunternehmen sind. Die vier größten deutschen Versorger und die ihnen zugehörigen Netzbetreiberfirmen sind die RWE mit Amprion, E.ON mit der transpower stromübertragungs gmbh, Vattenfall mit der 50 Hertz Transmission und die EnBW mit der EnBW Transportnetze. Die vier genannten Netzbetreiberunternehmen unterhalten die Übertragungs- bzw. Transportnetze, also den Großteil der Höchst- und Hochspannungsnetze in Deutschland. Ihre Netzgebiete sind zugleich Regelzonen, innerhalb derer die vier auch Übertragungsnetzbetreiber genannten Unternehmen jeweils dafür sorgen müssen, dass ein Leistungsgleichgewicht und damit eine konstante Frequenz von 50 Hertz herrscht. Damit die zum Erhalt des Gleichgewichts benötigte Regelenergie möglichst gering gehalten werden kann, arbeiten aber auch sowohl die vier großen Netzbetreiber innerhalb Deutschlands untereinander, als auch mit anderen Netzbetreibern europaweit zusammen. Dafür gibt es verschiedenste Zusammenschlüsse, zum Beispiel die ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators for Electricity), die seit 2009 aus den Verbundnetzen von 34 europäischen Ländern besteht.⁵⁵

Auch die Stadtwerke Augsburg haben seit der Liberalisierung des Strommarktes eine Energie GmbH für Stromproduktion, Einkauf und Vertrieb sowie eine davon getrennte Netze GmbH für das Betreiben ihres Verteilnetzes. Das Augsburger Versorgungsnetz liegt in der Regelzone der RWE und ist auch an deren Höchstspannungsnetz angebunden⁵⁶.

53 Heuck, 2010, S. 2f

54 Heuck, 2010, S. 82

55 Heuck, 2010, S. 3ff

56 http://www.sw-augsburg.de/privatkunden/strom_versorgungsgebiet.php

2.2.2 Die Netzfrequenz des Stromnetzes

2.2.2 Die Netzfrequenz des Stromnetzes

Im gesamten europäischen Verbundnetz herrscht eine Netzfrequenz von 50 Hertz (Hz)⁵⁷. Die Entscheidung für diesen Wert hat sich um 1900 aus technischen Bedingungen ergeben, während beispielsweise in Nordamerika die Wahl auf 60 Hz fiel⁵⁸. Die Netzfrequenz beträgt aber nicht exakt 50 Hz, sondern schwankt ständig im Bereich von einigen mHz um den Soll-Wert von 50 Hz. Da alle elektrischen Geräte, Maschinen, Kraftwerke etc. auf eine Frequenz von 50 Hz ausgerichtet sind, muss diese möglichst genau eingehalten werden, sonst kann es zu Stromausfällen oder gar zum Zusammenbruch des Netzes kommen⁵⁹. Die Frequenz ist genau dann stabil, wenn genauso viel Strom ins Netz eingespeist, wie auch verbraucht wird⁶⁰. Um dies zu gewährleisten, müssen die Stromversorger im Voraus möglichst genaue Prognosen über die zukünftige Netzlast machen, um die Produktion steuern zu können. Abweichungen von diesem Gleichgewicht müssen von den Regelzonenbetreibern mit Regelleistung aufgefangen werden. In Abbildung 7 ist der Verlauf der Netzfrequenz während fünf Minuten dargestellt. Wie man sieht, ist diese nicht konstant, sondern schwankt in einem Intervall von einigen Millihertz um ihren Soll-Wert.



Abbildung 7: Zeitlicher Verlauf der Netzfrequenz am 15.12.2012 zwischen 13:40 und 13:45 Uhr

Die Frequenz sinkt genau dann, wenn zu wenig Leistung im Netz ist, d.h. wenn mehr entnommen wird, als erwartet. Dagegen sorgt ein Zuviel an elektrischer Leistung im Netz dafür, dass die Frequenz steigt, also dann, wenn weniger Leistung verbraucht wird, als prognostiziert wurde. Der Grund für dieses Verhalten liegt am sich mit der Netzlast verändernden Gegen- oder Bremsmoment

57 <http://www.swissgrid.ch/swissgrid/de/home/experts/topics/frequency.html>

58 <http://www.amprion.de/netzfrequenz>

59 <https://www.entsoe.eu/system-operations/the-frequency/>

60 <http://www.swissgrid.ch/swissgrid/de/home/experts/topics/frequency.html>

2.2.2 Die Netzfrequenz des Stromnetzes

der Generatoren in den Kraftwerken. Die Turbinen haben ein von Lastschwankungen im Netz unbeeinflusstes Antriebsdrehmoment, das je nach Turbine nur von dem zugeführten Heißdampf, Wasser, Gas etc. bestimmt wird. Die Generatoren haben hingegen ein von der Netzlast abhängiges Bremsmoment, das dem Antriebsdrehmoment entgegen gerichtet ist. Da sich Turbine und Generator auf der gleichen Welle befinden, stellt sich abhängig von ihren Momenten eine gewisse Drehzahl ein, die direkt proportional zur ins Netz eingespeisten Frequenz ist.⁶¹

Durch diesen ständig minimal schwankenden Frequenzwert ergibt sich für jeden Tag ein ganz individueller zeitlicher Verlauf der Netzfrequenz. Dies macht sich sogar die Polizei bei der Verbrechensaufklärung zu Nutze. Beispielsweise wenn ein Verdächtiger als Alibi eine Videoaufnahme vorweist, die ihn zum Tatzeitpunkt nicht am Tatort zeigt. Um herauszufinden, ob der Film auch wirklich zur angegebenen Zeit aufgenommen wurde, genügt es, von der Netzfrequenz verursachte Störgeräusche auf der Tonspur mit dem Verlauf der Netzfrequenz zu dem Zeitpunkt zu vergleichen. Dieses durch die Frequenz verursachte Hintergrundrauschen entsteht nahezu überall, wo Elektrogeräte vorhanden sind.⁶²

2.2.3 Grund-, Mittel- und Spitzenlast

Im Zusammenhang mit Bedarfsprognosen ist des Öfteren von Grund-, Mittel- und Spitzenlasten die Rede, weswegen hier kurz darauf eingegangen werden soll. Die Leistung, die über einen ganzen Tag konstant benötigt wird, bezeichnet man als Grundlast. Sie ist im Winter höher als im Sommer und wird von Grundlastkraftwerken gedeckt, für die sich Anlagen mit niedrigen Brennstoffkosten eignen, die über 5.000 Stunden im Jahr in Betrieb sind. Darunter fallen beispielsweise Laufwasser- oder Kernkraftwerke. Als Mittellast bezeichnet man die Leistung, die durch den tagsüber erhöhten Verbrauch benötigt wird. Sie wird von Kraftwerken gedeckt, die oft nur am Tag ihre maximal mögliche Leistung erzeugen und zum Teil sogar nachts ganz ausgeschaltet werden. Bei außerordentlich hohem Stromverbrauch, der meist nur von kurzer Dauer ist, spricht man von Spitzenlast. Diese hohen Lasten kommen vor allem Mittags und Abends vor. Die Kraftwerke, die diesen Bedarf decken, laufen etwa 500 bis 1.000 Stunden pro Jahr. Dafür geeignet sind Gasturbinen und Pumpspeicherkraftwerke.^{63 64 65}

In Abbildung 8 sind die drei Lastarten nochmal anschaulich dargestellt. Insbesondere die im Vergleich zum Sommer im Winter höhere Grundlast ist deutlich ablesbar. Außerdem kann man erkennen, dass die elektrische Energie bei zu hoher Grundlast vor allem nachts in Pumpspeicherkraftwerken gespeichert werden kann. Auf den tageszeitlichen Verlauf der Last wird im Abschnitt 2.2.5 noch genauer eingegangen.

61 Heuck, 2010, S. 62f

62 <http://www.sueddeutsche.de/muenchen/landeskriminalamt-dem-verbrechen-auf-der-spur-1.1061222>

63 Zahoransky, 2010, S. 2 und S. 20

64 Heuck, 2010, S. 73

65 <http://www.amprion.de/grundlast-mittellast-spitzenlast>

2.2.3 Grund-, Mittel- und Spitzenlast

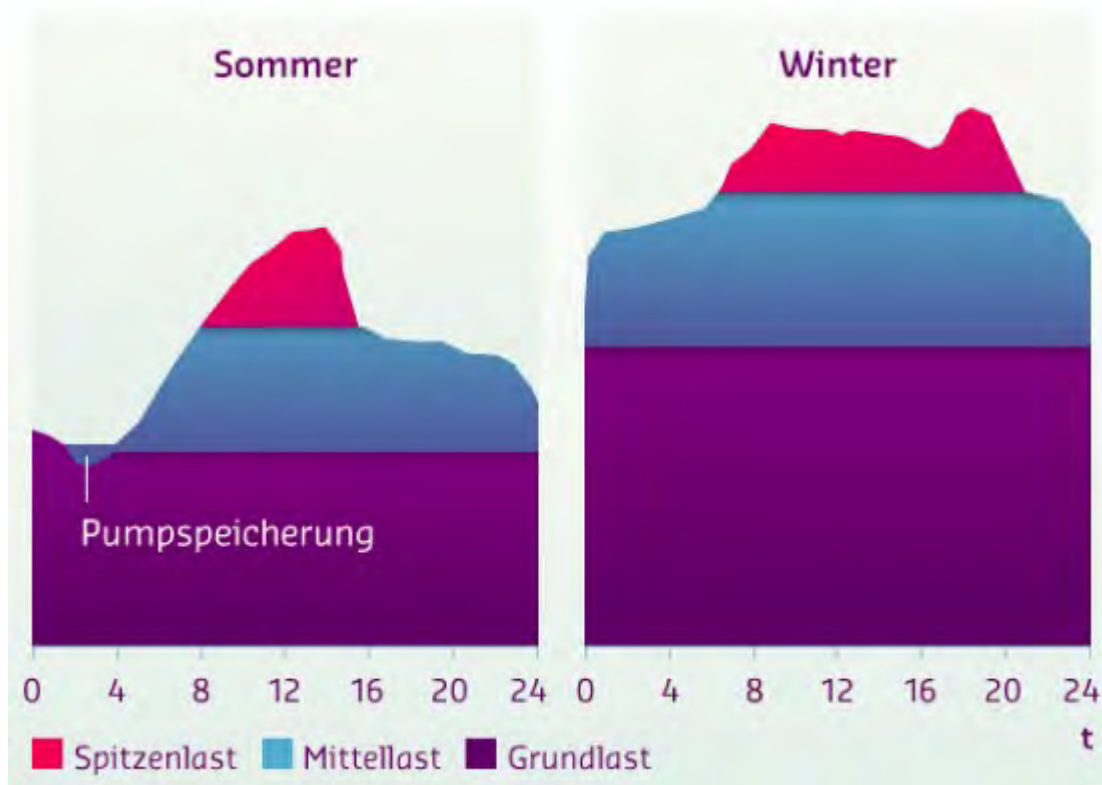


Abbildung 8: Beispiel für den Lastbedarf an einem Tag im Sommer und im Winter, hier wurde die benötigte Leistung gegen die Tageszeit in Stunden aufgetragen

2.2.4 Regelzonen und Regelleistung (Regelenergie) des Stromnetzes

In den vorhergehenden Abschnitten war bereits die Rede von Regelleistung oder -zonen. Deutschland ist in vier Regelzonen aufgeteilt, die von den vier Übertragungsnetzbetreibern unterhalten werden und die auf der Karte in Abbildung 9 dargestellt werden. Das Verteilungsnetz der Stadtwerke Augsburg liegt dabei in der Zone von Amprion von RWE. Die Regelzonenbetreiber sind jeweils dafür verantwortlich, dass in ihrem Bereich ein Gleichgewicht zwischen verbrauchter und eingespeister Leistung besteht, da Strom nicht in großen Mengen gespeichert werden kann und die Netzfrequenz konstant gehalten werden muss. Ein Bedarf an Regelleistung entsteht dann, wenn unvorhergesehene Ereignisse eintreten, wie der Ausfall eines Kraftwerks. Aber auch durch unerwartet hohe Einspeisungen von Windstrom kann ein Bedarf an Regelleistung entstehen. Außerdem beinhalten die meist einen oder mehrere Tage im Voraus erstellten Lastprognosen, nach denen sich der Kraftwerksbetrieb richtet, immer auch Fehler. Dies rührt unter anderem daher, dass Einflüsse durch das Wetter wie ein Gewitter zeitlich nicht exakt vorhersagbar sind. Der Mangel oder Überschuss an elektrischer Leistung im Netz wird ausgeglichen, indem unverzüglich Kraftwerke hoch- oder heruntergeregelt werden. Die Regelleistung wird als positiv bzw. negativ bezeichnet, wenn zusätzliche Leistung benötigt bzw. die Leistung reduziert werden muss.⁶⁶

⁶⁶ <http://www.amprion.de/regelenergie>

2.2.4 Regelzonen und Regelleistung (Regelenergie) des Stromnetzes



Abbildung 9: Regelzonen der vier größten Stromversorger Deutschlands, die jeweiligen Zonen werden von den zum Versorgungsunternehmen zugehörigen Netzbetreibern betrieben

Bei der Regelung teilt man die unterschiedlichen Regelungsarten danach ein, wie schnell sie bereitstehen. Die Primärregelung wird ständig benötigt und muss innerhalb von 30 Sekunden greifen. An dieser Regelungsart sind sehr viele regelfähige Kraftwerke beteiligt, die vom Regelzonenbetreiber automatisch gesteuert werden. Die Sekundärregelung muss erst nach fünf Minuten einsatzbereit sein. Hierfür sind Pumpspeicherkraftwerke und Gasturbinen besonders geeignet. Falls der Lastausgleich über längere Zeit benötigt wird, greift man auf die Minutenreserve zurück, um die Sekundärregelung für eventuell folgende Regelung freizuhalten. Die Minutenreserve wird telefonisch von Kraftwerksbetreibern, die diese bereitstellen, angefordert. Dazu melden Energieerzeuger freie Kapazitäten ihrer Kraftwerke täglich bei ihrem Regelzonenbetreiber an, der dann bei Bedarf darauf zurückgreifen kann.⁶⁷

Von den Stadtwerken Augsburg wird je nach eigenen Plänen für die Nutzung die Gasturbine als Minutenreserve zur Verfügung gestellt, die dann je nachdem entweder herunter- oder hochgefahren werden kann. Außerdem gibt es noch zwei Dieselmotoren, die nur noch in Notfällen eingesetzt werden und deshalb als positive Regelenergie eingesetzt werden können. Der mögliche Einsatz wird immer jeweils am Vortag dem Regelzonenbetreiber Amprion gemeldet. Die tatsächliche Inanspruchnahme wie auch die Bereitstellung der Regelenergie wird den Stadtwerken von diesem vergütet.

⁶⁷ <http://www.amprion.de/primaerregelung-sekundaerregelung-minutenreserve>

2.2.5 Netzlastprognosen für Strom

2.2.5 Netzlastprognosen für Strom

Um den Bedarf an Regelleistung bei der Stromversorgung möglichst gering zu halten, ist es für ein Versorgungsunternehmen wichtig, genaue Prognosen über den Strombedarf seiner Kunden zu machen, um zur richtigen Zeit die erforderliche elektrische Leistung bereitzustellen und den Kraftwerkeinsatz planen zu können. Dies liegt nicht zuletzt daran, dass das Verursachen von Regelbedarf vom Regelzonenbetreiber in Rechnung gestellt wird. Um möglichst treffende Vorhersagen machen zu können, muss das Versorgungsunternehmen das Verbrauchsverhalten seiner Stromkunden genau kennen. Es gibt allerdings auch einige Gesetzmäßigkeiten, die bei der Prognose hilfreich sind. Ein Punkt ist der jahreszeitliche Einfluss auf die Höhe und den Verlauf der Last. Gründe dafür sind, dass es im Winter weniger Stunden mit Tageslicht gibt und außerdem auch elektrisch geheizt wird. Die Jahreshöchstlast tritt im Winter auf, während die Last im Sommer niedrig genug ist, um Kraftwerke zwecks Revision vom Netz zu nehmen. Bei der Prognose ist außerdem hilfreich, dass sich die Werktage Montag bis Donnerstag, sowie jeweils die Freitage, Samstage und Sonntage vom Verlauf der Netzlast her ähneln. Außerdem kann man normalerweise zwischen Mitternacht und sechs Uhr mit einem Lastminimum und einem darauf folgenden steilen Lastanstieg, verursacht durch den Tagesanbruch rechnen. Erfahrungsgemäß ist es auch sinnvoll Lastgänge von anderen vorhergehenden Tagen einzubeziehen, die ähnliche Rahmenbedingungen hatten wie der zu prognostizierende. Damit sind Prognosen mit oft weniger als fünf Prozent Abweichung möglich.⁶⁸

Bei den Stadtwerken Augsburg wird die Vorhersage für die Netzlast eines Tages jeweils am Werktag zuvor gemacht. Zunächst wird die gesamte Netzlast für das eigene Netz prognostiziert. Da für Kunden mit einem Jahresverbrauch unter 100.000 kWh nur einmal im Jahr bei der Abrechnung Daten über den verbrauchten Strom vorliegen, werden diesen sogenannte Standardlastprofile zugeteilt. Diese fiktiven Lastprofile stellen den durchschnittlichen Verlauf des Stromverbrauchs der jeweiligen Verbrauchergruppe dar und werden dem Versorgungsunternehmen vom Netzbetreiber zur Verfügung gestellt. Eine Diskothek hat zum Beispiel einen besonders hohen Strombedarf in den Abendstunden, während eine Bäckerei vor allem morgens viel verbraucht. Kunden mit geringem Verbrauch wird also ein Lastprofil zugeteilt, das normalerweise einem Stromabnehmer ihrer Art entspricht. So gibt es Standardlastprofile für Haushalte, Gewerbe von 8-18 Uhr, Gewerbe mit überwiegendem Verbrauch in den Abendstunden, Gewerbe mit Wochenendbetrieb wie Ausflugslokale, Bäckereien, Landwirtschaft etc.^{69 70}

In den Abbildungen 10, 11, 12 und 13 ist jeweils das Standardlastprofil für eine Verbrauchergruppe dargestellt. Es wurden Daten für die von E.ON für das Jahr 2013 zur Verfügung gestellten Lastprofile verwendet. Abbildung 11 zeigt den angenommenen Verbrauch von Gewerbe, das von 8 bis 18 Uhr in Betrieb ist. Das Bedarfsmaximum liegt dabei um etwa 11 Uhr vormittags und flacht gegen Tagesanfang und -ende merklich ab. In Abbildung 12 ist ein Lastprofil für Gewerbe, das überwie-

68 Heuck, 2010, S. 72

69 http://www.eon-bayern.com/pages/eby_de/Netz/Stromnetz/Netzzugang/Lastprofilverfahren/Standard_Lastprofile/index.htm

70 http://www.lew.de/CLP/downloads/Produktinfos/ERS_G_S_Lastprofil.pdf

2.2.5 Netzlastprognosen für Strom

gend in den Abendstunden Strom verbraucht, also beispielsweise Gaststätten. Hier zeigt sich das Maximum, das sich im Tagesverlauf bereits langsam aufbaut um ungefähr 18 Uhr. Als weiterer Typ ist in Abbildung 13 das Profil einer Bäckerei mit Backstube dargelegt. Der maximale Verbrauch findet in den Morgenstunden zwischen 4 und 8 Uhr statt, also wenn gebacken wird. Den angenommenen Verlauf der Last eines Haushalts sieht man in Abbildung 10. Hier wurden drei verschiedene Tage ausgewählt. Ein Sonntag und ein Montag im Winter und ein Montag im Sommer. Vergleicht man die beiden Wintertage, so fällt auf, dass die Last am Wochenende insgesamt geringer ist. Beide Tage haben im Vergleich zum Montag im Sommer ein wesentlich größeres Maximum am Abend, was daher rührt, dass es im Juli wesentlich länger hell ist. Außerdem hat der Sommertag die geringste Last von allen drei Tagen, was ebenfalls an der höheren Anzahl von Stunden mit Tageslicht liegt. Der unterschiedliche Verlauf der Last einer Verbraucherkategorie an verschiedenen Tagen hängt nur von dem Tagestyp und der Saison ab. Deswegen kann die Bedarfsprognose nicht ausschließlich über die Standardlastprofile erfolgen.

Die Abweichungen einzelner Kunden von ihrem ihnen zugeordneten Standardlastprofil kompensieren sich durch die große Masse der Abnehmer. Verbraucher mit sehr hohem Strombedarf haben Zähler, die die Daten regelmäßig an das Versorgungsunternehmen liefern und werden so ebenfalls relativ gut kalkulierbar. Schwierig sind allerdings Kunden, die sehr unregelmäßig und dann hohe Leistungen benötigen. Hier besteht die Möglichkeit Sonderverträge abzuschließen, nach denen der Verbraucher seinen Bedarf und den Zeitpunkt dafür beim Versorger vorher anmeldet. Aus diesen gesammelten Daten über den voraussichtlichen Stromverbrauch der Kunden wird die Lastkurve erstellt. Des Weiteren werden aus einer Datenbank mit den Netzlasten vergangener Tage vergleichbare Tage ausgesucht. Aus diesen Informationen wird nun eine Lastkurve für den vorherzusagenden Tag erstellt, wobei die Tage aus der Vergangenheit unterschiedlich gewichtet werden, je nachdem wie gut sie passen. Ein Tag ist dabei vergleichbar mit einem anderen, wenn er in der gleichen Jahreszeit oder im gleichen Monat liegt, wenn es einer der vorhergehenden Tage ist, wenn der Wetterbericht, insbesondere die Temperatur übereinstimmt und wenn es der gleiche Wochentag ist. Außerdem müssen noch besondere Einflüsse berücksichtigt werden wie längere Ladenöffnungszeiten („Lange Einkaufsnacht“), Ferienbeginn und -ende oder die Zeitumstellung. Nach diesem Prognoseprozess hat man also die mutmaßliche Lastkurve für das Netz der Stadtwerke Augsburg.

Nun muss noch ermittelt werden, wann von den Stadtwerken wie viel Leistung angeboten werden muss. Dazu wird von der gesamten prognostizierten Netzlast der Bedarf der von anderen Unternehmen versorgten Kunden und die Netzverluste (beispielsweise Wärmeverluste) abgezogen. Außerdem wird der Bedarf der Kunden, die die Stadtwerke in fremden Netzen haben und ein Fehler, der durch die Einteilung von Kunden in Standardlastprofile entsteht, addiert. Das Ergebnis kann nun durch Eigenerzeugung oder Stromeinkauf gedeckt werden. Je früher der Zukauf von Strom an der Börse erfolgt, desto günstiger ist er. Zum Teil wird schon ein Jahr zuvor eingekauft. Laut Lastprognose überflüssige Leistung kann an der Börse auch wieder verkauft werden.

2.2.5 Netzlastprognosen für Strom

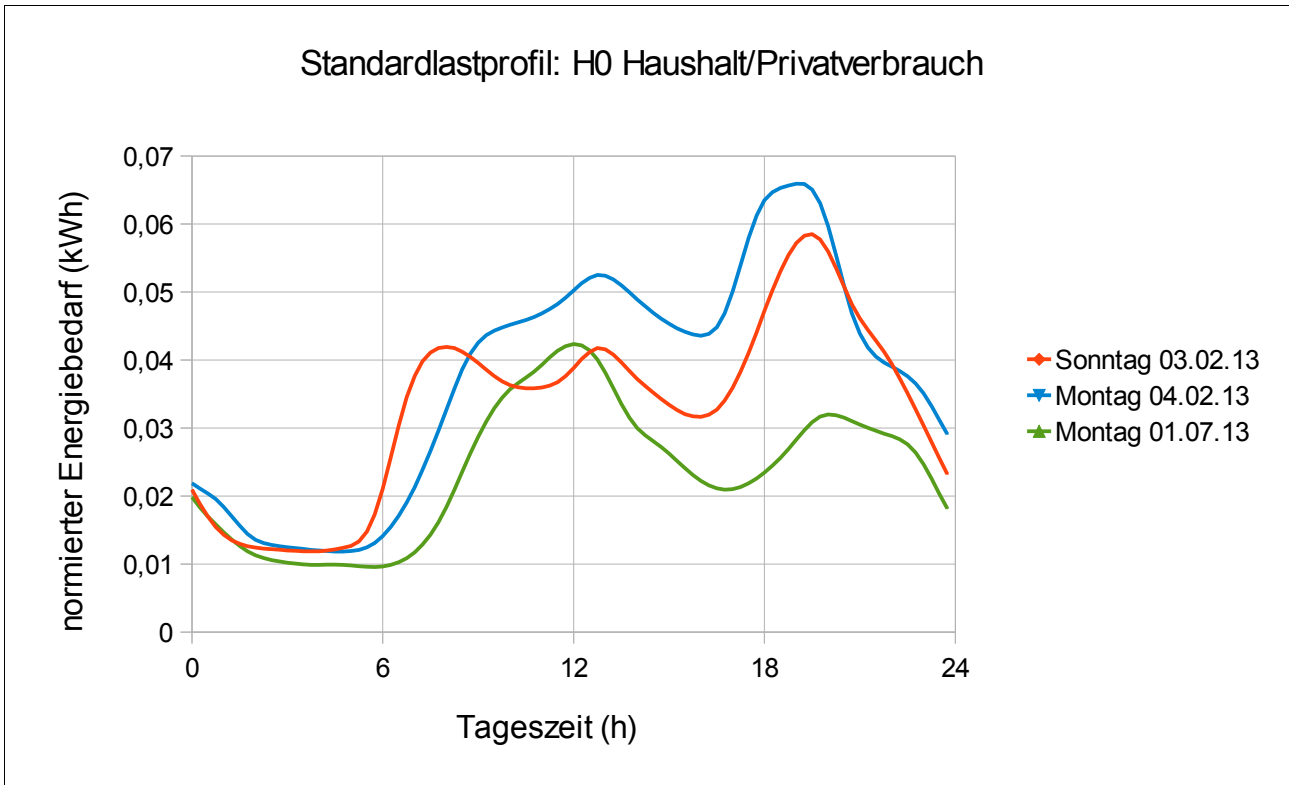


Abbildung 10: Standardlastprofil für den Typ H0 Haushalt bzw. Privatverbrauch an drei verschiedenen Tagen

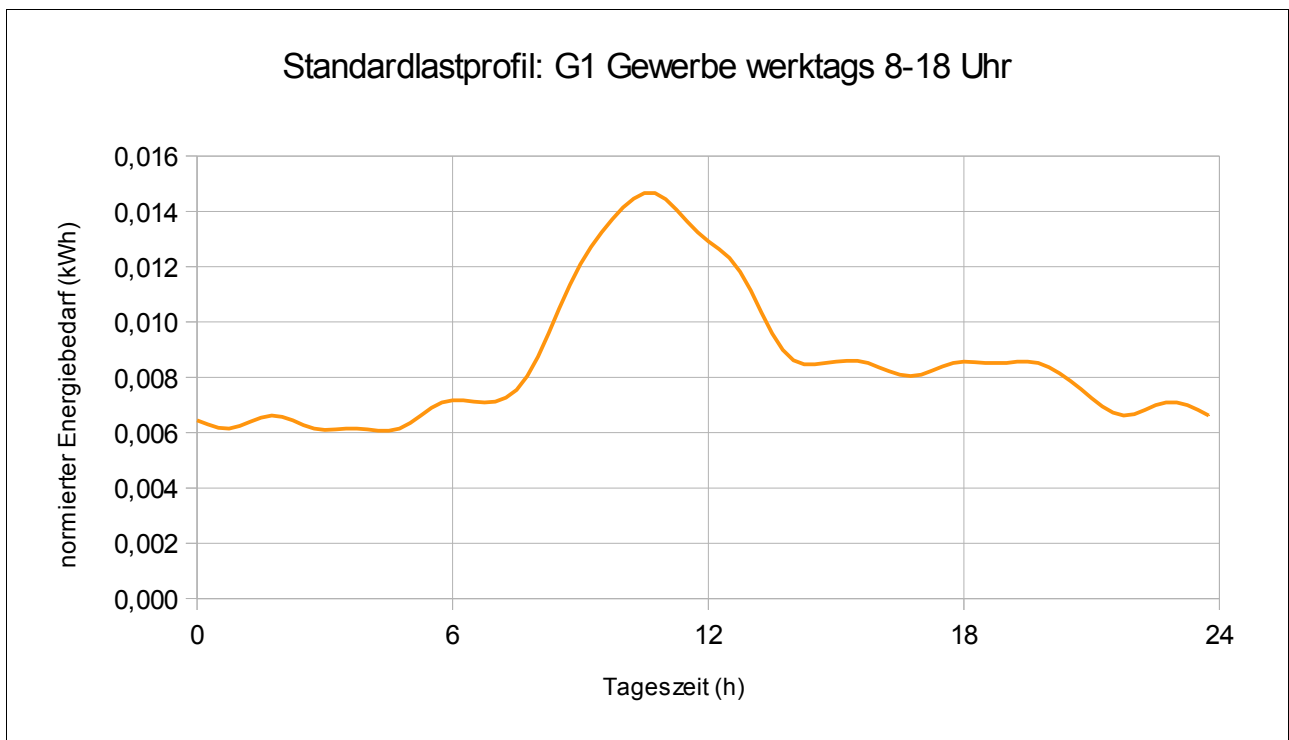


Abbildung 11: Standardlastprofil für den Typ G1 Gewerbe werktags 8-18 Uhr für Montag, 04.02.2013

2.2.5 Netzlastprognosen für Strom

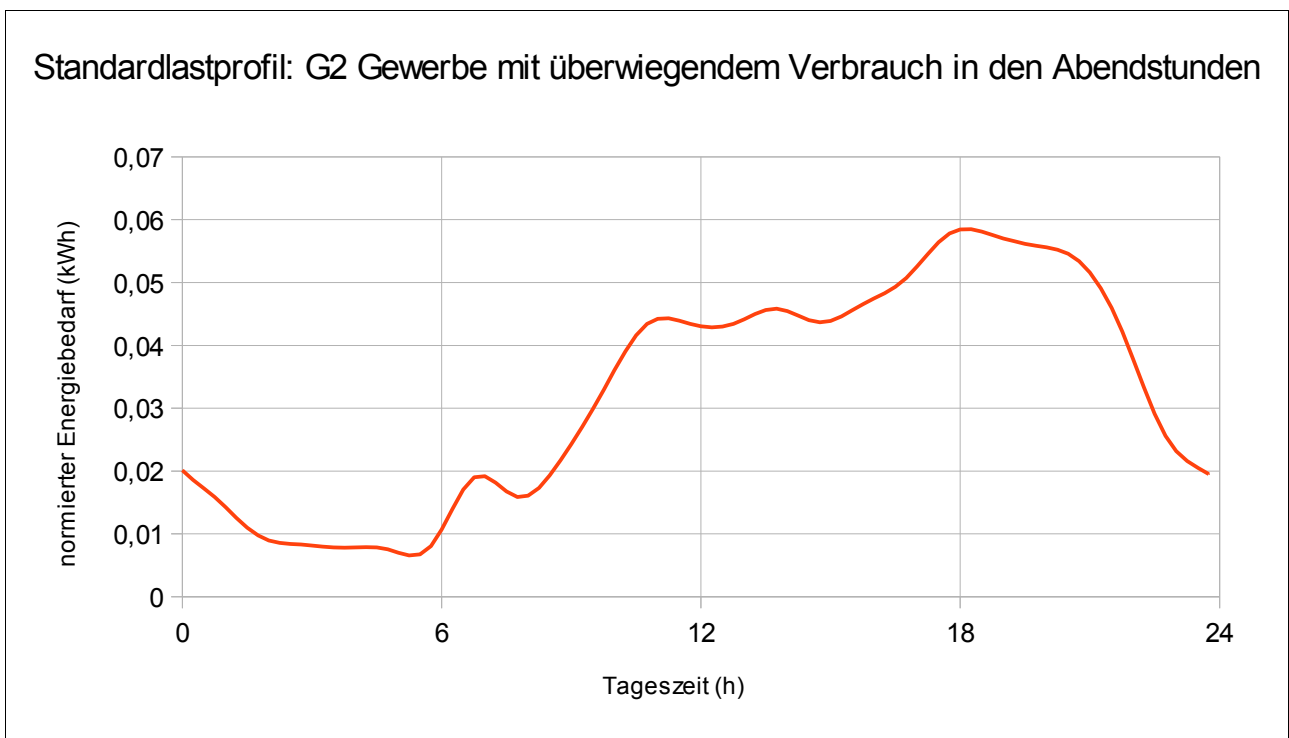


Abbildung 12: Standardlastprofil für den Typ G2 Gewerbe mit überwiegender Verbrauch in den Abendstunden für Montag, 04.02.2013

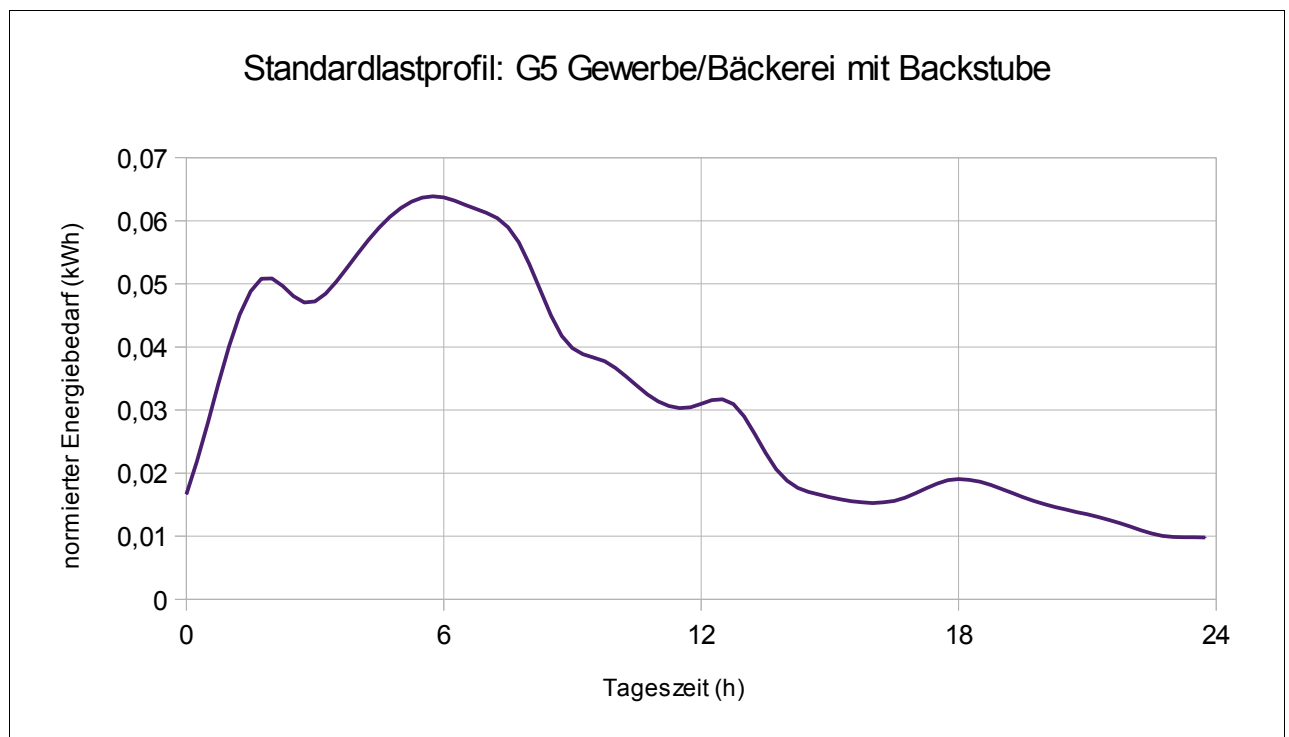


Abbildung 13: Standardlastprofil für den Typ G5 Gewerbe/Bäckerei mit Backstube für Montag, 04.02.2013

2.2.6 Bedarfsprognosen für Wärme und Gas

2.2.6 Bedarfsprognosen für Wärme und Gas

Die Prognose des Wärmebedarfs ist etwas weniger komplex als die der Netzlast beim Strom, da die Stadtwerke Augsburg ein von anderen Versorgern unabhängiges, geschlossenes Fernwärmenetz betreiben. Zudem erfolgt die Abrechnung der gelieferten Wärme monatlich, so dass für eine Vorhersage mehr Daten vorliegen. Des Weiteren ist das heiße Wasser im Gegensatz zum Strom zum Teil speicherbar. Wie der Strombedarf hängt auch der Wärmebedarf stark vom Wetter und der Jahreszeit ab, wobei sich die Lastprofile vom Verlauf her ähneln. Bei einer Stromproduktion im Kraft-Wärme-Kopplungsverfahren, wie es in Augsburg ausschließlich der Fall ist, nimmt der Wärmebedarf unmittelbar Einfluss auf die Strommenge, die erzeugt werden kann. Der Grund dafür ist, dass der Betrieb von KWK-Anlagen unter Wegkühlung der Wärme unwirtschaftlich wäre. Vor allem im Sommer, wenn wenig Fernwärme benötigt wird, kann also nur in geringem Umfang eigener Strom produziert werden.

Der tageszeitliche Verlauf des Erdgasbedarfs ähnelt stark dem des heißen Fernwärmewasser, was nicht verwunderlich ist, da beide Energieträger vor allem zum Heizen und für die Erwärmung von Trinkwasser verwendet werden. Im Prinzip gelten die gleichen Prognoseregeln wie bei der Last im Stromnetz: Der Verlauf gleicher Tagestypen ähnelt sich und das Wetter, vor allem Niederschlag und die Außentemperatur, nimmt Einfluss. Die Gasbedarfsprognose wird mit einem Computerprogramm, einem sogenannten neuronalen Netz, erstellt, das ständig mit aktuellen Daten zum Verbrauch und zu Daten, die auf diesen Einfluss nehmen, gespeist wird und daraus eine mutmaßliche Lastkurve für den nächsten Tag errechnet.⁷¹

2.2.7 Fernwärme und Fernwärmenetz

Bei einer Versorgung mit Fernwärme werden die Abnehmer mit einem Trägermedium beliefert, an das in Kraftwerken im Kraft-Wärme-Kopplungsverfahren oder in Heizwerken Wärme abgegeben wurde. Wird von Nahwärme gesprochen, so bedeutet dies meist lediglich, dass der Transportweg zum Abnehmer kürzer ist⁷².

In der Regel dient Wasser als Trägermittel für die Wärme, da es eine sehr große spezifische Wärmekapazität hat und noch dazu recht günstig ist. Das Wasser wird dabei üblicherweise noch aufbereitet. In Augsburg wird beispielsweise noch Hydrazin beigesetzt, um die Korrosion in den Leitungen zu unterbinden.

Die Fernwärmeversorgung funktioniert folgendermaßen: In einem Heiz(kraft)werk wird Wasser erhitzt und über eine Vorlaufleitung unter Druck und mit einer Temperatur von 110 bis 180°C zum Verbraucher transportiert. Dieser ist mit einer Übergabestation, meistens einem Wärmetauscher, mit dem Netz verbunden. Im Wärmetauscher gibt das heiße Wasser Wärme an das Warmwasser oder Heizwasser des Verbrauchers ab. Danach fließt das Fernwärmewasser mit einer nun niedrigeren

⁷¹ Reiner, 2005, S. 387ff

⁷² http://www.sw-augsburg.de/privatkunden/faq_fernwaerme.php

2.2.7 Fernwärme und Fernwärmenetz

Temperatur über den Rücklauf zum Heiz(kraft)werk zurück, wo es erneut erwärmt wird. Die Fernwärmeleitungen können einige Kilometer lang sein und sind üblicherweise im Boden verlegte, mit Kunststoff ummantelte, isolierte Rohre. Nahwärmenetze werden dabei oft nicht von Großkraftwerken, sondern von kleineren Blockheizkraftwerken in oder nahe bei Wohngebieten gespeist.⁷³

Das Netz der Stadtwerke Augsburg hat eine Länge von ungefähr 140 Kilometern und transportierte 2011 eine Energiemenge von 414,5 Mio. kWh, die zu etwa 20% vom Biomasseheizkraftwerk und zu knapp 40% vom Gasturbinenheizkraftwerk erzeugt wurde⁷⁴. Die restliche Energie stammt aus den Heizwerken, dem Heizkraftwerk mit Dampfturbine und aus Abwärme der Abfallverwertungsanlage. Die Ausdehnung des Stadtwerke-Fernwärmenetzes ist in Abbildung 14 dargestellt. Erkennbar sind auch die grün eingefärbten Bereiche der Nahwärmenetze, die unabhängig vom Fernwärmenetz sind. Die von den Stadtwerken versorgten Gebiete sind pink und blau eingefärbt. Der Verlauf der Hauptleitungen ist schwarz eingezeichnet.

Bei der Abrechnung wird die vom Kunden verbrauchte Wärmemenge in kWh veranschlagt⁷⁵. Berechnet wird diese über einen beim Abnehmer eingebauten Wärmehähler, der den Massenstrom und die Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklaufleitung ermittelt⁷⁶. Die beiden Temperaturen werden direkt mit Fühlern im Vor- und Rücklauf gemessen. Außerdem wird noch der Massenstrom \dot{m} festgestellt. Dabei misst der Zähler das Volumen, das innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls durch ihn hindurch fließt, z.B. mittels eines kleinen Flügelrads. Für jedes Zeitintervall wird dann die verbrauchte Wärmemenge berechnet:

$$Q = m \cdot c_W \cdot \Delta T$$

$$Q = m \cdot c_W \cdot (T_{VL} - T_{RL})$$

Dabei ist c_W die spezifische Wärmekapazität von Wasser, ΔT die Temperaturdifferenz von Vor- und Rücklauf und T_{VL} bzw. T_{RL} die Temperatur des Vor- bzw. Rücklaufs.

73 Zahoransky, 2010, Seite 383f

74 http://www.sw-augsburg.de/downloads/Zahlenspiegel_final_2011.pdf, S. 3 und 7

75 http://www.sw-augsburg.de/geschaeftskunden/fernwaerme_musterrechnung.php

76 Zahoransky, 2010, Seite 383f

2.2.8 Erdgasnetz

2.2.8 Erdgasnetz

Das deutsche Erdgasnetz hat eine Länge von über 300.000 km und wird vor allem aus den Staaten der ehemaligen Sowjetunion und Ländern wie Norwegen und den Niederlanden beliefert. Das Erdgas wird in den Leitungen bei Umgebungstemperatur gasförmig transportiert. Der gängige Transportdruck in den Pipelines beträgt etwa 80 bar. Da es aufgrund von Reibung und Leckagen zu Druckverlusten kommt, sind ungefähr alle 150 km Kompressorstationen eingebaut, die den gewünschten Druck wiederherstellen.⁷⁷

Analog zu den Spannungsebenen beim Stromnetz gibt es auch im Gasnetz verschiedene Druckebenen: Hoch-, Mittel- und Niederdrucknetz. Beim Verbraucher kommt das Gas üblicherweise im Niederdrucknetz mit einigen Millibar Überdruck an. Bei Kunden, die sehr große Mengen Gas abnehmen, wird außer dem Gaszähler noch ein sogenannter Mengenumwerter eingebaut. Dieser sorgt dafür, dass in gewissen zeitlichen Abständen sowohl Druck als auch Temperatur des Gases gemessen wird und das verbrauchte Gasvolumen auf eine entsprechende Gasmenge unter standardisierten Bedingungen umgerechnet wird. Damit wird gewährleistet, dass der Kunde nur die ihm tatsächlich gelieferte Energie bezahlt.

Anders als bei der Stromversorgung wiegen Fehler bei der Bedarfsprognose von Erdgas nicht so schwer. Durch Erhöhung bzw. Herabsetzung des Drucks im Netz bei überschüssigem bzw. fehlendem Gas, können diese Ungenauigkeiten bei der Planung aufgefangen werden. Außerdem kann das Gasnetz so auch als Speicher genutzt werden. Man spricht davon, dass das Netz „atmet“.

Das Augsburger Gasnetz hat eine Länge von 1.081 km, transportiert im Jahr eine Gasmenge von 3.750 Mio. kWh und die Höchstlast im Jahr 2011 betrug 1.197 MW⁷⁸. Es werden rund 55.000 Kundenanlagen beliefert⁷⁹.

2.2.9 Energiespeicher

Da es (abgesehen von Heizöl) relativ unüblich ist, dass die Verbraucher einen eigenen Energievorrat gespeichert haben, kommt es den Versorgungsunternehmen zu, die Energie bedarfsgleich zu liefern und das Speichern zu übernehmen. Grundsätzlich gibt es zwei Arten von Speicherung. Zum einen, wie bei Gas, Öl, Kohle das materielle Speichern von Brennstoffen. Zum anderen eine zustandsbezogene Speicherung von Energie beispielsweise als potentielle, kinetische, elektrische, chemische oder thermische Energie. Bei einem Energiespeicher ist wichtig, dass der Energierückgewinnungsfaktor, also das Verhältnis von eingespeicherter zu der nach der Ausspeicherung wieder nutzbaren Energie möglichst groß ist. Außerdem ist von Relevanz, wie schnell die gespeicherte Energie wieder verfügbar gemacht werden und wie lange sie zurückbehalten werden kann. Man spricht bei letzterem Gesichtspunkt von Momentan-, Minuten-, Stunden-, Wochenreserven und Saisonspeichern.⁸⁰

77 Zahoransky, 2010, S. 378

78 http://www.sw-augsburg.de/downloads/Zahlenspiegel_final_2011.pdf, S. 7

79 Reiner, 2005, S. 387

80 Zahoransky, 2010, S. 385

2.2.9 Energiespeicher

Die Förderung von Erdgas ist relativ wenig steuerbar, weswegen es notwendig ist, Speicher zu installieren, die die sowohl tages- als auch jahreszeitlich stark schwankende Nachfrage decken können. Als Langzeitspeicher von Erdgas kommen hier unterirdische Speicher wie leer geförderte Erdgas- und Erdölfelder in Frage⁸¹. Für die städtische Energieversorgung sind bei Erdgas eher Kurzzeitspeicher, sogenannte Gasbehälter, relevant. Noch bis 2001 wurde in Augsburg der große Scheibengasbehälter des alten Gaswerks Oberhausen genutzt⁸². Jetzt gibt es in Augsburg noch drei Möglichkeiten, die Gasversorgung bedarfsgleich zu gewährleisten: Das erste Mittel ist die Ausnutzung der Netzatmung, d.h. durch höheren Druck in den Leitungen sind größere Gasmengen speicherbar, die bei Leistungsspitzen tagsüber verbraucht und nachts wieder aufgefüllt werden können. Die Atmungsspeicherkapazität beträgt in Augsburg ungefähr 500 MWh, wobei die Spitzenlast bei höchstens 1.200 MWh pro Stunde liegt. Als zweite Möglichkeit können die Stadtwerke Augsburg auf vertraglich vereinbarte fremde Speicher eines ihrer Erdgaslieferanten zurückgreifen. Das letzte Mittel ist bei sehr großen Leistungsspitzen die Gasbezugsmenge von Kunden mit Sondervertrag zu reduzieren.⁸³

Als nächstes soll auf das Speichern von thermischer Energie, das meist nur für kurze Zeiträume vorgesehen ist, eingegangen werden. In Augsburg gibt es beispielsweise einen Schichtspeicher für heißes Fernwärmewasser auf dem Gelände der Gasturbinenanlage. Diese Art von Speicher nutzt die Temperaturabhängigkeit der Dichte des Wassers aus. Bereits bei der Einspeicherung wird das Wasser so eingeleitet, dass es in Temperaturschichten angeordnet ist und sich nicht durchmischt. Überflüssiges kaltes Wasser wird dabei unten aus dem Speicher gedrückt, während die Entnahme bei einem Bedarf oben stattfindet⁸⁴. Im Behälter der Stadtwerke Augsburg können acht Millionen Liter Wasser mit einer Temperatur bis 98°C eingespeichert werden⁸⁵.

Bei der elektrischen Energie erfolgt eine direkte Speicherung wie zum Beispiel in großen Kondensatoren eher selten. Für die Energieversorgung ist das indirekte Speichern von Strom viel wichtiger. Hier wären Batterien und Akkus zu nennen, die elektrochemische Stromspeicher sind und vor allem in der Versorgung mit Notstrom oder bei sehr kleinen Energieanlagen zum Einsatz kommen. Außerdem gibt es elektrische Speicherheizungen, die zumeist nachts Heizungswasser erwärmen, das dann einige Stunden gespeichert und tagsüber verwendet wird. Diese Art von Speicher erfolgt eher dezentral über die Kunden. Der Stromversorger kann deren Verhalten aber steuern, indem er nachts einen niedrigeren Stromtarif anbietet als tagsüber. Zur großtechnischen Speicherung elektrischer Energie eignen sich jedoch vor allem Pumpspeicherkraftwerke, die in den Verbundnetzen für das Auffangen von Spitzenlasten sorgen. Bei dieser Art von Speicher wird zu Zeiten mit schwacher Last und überschüssigem Strom Wasser in einen höher gelegenen Speichersee gepumpt und bei Bedarf wieder entnommen, wobei das Wasser eine Turbine antreibt und über einen Generator wieder Strom

81 Zahoransky, 2010, S. 387f

82 <http://www.sw-augsburg.de/downloads/unternehmensbrosch.pdf>, S. 31

83 Reiner, 2005, S.387f

84 Zahoransky, 2010, S. 389f

85 Krog, 2012

2.2.9 Energiespeicher

erzeugt wird⁸⁶. In Augsburg gibt es im Moment keine großen Anlagen zur Stromspeicherung. Der Bau eines Pumpspeicherkraftwerks bei der Gemeinde Welden im Landkreis Augsburg wurde bereits angedacht, wobei die Finanzierung noch sehr unklar ist⁸⁷. Die zwei vorgesehenen Speicher hätten jeweils ein Volumen von 300 000 m³ und eine Fallhöhe von 50 Metern⁸⁸. Damit wäre eine potentielle Energie von $E_{pot} = V \cdot \rho \cdot g \cdot h \approx 80 MWh$ speicherbar (mit V : gespeichertes Volumen; ρ : Dichte von Wasser, g : Erdbeschleunigung, h : Fallhöhe)⁸⁹. Der Gesamtwirkungsgrad, also der Wirkungsgrad von Ein- und Ausspeichern in Pumpspeicherkraftwerken kann 80% oder mehr betragen⁹⁰. Eine weitere, noch nicht ganz ausgereifte Möglichkeit elektrische Energie zu speichern wird im Abschnitt 2.5.2 (Neue Speichertechnologie - „Power to Gas“) vorgestellt.

86 Heuck, 2010, S. 26

87 Homann, 2012

88 Homann, 2012

89 Heuck, 2010, S. 56

90 Heuck, 2010, S. 26

2.3 Kraftwerkstechnik und Kraftwerkstypen zur Energieerzeugung

2.3 Kraftwerkstechnik und Kraftwerkstypen zur Energieerzeugung

Im Folgenden soll zunächst auf einzelne, elementare Vorgänge und Komponenten von Kraftwerken näher eingegangen werden. Außerdem werden Kraftwerkstypen vorgestellt, wobei speziell die in Augsburg bestehenden genauer erläutert werden.

2.3.1 Energiequellen

Am Anfang eines jeden Prozesses zur Energiegewinnung stehen Energiequellen, die man verschieden einteilen kann. Bei in der Natur vorkommenden Energieträgern wie Rohöl, Kohle, Wind- und Wasserenergie, spricht man von Primärenergieträgern. Nach einer Veredelung oder Veränderung für einen Gebrauch bei technischen Anwendungen nennt man sie dann Sekundärenergieträger. Beispiele dafür sind Heizöl, Benzin, Kohlebriketts oder mechanische Energie. Diese können dann in Nutzenergie in Form von thermischer Energie oder Strom umgewandelt werden. Des Weiteren können Energiequellen nach ihren Risiken, ihrer Zugänglichkeit, ihrer Ergiebigkeit, ihres Einflusses auf die Umwelt etc. differenziert werden. Außerdem können die Energieträger auch noch in regenerative und nicht regenerative bzw. fossile eingeteilt werden. Man hat sich darauf geeinigt, dass Energiequellen dann als erneuerbar bezeichnet werden, wenn nicht mehr davon verbraucht wird, wie sich gleichzeitig neu nachbilden kann⁹¹ bzw. wenn sie in menschlichen Maßstäben gedacht nicht erschöpft werden können. Nach dieser Definition gelten die Sonnenenergie, die Gezeitenenergie, die geothermische Energie und die noch nicht nutzbare Fusionsenergie als regenerativ. Unter Sonnenenergie werden Wind-, Wasser- und Sonnenstrahlungsenergie zusammengefasst. In Biomasse gebundene chemische Energie kann nur dann als regenerativ bezeichnet werden, wenn nicht mehr verbraucht wird, wie neu nachwachsen kann. Die Müllverwertung kann nicht eindeutig zugeordnet werden, da zwar ständig neuer Abfall entsteht, dieser aber hohe Anteile an Kunststoffen enthält, die aus fossilen Ressourcen hergestellt werden⁹². Zu den fossilen Energieträgern, die sich zwar auch sehr langsam nachbilden, aber nach der Definition nicht als erneuerbar bezeichnet werden können, zählen Kohle, Erdöl und Erdgas. Vor allem Letzteres ist gut handhabbar, verbrennt mit relativ geringer Freisetzung von Schadgasen und wird überwiegend in Gasturbinen eingesetzt. Dennoch gilt die Umweltbelastung bei fossilen Energieträgern als besonders groß: Schadgase, Staub und Abwasser werden frei. Aber auch die Nutzung regenerativer Energiequellen beeinflusst das Ökosystem durch Veränderungen des Landschaftsbildes, den Eingriff in Flussläufe oder Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion. Außerdem gibt es noch nukleare Brennstoffe, deren Einsatz in Kernkraftwerken aber aus heutiger Sicht reduziert werden soll.^{93 94}

Kommen fossile Brennstoffe in Kraftwerken zum Einsatz, so geschieht dies immer nach dem folgenden Muster: Der Brennstoff reagiert in einem Verbrennungsvorgang mit einem Oxidant, woraus

91 Zahoransky, 2010, S. 22

92 Zahoransky, 2010, S. 19

93 Zahoransky, 2010, S. 10ff

94 Strauß, 2009, S. 35ff und 46f

2.3.1 Energiequellen

Verbrennungsprodukte und die Reaktionsenthalpie resultieren. Um die verschiedenen Energieträger im Bezug auf ihren Energieinhalt zu vergleichen, wurden der Heizwert und der Brennwert eingeführt. Beide geben an, wie viel thermische Energie bei der Verbrennung von 1 kg eines Stoffes und anschließender Abkühlung der Reaktionsprodukte auf 25°C frei wird. Im Gegensatz zum Heizwert wird beim Brennwert auch die in den Rauchgasen enthaltene Verdampfungswärme des Wassers, das im Brennstoff vorhanden war bzw. während der Reaktion gebildet wurde, berücksichtigt. Alte, teilweise aber noch gebrauchte Bezeichnungen für den Heiz- bzw. den Brennwert sind unterer bzw. oberer Heizwert⁹⁵. Zahlenbeispiele sind Erdgas (mit der Bezeichnung „H“) mit einem Brennwert von 52,3 MJ/kg und einen Heizwert von 47,3 MJ/kg oder schweres Heizöl mit einem Brennwert von 43,3 MJ/kg und einem Heizwert von 41,0 MJ/kg⁹⁶. Der Unterschied der beiden Größen ist bei Heizöl geringer, was darauf hindeutet, dass dessen Wasseranteil geringer ist als der von Erdgas.⁹⁷

Im Jahr 2010 kamen in Deutschland bei der Stromerzeugung die Energieträger Kohle mit 43 %, Kernenergie mit 22 %, Erdgas mit 13 %, Mineralöl mit 2 %, Windkraft mit 6 %, Wasserkraft mit 4 %, Biomasse mit 4 %, Photovoltaik mit 1 % und andere, wie zum Beispiel Hausmüll mit 1 % Anteil zum Einsatz⁹⁸. Tendenziell nimmt die Produktion mit erneuerbaren Energiequellen zu. In Augsburg wird in den Kraftwerken Hausmüll, Biomasse in Form von Holzhackschnitzeln und Erdgas eingesetzt. Für Notfälle ist auch ein Betrieb mit Heizöl möglich, von dem eine gewisse Menge in Reservetanks immer zur Verfügung steht.

2.3.2 Energieumwandlung in Kraftwerken

In der Energietechnik ist vor allem interessant, wie die verschiedenen Arten von Energieträgern, also z.B. bei Wasserkraftwerken die potentielle Lageenergie, die Kernenergie oder chemische Brennstoffenergie möglichst wirtschaftlich in Nutzenergie, sprich mechanische Arbeit oder elektrische Energie, umgewandelt werden kann. In Wärmekraftwerken erfolgt die Energieumwandlung immer nach demselben Schema: Die Brennstoffenergie wird in thermische Energie umgeformt, die dann in einer thermodynamischen Maschine, beispielsweise in einer Turbine oder in einem Kolben, in einem Kreisprozess in mechanische Arbeit überführt wird. Die bei der Verbrennung frei werdende Wärme wird dabei an ein Arbeitsmittel abgegeben, so dass die thermische Energie mit diesem befördert werden kann. Man unterscheidet zwischen homogenen Arbeitsmittel wie Gas und inhomogenen wie Wasser bzw. Dampf. Kriterien für die Anwendung einer Umwandlungsmethode sind neben dem hohen Wirkungsgrad noch Zuverlässigkeit, ein sicherer Betrieb sowie die Investitions- und Unterhaltskosten für eine solchen Anlage.⁹⁹

95 Zahoransky, 2010, S. 18f

96 http://www.uni-magdeburg.de/isut/TV/Download/Kapitel3_VerbrennungSS2003.pdf

97 Strauß, 2009, S. 38f

98 Heuk, 2010, S. 6, 27, 29f, 30

99 Strauß, 2009, S. 24f

2.3.2 Energieumwandlung in Kraftwerken

Bei der Umformung verschiedener Energiearten ineinander spricht man von einem Umwandlungswirkungsgrad η_{Um} , der wie folgt definiert wird:

$$\eta_{Um} = \frac{\text{umgewandelte Energiemenge der gewünschten Energieform}}{\text{gesamte eingesetzte Energie}} \cdot 100$$

Bei der direkten Überführung von chemischer in thermische Energie durch Verbrennung kann ein maximaler Umwandlungswirkungsgrad von 97 % erreicht werden. Wird chemische Energie in einem Dampfkraftwerk indirekt, nämlich über die Zwischenstufen thermische und mechanische Energie, in elektrische Energie umgewandelt, kann nur noch ein Wirkungsgrad von höchstens 45 % erzielt werden.¹⁰¹

2.3.3 Energieverbrauch bei der Energiegewinnung

Bei der Energiegewinnung in Kraftwerken wird auch Energie verbraucht. Zum einen wird Brennstoff benötigt und zum anderen entstehen Kosten für den Unterhalt und den Bau der Anlagen. Um vergleichen zu können, wie sich unterschiedliche Kraftwerke rentieren, wurde der sogenannte Erntefaktor eingeführt, der wie folgt definiert wird:¹⁰²

$$\text{Erntefaktor} = \frac{\text{gewonnene Nutzenergie während der Lebenszeit einer Anlage}}{\text{für Bau, Betrieb und Unterhalt erforderliche Energie}}$$

Zum Energiebedarf für den Betrieb eines Kraftwerks gehört zum Beispiel die elektrische Energie, die für die Rauchgasreinigung oder für die Speisewasser- und Kondensatpumpen benötigt wird. Läuft eine Anlage mit optimaler Auslastung, so nimmt der Eigenbedarf in etwa 5 % der produzierten Leistung in Anspruch. In Gasturbinenanlagen ist das Betreiben des Verdichters für einen Großteil des Eigenbedarfs verantwortlich.^{103, 104}

2.3.4 Anforderungen an Kraftwerke im Verbundnetz und Regelung

Wie im Abschnitt 2.2 bereits erörtert wurde, gibt es für elektrische Energie nur unzureichende großtechnische Speichermöglichkeiten. Aus diesem Grund muss Strom immer genau dann in der passenden Menge produziert werden, wenn die Verbraucher einen Bedarf haben. Dabei sind die energieverzeugenden Kraftwerke mit den Verbrauchern im Verbundnetz gekoppelt. Aus dem schwankenden Bedarf der Kunden ergeben sich Anforderungen an die Kraftwerke hinsichtlich Regelungstechnik und den sogenannten Dynamikeigenschaften, unter denen man zum Beispiel die Flexibilität der Feuerungsanlage und die Belastung des Materials, aus dem Bauteile wie Turbinen gefertigt sind, versteht. Üblicherweise sollten Kraftwerke die von ihnen erzeugte Leistung pro Minute um 6 bis 10 % ändern können.¹⁰⁵

100 Strauß, 2009, S. 25 und Zahoransky, 2010, S. 17

101 Zahoransky, 2010, S. 17f

102 Strauß, 2009, S. 26f

103 Heuck, 2010, S. 20

104 Heuck, 2010, S. 9

105 Strauß, 2009, S. 27f

2.3.4 Anforderungen an Kraftwerke im Verbundnetz und Regelung

In Wärmekraftwerken wird die produzierte Leistung meist durch Steuerung von Turbine und Heizleistung dosiert. Dabei wird der Brennstoffmassenstrom geändert, was Einfluss auf die Heizleistung hat, die wiederum die Temperatur des Frischdampfes bestimmt, der in die Turbine eingeleitet wird. Bei Dampfturbinen hat sich die sogenannte Gleitdruckregelung etabliert, bei der Frischdampfdruck und Massenstrom variiert werden, während sich der Volumenstrom durch die Turbine nicht ändert. In Gasturbinen erfolgt die Leistungssteuerung ebenfalls über die Korrektur der Brennstoffzufuhr. Gasturbinen haben außerdem den Vorteil, dass sie aus dem Stillstand nur etwa 15 Minuten bis zum Erreichen des Volllastbetriebs brauchen.¹⁰⁶

2.3.5 Dampfkraftwerke

Im Folgenden soll ein grober Überblick über Dampfkraftwerke gegeben werden. Wichtige einzelne Bestandteile werden in den Abschnitten danach behandelt.

Der in Dampfkraftwerken angewandte Prozess ist der Clausius-Rankine-Vergleichsprozess, der im Unterkapitel 2.1.7 vorgestellt wurde. Der Kreislauf im Dampfkraftwerk besteht aus einem Vorwärmer und einem Überhitzer, in denen der Dampf auf den Zustand gebracht wird, in dem er auf die Turbine trifft. An den Überhitzer schließt sich ein Turbinensatz an, der mit einem Generator gekoppelt ist. Nach der Turbine wird der Dampf im Kondensator kondensiert und das Wasser mit der Kondensatpumpe in den Vorwärmer befördert, in dem die sogenannte regenerative Speisewasservorwärmung von statten geht. Anschließend wird das Wasser in den Speisewasserbehälter geleitet, von wo es die Speisewasserpumpe entnimmt und auf einen Druck von 200 bis 300 bar bringt. Danach durchläuft das Wasser wieder den Vorwärmer und den Überhitzer, womit sich der Kreislauf schließt. Als Arbeitsmittel ist Wasser üblich, das auch als Speisewasser bezeichnet wird.¹⁰⁷

Die Energieumwandlungen, die im Dampfkraftwerk passieren, lassen sich abgrenzen. Die erste Umwandlung geschieht in der Feuerungsanlage, wo die im Brennstoff chemisch gebundene Energie in die in den entstehenden Rauchgasen enthaltene thermische Energie überführt wird. Die Rauchgase geben ihre thermische Energie an den Kesselheizflächen an das Arbeitsfluid ab, das auf einen Druck von etwa 200 bar und eine Temperatur von ungefähr 540°C gebracht wird. In der Turbine wird nun die Enthalpie des Dampfes in mechanische Energie umgewandelt. Der Dampf expandiert vom Eintritt bis zum Austritt aus der Turbine etwa um das 2.000 fache. Nach Austritt aus der Turbine wird der Dampf im Kondensator verflüssigt. Die mechanische Energie der Turbine wird durch einen Generator, der auf dem Prinzip der Induktion basiert, in elektrische Energie umgewandelt.¹⁰⁸

Die benötigte thermische Energie kann von verschiedenen fossilen Energieträgern, von Biomasse, Abfall, aus Kernspaltung oder Solarenergie stammen. Je besser der Brennstoff ist, desto höhere Drücke und Temperaturen des Dampfes können erzielt werden und somit auch ein höherer Wirkungsgrad.¹⁰⁹

106 Zahoransky, 2010, S. 34f und S. 146

107 Heuk, 2010, S. 7ff

108 Strauß, 2009, S. 105f

109 Zahoransky, 2010, S. 28

2.3.5 Dampfkraftwerke

Kommt in einem Dampfkraftwerk Kraft-Wärme-Kopplung zum Einsatz, so spricht man von einem Dampfheizkraftwerk. Dabei findet keine Erhöhung des Wirkungsgrad des Dampfkraftprozesses statt, allerdings wird die Brennstoffenergie besser ausgenutzt.

In Abbildung 15 ist eine Schaltskizze eines Dampfkraftwerks dargestellt. Zusätzlich zu obigen Ausführungen, sind hier noch mehrere Vorwärmstrecken eingefügt. Außerdem sind an vielen Stellen der Druck und die Temperatur des Arbeitsmittels angegeben, sowie, ob es gerade flüssig oder gasförmig ist.

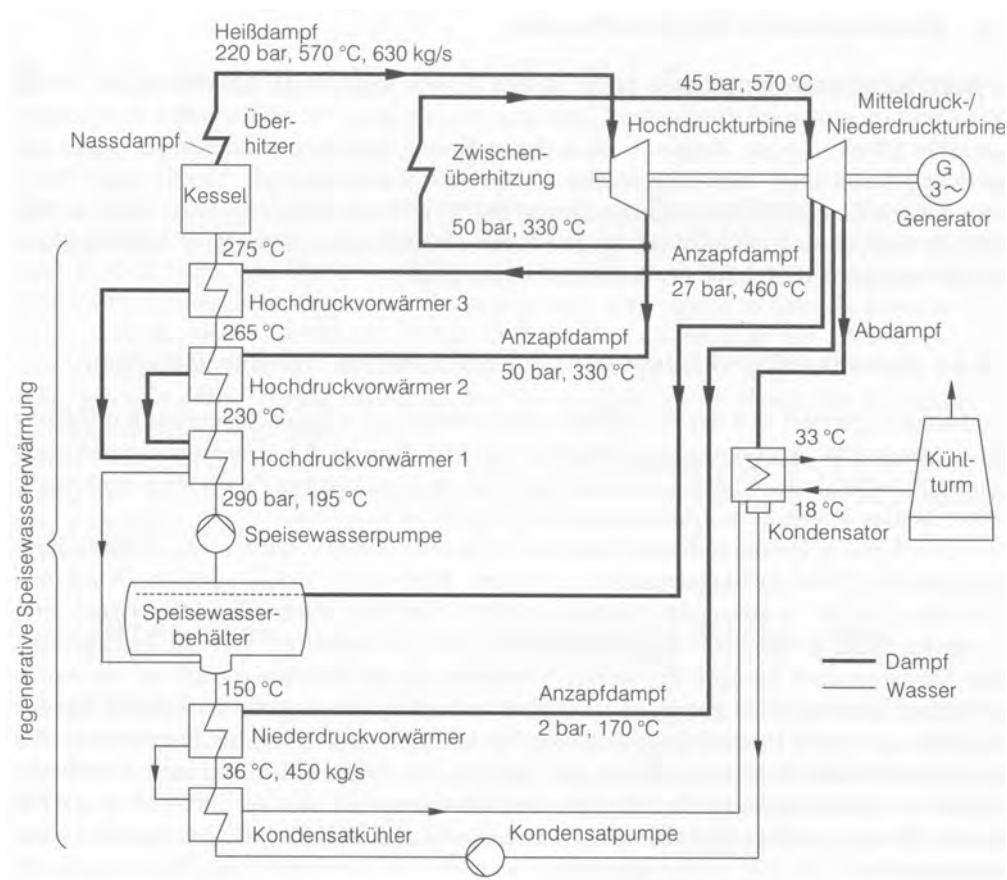


Abbildung 15: Prinzipieller Aufbau eines Dampfkraftwerks

2.3.6 Verbrennungstechnik und Feuerungsanlagen

2.3.6 Verbrennungstechnik und Feuerungsanlagen

Für die Umwandlung der chemischen Energie der Brennstoffe in thermische Energie sind die Feuerungsanlagen eines Kraftwerks verantwortlich.

Zunächst einmal ist die Verbrennung eine Oxidation des Brennstoffes bei sehr hoher Temperatur, die hauptsächlich aus einer Reaktion von Kohlenstoff und Wasserstoff mit Sauerstoff unter Abgabe von Wärme besteht. Um diese Verbrennungsreaktion aufrechtzuerhalten, darf die Zündtemperatur des jeweiligen Brennstoffs nicht unterschritten werden. Das heißt, die abgegebene Wärme muss größer sein als die Verluste an die Umgebung durch Wärmeleitung und Strahlung. Als Beispiel für eine Zündtemperatur wäre die von Methan in Luft mit 595°C anzuführen¹¹⁰. Der Verbrennungsvorgang von Gas ist am Einfachsten darzulegen: Zunächst werden Brennstoff und Sauerstoff in einem solchen Verhältnis zusammen gegeben, dass die Mischung zündfähig ist. Anschließend werden die Reaktionspartner gezündet und verbrennen. Damit die Verbrennung aufrecht erhalten werden kann, muss nun die Temperatur über der Zündtemperatur liegen, die Verbrennungsprodukte weg geleitet und Sauerstoff zugeführt werden.^{111 112}

Die Abgase der Verbrennung werden in die Rauchgasreinigung geleitet, wo sie von Schwefel, Stickstoff und Feinstaub befreit werden müssen. Es wird jedoch vor allem auch darauf Wert gelegt, bei der Verbrennung möglichst wenig Schadstoffe entstehen zu lassen.¹¹³

Je nach Art des Brennstoffs gibt es verschiedene Vorrichtungen zur Verbrennung. Bei festem, grobem Brennstoff wie Biomasse, Kohle oder Abfall wird üblicherweise die Rostfeuerung eingesetzt. Im Augsburger Biomasseheizkraftwerk besteht diese aus einer schiefen Ebene aus beweglichen Metallrosten, auf der die Holzhackschnitzel langsam hinunter transportiert werden. Am Beginn des Rostes brennt das Material noch nicht, sondern wird durch die Hitze getrocknet und entgast, dann kommt es in Berührung mit schon brennendem Material und wird gezündet. Am Ende des Rostes ist das Material dann verbrannt, Schlacke und Asche fallen durch den Rost nach unten. Abbildung 16 zeigt das Prinzip einer solchen Rostfeuerung. Nach dem Stillstand einer solchen Anlage dauert es sehr lange, bis der Betrieb wieder vollständig aufgenommen werden kann. Im Biomasseheizkraftwerk muss ein Arbeiter ins Innere des Feuerraums klettern und eine Art „Lagerfeuer“ auf dem Rost anzünden. Nicht zuletzt deshalb lässt man solche Anlagen, abgesehen von Revisionszeiten, ununterbrochen durchlaufen. Auf die Leistung solcher Rostfeuerungen kann Einfluss genommen werden, indem die Geschwindigkeit, mit der die Roste nach unten wandern, variiert wird. Diese Geschwindigkeit kann sich zwischen 1,5 und 15 m/h bewegen. In Kohlekraftwerken wird die Kohle zumeist sehr fein gemahlen und der Staub dann eingeblasen. Die sogenannte Brennerfeuerung kommt für gasförmige, flüssige und gemahlene Brennstoffe in Frage. Dabei wird der Brennstoff gemeinsam

110 Strauß, 2009, S. 115

111 Strauß, 2009, S. 128

112 Strauß, 2009, S. 115

113 Zahoransky, 2010, S. 57

2.3.6 Verbrennungstechnik und Feuerungsanlagen

mit dem Sauerstoff in die Brennkammer eingespritzt. In dem mit Erdgas betriebenen Augsburger Dampfkraftwerk wird die Brennerfeuerung eingesetzt.^{114 115 116}

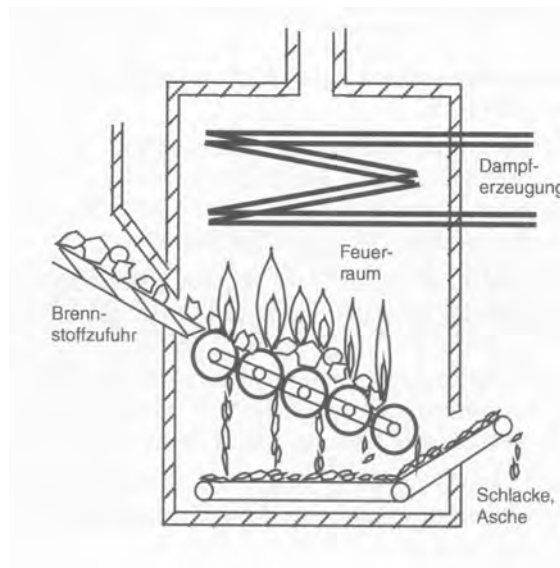


Abbildung 16: Aufbau eines Kessels mit Rostfeuerung

Bei der Verbrennung können Verluste entstehen durch Wärmeleitung, Konvektion oder Wärmestrahlung der die Feuerungsanlage einschließenden Wände, durch thermische Energie, die mit den Abgasen ausgeleitet wird, durch unvollständige Verbrennung (sogenannte Feuerungsverluste) und durch die thermische Energie, die die Asche und Schlacke beinhaltet¹¹⁷.

2.3.7 Dampffarten, Dampferzeuger, Überhitzung und Kondensator

In einem Dampfkraftwerk ist der Dampferzeuger verantwortlich dafür, die thermische Energie, die bei der Verbrennung des Brennstoffs freigesetzt wurde, an das Arbeitsmittel abzugeben und damit Dampf unter Überdruck zu erzeugen. Der Dampferzeuger nimmt im Kraftwerk den meisten Raum ein und ist auch zumeist das teuerste Bauteil. Umgangssprachlich wird der Dampferzeuger, der aus mehreren Komponenten wie Vorwärmer, Verdampfer und Überhitzer besteht, auch als Kessel bezeichnet¹¹⁸. Bis der überhitzte Dampf auf die Turbine treffen kann, muss das Arbeitsmittel Wasser erst im Vorwärmer auf Sättigungstemperatur gebracht werden, anschließend verdampft und schließlich überhitzt werden: Von der Speisewasserpumpe wird das Wasser auf einen Druck von 200 bis 300 bar gebracht und in den Vorwärmer befördert¹¹⁹. Dort wird es solange erwärmt bis es die Sättigungstemperatur erreicht hat. Danach gelangt es in den Verdampfer, wo es erhitzt wird bis Sättigungstemperatur erreicht hat.

114 Zahoransky, 2010, S. 45

115 Strauß, 2009, S. 133

116 Strauß, 2009, S. 135ff

117 Strauß, 2009, S. 183

118 Strauß, 2010, S. 185

119 Heuk, 2010, S. 7

2.3.7 Dampffarten, Dampferzeuger, Überhitzung und Kondensator

dampf entstanden ist. Das heißt, das Wasser ist in einem geschlossenen Behälter so lange verdampft worden, bis aufgrund des Drucks des schon vorhandenen Dampfes kein weiteres Wasser mehr in den gasförmigen Zustand überführt werden kann. Bis dieser Zustand eingetreten ist, spricht man von Nassdampf, welcher als weiße Wolke sichtbar ist und von dem zumeist die Alltagsvorstellung von Dampf herrührt. Anschließend wird der Satttdampf, der noch Wassertröpfchen enthält, aus dem Verdampfer in den Überhitzer geleitet und hat somit keinen Kontakt mehr mit dem nicht in den gasförmigen Zustand überführten restlichen Wasser. Im Überhitzer wird die Temperatur des Dampfes weiter erhöht und es entsteht der sogenannte Heiß- oder Frischdampf, der unsichtbar ist und auf die Turbine geleitet wird. Dabei hat er eine Temperatur zwischen 540 und 580°C und einen Druck zwischen 180 und 280 bar^{120, 121, 122, 123, 124}.

Der Aufbau des Dampferzeugers gestaltet sich zumeist wie folgt: An den Wänden des Feuerraums, in dem der Brennstoff verbrannt wird, verlaufen schraubenförmige Rohrsysteme, durch die das Arbeitsmittel strömt. Je nach gewünschter Temperatur, die beispielsweise beim Überhitzer sehr hoch sein muss, beim Vorwärmer dagegen auch niedriger sein kann, sind die jeweiligen Rohre in einem entsprechenden Abstand zur Flamme angeordnet.¹²⁵

Der Abdampf der Turbine wird in den Kondensator geleitet, wo er an das Kühlwasser Wärme abgibt und bis etwa auf die Temperatur des Kühlwasser kondensiert. Dabei entsteht durch die Verkleinerung des Arbeitsmittelvolumens von gasförmig zu flüssig ein Unterdruck. Die an das Kühlwasser abgegebene Wärmemenge entspricht ungefähr der Hälfte der Energie des Brennstoffs. Das benötigte Kühlwasser kann Gewässern entnommen werden. In Augsburg nutzt beispielsweise das Dampfheizkraftwerk in der Stadtmitte einen Stadtbach zur Kühlung. Weitere Möglichkeiten zur Kühlung sind Kühltürme oder die Verdunstungskühlung. Das kondensierte Speisewasser wird anschließend von der Kondensatpumpe wieder in den Speisewasserbehälter gepumpt.^{126, 127}

Zu sagen ist noch, dass das Material der Bestandteile eines Dampferzeugers sehr großen Dehnungen und Spannungen ausgesetzt ist, wenn die Temperatur beim Starten des Kraftwerks von Umgebungstemperatur auf über 500°C gebracht wird. Aus diesem Grund wird das Anfahren des Kraftwerks auf einige Stunden ausgedehnt.¹²⁸

120 Zahoransky, 2010, S. 36

121 Lüders, 2009, S. 294

122 <http://www.daempfen-dampfkessel-blog.de/dampfencontainer/nasdampf-sattdampf-und-heisdampf/>

123 Heuck, 2010, S. 7

124 Zahoransky, 2010, S.42f

125 Heuck, 2010, S. 12

126 Heuck, 2010, S.7f

127 Heuck, 2010, S. 16f

128 Heuck, 2010, S. 10

2.3.8 Turbinen

2.3.8 Turbinen

Die Dampf-, Gas- und Wasserturbinen, die hier genauer erläutert werden sollen, gehören wie auch Windräder, Propeller oder Turboverdichter zu den Strömungsmaschinen. Bei diesen findet eine Umwandlung der potentiellen Energie eines Arbeitsmittels in kinetische Energie und schließlich in mechanische Energie in Form einer sich drehenden Turbine statt. Beim Turboverdichter passiert diese Energieumformung in der umgekehrten Reihenfolge.¹²⁹

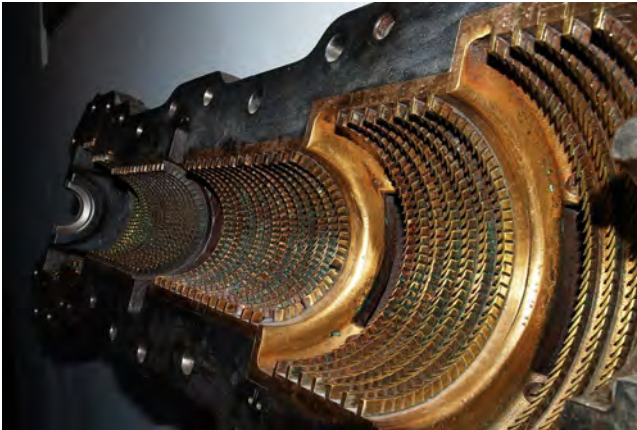


Abbildung 17: offenes Turbinengehäuse einer Dampfturbine mit messingfarbenen Leitschaufeln
Abbildung 18: Dampfturbinen-Laufräder mit Laufschaufeln

Turbinen sind aus Leit- und Laufrädern aufgebaut, wobei eine Turbinenstufe aus einem Leit- und einem Laufrad besteht. Dampf- und Gasturbinen sind üblicherweise mehrstufig. Die Leitschaufeln sind fix auf den unbeweglichen Leiträdern angebracht, die meist in die Innenseite des Turbinengehäuses integriert sind (siehe Abbildung 17). Die Laufschaufeln befinden sich außen an den drehbaren Laufrädern (siehe Abbildung 18). Der Zweck der Leitschaufeln ist es, das Arbeitsmittel möglichst optimal auf die Laufschaufeln zu lenken. Dafür sind die Leitschaufeln so angeordnet, dass die vom Arbeitsmittel durchströmte Fläche zwischen zwei benachbarten Leitschaufeln am Anfang größer ist als am Ende. Damit wirken die Leitschaufeln wie Düsen, d.h. die Geschwindigkeit des Arbeitsmittels, die die Größenordnung der Schallgeschwindigkeit erreichen kann, steigt. Währenddessen nimmt der Druck ab. Nach dem Austritt aus den Leitschaufeln trifft das Arbeitsmittel auf die Laufradschaufeln, an die es gemäß dem Impulssatz seine kinetische Energie teilweise abgibt. Üblicherweise strömt das Arbeitsmittel axial durch die Turbinenräder.^{130 131}

Bei der Dampfturbine wird die Drehung des Laufrades durch die Entspannung des Dampfes bewirkt. Der Frischdampf hat bei Eintritt in die Turbine Werte um 550°C und 200 bar und wird bis zum Austritt auf Kondensatorzustand entspannt, wofür Beispielwerte 40°C und der entsprechende Sättigungsdruck von 0,074 bar wären¹³². Dieser Druckgradient sorgt erst für das Strömen des Ar-

129 Strauß, 2009, S. 249

130 Heuck, 2010, S. 14ff

131 Strauß, 2009, S. 249ff

132 Zahoransky, 2010, S.64

2.3.8 Turbinen

beitsmediums durch die Turbine. Dabei kommt es aber auch zu einer enormen Volumenzunahme, so dass der Platzbedarf und der Volumenstrom des Dampfes in Strömungsrichtung steigen. Dem begegnet man mit bei Druckabnahme entsprechend größer werdenden Laufraddurchmessern und Hintereinanderschalten von Hoch-, Mittel- und Niederdruckturbinen zu einem sogenannten Turbosatz. Dampfturbinen drehen üblicherweise mit 3.000 Umdrehungen pro Minute bzw. 50 Umdrehungen pro Sekunde, woraus bei Kopplung mit einem Generator, dessen Rotor nur ein Polpaar hat, eine Frequenz von 50 Hz resultiert. Die Turbine eines Kraftwerks, das in ein 60 Hz-Stromnetz einspeist, hat entsprechend eine Drehzahl von 3.600.¹³³

Die von der Turbine abgegebene Leistung P_T hängt vom Dampfstrom \dot{m} , vom Turbinenwirkungsgrad η_T und von der Differenz der Enthalpie des Dampfes zwischen Ein- und Austritt Δh ab: $P_T = \dot{m} \cdot \eta_T \cdot \Delta h$. Durch eine Änderung der zugeführten Dampfmenge kann also die von der Turbine abgegebene Leistung beeinflusst werden.¹³⁴

Die Turbine einer Gasturbinenanlage gleicht von der Funktionsweise einer Dampfturbine. Statt Dampf dienen Verbrennungsgase, die sich hauptsächlich aus Kohlendioxid, Wasserdampf und Stickstoff zusammensetzen, als Arbeitsmittel. Da Temperaturen von bis zu 1.500°C erreicht werden, stellen sich auch andere Anforderungen an das verwendete Material. Die Turbinenschaufeln werden beispielsweise aus Einkristallen gefertigt und mit Luft gekühlt.^{135 136}

Der Aufbau von Wasserturbinen ist relativ einfach, da sie in der Regel nur eine Stufe, also nur jeweils ein Leit- und Laufrad haben. Im Prinzip ist ihre Funktionsweise vergleichbar mit der von Dampf- und Gasturbinen, allerdings ist das Arbeitsmittel Wasser inkompressibel und weist eine höhere Dichte auf. Wasserturbinen haben eine vergleichsweise höhere Leistungsdichte, d.h. pro Kilogramm Wasser kann mehr Leistung erzeugt werden, als mit der gleichen Masse der Arbeitsmittel von Dampf- und Gasturbine. Die Wasserturbinen haben nur wenige Schaufeln und eine niedrige Drehzahl im Bereich von 100 Umdrehungen pro Minute¹³⁷. Die feststehenden Leitschaufeln sorgen dafür, dass das Wasser optimal auf die Laufradschaufeln trifft und möglichst viel seiner kinetischen Energie an diese abgeben kann. Die Leistung wird geregelt, indem die zugeführte Wassermenge entweder gedrosselt oder erhöht wird. Je nach Fallhöhe kommen drei unterschiedliche Turbinentypen zum Einsatz, die in Abbildung 19 dargestellt sind. Für Fallhöhen zwischen 300 und 2.000 Metern wird die Peltonturbine verwendet, die als einzige tangential vom Wasser angeströmt wird und vom Aussehen her am ehesten einem Schaufelrad nahe kommt. Die Francisturbine ist bei Fallhöhen von 40 bis 700 Meter in Gebrauch. Bei niedrigen Fallhöhen wird die Kaplan-turbine eingesetzt, deren Laufrad einem Propeller ähnelt.^{138 139}

133 Zahoransky, 2010, S. 65

134 Strauß, 2009, S. 261

135 Heuck, 2010, S. 19

136 Strauß, 2009, S. 339

137 Zahoransky, 2010, S. 260

138 Heuck, 2010, S. 24f

139 Strauß, 2009, S. 447

2.3.8 Turbinen

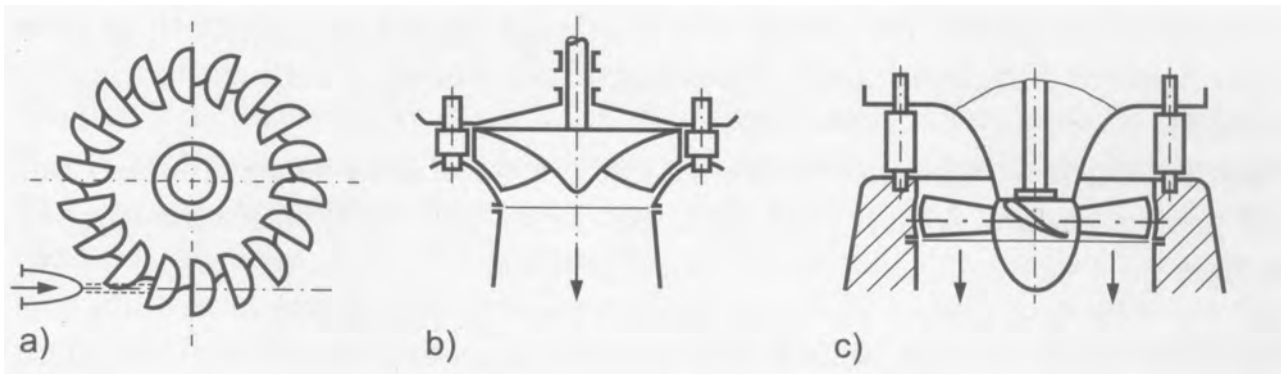


Abbildung 19: Wasserturbinentypen: a) Pelton turbine, b) Francis turbine, c) Kaplan turbine

Turbinen erreichen Wirkungsgrade bis zu 94%. Verluste entstehen durch Reibung an den Schaufeln und in der Lagerung der drehbaren Teile, durch Spaltverluste zwischen fixen und beweglichen Komponenten, sowie durch Undichtigkeiten.¹⁴⁰

2.3.9 Erzeugung elektrischer Energie und Frequenz durch Generatoren

In Kraftwerken wird die mechanische Energie der Turbinen durch einen Generator in elektrische Energie umgewandelt. Dabei sind Wirkungsgrade bis 99 % möglich¹⁴¹. Das Stromnetz hat eine Frequenz von 50 Hz. Gas- und Dampfturbinen haben deswegen zumeist eine Drehzahl von 3.000 Umdrehungen pro Minute bzw. 50 pro Sekunde und ihr zugehöriger Generator ein Polpaar, also einen Magneten mit Nord- und Südpol. Wasserturbinen drehen üblicherweise deutlich langsamer. Damit der Generator trotzdem eine Frequenz von 50 Hz erzeugt und direkt mit dem Stromnetz gekoppelt werden kann, wird die Anzahl von Polpaaren, also Magneten erhöht¹⁴². Angenommen, eine Wasserturbine dreht mit 120 Umdrehungen pro Minute bzw. 2 pro Sekunde, dann benötigt der Generator 25 Polpaare, um eine Frequenz von 50 Hz zu erzeugen. In einer Formel ausgedrückt, würde dieser Zusammenhang wie folgt aussehen: $f = 50 \text{ Hz} = p \cdot n$ ¹⁴³. f ist dabei die Frequenz von 50 Hz, p die Polpaarzahl und n die Anzahl Umdrehungen pro Sekunde.

Da die Generatordrehzahl, vor allem bei einer Gas- oder Dampfturbine sehr hoch ist, wird der Läufer massiv gebaut, um die wirkenden Fliehkräfte besser auszuhalten. Man bezeichnet den Generator dann auch als Vollpolmaschine. Die Erregerwicklungen werden in Aussparungen in der Oberfläche des Läufers gelegt. Auch der Ständer hat auf seiner Innenseite Vertiefungen, in die, jeweils um 120° versetzt, drei Wicklungsstränge eingelegt werden, um Drehstrom zu erzeugen.¹⁴⁴

Die Generatordrehzahl wird aufgrund der Kopplung mit dem Stromnetz von Leistungsschwankungen der Turbine nur unmerklich beeinflusst. Da das Stromnetz europaweit verbunden ist und sehr viele Kraftwerke daran angeschlossen sind, gleichen sich Leistungsschwankungen oftmals sehr gut

140 Strauß, 2009, S. 260f

141 Heuck, 2010, S. 178

142 Zahoransky, 2010, S. 260f

143 Heuck, 2010, S. 180

144 Heuck, 2010, S. 178

2.3.9 Erzeugung elektrischer Energie und Frequenz durch Generatoren

aus. Allerdings muss die Leistungsabgabe des Generators dem Bedarf angepasst sein, um die Frequenz aufrechtzuerhalten. Wird mehr Strom produziert, als verbraucht wird, so erhöht sich die Frequenz und umgekehrt. ¹⁴⁵

2.3.10 Speisewasserversorgung

Dampfkraftwerke setzen als Arbeitsmittel üblicherweise Wasser in flüssigem und gasförmigem Zustand ein, das Speisewasser genannt wird. Um zu verhindern, dass die Kraftwerksbauteile, die mit dem Arbeitsfluid in Berührung kommen, korrodieren oder sich in ihnen Ablagerungen bilden, muss dafür gesorgt werden, dass das Wasser besonders rein ist. Ablagerungen wären insbesondere auf den Turbinenschaufeln fatal, da die Turbine sich extrem schnell dreht und so die Gefahr bestünde, dass sie zerstört wird. Aus diesem Grund wird das Wasser von Schwebstoffen gereinigt, entkalkt und entsalzt. Außerdem muss es einen pH-Wert zwischen 7 und 9,5 haben, was mit dem Verhindern der Korrosion zusammenhängt. ¹⁴⁶

Eine Maßnahme, um den Wirkungsgrad eines Dampfkraftwerkes zu erhöhen, ist die sogenannte regenerative Speisewasservorwärmung. Ohne diese würde der entspannte Dampf nach der Turbine in den Kondensator geleitet, dort auf eine möglichst niedrige Temperatur kondensiert und durch die Speisewasserpumpe wieder in den Kessel befördert. Der Wirkungsgrad eines Prozesses ist umso höher, je mehr er dem Carnot-Prozess ähnelt, bei welchem dem Arbeitsfluid bei hoher Temperatur Wärme zugeführt und bei niedriger Temperatur Wärme entnommen wird. Um dies zu imitieren, wird von der Turbine eine gewisse Menge Dampf abgeleitet und damit das Speisewasser zwischen Speisewasserpumpe und Dampferzeuger in einem zusätzlichen Vorwärmer auf bis zu 250°C erhitzt¹⁴⁷. Die Erhöhung des Wirkungsgrades sorgt dabei für mehr Leistung, als durch das Abzapfen des Dampfes von der Turbine verloren geht. Zumeist gibt es mehrere Stufen der Vorwärmung, wobei an verschiedenen Stellen der Turbine unterschiedlich heißer Dampf abgeleitet wird. ^{148 149 150}

2.3.11 Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)

Zunächst sei vorausgeschickt, dass ein Kraftwerk, das mit Kraft-Wärme-Kopplung arbeitet, als Heizkraftwerk bezeichnet wird. Die Kraft-Wärme-Kopplung ermöglicht es, in einem thermischen Kraftwerk zwei Energieformen zugleich bereit zu stellen. Fast ausnahmslos werden dabei Strom- und Wärmeerzeugung kombiniert. Üblicherweise wird bei Gasturbinenanlagen und anderen Verbrennungsmotoren das heiße Abgas genutzt, so dass die Stromerzeugung nicht reduziert wird. Anders bei Dampfkraftwerken: Hier wird ein Teil des Dampfes abgezapft, der je nach weiterer Verwendung Drücke zwischen 2 und 6 bar und Temperaturen von 110 bis 220°C hat¹⁵¹. Der abgeleitete

145 Zahoransky, 2010, S. 66f

146 Zahoransky, 2009, S. 39

147 Zahoransky, 2010, S. 36

148 Heuck, 2010, S. 9

149 Heuck, 2010, S. 17

150 Strauß, 2009, S. 83f

151 Heuck, 2010, S. 9

2.3.11 Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)

Dampf kann eingesetzt werden zur Erhitzung von Fernwärmewasser oder zur Herstellung von Prozessdampf, der beispielsweise in einer Papierfabrik zur Produktion benötigt wird. Will man nun die Kraft-Wärme-Kopplung bewerten, so spricht man nicht von einem Wirkungsgrad, denn dieser bezieht sich üblicherweise nur auf den Prozess der Stromerzeugung, sondern von einem Nutzungsgrad ϵ , der wie folgt definiert wird:

$$\epsilon = \frac{\text{gewonnene Arbeit und Wärme}}{\text{zugeführte Energie}}$$

Der Nutzungsgrad gibt Auskunft über das Ausmaß der Energieausbeute des eingesetzten Brennstoffs. Ein Nachteil der Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen ist, dass sie auf eine genügend große Anzahl von Abnehmern für die Fernwärme bzw. den Prozessdampf angewiesen sind. Zugleich werden große Kraftwerke nur selten in der Nähe von Wohngebieten gebaut. Allerdings bieten sich hierfür kleinere Blockheizkraftwerke an, die auch mit Kraft-Wärme-Kopplung arbeiten und die sich einfacher an den örtlichen Wärmebedarf anpassen können.^{152 153 154}

Abschließend ist zu sagen, dass die KWK-Anlagen fast ausnahmslos dann eingesetzt werden, wenn ein Bedarf an Fernwärme besteht oder es die Möglichkeit gibt, das heiße Wasser zu speichern. Um ausschließlich Strom zu erzeugen, ist der Betrieb wegen hoher Brennstoffkosten und teilweise sehr niedrigen Preisen an der Strombörse zu teuer. An einem sonnigen Tag im Sommer wird beispielsweise sehr wenig Fernwärme benötigt, während Solarstrom im Überfluss zur Verfügung steht. In Augsburg werden die bestehenden KWK-Anlagen, abgesehen vom Biomasseheizkraftwerk und der Abfallverwertungsanlage, lediglich dann gefahren, wenn ein genügend großer Bedarf an Fernwärme besteht.

2.3.12 Biomassekraftwerke

Es gibt drei Hauptarten, Biomasse energetisch zu verwerten. Eine davon ist die thermochemische Energieumwandlung. Diese schließt die Verbrennung, die Vergasung sowie die Verflüssigung zu Treibstoff mit ein. Eine weitere Möglichkeit sind physikalisch-chemische Verfahren, bei denen aus ölhaltigen Pflanzenteilen Biodiesel produziert wird. Als letztes ist die anaerobe Fermentation zur Herstellung von Alkohol und Biogas als biochemisches Verfahren zu nennen.¹⁵⁵

Die verwertbare Biomasse kann in anfallende Biomasse, wie beispielsweise Restholz, Ernterückstände, Gülle, Klärschlamm etc. und in eigens angebaute Biomasse eingeteilt werden. Dabei ist letztere wesentlich teurer.^{156 157}

Das Augsburger Biomasseheizkraftwerk ist ein Dampfheizkraftwerk mit einer Rostfeuerung mit Holzhackschnitzeln. Da das Anfeuern, wie bereits in Abschnitt 2.3.6 beschrieben, sehr aufwendig

152 Strauß, 2009, S. 88

153 Zahoransky, 2010, S. 21

154 Heuck, 2010, S. 9

155 Heuck, 2010, S. 46

156 Zahoransky, 2010, S. 340

157 Heuck, 2010, S. 46

2.3.12 Biomassekraftwerke

ist und mit Biomasse betriebene Kraftwerke durch das Erneuerbare Energien Gesetz gefördert werden, ist das Biomasseheizkraftwerk, abgesehen von Revisionszeiten, ununterbrochen in Betrieb. Interessant ist noch, dass die Holzhackschnitzel, was ihren Energieinhalt anbetrifft, etwas inhomogener sind als Brennstoffe wie Öl oder Gas. Dadurch kommt es zu minimalen Schwankungen bei der Leistungsabgabe des Kraftwerks.

Im Schaubild der Abbildung 20 wird ein sehr vereinfachtes Biomasseheizkraftwerk dargestellt. Links unten ist der Brennstoff und das Förderband in die Brennkammer sichtbar. Ebenfalls zu erkennen ist, dass die Rohre, in denen die Verdampfung des Speisewassers stattfindet, im Kessel verlaufen. Turbine und Generator sind im rechten Teil des Schaubildes zu sehen. Außerdem ist kein Kondensator, sondern ein Wärmetauscher vorhanden, mit dem die Restwärme genutzt werden kann, zum Beispiel zu Heizzwecken.

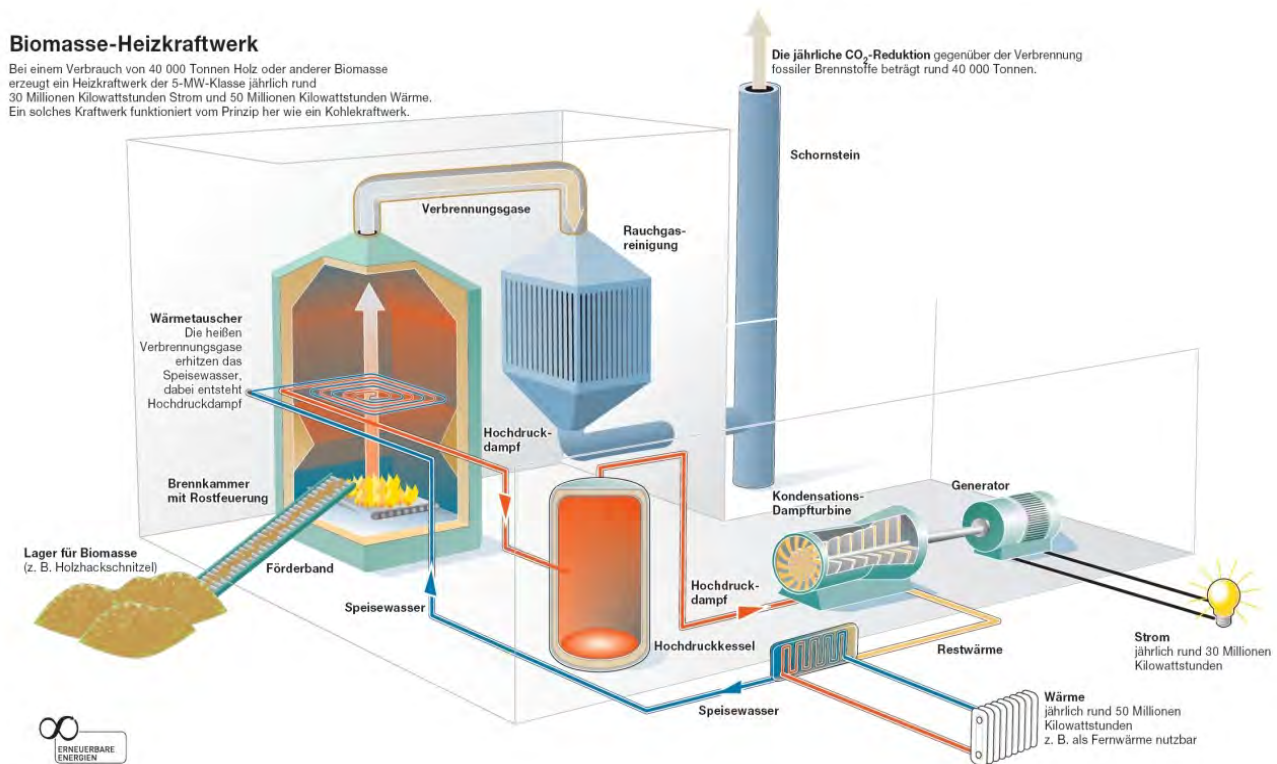


Abbildung 20: Schaubild eines Biomasse-Heizkraftwerks

2.3.13 Nutzung der Abwärme einer Müllverbrennungsanlage

2.3.13 Nutzung der Abwärme einer Müllverbrennungsanlage

In Deutschland gibt es sehr genaue Gesetze, wie mit Müll verfahren werden soll. So darf dieser zum Beispiel nur deponiert werden, wenn der brennbare Anteil unter 5% beträgt. Der Heizwert von einer Tonne Hausmüll in Deutschland ist vergleichbar mit dem von 250 Liter Heizöl. Deswegen ist es naheliegend, den Müll zu verbrennen und mit der freiwerdenden thermischen Energie ein Dampfkraftwerk zu betreiben, um einerseits die Entsorgung zu gewährleisten und andererseits den Energieinhalt des Abfalls zu nutzen.¹⁵⁸

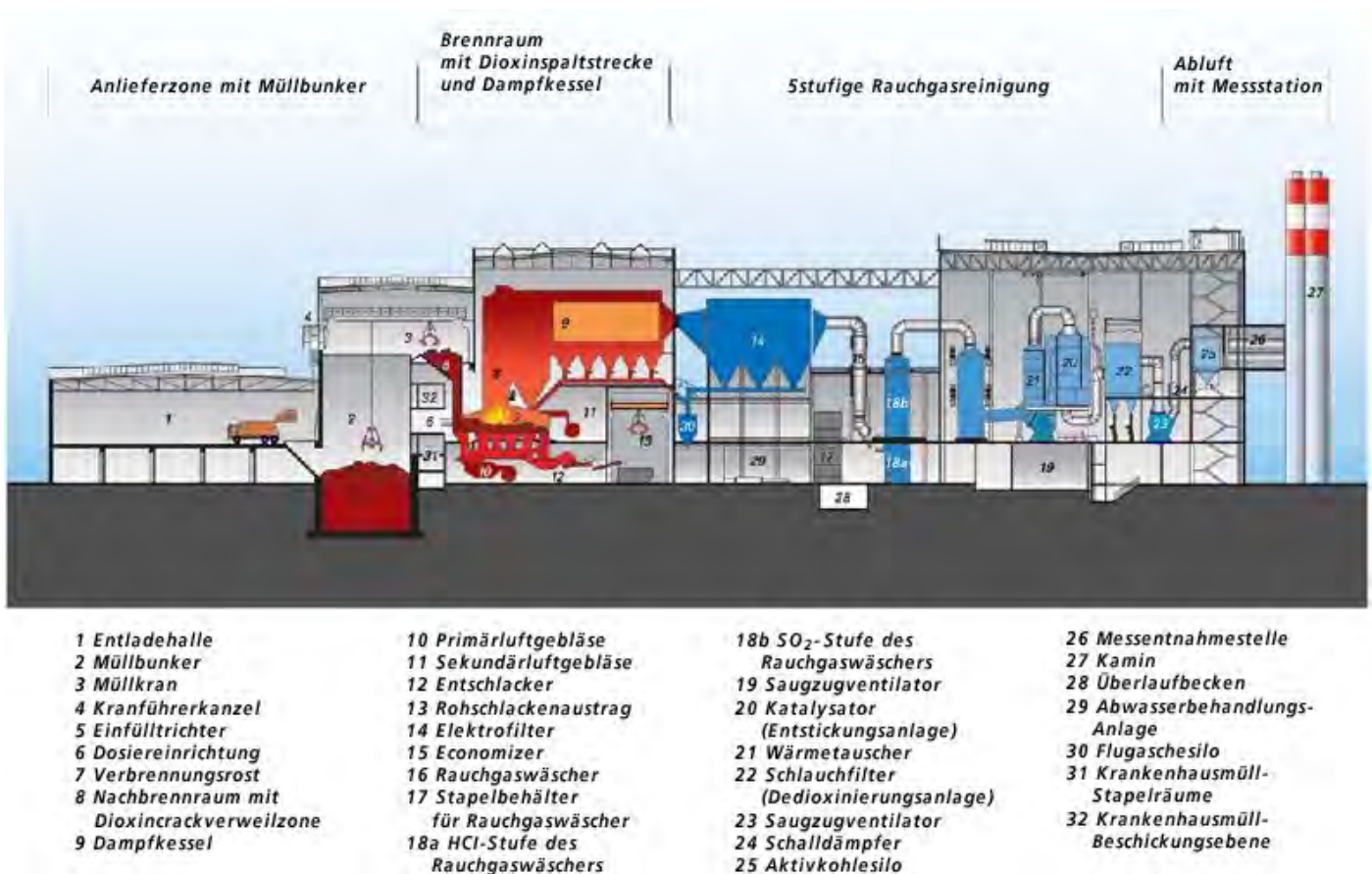


Abbildung 21: Schema der AVA

In Augsburg ist seit 1996 in der Abfallverwertung Augsburg GmbH (AVA) ein Abfallheizkraftwerk in Betrieb. Abbildung 21 zeigt ein Schema der Anlage. Die im Folgenden in Klammern angegebenen Zahlen beziehen sich auf die Legende zur Abbildung. Zuerst liefern Müllsammelfahrzeuge den Abfall aus der Stadt Augsburg und vier angrenzenden Landkreisen an (1). Im Jahr 2011 betrug die gesammelte Menge Hausmüll rund 230.000 t. Zunächst wird der Abfall im „Müllbunker“ gelagert und gleichmäßig durchmischt (2). Danach wird er in Trichter (5) gefüllt, die jeweils über Schächte zu einem von drei Hausmüllöfen (7) führen, wo der Abfall mit über 850°C zu Schlacke verbrannt

¹⁵⁸ Zahoransky, 2010, S. 368

2.3.13 Nutzung der Abwärme einer Müllverbrennungsanlage

wird. Infektiösen und pathologischen Krankenhausabfällen kommt in zwei kleineren Öfen eine gesonderte Behandlung zu. Die bei der Verbrennung freiwerdende Energie wird genutzt, um Dampf (9) für zwei Dampfturbinen mit Generator (ohne Abbildung) zur Stromproduktion zu erzeugen. Die danach noch verbleibende thermische Energie wird zum Erhitzen von Fernwärmewasser genutzt (21), da die Anlage im Kraft-Wärme-Kopplungsverfahren arbeitet. Auf diese Weise können im Jahr 100.000.000 kWh Strom, sowie 80.000.000 kWh Fernwärme erzeugt werden¹⁵⁹. Diese Energie wird primär zur Deckung des Eigenbedarfs genutzt, wobei Restenergie, vor allem Fernwärme, in das Netz der Stadtwerke Augsburg eingespeist wird. Abbildung 22 gibt eine Übersicht des Hauptgebäudes, in dem das Abfallheizkraftwerk untergebracht ist; die Fernwärmeübergabestation der swa ist markiert.^{160 161}



Abbildung 22: Luftbild des AVA-Hauptgebäudes (in dem das HKW untergebracht ist) und der Fernwärme-Übergabestation der Stadtwerke Augsburg (swa)

159 http://ava.ve.m-online.net/cms/index.php?option=com_content&task=view&id=53&Itemid=107

160 http://ava.ve.m-online.net/cms/index.php?option=com_content&task=view&id=15&Itemid=40

161 http://ava.ve.m-online.net/cms/index.php?option=com_content&task=view&id=15&Itemid=40&limit=1&limitstart=1

2.3.14 Heizwerke

2.3.14 Heizwerke

Die Heizwerke sollen hier nicht unerwähnt bleiben, da es in Augsburg zwei Anlagen ausschließlich zum Erhitzen von Fernwärmewasser gibt. Dies sind die Heizwerke Süd und West. Da die Verbrennung von Rohstoffen, einzig zur Erwärmung von Wasser, nicht besonders wirtschaftlich ist, sind die beiden Heizwerke nur noch zu Spitzenlastzeiten im Winter in Betrieb. Ansonsten haben Anlagen mit höheren Wirkungsgraden und solche, die mit regenerativen Energiequellen arbeiten, Vorrang. Als Brennstoff dient in beiden Heizwerken Erdgas. Den Kern einer solchen Anlage bilden ein oder mehrere Heizkessel, in denen das Wasser erhitzt wird.

2.3.15 Gasturbinenkraftwerke (GT-Kraftwerke)

Um Missverständnissen vorzubeugen, soll hier vorausgeschickt werden, dass oft die komplette Kraftwerksanlage, neben der eigentlichen Turbine, als „Gasturbine“ bezeichnet wird.

Das Prozessschema einer Gasturbinenanlage entspricht dem in Abschnitt 2.1.7 vorgestellten Joule-Prozess. Die Hauptbestandteile einer Gasturbinenanlage sind ein Verdichter, eine Brennkammer, eine Turbine und ein Generator, die ,abgesehen von letzterem, in Abbildung 23 dargestellt werden.

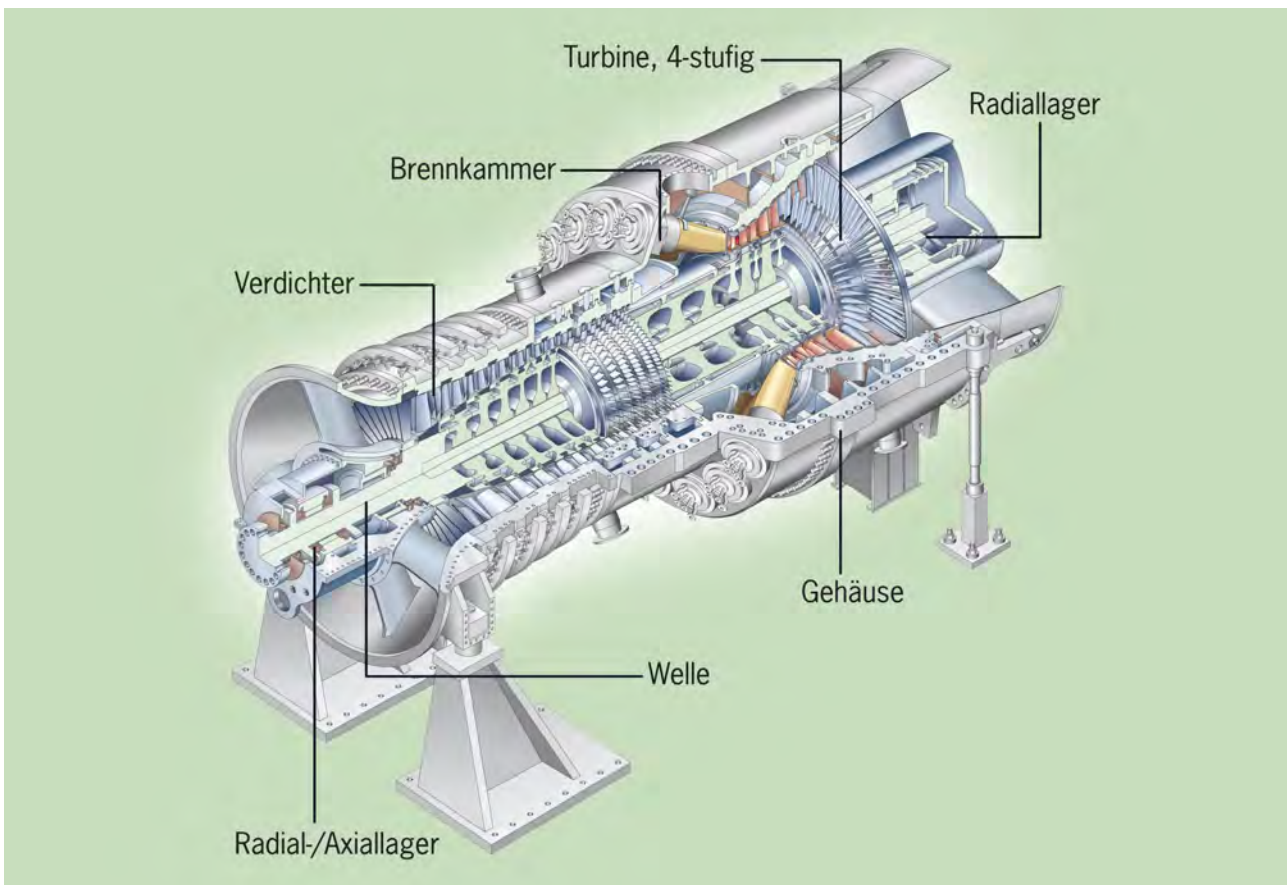


Abbildung 23: „Kernstück“ einer Gasturbinenanlage: Verdichter, Brennkammer und Turbine

2.3.15 Gasturbinenkraftwerke (GT-Kraftwerke)

Vom Verdichter wird Umgebungsluft angesaugt und auf einen Druck von 15-20 bar komprimiert. In der Brennkammer reagiert diese mit dem eingespritzten Brennstoff, wobei heiße Rauchgase mit Temperaturen bis zu 1.500°C entstehen. Die Verbrennungsgase strömen von dort in die einen Generator antreibende Turbine, expandieren dort beim sogenannten offenen Gasturbinenbetrieb bis auf Umgebungsdruck und werden ins Freie ausgeblasen. Dieser Prozess erreicht Wirkungsgrade um 40 %. Alternativ zum Ableiten der Abgase in die Umgebung kann die darin enthaltene thermische Energie noch genutzt werden, beispielsweise zum Erhitzen von Fernwärmewasser. Ein großer Vorteil von Gasturbinenanlagen gegenüber anderen Kraftwerken ist ihre Anfahrzeit von nur wenigen Minuten und die Möglichkeit, sie vollautomatisch zu steuern. Damit sind sie sehr flexibel einsetzbar.^{162 163}

Abbildung 24 zeigt eine geöffnete Gasturbine. In dem hellblauen Ring rechts der Bildmitte ist die Brennkammer eingehaust. Rechts davon ist die eigentliche Turbine angebracht. Links der Brennkammer befindet sich der Verdichter. Sehr gut sichtbar ist, dass der Verdichter einer Turbine stark ähnelt, was nicht verwunderlich ist, da er im Prinzip das Umgekehrte macht: In ihn wird Luft eingesaugt und von einem großen Volumen mit wenig Druck auf ein kleines Volumen mit hohem Druck komprimiert.

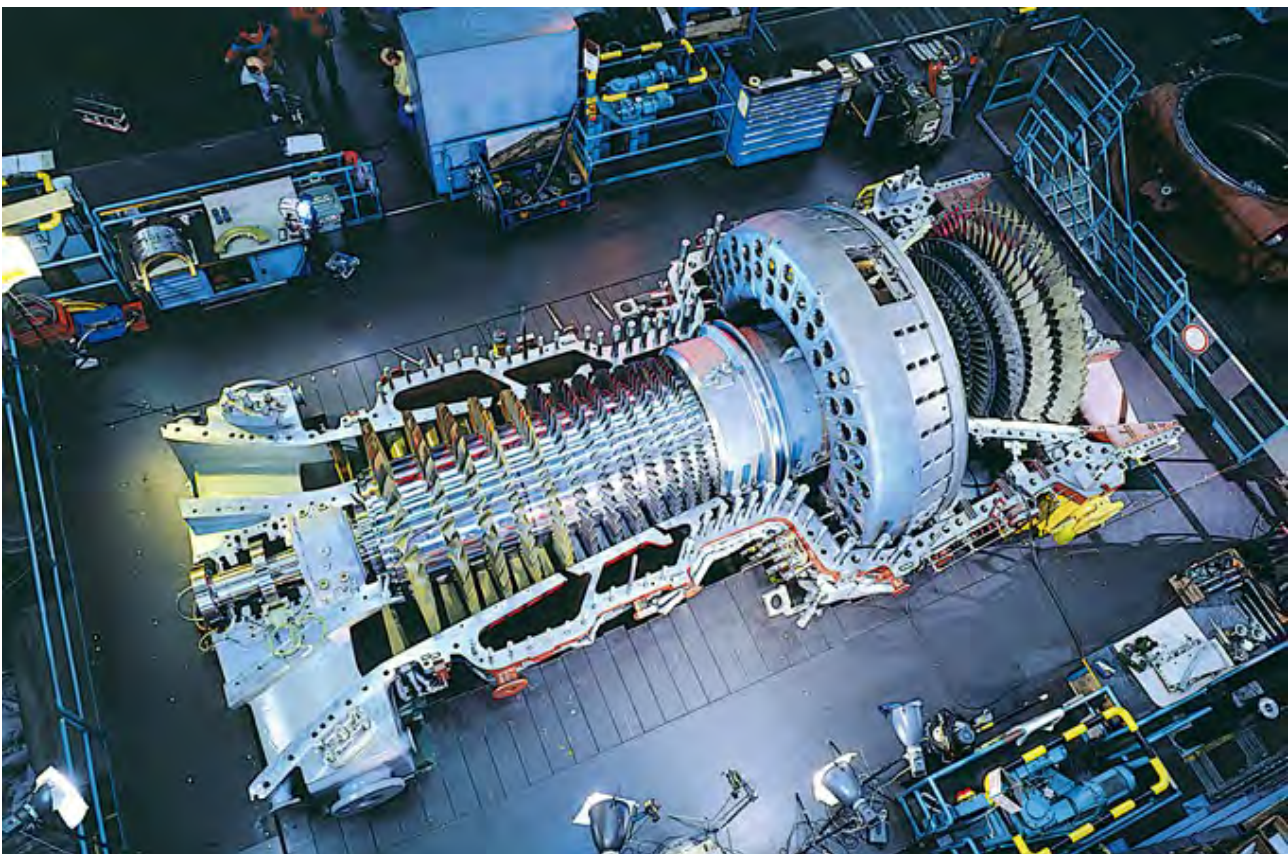


Abbildung 24: geöffnete Gasturbine mit Brennkammer und Verdichter

162 Strauß, 2009, S. 339ff

163 Heuck, 2010, S. 19f

2.3.16 Wasserkraftwerke (Laufwasserkraftwerke)

2.3.16 Wasserkraftwerke (Laufwasserkraftwerke)

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, Wasserkraft zu nutzen. Gezeitenkraftwerke, die sich der Höhendifferenz des Meeresspiegels zwischen Ebbe und Flut bedienen und Wellenkraftwerke, die die Bewegung der Wellen in elektrische Energie umwandeln, kommen eher vereinzelt vor und ihr Standort ist zudem ans Meer gebunden. Am weitesten verbreitet sind Laufwasser- und Speicherkraftwerke. Letztere werden bei einer Fallhöhe von 15 bis 150 Metern als Mittel- und darüber als Hochdruckanlagen bezeichnet. Laufwasserkraftwerke mit Fallhöhen unter 15 Metern sind Niederdruckanlagen. Im Folgenden wird der Aufbau und die Funktionsweise eines Laufwasserkraftwerks näher beleuchtet. Die Hauptbestandteile eines solchen sind folgende: Eine Stauanlage, wobei man den Staupegel als Oberwasser bezeichnet. Am Hochablass beispielsweise beträgt die Soll-Höhe des Wasserspiegels 484,5 m über NN¹⁶⁴. Des Weiteren ist eine Einrichtung zur Wasserentnahme, etwa ein Überlauf nötig. Danach eine Druckleitung zur Turbine, die Turbine selbst, ein Generator und schließlich der Turbinenauslauf, der Unterwasser genannt wird. Meist sind die Kraftwerke in einen Flusslauf integriert, der zum Zweck der Pegelhaltung nur wenig aufgestaut wird. Oft ist aus Gründen des Umweltschutzes auch noch eine Fischtreppe eingebaut. Laufwasserkraftwerke werden fast ausnahmslos zur Deckung der Grundlast eingesetzt.¹⁶⁵

In Laufwasserkraftwerken kommen gewöhnlich sogenannte Kaplan-Turbinen zum Einsatz, die speziell bei niedrigen Fallhöhen und großen, variierenden Volumenströmen den höchsten Wirkungsgrad erzielen. Dies rührt daher, dass die Leit- und Laufschaufeln verstellbar sind und somit den Schwankungen der Wassermenge angepasst werden können. Eine Kaplan-Turbine hat relativ wenige Schaufeln und ähnelt, wie Abbildung 25 erahnen lässt, einer Schiffschraube. Das Turbinenlaufrad wird vom Wasser axial angeströmt, wobei Kaplan-Turbinen nur sehr niedrige Drehzahlen von 90 bis 300 Umdrehungen pro Minute erreichen. Im Kraftwerksbetrieb stellt die Drehzahl der Turbine eine Regelgröße dar, die durch eine Änderung der verfügbaren Wassermenge gestört und durch die Variation der Schaufelstellung wieder ausgeglichen wird.^{166 167}

Laufwasserkraftwerke nutzen die potentielle Energie, die das Flusswasser aufgrund eines geographischen Gefälles hat. Im Zulauf zur Turbine wird die Lageenergie in kinetische Energie umgewandelt. Die Turbine formt diese in mechanische Energie um, die der Generator schließlich in elektrische Energie umwandelt. Die potentielle Leistung P_{pot} ist durch die Fallhöhe h und den Massenstrom \dot{m} , also die in einem bestimmten Zeitintervall verfügbare Wassermenge, festgelegt:

$$P_{pot} = \dot{m} \cdot g \cdot h$$

(wobei g : Erdbeschleunigung)

164 Ruckdeschel, 1984, S. 73

165 Zahoransky, 2010, S. 252ff

166 Strauß, 2009, S. 444ff

167 Zahoransky, 2010, S. 252ff

2.3.16 Wasserkraftwerke (Laufwasserkraftwerke)

Die vom Generator am Schluss abgegebene elektrische Leistung P_{el} wird gegenüber der potentiellen Leistung durch den Wirkungsgrad der Leitungen η_L , über die das Wasser zuströmt, durch den Wirkungsgrad der Turbine η_T und durch den Wirkungsgrad des Generators η_G gemindert:

$$P_{el} = P_{pot} \cdot \eta_L \cdot \eta_T \cdot \eta_G \quad ^{168}$$

Der Gesamtwirkungsgrad von Laufwasserkraftwerken liegt zwischen 75 und 93%¹⁶⁹.

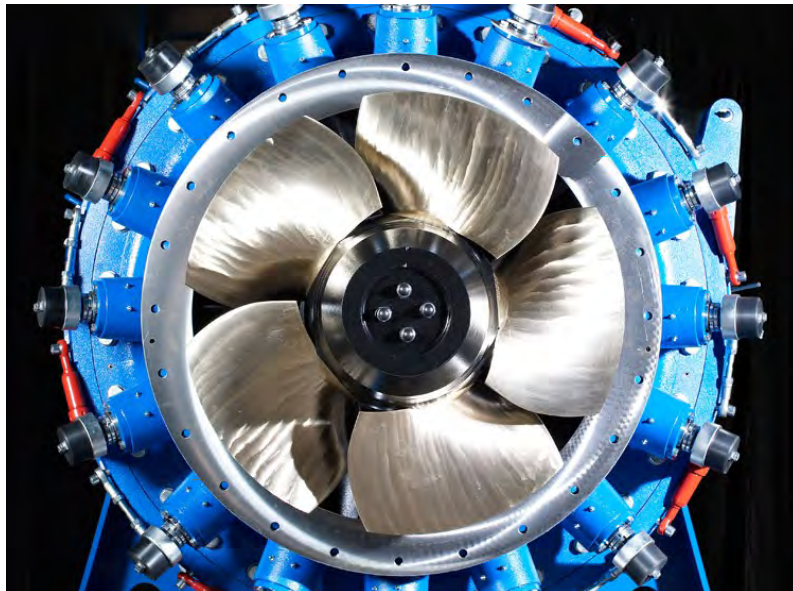


Abbildung 25: Kaplan-Turbine

Abbildung 26 zeigt einen vertikalen Schnitt des möglichen Einbaus einer Kaplan-Rohrturbine in ein Laufwasserkraftwerk. Wie man sieht, wird die in gelb eingezeichnete Turbine von links axial angeströmt. Der Generator und die Anlagen zur Regelung sind grün eingefärbt.

Wasserkraftwerke haben eine sehr kurze Anfahrzeit, da sie mit Öffnen des Turbinenzulaufs sofort betriebsbereit sind. Als weiterer Vorteil ist anzuführen, dass die Betriebskosten niedrig sind, da keine Kosten für Brennstoff entstehen.¹⁷⁰

168 Strauß, 2009, S. 445

169 Zahoransky, 2010, S. 255

170 Heuck, 2010, S. 24f

2.3.16 Wasserkraftwerke (Laufwasserkraftwerke)

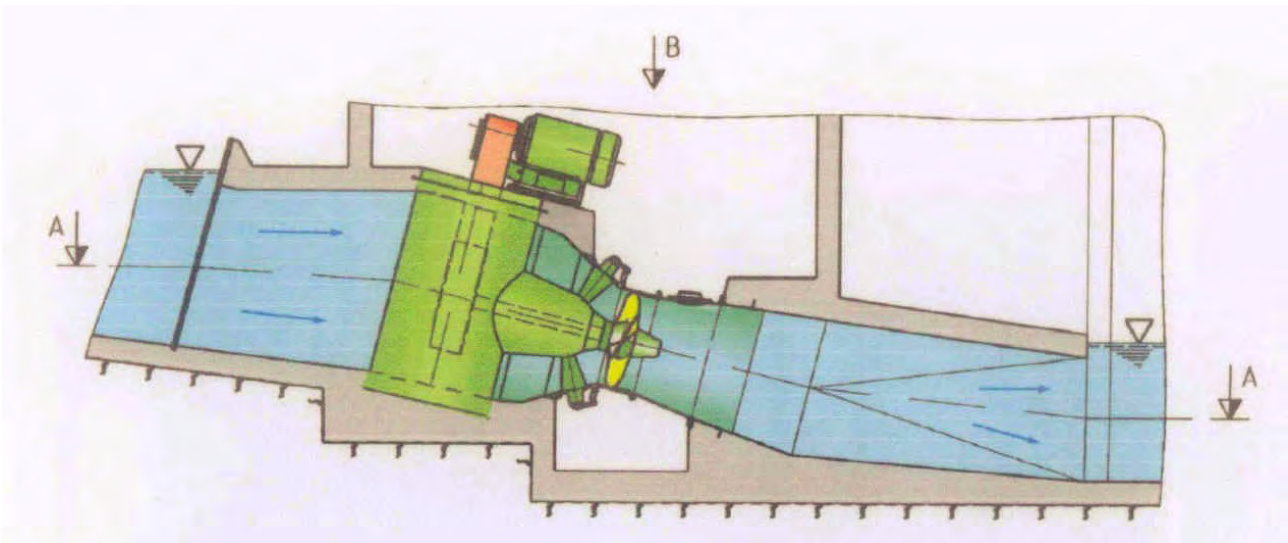


Abbildung 26: vertikaler Schnitt durch einen möglichen Aufbau eines Laufwasserkraftwerks mit Kaplan-Rohrturbine (gelb)

2.3.17 Weitere Kraftwerkstypen

Außer den hier vorgestellten Kraftwerkstypen, gibt es noch eine Reihe weiterer, die nicht unerwähnt bleiben sollen.

In den sogenannten **Gas-und-Dampf-Kraftwerken** (kurz: GuD-Kraftwerke) wird ein Gasturbinen- und ein Dampfkraftwerk kombiniert. Zunächst besteht die Anlage aus einem normalen Gasturbinenblock, dessen Verbrennungsgase, die Temperaturen bis 625°C haben können, nach Passieren der Turbine in einen sogenannten Abhitzeessel geleitet werden. Dieser Kessel arbeitet nach dem Prinzip eines Wärmetauschers und produziert Dampf mit Zustandsgrößen von etwa 170 bar und 600°C . In der Folge gestaltet sich die Anlage wie ein Dampfkraftwerk. Sowohl Gas- als auch Dampfturbine treiben einen Generator an, wobei erstere in etwa die doppelte Leistung erzeugt wie letztere. GuD-Anlagen erzielen Wirkungsgrade bis 58% ^{171, 172}

Für die Erzeugung von relativ niedriger Leistung zwischen 30 kW und 15 MW eignen sich **Blockheizkraftwerke** (BHKW) gut. Ein Verbrennungsmotor treibt dabei zum einen einen Generator an und zum anderen wird seine Abwärme zum Heizen genutzt, das heißt, die Anlage arbeitet mit Kraft-Wärme-Kopplung. Als Brennstoff kann sowohl Erdgas, als auch Heizöl dienen. BHKWs versorgen bestimmte kleine und abgeschlossene Bereiche wie beispielsweise Wohnblocks oder eine Schule dezentral. In Abbildung 14 sind die von BHKWs versorgten Gebiete gut erkennbar: Sie sind als

171 Strauß, 2009, S. 104

172 Heuck, 2010, S. 20f

2.3.17 Weitere Kraftwerkstypen

Nahwärmegebiete eingetragen und grün eingefärbt. Wird zu viel elektrische Leistung erzeugt, kann diese ins öffentliche Netz eingespeist werden.^{173 174}

Des Weiteren gibt es noch Kernkraftwerke, Brennstoffzellen, Windenergieanlagen, Geothermische Kraftwerke, Photovoltaische Anlagen, Gezeiten-, Wellen- und Strömungskraftwerke etc., auf die hier nicht näher eingegangen werden soll.

173 Heuck, 2010, S. 21f

174 Krog, 2013

2.4 Überblick über die Energieversorgung in der Stadt Augsburg

2.4 Überblick über die Energieversorgung in der Stadt Augsburg

Dieser Abschnitt soll den Zusammenhang der einzelnen, in den vorhergehenden Abschnitten behandelten Komponenten der Energieversorgung in Augsburg erklären. Im Durchschnitt benötigt ein Augsburger Haushalt im Jahr 2.400 kWh Strom¹⁷⁵. Der Hauptversorger sind die Stadtwerke Augsburg (swa), die in etwa 350.000 Personen mit Strom, Erdgas und Fernwärme beliefern¹⁷⁶. In Bayern sind nur die Versorgungsunternehmen der Städte München und Nürnberg größer¹⁷⁷. Auf dem Gebiet der Fernwärmeversorgung haben die swa in Augsburg ein Monopol, außerdem gehören ihnen die Netze ihres Versorgungsgebietes. Im Jahr 2011 belieferten die swa ihre Kunden mit 1.250,2 Mio kWh Strom, 3.476,8 Mio kWh Erdgas und 430,9 Mio kWh Fernwärme¹⁷⁸. Die Höchstlast im Netz betrug dabei beim Strom 287 MW, beim Erdgas 1197 MW und bei der Fernwärme 176 MW¹⁷⁹. Das Erdgas wird von den swa eingekauft und an die Kunden weiter verkauft, während Fernwärme und Strom sich aus einem selbst erzeugten und einem zugekauften Anteil zusammensetzen. Als Energieerzeugungsanlagen stehen als modernsten Kraftwerke eine Gasturbinenanlage mit einer elektrischen Leistung von 30 MW und einer thermischen Leistung von 40 MW, sowie ein Biomasseheizkraftwerk mit einer Wärmeleistung von 15 MW und einer elektrischen Leistung von 7,5 MW im Nordosten der Stadt zur Verfügung¹⁸⁰. Neben diesen ist auch noch ein Dampfheizkraftwerk in der Stadtmitte vorhanden, das allerdings, wegen der Befuerung mit den fossilen Brennstoffen Erdgas oder Öl, nur noch selten in Betrieb ist. Außerdem trägt noch ein kleines Laufwasserkraftwerk im alten Wasserwerk am Hochablass zur Stromerzeugung bei. Die im Abschnitt 2.5.1 beschriebene Anlage wird voraussichtlich Ende 2013 in Betrieb gehen. Zum Erhitzen von Fernwärmewasser dienen weiterhin noch eine Übergabestation des Dampfheizkraftwerks der AVA und, hauptsächlich zum Auffangen von Bedarfsspitzen und für Notfälle, zwei Heizwerke im Süden und Westen der Stadt. Lediglich als Reserve für starke Frequenzschwankungen und Kraftwerksausfälle im Stromnetz, stehen des Weiteren noch zwei Dieselmotoren im Heizkraftwerk in der Innenstadt zur Verfügung. Damit erzeugen die swa etwa 25 % des an die Kunden weitergegebenen Stroms selbst¹⁸¹. Mit Fernwärme werden rund 1.300 Kundenanlagen versorgt, was ungefähr 10 % des Raumwärmebedarfs der Stadt entspricht¹⁸². Außerdem heizen 75 % der Haushalte mit Erdgas, das sie von den swa beziehen¹⁸³.

Neben den großen Anlagen der swa gibt es noch eine Vielzahl kleinerer. Hier wären die verschiedenen privaten und firmeneigenen Laufwasserkraftwerke im Bereich von Lech, Wertach und den zahlreichen Stadtbächen zu nennen, die ins swa-Netz einspeisen. Außerdem kommen noch etwa

175 <http://www.wkw-hochablass.de/kraftwerk/daten-und-fakten/>

176 http://www.sw-augsburg.de/ueber_uns/konzernstruktur.php

177 http://www.sw-augsburg.de/ueber_uns/fakten.php

178 http://www.sw-augsburg.de/downloads/Zahlenspiegel_final_2011.pdf, S. 3f

179 http://www.sw-augsburg.de/downloads/Zahlenspiegel_final_2011.pdf, S. 7

180 <http://www.sw-augsburg.de/downloads/unternehmensbrosch.pdf>, S. 14 und S. 29

181 <http://www.sw-augsburg.de/downloads/unternehmensbrosch.pdf>, S. 8

182 <http://www.sw-augsburg.de/downloads/unternehmensbrosch.pdf>, S. 14

183 <http://www.sw-augsburg.de/downloads/unternehmensbrosch.pdf>, S. 12

2.4 Überblick über die Energieversorgung in der Stadt Augsburg

300.000 kWh Strom von Photovoltaikanlagen jährlich hinzu¹⁸⁴. Schließlich wären noch die Blockheizkraftwerke zu nennen, von denen die swa insgesamt 20 Stück für die Eigentümer installiert haben und betreiben. Hierfür eignen sich beispielsweise große Wohnanlagen oder Schulen besonders, die außerhalb des mit Fernwärme versorgten Gebietes liegen. Die 20 bestehenden Anlagen sollen in Zukunft zu einem sogenannten „virtuellen Kraftwerk“ zusammengefasst werden und können zentral gesteuert werden. Da überschüssig produzierter Strom ins Netz eingespeist werden kann, ist es möglich, auch diese Anlagen je nach Strombedarf und Schwankungen im Netz unterschiedlich zu fahren. Im Jahr produzieren die 20 Blockheizkraftwerke ungefähr 9 Mio kWh Strom. Die neueste Anlage mit einer Leistung von 50 kW wurde erst kürzlich in der Heinrich-von-Buz-Realschule im Stadtteil Oberhausen installiert und versorgt die Schule sowie 300 Wohnungen mit heißem Wasser und Strom.^{185 186}

Mit allen oben genannten Erzeugungsarten und dem Zukauf setzt sich der Strom, mit dem die Augsburger swa-Kunden versorgt werden, wie folgt aus den zugrunde liegenden Energiequellen zum sogenannten „Strommix“ zusammen: 39,5 % aus Kohle, 11,7 % aus Kernkraft, 13,9 % aus Erdgas, 3,2 % aus anderen fossilen Energieträgern, 31,7 % aus regenerativen oder durch das Erneuerbare Energien Gesetz geförderten Energiequellen¹⁸⁷

Auch die swa bieten ein Stromprodukt an, das man als „Grünen Strom“ bezeichnen kann¹⁸⁸. Damit ist gemeint, dass man dann nur Strom aus regenerativen Quellen bezieht. Physikalisch besteht jedoch kein Unterschied zum „normalen“ Strom. Der Unterschied ist eher kaufmännischer Art, da das Beziehen von „Grünem Strom“ die Stromerzeugung mit erneuerbaren Energien zusätzlich fördert.

Abschließend ist noch zu sagen, dass das Verhältnis von zugekauftem zu von den Stadtwerken Augsburg selbst erzeugtem Strom von einigen komplexen Faktoren abhängt. Bei den Anlagen mit Kraft-Wärme-Kopplung ist der Wärmebedarf ausschlaggebend. Dieser ist im Winter höher als im Sommer. Außerdem hat die Energieerzeugung aus regenerativen Energiequellen grundsätzlich Vorrang. Weitere Kriterien für die Bevorzugung einer Anlage sind ein hoher Wirkungsgrad und niedrige Brennstoffkosten. In Augsburg läuft das Biomasseheizkraftwerk und die Müllverbrennungsanlage, abgesehen von Wartungen, das ganze Jahr. Die anderen Kraftwerke werden je nach Bedarf flexibel eingesetzt.

184 <http://www.sw-augsburg.de/downloads/unternehmensbrosch.pdf>, S. 29

185 http://www.sw-augsburg.de/ueber_uns/aktuelle_meldungen_7770.php

186 Krog, 2013

187 http://www.sw-augsburg.de/downloads/20121031_Strommix_swa_2012.pdf

188 http://www.sw-augsburg.de/downloads/20121031_Strommix_swa_2012.pdf

2.5 Regionale Energieversorgung in der Zukunft

2.5 Regionale Energieversorgung in der Zukunft

Im Zuge der Energiewende wird die Energieversorgung zunehmend dezentraler werden. Daher muss nun auch in den einzelnen Städten und Gemeinden darüber nachgedacht werden, was noch an ungenutztem Potential zur Energieerzeugung vorhanden ist. Außerdem müssen Probleme, wie zum Beispiel das unregelmäßige Anfallen von Strom aus Windkraftwerken und Photovoltaikanlagen gelöst werden.

Im Folgenden soll nun auch darauf eingegangen werden, was eine Stadt wie Augsburg tun kann, um ihre Versorgung mit Energie auch in der Zukunft zu sichern.

Interessiert man sich für eine bestimmte Region genauer, so ist ein Blick in den Energieatlas Bayern aufschlussreich. Dort kann man sich in einer Karte darstellen lassen, wo und in welchem Umfang Biomasse, Geothermie, Solarenergie, Wasserkraft, Windenergie und Abwärme genutzt wird und wo es noch Potential dafür gibt¹⁸⁹. Man kann sich beispielsweise darüber informieren, wie es um die Abwärmenutzung in Augsburg bestellt ist. Hier werden die drei Abwärmequellen UPM GmbH, das Klärwerk Augsburg und die Abfallverwertung aufgeführt¹⁹⁰. Betrachtet man dagegen die Windkraft, so sieht man, dass es im Raum Augsburg weder bestehende Anlagen, noch Vorrang- oder Vorbehaltsgebiete dafür gibt¹⁹¹.

Im Folgenden soll auf einige ausgewählte Technologien und Nutzungsmöglichkeiten von Energiequellen genauer eingegangen werden. Diese werden entweder in Augsburg schon umgesetzt, oder erscheinen zumindest als gut dafür denkbar.

2.5.1 Bau eines Wasserkraftwerks am Hochablass

Durch die Lage von Augsburg an Lech, Wertach und einer Vielzahl weiterer kleiner Kanäle im Stadtgebiet, ist die Nutzung von Wasserkraft zur Stromerzeugung naheliegend.

Laut Energie-Atlas Bayern sind in der Stadt Augsburg insgesamt 37 Wasserkraftanlagen mit 16 MW Leistung installiert¹⁹². Neben vielen relativ kleinen Anlagen, sind die Kraftwerke Eisenbahnerwehr am Lech mit bis zu 12 Mio. kWh elektrischer Energie im Jahr und Wolfzahnau an der Wertach momentan die beiden größten Anlagen^{193 194}. Hohe Leistungen werden vor allem im Frühjahr und Frühsommer während der Schneeschmelze erzielt, da die genutzten Gewässer aus den Alpen gespeist werden.

Seit dem Sommer 2012 wird in das bestehende Wehr Hochablass am Lech ein unterirdisches Wasserkraftwerk mit zwei Kegelrad-Rohrturbinen eingebaut, die jeweils von Wassermengen bis zu

189 <http://geoport.bayern.de/energieatlas-karten/>, Auswahl: Biomasse, Geothermie, Solarenergie, Wasserkraft, Windenergie und Abwärme

190 <http://geoport.bayern.de/energieatlas-karten/>, Auswahl: Abwärme

191 <http://geoport.bayern.de/energieatlas-karten/>, Auswahl: Windenergie

192 <http://geoport.bayern.de/energieatlas-karten/>, Auswahl: Windenergie

193 http://wasserpfad.augsburg-tourismus.de/2_1_kraftwerk_wolfzahnau.html

194 http://wasserpfad.augsburg-tourismus.de/6_1_eisenbahnerwehr.html

2.5.1 Bau eines Wasserkraftwerks am Hochablass

32 m³/s durchströmt werden können¹⁹⁵. Die verwendeten Turbinen funktionieren nach dem Prinzip der sogenannten Kaplan-Turbine¹⁹⁶, die axial angeströmt wird und bei der die Flügel des Laufrades verstellbar sind¹⁹⁷. Diese Eigenschaften machen diese Turbinenart besonders geeignet für niedrige Fallhöhen und durch die Variabilität der Flügelstellung auch für schwankende Durchlassmengen¹⁹⁸.

Die fertige Anlage wird eine maximale Leistung von 3.100 kW haben und in einem durchschnittlichen Jahr voraussichtlich 11,2 Mio kWh Arbeit leisten¹⁹⁹. Damit kann das neue Kraftwerk, das im Oktober 2013 in Betrieb gehen soll, etwa 3.900 Haushalte in Augsburg mit Strom versorgen²⁰⁰.

Das Potential für neue, leistungsstarke und wirtschaftlich sinnvolle Wasserkraftwerke im Bereich der Stadt Augsburg ist damit weitgehend ausgeschöpft.

Die nun folgende Abbildung 27 gibt einen Überblick über die Baustelle und die Lage des neuen Kraftwerks am Hochablass.



Abbildung 27: Überblick über den Hochablass und die Baustelle für das neue Wasserkraftwerk

195 <http://www.wkw-hochablass.de/kraftwerk/daten-und-fakten/>

196 <http://iwhw.boku.ac.at/LVA816110/kap7Wasserkraftnutzung.pdf>, S. 47

197 <http://www.wasserkraftverband.de/wissenswertes-uber-wasserkraft/kaplan-turbine/>

198 <http://www.wasserkraftverband.de/wissenswertes-uber-wasserkraft/kaplan-turbine/>

199 <http://www.wkw-hochablass.de/kraftwerk/daten-und-fakten/>

200 <http://www.wkw-hochablass.de/kraftwerk/daten-und-fakten/>

2.5.1 Bau eines Wasserkraftwerks am Hochablass

Abbildung 28 vermittelt einen Eindruck vom Stauwehr Hochablass. Das neue Kraftwerk wird am Ostufer eingebaut, das heißt im Bild am linken Ende des betonierten Wehrs.



Abbildung 28: Hochablass mit Blick vom West- zum Ostufer des Lechs

2.5.2 Neue Speichertechnologie - „Power to Gas“

Problematisch bei der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien sind die Schwankungen bei der anfallenden Leistung. Bei Windkraftanlagen kann sich bei Windböen die Stromproduktion innerhalb von Minuten ändern. Hinzu kommen noch starke jahreszeitliche Unterschiede. Auch Photovoltaikanlagen unterliegen wetterbedingt sowohl saisonalen Schwankungen, als auch solchen im Tages- und Minutenbereich. Bei Wasserkraftwerken treten Änderungen eher langsam und im Verlauf eines Jahres auf. Beispielsweise kann im Frühjahr zur Schneeschmelze besonders viel Strom produziert werden. Von starken Leistungsschwankungen sind nur Biomasse- und Geothermie-Anlagen weitgehend ausgenommen²⁰¹.

Im Jahr 2011 waren in Deutschland Kraftwerke mit bis zu 65 GW Leistung zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien installiert. Bis 2050 ist ein Ausbau bis zu einer Leistung von 179 GW geplant²⁰². Da die Möglichkeiten für neue Wasserkraftwerke weitgehend ausgeschöpft sind, es wenig

201 <http://www.powertogas.info/power-to-gas/erneuerbaren-strom-erzeugen.html>

202 <http://www.powertogas.info/power-to-gas/erneuerbaren-strom-erzeugen.html>

2.5.2 Neue Speichertechnologie - „Power to Gas“

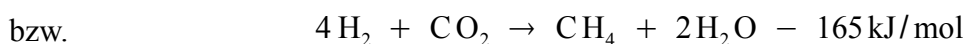
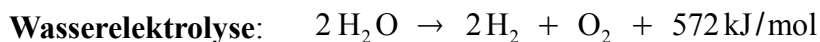
gute Standorte für Geothermie-Anlagen gibt und auch die Biomassenutzung begrenzt ist, werden in Zukunft die größten Zuwächse bei Wind- und Solaranlagen erwartet. Vor allem Windparks auf hoher See sind angedacht²⁰³.

Es gilt also, die starken Schwankungen in Griff zu bekommen. Bereits heute kann es bei einem Überangebot von Wind- und Solarstrom zu Problemen kommen, da das lokale Netz den Strom aufnehmen und verteilen muss. Im Moment ist die einzige Lösung das Abregeln von Windkraftanlagen, was bedeutet, dass weniger Strom produziert wird, als möglich wäre. Im Jahr 2010 betrug die Ausfallarbeit, also die Jahresarbeitsmenge, die nicht eingespeist wurde, 127 GWh²⁰⁴.

Mit dem immer größer werdenden Anteil an erneuerbaren Energien entsteht also die Notwendigkeit, große Mengen Strom flexibel zu speichern, damit die Erzeugung und der Verbrauch zeitlich entkoppelt werden können. Bisher wird Strom in Form mechanischer Energie in Pumpspeicherwerken, Druckluftspeicherwerken oder Schwungrädern, in Form elektrischer Felder in Kondensatoren und in Form elektrochemischer Bindungsenergie in Batterien bzw. Akkumulatoren gespeichert. Die einzige Speichertechnologie, die es erlaubt, große Mengen Strom einerseits über längere Zeiträume, andererseits flexibel zu speichern, sind Pumpspeicherwerke. Deren Wirkungsgrad liegt bei bis zu 80%. Allerdings ist ein Ausbau aufgrund der geographischen Gegebenheiten in Deutschland nur mehr sehr beschränkt möglich. Die anderen Speichertechnologien haben entweder zu geringe Wirkungsgrade, sind für große Energiemengen nicht ausreichend oder sind für langfristiges Stromspeichern nicht geeignet. Der in Deutschland momentan speicherbare Strom würde für weniger als eine Stunde reichen.^{205 206}

Einen möglichen Ausweg würde die Technologie „Power to Gas“ bieten. Dabei wird überschüssiger Strom aus erneuerbaren Energien in Wasserstoff oder synthetisches Erdgas, also Methan, umgewandelt. Damit wäre auch eine langfristige Speicherung und ein Transport im Erdgasnetz möglich, so dass die Energie zu Zeitpunkten mit geringerem Stromangebot aus erneuerbaren Quellen wieder zur Verfügung steht²⁰⁷. Der Strom wird dabei in einem Elektrolyseverfahren in Wasserstoff umgewandelt. Anschließend kann der Wasserstoff entweder mit Kohlenmonoxid oder -dioxid methanisiert werden.

Die chemischen Reaktionen sehen wie folgt aus²⁰⁸:



203 <http://www.powertogas.info/power-to-gas/erneuerbaren-strom-erzeugen.html>

204 http://www.bundestag.de/dokumente/analysen/2012/Power_to_Gas.pdf

205 <http://www.powertogas.info/power-to-gas/strom-speichern.html>

206 <http://www.zsw-bw.de/themen/brennstoffe-wasserstoff/power-to-gas.html>

207 <http://www.powertogas.info/power-to-gas/strom-in-gas-umwandeln.html>

208 <http://www.powertogas.info/power-to-gas/strom-in-gas-umwandeln.html>

2.5.2 Neue Speichertechnologie - „Power to Gas“

Die Methanisierung ist eine exotherme Reaktion, das heißt, es wird Wärme frei. Einerseits bedeutet das, dass bei dem Prozess eine ausreichende Wärmeabfuhr gewährleistet sein muss. Andererseits kann man die anfallende Reaktionswärme aber auch beispielsweise sehr gut für eine Versorgung mit Fernwärme nutzen. Bei der Umwandlung von Strom zu Wasserstoff wird je nach Verfahren ein Wirkungsgrad von 64% bis 77% erreicht. Wird der Wasserstoff noch methanisiert, so liegt der Wirkungsgrad zwischen 49% und 77%²⁰⁹. Wird nun das synthetische Gas bei Bedarf in einem Kraftwerk wieder verstromt oder in Wärme umgewandelt, so unterliegt dieser Prozess wieder einem bestimmten Wirkungsgrad. Insgesamt gesehen ist die Effizienz der „Power to Gas“-Technologie also gering. Man muss jedoch bedenken, dass man den dabei verwendeten Strom ansonsten gar nicht nutzen würde²¹⁰.

Das für die Methanisierung benötigte CO bzw. CO₂ kann sowohl aus regenerativen, als auch aus fossilen Quellen stammen. Mögliche Quellen für CO₂ sind Kläranlagen, Abgase aus Kraftwerken, Biogasanlagen, aus der Luft absorbiertes CO₂, Abfälle aus der Kalk- oder Zementproduktion.²¹¹

Hat man die elektrische Energie nun in Wasserstoff oder Methan umgewandelt, stellt sich noch die Frage des Speicherns. In Deutschland ist ein großes und leistungsfähiges Erdgasnetz vorhanden, das im Moment 23,5 Milliarden Kubikmeter fassen kann. Zudem ist eine Erweiterung geplant²¹². Sowohl Wasserstoff als auch Methan können problemlos eingespeist und gespeichert werden, da synthetisches Methan keinerlei Einfluss auf die Eigenschaften des fossilen Erdgases im Netz hat und Wasserstoff den Brennwert lediglich etwas herabsetzt. Ein Anteil von bis zu 5% Wasserstoff im Erdgas ist unproblematisch²¹³.

Das synthetische Gas steht dann bei Bedarf für eine Nutzung in Kraftwerken zur Stromerzeugung oder Kraft-Wärme-Kopplung wie GuD-Anlagen, Gasturbinen, Erdgas-Blockheizkraftwerken etc. zur Verfügung. Darüber hinaus ist es zur Wärmeerzeugung in Heizwerken oder Gasheizungen, als Kraftstoff für gasbetriebene Autos oder zu industriellen Nutzung verwendbar²¹⁴.

Im Moment gibt es für diese Technologie in Deutschland einige Pilotprojekte. Eine Versuchsanlage wird von erdgas schwaben derzeit bei Graben südlich von Augsburg geplant. An dem Standort ist vorteilhaft, dass sich in der Nähe eine Biogasanlage befindet, die das nötige CO₂ liefert²¹⁵. Langfristig gesehen wäre die Technologie sicherlich auch für die Stadt Augsburg interessant, da beispielsweise die Abwärme des Methanisierungsprozesses gut im Fernwärmenetz genutzt werden könnte. Zudem gibt es bereits einige Tankstellen für Erdgasfahrzeuge²¹⁶ und ein Teil der Busse des öffentlichen Nahverkehrs wird mit Erdgas betrieben.

209 http://www.bundestag.de/dokumente/analysen/2012/Power_to_Gas.pdf

210 http://www.bundestag.de/dokumente/analysen/2012/Power_to_Gas.pdf

211 <http://www.powertogas.info/power-to-gas/strom-in-gas-umwandeln.html>

212 <http://www.powertogas.info/power-to-gas/gas-speichern.html>

213 <http://www.powertogas.info/power-to-gas/gas-speichern.html>

214 <http://www.powertogas.info/power-to-gas/gas-nutzen.html>

215 <http://www.erdgas-schwaben.de/zukunft-beginnt-in-augsburg>

216 http://www.sw-augsburg.de/privatkunden/erdgas_erdgastankstellen.php

2.5.2 Neue Speichertechnologie - „Power to Gas“

In Abbildung 29 ist der gesamte „Power to Gas“-Prozess zusammenfassend dargestellt: Der überflüssige Strom aus der Erzeugung mit erneuerbaren Energien wird mittels Elektrolyse und Methanisierung in Gas umgewandelt und im Erdgasnetz gespeichert, so dass das Gas nun bei Bedarf entweder als Kraftstoff beim Autofahren, zur Stromerzeugung oder zum Heizen zur Verfügung steht. Darüber hinaus kann selbstverständlich auch der reine Wasserstoff für den Verkehr oder für die Industrie genutzt werden.

Der Power-to-Gas-Prozess: Anwendungsfelder.

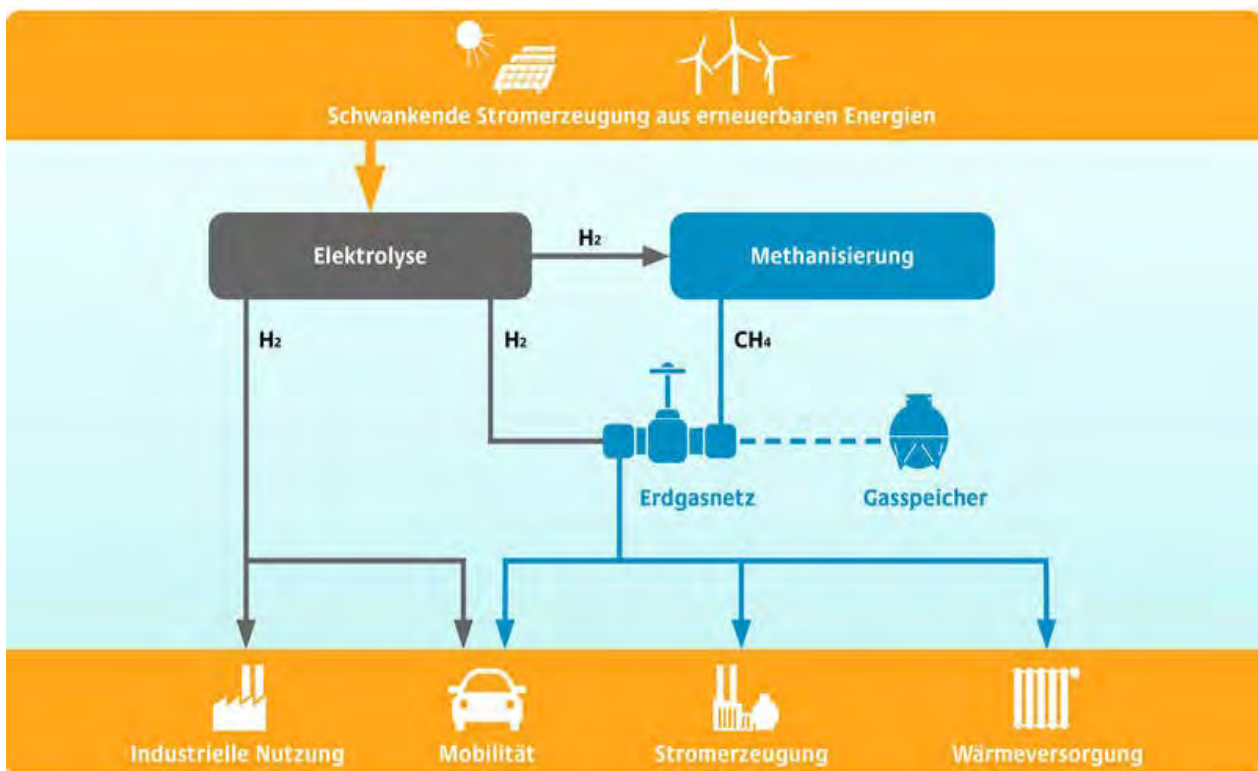


Abbildung 29: Anwendungsfelder des Power-to-Gas-Prozess

2.5.3 Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (KWKK)

Im Abschnitt 2.3.11 wurde bereits beschrieben, dass das Betreiben von KWK- Anlagen abhängig von der nachgefragten Fernwärme ist. Somit ist es üblich, dass die Kraftwerke in der warmen Jahreszeit seltener oder gar nicht laufen und somit auch weniger Strom mit einer Erzeugungsweise produziert werden kann, die durch das erneuerbare Energien Gesetz gefördert wird. Es wäre also interessant, Möglichkeiten für einen höheren Wärmeabsatz und damit eine bessere Anlagenauslastung im Sommerhalbjahr zu finden.

Vor allem die Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung bietet sich dazu hervorragend an. Dabei wird im Sommer thermische Energie verwendet, um Absorptionskältemaschinen zu betreiben. Das damit abge-

2.5.3 Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (KWKK)

kühlte Wasser kann beispielsweise zur Klimatisierung von Bürokomplexen und öffentlichen Gebäuden oder zur Kühlung von Lebensmitteln verwendet werden und ersetzt damit strombetriebene und die Umwelt mehr belastende Klimaanlage²¹⁷. Zudem nimmt man an, dass der Kältebedarf zur Klimatisierung in Deutschland noch steigen wird²¹⁸.

Das in Augsburg bereits vorhandene Fernwärmenetz könnte hierbei genutzt werden, um in der wärmeren Jahreszeit heißes Wasser zu den Abnehmern zu transportieren und vor Ort mittels Absorptionskältemaschinen kaltes Wasser zu bekommen.

Grob skizziert funktioniert eine Absorptionskältemaschine wie folgt: Gearbeitet wird mit einem Kältemittel, das je nach Druck und Temperatur von einem Trägermittel absorbiert oder davon getrennt wird. Ein verbreitetes Stoffpaar ist Ammoniak mit Wasser als Träger. Die Ammoniak-Wasser-Lösung wird im sogenannten Austreiber beheizt, so dass der Ammoniak verdampft und abgeschieden wird. Anschließend wird das Kältemittel wieder kondensiert und in einen Vakuumbehälter eingesprüht, wo es aufgrund des fehlenden Drucks verdampft. Dabei wird der Umgebung Wärme entzogen. Danach wird der Ammoniak in einem weiteren Behälter wieder vom Wasser absorbiert und der Kreislauf kann von Neuem beginnen. In Abbildung 30 ist der Vorgang schematisch dargestellt.^{219 220}

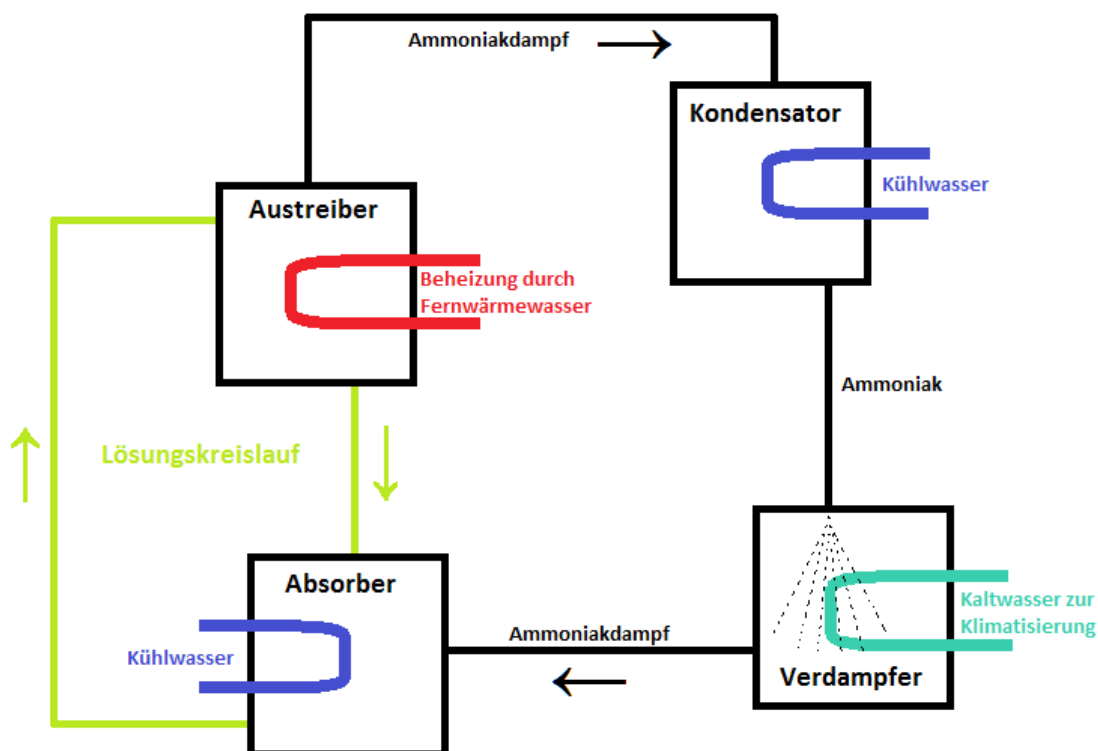


Abbildung 30: Schema einer Absorptionskältemaschine

217 http://www.bine.info/fileadmin/content/Publikationen/Basis_Energie/Basis_Energie_Nr_20/basis20internetx.pdf

218 http://www.bine.info/fileadmin/content/Publikationen/Basis_Energie/Basis_Energie_Nr_20/basis20internetx.pdf

219 <http://www.kwkk.de/kwkk-technologien/abso.html>

220 Zahoransky, 2010, S. 243f

2.5.4 Nutzung von Bioabfällen zur Energiegewinnung

2.5.4 Nutzung von Bioabfällen zur Energiegewinnung

Im Jahr 2010 sind in Bayern insgesamt etwa 1,83 Millionen Tonnen organische Abfälle, also Grün- und Bioabfall, angefallen²²¹. Davon wurden knapp 1,33 Millionen Tonnen durch Kompostierung und 317.000 Tonnen durch Vergären verwertet, während der Rest entweder zu Häcksel weiterverarbeitet oder beispielsweise durch Verbrennen energetisch umgesetzt wurde²²². Die Vergärung von Biomasse hat viele Vorteile. Zum einen werden Entsorgungskosten eingespart und zum anderen können die Reste aus dem Vergärungsprozess zu Kompost und Flüssigdünger weiterverarbeitet werden²²³. Außerdem wird eine ansonsten ungenutzte regenerative Energiequelle genutzt und nicht zuletzt CO₂ eingespart, das bei anderen Formen der Energiegewinnung anfallen würde²²⁴.

In Ingolstadt ging im April 2012 eine Vergärungsanlage in Betrieb, die der bisherigen Kompostierung vorgeschaltet ist und die von Kommunalbetrieben und einer Entsorgungsfirma gemeinsam geführt wird²²⁵. Das aus etwa 18.000 Tonnen Bioabfällen entstehende Gas wird in einem Blockheizkraftwerk in Strom und Wärme umgewandelt²²⁶.

In der AVA Abfallverwertung Augsburg GmbH wurden im Jahr 2010 insgesamt 64.817 Tonnen Biomasse aus der Stadt und dem Landkreis Augsburg, sowie dem Landkreis Aichach-Friedberg kompostiert²²⁷. Es ist also naheliegend, diese regenerative Energiequelle besser zu nutzen. In der Tat soll ab dem Jahr 2013 in der AVA zusätzlich zur Kompostierung eine Vergärungsanlage in Betrieb gehen und das entstehende Gas zum Teil verkauft werden²²⁸. Dazu findet in den Gemeinden des Landkreises Augsburg im Moment ein Wechsel von der ursprünglichen braunen Bioabfalltonne zur einer kostenlosen „BioEnergieTonne“ statt²²⁹.

2.5.5 Smart Grid – Intelligentes Stromnetz

Statt einer zentralen Regelung der durch die erneuerbaren Energien vermehrt anfallenden Schwankungen im Stromnetz wie bei der Technologie Power-to-gas, ist auch eine dezentrale Regelung denkbar. Ein Beispiel dafür ist das sogenannte Intelligente Netz oder Smart Grid. Dieses Konzept funktioniert folgendermaßen: Es wird eine Einheit von Verbrauchern gebildet, die durch einen geschlossenen Stromkreis verbunden sind und in deren Bereich Stromerzeugung, zum Beispiel durch Photovoltaikanlagen stattfindet. Dieser Bezirk wird von einem zentralen Rechner, dem Smart Operator, gesteuert. Das Ziel ist es, die Stromerzeugung und den -verbrauch zu synchronisieren, indem sich die Stromkunden nach dem Stromangebot richten. Konkret bedeutet das, dass der Smart Operator mit Daten über das Wetter, die Stromerzeugung, den Strombedarf etc. versorgt wird und dann

221 <http://www.bestellen.bayern.de>, S. 55

222 <http://www.bestellen.bayern.de>, S. 55

223 http://www2.ingolstadt.de/index.phtml?object=tx|1842.55.1&NavID=1842.86&Aktuell_ID=13222

224 http://www2.ingolstadt.de/index.phtml?object=tx|1842.55.1&NavID=1842.86&Aktuell_ID=13222

225 <http://www.in-kb.de/index.phtml?NavID=1271.134&La=1>

226 <http://www.in-kb.de/index.phtml?NavID=1271.134&La=1>

227 http://ava.ve.m-online.net/cms/index.php?option=com_docman&task=cat_view&gid=12&Itemid=124
Geschäftsbericht 2010, S. 14f

228 http://www.abfallwirtschaft-landkreis-augsburg.de/webarba/webcms.nsf/pa_webFrameSet_1024?OpenPage

229 http://www.abfallwirtschaft-landkreis-augsburg.de/webarba/webcms.nsf/pa_webFrameSet_1024?OpenPage

2.5.5 Smart Grid – Intelligentes Stromnetz

den Verbrauch in seinem Bezirk lenkt, indem beispielsweise bei zu geringer Netzauslastung elektrische Geräte in den Haushalten eingeschaltet werden. Denkbar sind dabei Spül- und Waschmaschinen, Warmwasserspeicher oder das Aufladen von Elektroautos. Voraussetzung für das Funktionieren dieses Konzepts ist aber, dass die beteiligten Verbraucher einen Glasfaseranschluss für die Datenübertragung vom Smart Operator, einen intelligenten Stromzähler und von Außen steuerbare intelligente Geräte haben. In Schwaben wird dieses Konzept nun erstmals in der Schwabmünchener Siedlung Wertachau realisiert, wo rund 100 Haushalte teilnehmen.²³⁰

Das Konzept des „Smart Grid“ umfasst, in größeren Dimensionen gedacht, noch Aspekte wie einen Netzausbau, der auf die Spitzenleistungen der erneuerbaren Energiequellen zugeschnitten ist, sowie den Ausbau von Regelenergie-Kraftwerken und Energiespeichern²³¹.

230 Antosch, 2012

231 Zahoransky, 2010, S. 381ff

3 Didaktische Überlegungen

Zunächst soll hier auf didaktische Aspekte eingegangen werden, die für das Thema Energieversorgung charakteristisch sind. Anschließend werden noch fünf Vorschläge für Unterrichtsstunden genauer ausgearbeitet.

3.1 Vorkenntnisse der Schüler aus dem regulären Unterricht

Wie schon im Abschnitt 1.2 angeklungen ist, macht der Lehrplan insbesondere für die 8. und 9. Jahrgangsstufe Vorgaben, die Aspekte der Energietechnik betreffen. Die physikalischen Grundlagen für das Verstehen dieser Thematik werden ebenfalls hauptsächlich in diesen beiden Klassenstufen gelegt.

In der 8. Jahrgangsstufe lernen die Schüler die physikalischen Größen Energie und Arbeit kennen, sowie das Prinzip der Energieerhaltung. Insbesondere werden auch die Formeln für die potentielle und die kinetische Energie eingeführt und Aufgaben mittels des Energieerhaltungsgesetzes mathematisch gelöst. Außerdem können die Schüler verschiedene Formen der Energieumwandlung qualitativ darlegen und kennen verschiedene Energiearten. Ein weiterer Themenkomplex der 8. Jahrgangsstufe, der zum Verstehen von Aspekten der Energietechnik beiträgt, ist die Wärmelehre. Unter anderem wird die innere Energie eingeführt, die Aggregatzustände von Stoffen durchgenommen und Volumenänderungen, wie beispielsweise das Verhalten von Gasen bei Temperaturänderungen, näher beleuchtet. Schließlich beinhaltet der Unterricht der 8. Klasse auch noch das Thema Elektrische Energie. In diesem Abschnitt lernen die Schüler die elektrische Energie und ihre Umwandlung in andere Energieformen, sowie die elektrische Leistung kennen. Außerdem erfolgt hier eventuell auch schon eine erste Thematisierung der Energieversorgung, die vor allem deren Zukunft im Hinblick auf Ressourcen oder Umweltfragen betrifft.²³²

In der 9. Jahrgangsstufe wird das für die Energietechnik relevante Wissen der Schüler hauptsächlich auf dem Gebiet der Elektrizität erweitert. Die Schüler haben die Induktion und ihre technischen Anwendungen im Elektromotor und im Generator kennen gelernt. Auch der Transformator ist ein Thema, bei dem oft auch das Umspannen zwischen den Netzebenen unterrichtet wird.²³³

Zusammenfassend kann man also sagen, dass die Schüler aus der 8. Jahrgangsstufe Kenntnisse über Energie, Arbeit, Leistung, sowie Grundlagen der Thermodynamik und Elektrizität mitbringen. In der 9. Klasse wird dann vor allem das Gebiet der Elektrizität noch um Elektromotor, Generator und Transformator vertieft. Damit eignet sich ein Großteil der in dieser Arbeit vorgestellten Themen bereits ab der 8. Jahrgangsstufe.

232 <http://www.isb-gym8-lehrplan.de/contentserv/3.1.neu/g8.de/index.php?StoryID=26437>

233 <http://www.isb-gym8-lehrplan.de/contentserv/3.1.neu/g8.de/index.php?StoryID=26438>

3.2 Irreführende, aber gebräuchliche Begriffe in der Energiewirtschaft

3.2 Irreführende, aber gebräuchliche Begriffe in der Energiewirtschaft

Grundsätzlich sollte im Unterricht darauf geachtet werden, richtige, das heißt der physikalischen Definition entsprechende Bezeichnungen zu verwenden. Außerdem sollte der Unterricht der behandelten Sache gerecht werden, was auch das Verwenden und Beherrschen der Fachsprache mit einschließt²³⁴. In manchen Fällen widersprechen sich allerdings diese beiden Grundsätze. Nämlich dann, wenn in der Wissenschaft oder Technik Begriffe verwendet werden, die physikalisch gesehen irreführend, ungenau oder sogar falsch sind. Hier sollte man als Lehrer zwischen dem Einhalten physikalischer Korrektheit und dem Verwenden von eventuell problematischen Bezeichnungen, die aber in eine allgemein anerkannten Fachsprache integriert sind, abwägen. Entschließt man sich zu letzterem, was dann sinnvoll ist, wenn man den Begriff nur durch einen künstlichen anderen ersetzen könnte, sollte man die Problematik mit den Schülern auf jeden Fall thematisieren, um einer Entwicklung von Fehlvorstellungen vorzubeugen. Auf die Korrektheit muss insbesondere dann genau geachtet werden, wenn eine Größe erst neu eingeführt wurde und die Schüler damit noch nicht sicher umgehen können. Im Folgenden sollen einige irreführende Bezeichnungen der Energietechnik vorgestellt werden.

Ein erstes Beispiel ist die „Kraft“, die ganz selbstverständlich in Ausdrücken wie etwa Wasserkraft, Kraft-Wärme-Kopplung, Kraftwerk etc. vorkommt. Mit der physikalischen Definition der Kraft, nämlich dass diese eine gerichtete Größe ist, die einen Körper verformen oder beschleunigen kann²³⁵, haben die genannten Begriffe eher wenig zu tun. Die Verwendung des Wortes „Kraft“ in den genannten Ausdrücken hat sich im 19. Jahrhundert, also in der Anfangszeit der Energietechnik, etabliert. Damals wurde Energie, Leistung, Impuls, Kraft, Moment etc. noch nicht exakt voneinander abgegrenzt²³⁶. Ein Ersetzen durch andere Bezeichnungen scheint hier aber weder möglich, noch sinnvoll.

Ein nächster Fall, ist die häufige Verwendung des Begriffs „Energie“ an Stelle von „Leistung“, wie beispielsweise bei Regelenergie und -leistung. Meist ist dies nicht wirklich falsch, aber von Leistung zu sprechen, trifft den Sachverhalt oft genauer. In der Energietechnik ist die geforderte Leistung, also die Energie, die pro Zeit bereitgestellt werden muss, maßgebend. Bei der Dimensionierung von Kraftwerken bzw. von Transportleitungen beispielsweise, ist die maximal benötigte bzw. zu transportierende Leistung ausschlaggebend.

Ein weiteres Problem gibt es mit einer klaren Unterscheidung von Wärme Q und innerer Energie U bzw. thermischer Energie. Wärmeerzeugung ist ein gängiger, aber falscher Begriff, da Wärme nur abgegeben oder aufgenommen werden kann. Dennoch werden diese Ausdrücke vor allem umgangssprachlich oft falsch verwendet. Beispielsweise ist in einem Zeitungsartikel von „*dabei entstehende[r] Wärme*“²³⁷ die Rede, womit korrekt nur gemeint sein kann, dass bei einem Prozess Wärme auf-

234 Wiater, 2011, S. 132f

235 Lüders, 2009, S. 21

236 Zahoransky, 2010, S. 252

237 Krog, 2012

3.2 Irreführende, aber gebräuchliche Begriffe in der Energiewirtschaft

genommen oder abgegeben wird. Ein weiteres Zitat aus diesem Artikel ist, dass „*Strom und Wärme* [von einer Gasturbine] *gleichzeitig erzeugt*“ werden²³⁸, was heißen soll, dass in elektrische und thermische Energie umgewandelt wird. Aber auch in Fachbüchern ist die Rede von „*Erzeugung von elektrischer Energie und Wärme*“²³⁹. „Erzeugung von Fernwärme“ bedeutet also korrekt: Das Fernwärmewasser nimmt Wärme auf bzw. es wird Wärme ans Wasser abgegeben. Oder: Das Wasser wird erhitzt bzw. seine innere Energie wird erhöht. Hier ist es relativ gut möglich, sich physikalisch richtig auszudrücken.

Ganz ähnlich wie im letzten Beispiel, verhält es sich mit den gängigen Bezeichnungen Energieerzeugung oder Stromerzeugung bzw. Erzeugung elektrischer Energie. Nach dem Energieerhaltungssatz kann Energie innerhalb eines geschlossenen Systems weder erzeugt, noch vernichtet werden, sondern nur verschiedene Energieformen ineinander umgewandelt werden. Trotzdem wird der Begriff Energieerzeugung häufig verwendet. Man kann ihn als eine Art Abkürzung oder Überbegriff für Energieumwandlungsketten von zum Beispiel einer fossilen Energiequelle bis zur direkt nutzbaren Energie sehen. Vor allem wenn „Energieerzeugung“ in der 8. Jahrgangsstufe auftaucht, in der auch der Energieerhaltungssatz eingeführt wird, sollte diese Problematik thematisiert werden.

3.3 Bemerkung zur Einheit Wattstunden (Wh)

Beschäftigt man sich mit dem Thema Energieversorgung, so fällt auf, dass Energie fast ausschließlich in der Einheit Wattstunden (Wh) angegeben wird. Zum Beispiel wird die verbrauchte Energie von Strom- und Wärmehählern in Wh gemessen. Die Abrechnung von Gas, Wärme und Strom passiert ebenfalls zumeist in der Einheit Wh^{240 241 242}. Ein Zahlenbeispiel dafür ist, dass ein Augsburger Haushalt im Durchschnitt 2400 kWh im Jahr Strom verbraucht²⁴³.

In der Physik sind Wattstunden keine übliche Einheit und erscheinen auf den ersten Blick unnötigkompliziert, da man sie ja eigentlich noch in Joule (J) umrechnen und somit kürzen könnte. In der Energiewirtschaft hat sich die Einheit Wh dennoch durchgesetzt. Zum einen hat dies mit Sicherheit auch geschichtliche Gründe, ähnlich der Angabe der Leistung beim Auto in Pferdestärken, an Stelle von Watt. Andererseits ist die Angabe von Energie bzw. Arbeit bei näherem Hinsehen in Wh durchaus anschaulicher als in J. Zudem sind die Größenordnungen handlicher. So hat Erdgas unter Normbedingungen einen Heizwert von etwa 10 kWh pro Kubikmeter, d.h. bei vollständiger Verbrennung von einem Kubikmeter Erdgas wird eine Wärmeenergie von 10 kWh frei²⁴⁴. Interessanterweise liegt auch der Heizwert von Heizöl bei ungefähr 10 kWh pro Liter²⁴⁵. Drückt man also die Arbeit in Wh aus, so kann man sich eine recht anschauliche Vorstellung von der verbrauchten Energie machen.

238 Krog, 2012

239 Heuck, 2010, S. 9

240 http://www.sw-augsburg.de/geschaeftskunden/fernwaerme_musterrechnung.php

241 http://www.sw-augsburg.de/geschaeftskunden/strom_musterrechnung.php

242 http://www.sw-augsburg.de/geschaeftskunden/erdgas_musterrechnung.php

243 <http://www.wkw-hochablass.de/kraftwerk/daten-und-fakten/>

244 Zahoransky, 2010, S. 185

245 <http://www.iwo.de/fachwissen/brennstoff/>

3.3 Bemerkung zur Einheit Wattstunden (Wh)

Benötigt also beispielsweise ein Haushalt in einem Monat 500 kWh Heizenergie, so entspricht dies in etwa 50 m³ Erdgas bzw. 50 l Heizöl. Des Weiteren heißt es, wenn davon gesprochen wird, dass eine Heizung 20 kW Leistung hat, dass diese Heizung 20 kWh pro Stunde Arbeit leisten kann, also dann pro Stunde 2 m³ Erdgas bzw. 2 l Heizöl verbrannt werden können.

Abschließend sei noch bemerkt, dass es bei Erdgas auch üblich ist, die Einheit der gelieferten Leistung in Kubikmeter pro Stunde statt in Watt angegeben wird. Wie auch in Abbildung 31 zu sehen ist, werden vor allem von den Zählern zumeist die verbrauchten Kubikmeter gemessen und erst bei der Abrechnung in kWh veranschlagt. Kunden, die sehr große Gasmengen beziehen, haben zusätzlich einen Mengenumwerter eingebaut, der sowohl den Druck, als auch die Temperatur des Gases misst und dann in die entsprechende Gasmenge bei Normbedingungen umrechnet.

Da bei den Schülern zu Hause in den meisten Fällen zugängliche Strom-, Gas- oder Wärmehzähler vorhanden sind, bietet es sich an, dies beispielsweise als Einstieg in ein Stundenthema zu nutzen. Auf den Abbildungen 31 und 32 sind die Anzeigen von einem Gas- und einem Stromzähler zu sehen.

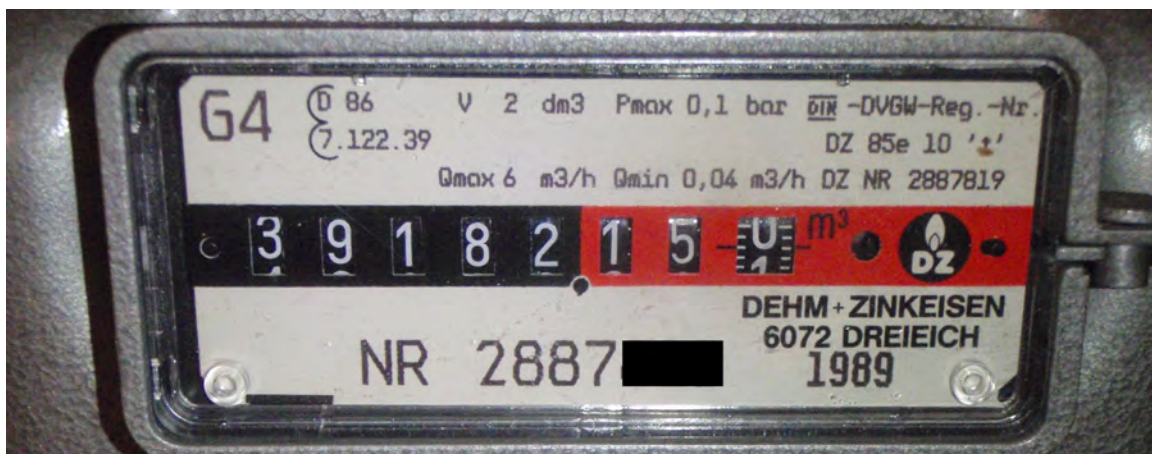


Abbildung 31: Gasmengenangabe auf einem Gaszähler in m³

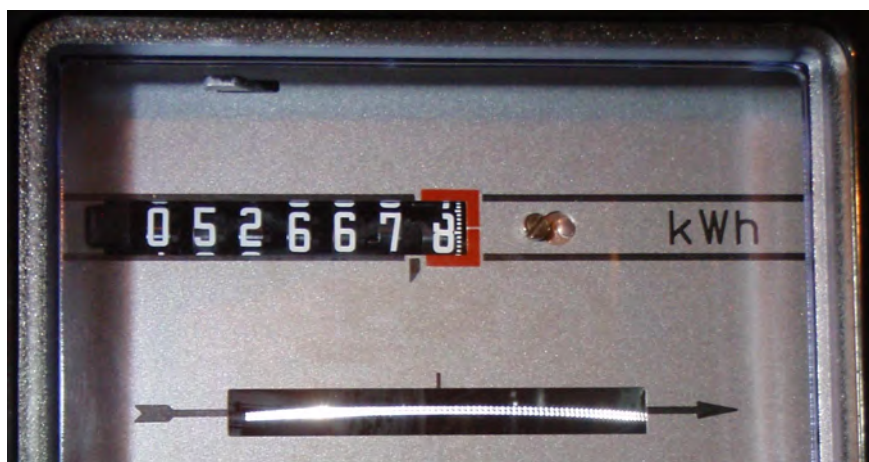


Abbildung 32: Strommengenangabe auf einem Stromzähler in kWh

3.4 Das Thema als wissenschaftspropädeutisches Seminar in der Oberstufe

3.4 Das Thema als wissenschaftspropädeutisches Seminar in der Oberstufe

Im wissenschaftspropädeutischen Seminar (W-Seminar) der Oberstufe sollen die Schüler Kompetenz in wissenschaftlichem Arbeiten erwerben. Dafür ist das Thema Energieversorgung, sowohl im Hinblick auf Physik, als auch auf Technik und Ingenieurwissenschaften gut geeignet. An das Rahmenthema eines W-Seminars wird der Anspruch gestellt, dass es auf der einen Seite genügend Unterthemen für die Seminararbeiten der einzelnen Schüler zulässt und auf der anderen Seite so eingegrenzt ist, dass die Schüler an Inhalten arbeiten, die auch noch eine Kooperation untereinander zulässt. Die Teilgebiete sollen sich zu einem großen Ganzen zusammenfügen lassen. Diese Bedingungen würde das Thema „Energieversorgung einer Stadt“ erfüllen. Dabei muss allerdings bedacht werden, in welcher Tiefe einzelne Aspekte behandelt werden sollen. Hier ist es wohl sinnvoll, die Feinheit der Themenbehandlung von der Anzahl der zu vergebenden Seminararbeiten abhängig zu machen, damit nicht beispielsweise nur spezielle Details der Energieerzeugung, sondern auch die Zusammenhänge erörtert werden können. Gut denkbar wäre eine Begrenzung des Rahmenthemas auf ausschließlich elektrische Energieversorgung. Eine weitere Anforderung an das Rahmenthema ist, keine zu enge Verbindung zum Lehrplan zu haben. Auch dies ist gegeben, da Energieversorgung und -technik ausdrücklich nur im Profilbereich des naturwissenschaftlich-technologischen Gymnasiums der 8. und 9. Jahrgangsstufe vorkommen^{246 247}. Des Weiteren lässt die Beschäftigung mit der Energieversorgung Methoden wie Quellenarbeit, Versuche, Exkursionen, Expertenvorträge etc. zu. Für die thematische Hinführung im Halbjahr 11/1 eignen sich Aspekte aus Kapitel 2 und ein Überblick über die verschiedenen Gesichtspunkte der Energieversorgung.²⁴⁸

Für das Durchnehmen dieses Themas in der Oberstufe spricht außerdem seine Komplexität und eher schwierige Aspekte der Energietechnik wie die Kreisprozesse oder die Verwendung des h-s-Diagramms.

Nun sollen noch einige Vorschläge für Themen von Seminararbeiten in einem W-Seminar folgen, wobei fast alle ein Kooperieren der Schüler untereinander erfordern, um Überschneidungen abzuklären und zusammen zu arbeiten:

- (1) Die Anfänge der Energieversorgung
- (2) Energieverteilnetze
- (3) Lastprognosen und Regelung im Stromnetz
- (4) Energiespeicher
- (5) Energieumwandlungsprozesse und Wirkungsgrad
- (6) Aufbau und Funktionsweise einer Gasturbinenanlage

246 <http://www.isb-gym8-lehrplan.de/contentserv/3.1.neu/g8.de/index.php?StoryID=26437>

247 <http://www.isb-gym8-lehrplan.de/contentserv/3.1.neu/g8.de/index.php?StoryID=26438>

248 http://www.isb-oberstufegym.de/userfiles/Die_Seminare/W_Seminar_Leitfaden.pdf

3.4 Das Thema als wissenschaftspropädeutisches Seminar in der Oberstufe

- (7) Aufbau und Funktionsweise eines Dampf(heiz)kraftwerks
- (8) einzelne wichtige Kraftwerksbauteile (Turbinen, Generatoren, ...)
- (9) Kraft-Wärme-(Kälte)-Kopplung
- (10) Wasserkraftwerke
- (11) Power-to-gas
- (12) Energiequellen
- (13) ungenutztes Potential erneuerbarer Energiequellen in der Region
- (14) Fernwärmeversorgung
- (15) ...

3.5 Außerschulische Lernorte und Betriebserkundungen in Kraftwerken

Bereits der Lehrplan für das bayerische Gymnasium weist darauf hin, dass eine Kooperation mit Partnern außerhalb der Schule wünschenswert ist, um den Schülern zu Erfahrungen, beruflichen Orientierungshilfen, Interesse am Thema oder größerem Realitätsbezug zu verhelfen²⁴⁹. Gerade bei der Energieversorgung lässt sich diese Forderung relativ einfach verwirklichen. Die Möglichkeiten außerschulischen Lernens reichen hier vom Stromzähler bei den Schülern zu Hause bis zur Betriebserkundung in einem Kraftwerk. Hier soll vor allem auf letztere näher eingegangen werden. Grundsätzlich ist zu einer Betriebserkundung zu sagen, dass sie, um einen Lerneffekt zu erzielen, zusätzlich zum eigentlichen Besuch des Betriebs, eine Vor- und eine Nachbereitungsphase im Unterricht erfordert. Das außerschulische Lernen soll unbedingt auch zu Einsichten des behandelten physikalischen Themas beitragen, anstatt am Schluss einer beendeten Unterrichtseinheit zu stehen und damit redundant zu bereits Gelerntem zu sein. Die Vorbereitungsphase beinhaltet eine Einführung in das Thema, die auch Schülerversuche, das Aufstellen von Hypothesen oder die Sammlung eines Fragenkatalogs mit einschließen kann. Außerdem muss die Erkundung geplant werden und ihr eine Bedeutung im physikalischen Erkenntnisgewinn beigemessen werden. Denkbar ist zum Beispiel das Beantworten einer Liste von zuvor überlegten Fragen oder das Anfertigen einer Skizze des Aufbaus der besichtigten Anlage. Je nach den örtlichen Gegebenheiten des Betriebs (Hintergrundlärm, Platz, ...), ist es sinnvoll, die Klasse bzw. die Lerngruppe in kleinere Gruppen aufzuteilen. Elementar für den Nutzen einer Betriebserkundung für den Unterricht, ist eine entsprechende Auswertung und Nachbereitung. Eine gute Möglichkeit ist, vorher zu vereinbaren, dass die Schüler die Ergebnisse ihrer Aufträge von der Erkundung nachher in einem kurzen Referat präsentieren. Auf diese Resultate kann dann im folgenden Unterricht aufgebaut werden. Die Schüler können bei dieser Unterrichtsmethode, über das physikalische Fachwissen hinaus, Methodenkompetenz beim Lösen und Vorstellen von Aufgaben erwerben. Außerdem erhalten sie Einblick in die Berufswelt und

249 <http://www.isb-gym8-lehrplan.de/contentserv/3.1.neu/g8.de/index.php?StoryID=26350>

3.5 Außerschulische Lernorte und Betriebserkundungen in Kraftwerken

lernen technische Anwendungen physikalischer Phänomene kennen, was dazu beitragen kann, sie zu motivieren.²⁵⁰

In Augsburg besteht von Seiten der Abfallverwertung Augsburg (AVA) das Angebot, die Anlage zu besichtigen²⁵¹. Wie in Abschnitt 2.3.13 beschrieben, handelt es sich dabei um ein Dampfheizkraftwerk, das mit Abfall befeuert wird.

Auch die Stadtwerke bieten offiziell Betriebserkundungen an, die allerdings mehr an Schülern orientiert sind, die sich über eine Ausbildung in einem der dort gefragten Berufe informieren wollen. Auf Anfrage ist jedoch sicher auch eine ausschließlich physikalische Ausrichtung möglich. Im Hinblick auf das Thema Energieversorgung, sind die Anlagen Heizkraftwerk und Biomasseheizkraftwerk interessant.²⁵²

Das alte Wasserwerk auf der Westseite des Hochablass mit im Gebäude integrierten Turbinen zur Stromerzeugung steht ebenfalls zur Besichtigung offen, ist aber eher im Hinblick auf die historische und heutige Wasserversorgung lohnend²⁵³. Die Baustelle vom neuen Wasserkraftwerk auf der Ostseite des Hochablass ist vom Fußgängersteg gut einsehbar, kann aber nur bedingt – je nach Bauphase und Sichtbarkeit von beispielsweise der Turbine – zum physikalischen Erkenntnisgewinn beitragen.

Des Weiteren können auch die Heizungsanlagen bei den Schülern daheim bis zu einem gewissen Maße in den Unterricht eingebunden werden, beispielsweise in der Einstiegsphase ins Thema.

Eine andere gute Möglichkeit, die, falls sie machbar ist, wenig zeitaufwendig ist, da die Anfahrt ausfällt, ist die Besichtigung der schuleigenen Heizungsanlage. Gerade in der Augsburger Innenstadt werden die städtischen Gebäude mit Fernwärme beheizt. Sichtbar sollte dann der meist in rot gehaltene Vorlauf und der in blau gehaltene Rücklauf, ein Wärmetauscher und ein Wärmezähler mit Temperaturfühlern in Vor- und Rücklauf sein. Einige wenige Schulen werden außerdem mit Blockheizkraftwerken beheizt. Falls die räumlichen Gegebenheiten und die Heizungsart eine interessante Besichtigung zulassen, ist dies eine gute Möglichkeit für einen Lernort, der zwar nicht außerhalb der Schule, aber außerhalb des normalen Unterrichts liegt.

250 Bresler, 2003, S. 10ff

251 <http://www.ava-augsburg.de/service/ava-vor-ort-erleben/>

252 http://www.sw-augsburg.de/ueber_uns/Betriebspraktika%20und%20Erkundung.php

253 http://www.sw-augsburg.de/ueber_uns/Fuehrungen.php

3.6 Unterrichtsvorschlag zur Netzfrequenz bei der Stromversorgung

3.6 Unterrichtsvorschlag zur Netzfrequenz bei der Stromversorgung

Der nun vorgestellte mögliche Verlauf einer Unterrichtsstunde wurde für die 9. Jahrgangsstufe entworfen. Er hat insbesondere die Maßnahmen zum Thema, die ergriffen werden, um die Netzfrequenz im Stromnetz bei konstant 50 Hz zu halten. Am Besten ist es, wenn diese Stunde an eine Unterrichtseinheit anschließt, die die Funktionsweise eines Generators bzw. Elektromotors zum Thema hatte. Zu beachten sind für genauere Informationen zum Inhalt besonders die Abschnitte 2.2.2, 2.2.5 und 2.3.9 dieser Arbeit.

3.6.1 Allgemeines zum Thema

Im vorhergehenden Unterricht sollte vor allem die Funktionsweise eines Generators verstanden worden sein. Außerdem müssen Grundlagen zu Wechselstrom und Frequenz vorliegen. Der Inhalt Netzfrequenz zielt auf das Verständnis von Zusammenhängen der Stromversorgung und außerdem einem vertieften Verständnis von der Funktionsweise eines Generators ab. Als markanteste Medien werden ein zweiseitiges Arbeitsblatt und eine Netzfrequenzmessung im Internet verwendet. Da das Thema nicht einfach ist, verlangt es ein höheres Maß an Lehrersteuerung, als andere Inhalte. Als Methode dient hauptsächlich der Lehrervortrag, der an zwei Stellen von einer aktiven Phase der Schüler unterbrochen wird. Die Ergebnisse der dabei bearbeiteten Aufgaben werden in einem fragend-entwickelnden Unterrichtsgespräch diskutiert.

3.6.2 Vorschlag für einen Stundenverlauf

Die Frage „Kann man die Elektrogeräte, die wir in Deutschland verwenden, überall auf der Welt ans Stromnetz anschließen?“ wäre eine Idee für den Einstieg in die Unterrichtsstunde. Es ist sehr wahrscheinlich, dass einige Schüler bereits Fernreisen gemacht haben und wissen, dass dem nicht so ist. Dies hängt mit der Netzfrequenz zusammen, die zum Beispiel in Nordamerika einen Wert von 60 Hz hat. Damit wäre der Inhalt der Stunde, die Netzfrequenz, bereits bestimmt. Es soll geklärt werden, wie die Netzfrequenz von genau 50 Hz erzeugt wird, wie sie konstant gehalten und wie dies durch möglichst genaue Prognosen vereinfacht werden kann.

Da Schulbücher dieses Thema in der hier behandelten Form nicht beinhalten, wurde ein zweiseitiges Arbeitsblatt erstellt, das vor allem auch längere Informationstexte aufweist. Das Arbeitsblatt ist am Ende des Abschnitts 3.6 eingefügt.

Zunächst soll geklärt werden, wie die Frequenz von 50 Hz erzeugt werden kann. Dazu findet sich auf dem Arbeitsblatt ein Text. Üblicherweise kennen die Schüler aus dem regulären Unterricht nur Generatoren mit einem Polpaar als Läufer. Als Erstes wird die Überlegung angestellt, wie schnell sich eine Turbine in Nordamerika im Vergleich zu einer in Europa drehen muss, um die jeweils gewollte Netzfrequenz zu bekommen. Diese Frage ist natürlich relativ einfach. In Nordamerika sind es 3.600 Umdrehungen. Allerdings soll diese Überlegung bereits auf die nächste Aufgabe hinführen, die von den Schülern in Partnerarbeit versucht werden soll. Die nun folgende Aufgabe hat die Än-

3.6.2 Vorschlag für einen Stundenverlauf

derungen zum Inhalt, die an einem herkömmlichen Generator mit einem Polpaar durchgeführt werden müssen, um bei einer geringeren Drehzahl als 50 pro Sekunde, dennoch eine Frequenz von 50 Hz zu bekommen. Die Antwort lautet: Die Anzahl der Polpaare des Läufers muss entsprechend erhöht werden. Wenn dies verstanden worden ist und die Polpaarzahl für die mit 1.500 und 300 Umdrehungen pro Minute drehenden Turbinen gefunden wurde, kann der Zusammenhang zwischen Drehzahl, Polpaarzahl und Frequenz noch in einer Formel verallgemeinert werden.

Anschließend folgen ein Informationstext dazu, wie die Netzfrequenz konstant gehalten wird und ein Abschnitt über die Prognostizierung des Leistungsbedarfs der Kunden. Am Schluss gibt es noch eine kurze Aufgabe, bei der drei Standardlastprofile zugeordnet werden sollen. Die Lösung ist dabei von links nach rechts: Bäckerei, Diskothek oder Gaststätte, Gewerbe mit einem Betrieb tagsüber von 8 bis 18 Uhr (zum Beispiel ein Laden, ein Friseur oder ein Büro).

Abschließend kann die aktuelle Netzfrequenz, die im Internet von einigen Seiten (beispielsweise von <http://www.netzfrequenzmessung.de/verlauf.htm>) angezeigt wird, betrachtet werden. Oft ist bei einem zu gravierenden Absinken oder Ansteigen der Frequenz nur wenige Sekunden später das Gegensteuern durch den Einsatz von Regelleistung sichtbar.

3.6.3 Erweiterungsmöglichkeiten

Das Thema Netzfrequenz kann in mehrere Richtungen erweitert werden. Denkbar ist, verschiedene Arten von Energiespeichern zu besprechen. Aber auch das Gewinnen elektrischer Energie aus einem Kraftwerksprozess, kann an eine Stunde wie oben beschrieben anschließen.

3.6.3 Erweiterungsmöglichkeiten

Arbeitsblatt: Die Netzfrequenz von 50 Hz

1. Wie bekommt man eine Frequenz von 50 Hz?

Im europäischen Stromnetz herrscht eine Netzfrequenz von konstant 50 Hz, die die direkt mit dem Stromnetz gekoppelten Generatoren der Kraftwerke liefern müssen. Die Generatoren sind aber gleichzeitig auch direkt mit den Turbinen der Anlagen zur Stromerzeugung gekoppelt. Die Turbinen von Dampf- und Gasturbinenkraftwerken drehen sich üblicherweise mit 3.000 Umdrehungen pro Minute bzw. 50 pro Sekunde. Mit einem einfachen Magneten als Läufer, der sich ebenfalls 50 mal pro Sekunde dreht und so in einer Sekunde 50 mal eine volle Phase durchläuft, ergibt sich die gewünschte Frequenz von 50 Hz. Wie schnell muss sich die Turbine eines nordamerikanischen Kraftwerks drehen, um die dort übliche Frequenz von 60 Hz zu bekommen, wenn der gleiche Generator verwendet werden soll?

Vor allem Turbinen von Wasserkraftwerken haben sehr niedrige Drehzahlen. Da die Drehzahl des Generators immer der der Turbine entspricht, müssen am Generator andere Maßnahmen ergriffen werden, um trotz geringerer Drehzahl eine Frequenz von 50 Hz zu erzielen.

Welche Änderungen müssen an einem Generator vorgenommen werden, damit er bei 300 Umdrehungen pro Minute eine Frequenz von 50 Hz erzeugt? Eventuell ist es einfacher, sich zunächst zu überlegen, wie ein Generator mit 1.500 Umdrehungen pro Minute aussehen muss.

2. Wie kann die Frequenz konstant gehalten werden?

Die von den Kunden benötigte elektrische Leistung schwankt tageszeitlich zum Teil sehr stark. Die Netzfrequenz ist genau dann konstant, wenn die Leistungsabgabe der Generatoren mit dem Leistungsbedarf der Kunden übereinstimmt. Ist die abgegebene Leistung zu groß, dann steigt die Frequenz; ist sie zu gering, dann sinkt die Frequenz. Das Bedarfsverhalten der Kunden kann nicht exakt vorausgesagt werden. Deshalb halten Energieversorgungsunternehmen Kraftwerke bereit, deren Leistungsabgabe zum Ausgleich gesteigert oder gesenkt werden kann. Man spricht dabei von Regelleistung. Trotzdem schwankt die Frequenz, wie man im Bild sieht, minimal in einem Bereich zwischen 49,9 und 50,1 Hz. Immer dann wenn die Kurve sich zu weit über oder unter die 50 Hz Linie bewegt und dann wieder „umkehrt“, wurde Regelleistung eingesetzt.



3.6.3 Erweiterungsmöglichkeiten

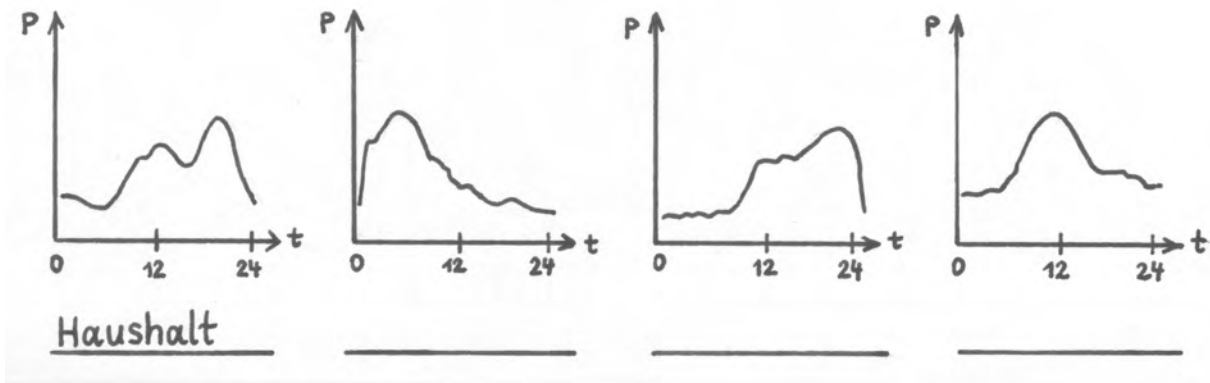
3. Wie kann der Bedarf an elektrischer Leistung vorhergesagt werden?

Um das konstant halten der Frequenz zu erleichtern, erstellen Energieversorgungsunternehmen spätestens einen Tag vorher Prognosen darüber, wie die benötigte elektrische Leistung, die sogenannte Netzlast, an einem bestimmten Tag aussehen wird. Mit dieser Vorhersage können sie den Einsatz ihrer Kraftwerke besser planen und das Verwenden von Regelleistung minimieren.

Die Prognosen werden auf Basis gesammelter Daten über die Stromkunden erstellt. Der Stromzähler von einem Kunden, der viel Strom bezieht, liefert Daten darüber, wie sein tageszeitliche Leistungsbedarf normalerweise aussieht. Kunden, die wenig Strom verbrauchen wie zum Beispiel ein Haushalt, wird ein sogenanntes Standardlastprofil zugeteilt, das einen Verlauf hat, der typisch für diese Art von Kunden ist. Die Daten vom erwarteten Leistungsbedarf aller Kunden werden addiert und das Ergebnis dann noch an Einflüsse wie das Wetter, die Jahreszeit oder besondere Ereignisse wie Schulferien angepasst. Die trotz Prognose auftretenden Abweichungen, werden durch den Einsatz von Regelleistung aufgefangen.

Hier sieht man vier Standardlastprofile. Das erste ist das eines Haushalts. Den Verlauf der Kurve kann man damit begründen, dass die meisten Leute typischerweise zwischen 6 und 8 Uhr aufstehen und beginnen, elektrische Geräte wie Lampen, Radios etc. zu benutzen. Die Höhepunkte der benötigten Leistung werden mittags und abends erreicht, wenn zum Beispiel gekocht und ferngesehen wird.

Zu welcher Kundengruppe könnten die drei anderen Lastprofile gehören und warum?



3.7 Unterrichtsvorschlag zur Fernwärme

3.7 Unterrichtsvorschlag zur Fernwärme

Die Fernwärme im Unterricht zu behandeln, ist eigentlich vor allem dann sinnvoll, wenn ein direkter Bezug zur Lebenswelt der Schüler besteht, das heißt wenn das Einzugsgebiet, aus dem die Schüler kommen mit Fernwärme versorgt wird. Der folgende Unterrichtsvorschlag ist für die 8. Jahrgangsstufe entwickelt und setzt voraus, dass die Schule mit Fernwärmewasser beheizt wird.

Insbesondere bei Unterricht zum Thema Fernwärme sollte der Abschnitt 3.2, in dem die Problematik von Begriffen der Energietechnik und der Physik diskutiert wird, beachtet werden. Wo es möglich und sinnvoll ist, sollte man die physikalisch richtige Ausdrucksweise verwenden. Für den Begriff Fernwärme, gibt es aber keinen korrekten, der diesen ersetzen könnte. In diesem Fall sollte man die Schüler dafür sensibilisieren und deutlich machen, was Fernwärme exakt bedeutet, nämlich heißes Wasser bzw. Wasser mit hoher innerer oder thermischer Energie. Dieses Wasser gibt im Wärmetauscher des Verbrauchers Wärme an das kältere Trinkwasser ab. Werden diese Begrifflichkeiten mit den Schülern problematisiert und, wenn nötig auch mehrmals, erläutert, dann können nicht nur falsche Vorstellungen vermieden, sondern eventuell sogar für ein vertieftes Verständnis von Wärme gesorgt werden.

3.7.1 Allgemeines zum Thema

Die wichtigste Voraussetzung ist beim folgenden Stundenvorschlag, dass die Begriffe Wärme und thermische Energie bekannt sind und auch berechnet werden können. Der Unterrichtsvorschlag bietet eine sehr anwendungsbezogene Möglichkeit an das Thema Wärme und thermische Energie heranzugehen. Außerdem kann zusätzlich motivieren, dass die Schüler zu einem Teil der Schule Zugang haben, den sie sonst nicht betreten dürfen. Der Inhalt „Funktionsweise einer Fernwärmeheizung“ zielt auf ein vertieftes Verständnis von Wärme und thermischer Energie ab. Außerdem soll durch den Realitätsbezug Interesse für das Thema geweckt werden. Als Methoden kommt eine kurze Erkundung und ein fragend-entwickelndes Unterrichtsgespräch zum Einsatz. Das markanteste Medium der Stunde ist die Fernwärmeheizung der Schule.

3.7.2 Vorschlag für einen Stundenverlauf

In die Stunde eingestiegen werden kann mit der Frage „Wie funktioniert eigentlich eine Heizung?“. Dabei ist wahrscheinlich das Vorwissen bei den einzelnen Schüler sehr unterschiedlich ausgeprägt. Nach einer Sammlung von verschiedenen Heizungsarten, kann zur Beheizung der Schule übergeleitet werden. Je nach Vorwissen der Schüler und Verbreitung von Fernwärmeheizungen, werden die Grundlagen dazu in einem fragend-entwickelnden Unterrichtsgespräch oder in einem Lehrervortrag ausgeführt. Informationen hierzu finden sich im Abschnitt 2.2.7 über Fernwärme. Dieser Teil der Stunde sollte etwa zehn Minuten in Anspruch nehmen.

Anschließend wird die Fernwärmeheizung der Schule erkundet. Voraussetzung dafür ist aber, dass die Räume mit einem Haustechniker der Schule zugänglich sind, Sicherheitsbestimmungen einge-

3.7.2 Vorschlag für einen Stundenverlauf

halten werden und überhaupt etwas von der Heizungsanlage sichtbar ist. Falls die räumlichen Verhältnisse etwas beengt sind, ist es möglicherweise notwendig, die Schüler aufzuteilen.

Die Fernwärmeheizung auf Seiten des Verbrauchers besteht in der Regel aus dem Vor- und Rücklauf, einem Zähler und einem Wärmetauscher. Vor- und Rücklaufleitung sind üblicherweise isoliert. Allerdings schauen Absperrventile aus der Isolierung heraus, die beim Vorlauf oft rot, beim Rücklauf blau lackiert sind. Vom im Vorlauf eingebauten Wärmezähler führt jeweils ein Temperaturfühler in die Vorlauf- und die Rücklaufleitung. An der Zähleranzeige können Werte für die Vorlauf- und Rücklauf-temperatur und die in einem bestimmten Zeitraum vom Fernwärmewasser abgegebene Wärmemenge nachgeschaut werden. Meist zeigt der Zähler immer nur einen Wert an. Es gibt dann aber einen Knopf, mit dem die Anzeige gewechselt werden kann. Solange keine Verplombungen gelöst werden, kann dabei nichts verstellt werden. Die Schüler haben den Auftrag, sich die Werte für die Temperaturen zu notieren, sowie den Durchmesser d der Vorlaufleitung abzuschätzen, der am Besten im Bereich des Zählers erkennbar ist. Optimalerweise nimmt dieser Teil der Stunde 25 Minuten ein. Es kann aber, je nach äußeren Rahmenbedingungen, auch länger dauern.

Wieder zurück im Klassenzimmer, kann nun der momentane Bedarf an thermischer Energie der Schule berechnet werden. Die vom Fernwärmewasser in einem bestimmten Zeitintervall abgegebene Wärme berechnet sich, wie bereits in Abschnitt 2.2.7 vorgestellt, folgendermaßen:

$$Q = m \cdot c_w \cdot \Delta T$$

$$Q = m \cdot c_w \cdot (T_{VL} - T_{RL})$$

(c_w : spezifische Wärmekapazität von Wasser, ΔT : Temperaturdifferenz von Vor- und Rücklauf und T_{VL} bzw. T_{RL} : Temperatur des Vor- bzw. Rücklaufs)

Die Temperaturen wurden abgelesen und die spezifische Wärmekapazität ist ebenfalls gegeben. Die Masse muss noch ermittelt werden. Dazu gibt es die folgende Möglichkeit: Man legt einen Zeitraum fest, beispielsweise eine Stunde, für die man die benötigte thermische Energie ermitteln möchte. Außerdem hat man den Durchmesser d des durchströmten Rohres abgeschätzt und erhält so mit der Rechnung $A = (d/2)^2 \pi$ den Rohrquerschnitt A . Fernwärmewasser strömt üblicherweise mit Werten um 1 m/s durch die Leitungen. Das heißt, in einer Sekunde fließt das Wasservolumen $A \cdot 1 \text{ m}$ durch die Leitung. Da ein Kubikdezimeter Wasser einem Liter bzw. einem Kilogramm entspricht, hat man die Masse m somit ermittelt. Da die Berechnung des Zylindervolumens erst in der 9. Jahrgangsstufe in Mathematik eingeführt wird, könnte man das Rohr bei der Berechnung des Volumens auch vereinfachend als Quader betrachten.

Das Ergebnis für die benötigte Wärmemenge wird in Joule angegeben. Nun könnte die Einheit noch in Watt umgerechnet werden und nach den Ausführungen von Abschnitt 3.3 überlegt werden, wie viel Liter Heizöl oder Kubikmeter Erdgas verbrannt werden müssten, um die gleiche Wärmemenge zu bekommen.

3.7.2 Vorschlag für einen Stundenverlauf

Für den letzten Teil des Unterrichts sind etwa 10 Minuten eingeplant. Man muss allerdings dazu sagen, dass die Zeitangaben von einem reibungslosen Ablauf bei der Erkundung ausgehen. Möglicherweise muss der Unterrichtsvorschlag auf zwei Stunden ausgedehnt werden.

3.7.3 Erweiterungsmöglichkeiten

Die interessanteste Erweiterung im Bezug auf die Fernwärme, ist das Durchnehmen von Heizkraftwerken und Kraft-Wärme-Kopplung. In dieser Richtung ist das Thema Fernwärme praktisch beliebig erweiterbar. Dabei könnte auch die Möglichkeit außerschulischen Lernens wahrgenommen werden und vor Ort erkundet werden, wie Fernwärmewasser erhitzt wird.

3.8 Unterrichtsvorschlag zur Funktionsweise von Dampfkraftwerken

3.8 Unterrichtsvorschlag zur Funktionsweise von Dampfkraftwerken

Dieser Unterrichtsvorschlag wurde für die 8. Jahrgangsstufe konzipiert. Idealerweise würde diese Stunde eher am Ende des Schuljahres stehen, da auf viele Themen zurückgegriffen werden muss, die während des Schuljahrs eingeführt wurden. Die Beschäftigung mit der Funktionsweise eines Dampfkraftwerks ist dabei besonders geeignet, sämtliche getrennt behandelte Unterrichtsinhalte der 8. Klasse, wie Energiearten und -umwandlungen, Wärmelehre sowie elektrische Energie, in einen Gesamtzusammenhang zu stellen und miteinander zu verknüpfen. Dies trägt auch dazu bei, die im Verlauf des Schuljahres unterrichteten Inhalte zusätzlich zu festigen.

3.8.1 Allgemeines zum Thema

Möchte man die Unterrichtsstunde so, wie im anschließenden Abschnitt beschrieben, durchführen können, dann müssen gewisse Grundlagenkenntnisse und Fähigkeiten bei den Schülern vorhanden sein. Dazu gehören vor allem die folgenden Aspekte: Aggregatzustände von Wasser, Volumenänderungen von Gasen in Abhängigkeit der Temperatur, Energiearten und -umwandlungen, sowie die elektrische Energie. Außerdem sollten die Schüler mit problemorientierten Aufgaben und Gruppenarbeit vertraut sein. Die vorgeschlagene Unterrichtsstunde ist vom Lehrer gesteuert, beinhaltet aber auch freie Elemente. Als Methoden kommen der Lehrervortrag, das fragend-entwickelnde Unterrichtsgespräch und die Gruppenarbeit zum Einsatz. Der Inhalt „Funktionsweise von Dampfkraftwerken“ hat zum Ziel, dass die Schüler sich einen thermodynamischen Prozess am konkreten Beispiel eines Kraftwerks kreativ erarbeiten können und diesen verstehen. Als Medien kommen dabei vorrangig ein Demonstrationsversuch und ein Arbeitsblatt zum Einsatz.

3.8.2 Vorschlag für einen Stundenverlauf

Am Beginn der Unterrichtsstunde steht als Einstieg, zunächst ohne genauere Erläuterungen, der im nächsten Abschnitt beschriebene Versuch, der die Funktionsweise eines Dampfkessels und einer Dampfturbine nachempfinden soll. Hier ist zu beachten, dass der Versuch einige Minuten Vorlaufzeit braucht, da das Wasser erst zum Kochen anfangen und sich eine entsprechende Menge Dampf entwickeln muss. Im Anschluss daran soll in einem fragend-entwickelnden Unterrichtsgespräch geklärt werden, was bei dem Versuch genau passiert. Dabei sind die Hinweise zu beachten, die bei der Beschreibung des Experiments im nächsten Abschnitt gegeben werden. Am Ende dieser Phase, kann noch ein regionaler Bezug zu Dampfkraftwerken in der Umgebung hergestellt werden, was eine zusätzliche Motivation sein kann. Dieser Teil des Unterrichts soll etwa 10 bis 15 Minuten in Anspruch nehmen.

Der Versuch hat zwei „Kernelemente“ eines Dampfkraftwerks demonstriert, nämlich den Kessel und die Turbine. Die folgenden 15 Minuten bestehen aus einer Gruppenarbeitsphase mit Gruppen à vier Schülern. Die Schüler bekommen die Aufgabe, gemeinsam aus auf einem Arbeitsblatt (das am Ende dieses Abschnitts eingefügt ist) beschriebenen Teilen eines Dampfkraftwerks, mit dem nun

3.8.2 Vorschlag für einen Stundenverlauf

schon bekannten Kessel und der Turbine, einen funktionierenden Kreislauf zusammzusetzen. Die Elemente des Kraftwerks sind auf dem Arbeitsblatt mit Schaltzeichen angegebenen. Da die Schüler in der 8. Jahrgangsstufe bereits die elektrischen Schaltzeichen kennen gelernt haben, sollte dies kein Problem darstellen. Gruppen, die mit dem Zusammensetzen des Kraftwerksprozesses schnell fertig sind, können sich noch mit drei ebenfalls auf dem Arbeitsblatt befindlichen Fragen beschäftigen: In welchen Teilen des Kreislaufs ist das Arbeitsmittel Wasser flüssig und in welchen ist es gasförmig? Welche Energiearten kommen im Prozess vor? Welche Energieumwandlungen finden statt und wie könnte eine Energieumwandlungskette aussehen?

Im Anschluss an diese Phase, stellen die Gruppen ihre Lösungsvorschläge vor, deren Funktionieren gemeinsam diskutiert wird und die gegebenenfalls berichtigt werden müssen. Danach werden noch die drei Fragen geklärt und auf der Prozessskizze auf dem Arbeitsblatt hinzugefügt. Die genauen Antworten lassen sich im Abschnitt 2.3.5 nachlesen. Für diese Phase der Ergebnissicherung empfiehlt sich eventuell, um die Reibungslosigkeit des Unterrichtsverlaufs zu gewährleisten, eine vorbereitete Folie für den Tageslichtprojektor. Ein Lösungsvorschlag für das Arbeitsblatt ist auf Abbildung 33 zu sehen:

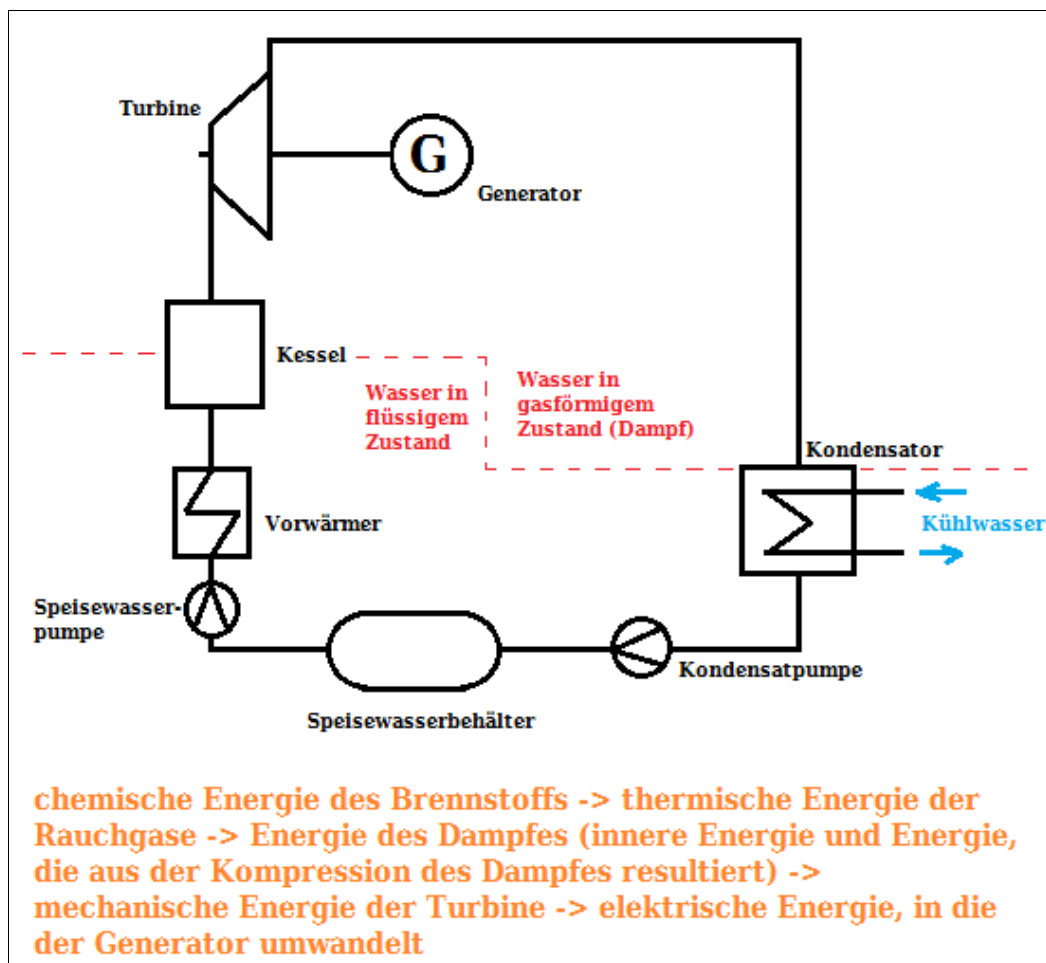

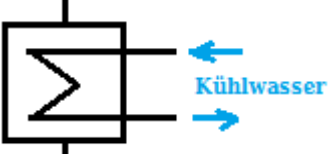








Abbildung 33: Lösungsvorschlag für das Arbeitsblatt

3.8.2 Vorschlag für einen Stundenverlauf

Arbeitsblatt: Funktionsweise eines Dampfkraftwerks

Setze die folgenden Elemente zu einem funktionierenden Kraftwerkskreislauf zusammen! Verwende dazu die Schaltzeichen der einzelnen Bauteile.

<p>Turbine</p>  <p>Die Turbine wandelt die Energie des Dampfes, der einen Druck von etwa 200 bar und eine Temperatur von etwa 500°C hat, in mechanische Energie um.</p>	<p>Kondensator</p>  <p>Im Kondensator wird der Dampf der Turbine kondensiert. In ihm verlaufen Leitungen, durch die Kühlwasser von außerhalb des Kraftwerkskreislaufs fließt.</p>	<p>Kessel</p>  <p>Im Kessel wird das Arbeitsmittel Wasser verdampft. Die dafür benötigte Wärmemenge wird bei der Verbrennung von z.B. Gas, Kohle, Öl oder Biomasse abgegeben.</p>
<p>Arbeitsmittel</p> <p>Das Medium, das den Kraftwerksprozess durchläuft, wird als Arbeitsmittel bezeichnet. In Dampfkraftwerken wird dafür Wasser verwendet, das flüssig oder gasförmig ist.</p>	<p>Generator</p>  <p>Die Funktionsweise eines Generators kann man mit einem Fahrraddynamo vergleichen. Er wandelt mechanische Energie in elektrische um.</p>	<p>Kondensatpumpe</p>  <p>Die Kondensatpumpe saugt das Wasser aus dem Kondensator und befördert es weiter.</p>
<p>Speisewasserpumpe</p>  <p>Die Speisewasserpumpe saugt das Wasser aus dem Speisewasserbehälter und bringt es auf einen Druck von ungefähr 200 bar.</p>	<p>Speisewasserbehälter</p>  <p>Im Speisewasserbehälter wird das momentan für den Prozess überflüssige Arbeitsmittel gespeichert und frisch aufbereitet.</p>	<p>Vorwärmer</p>  <p>Im Vorwärmer wird das Speisewasser bis auf die Temperatur vorgewärmt, bei der es anfängt, zu verdampfen.</p>

1. In welchen Teilen des Kreislaufs ist das Arbeitsmittel Wasser flüssig und in welchen ist es gasförmig?
2. Welche Energiearten kommen im Prozess vor?
3. Welche Energieumwandlungen finden statt und wie könnte eine Energieumwandlungskette aussehen?

3.8.3 Versuch zu Dampfturbine und Dampfkessel

3.8.3 Versuch zu Dampfturbine und Dampfkessel

Bei diesem Versuch muss vorausgeschickt werden, dass er sich als viel schwieriger realisierbar herausgestellt hat, als zunächst gedacht. Die Grundidee ist, Wasserdampf zu erzeugen und damit eine Turbine anzutreiben. Die ersten Tests wurden mit einem Wasserkocher und verschiedenen Windrädern durchgeführt. Durch bloßes Kochen des Wassers war es allerdings schwierig einen genügend großen Volumenstrom zu produzieren, um ein Windrad anzutreiben. Der Großteil des Dampfes strömte einfach außen vorbei. Eine Möglichkeit ist nun, die Geschwindigkeit des Dampfes zu erhöhen. Das kann erreicht werden, indem man ihn durch eine Düse strömen lässt. Hier wurde der Dampfkessel einer Dampfmaschine benutzt, in dem ein leichter Überdruck erzeugt wird, der dann über eine Dampfleitung, ebenfalls mit hoher Geschwindigkeit, auströmt. Aufgrund der vorher durchgeführten Tests waren die Anforderungen an das Material der Turbine klar: Es muss hitzebeständig, sehr leicht und wasserfest sein. Damit ist Papier ausgeschlossen, da es aufweicht. Dünner leichter Kunststoff neigt dazu, sich zu wellen. Der erste Versuch, eine Dampfturbine zu bauen, die durch den aus der Dampfleitung des Dampfmaschinenkessels ausströmenden Dampf betrieben werden kann, scheiterte, hat aber zu den Erkenntnissen, die am Ende dieses Abschnitts noch genauer ausgeführt werden, entscheidend beigetragen. Deswegen wird dieser Versuch hier ebenfalls beschrieben.

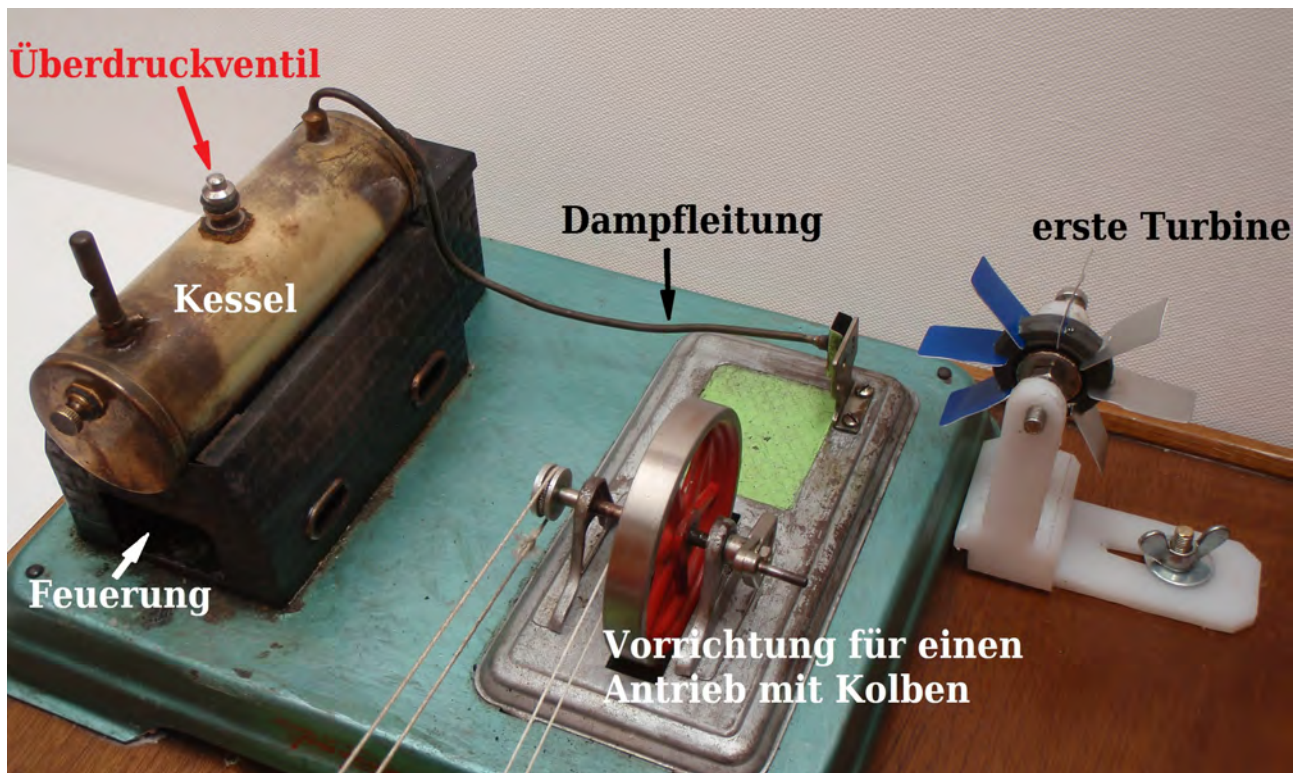


Abbildung 34: Versuchsaufbau mit der Turbine des ersten (gescheiterten) Versuchs

Als Dampferzeuger diente ein Dampfkessel eines älteren Dampfmaschinenmodells mit einem Fassungsvermögen von 80 ml Wasser, wie in Abbildung 34 sichtbar. Befeuert wurde er mit einer Ta-

3.8.3 Versuch zu Dampfturbine und Dampfkessel

blatte Trockenbrennstoff. Je nach Temperatur des eingefüllten Wassers dauerte es vom Anzünden des Brennstoffs bis zum Austreten des Dampfes 4 bis 6 Minuten. Wichtig ist, auf ein funktionierendes Überdruckventil zu achten, da es sicherstellt, dass es den Kessel bei zu hohem Druck nicht zerreißt. Der Dampf wird über eine Dampfleitung bis zur Turbine geleitet.

Für das Turbinenrad und die Lagerung wurde ein Schalungsradchen mit Gleitlager einer Fahrradgangschaltung verwendet. Dessen Zähne wurden, wie in Abbildung 35 sichtbar, abgeschliffen. Aus sehr dünnem Weißblech wurden Turbinenschaufeln ausgeschnitten und in Schlitze, die ins Turbinenrad gesägt wurden, geklebt. Außerdem wurde die Turbine, wie in Abbildung 36 zu sehen ist, vor dem Dampfauslass installiert. Der Aufbau funktionierte so nicht, auch nicht, nachdem das Rad näher an den Dampfstrom gerückt wurde. Ein Problem war der viel zu geringe Volumenstrom für ein Turbinenrad dieser Größe und Masse. Außerdem wich der Dampf auf die Seite aus. Bei leichtem Anpusten drehte sich das Rad dagegen sehr gut und schnell. Hier muss bemerkt werden, dass man sehr leicht der Täuschung aufsitzt, dass der deutlich sichtbare, mit einem vernehmbaren Zischen sehr schnell ausströmende weiße Dampf auch einen erheblichen Wind verursacht. Dem ist nicht so. Hält man nämlich die Hand vor die Öffnung, aus der der Dampf quillt, so spürt man nahezu keine Luftbewegung, sondern lediglich die Hitze des Dampfes. Da sehr wahrscheinlich auch die meisten Schüler auf diesen falschen Eindruck hereinfallen würden, schadet es sicher nicht, diesen Effekt zu erwähnen.



Abbildung 35: Schalungsrad einer Fahrradgangschaltung, oben ganz, unten mit abgeschliffenen Zähnen und auseinandergenommenem Lager

3.8.3 Versuch zu Dampfturbine und Dampfkessel

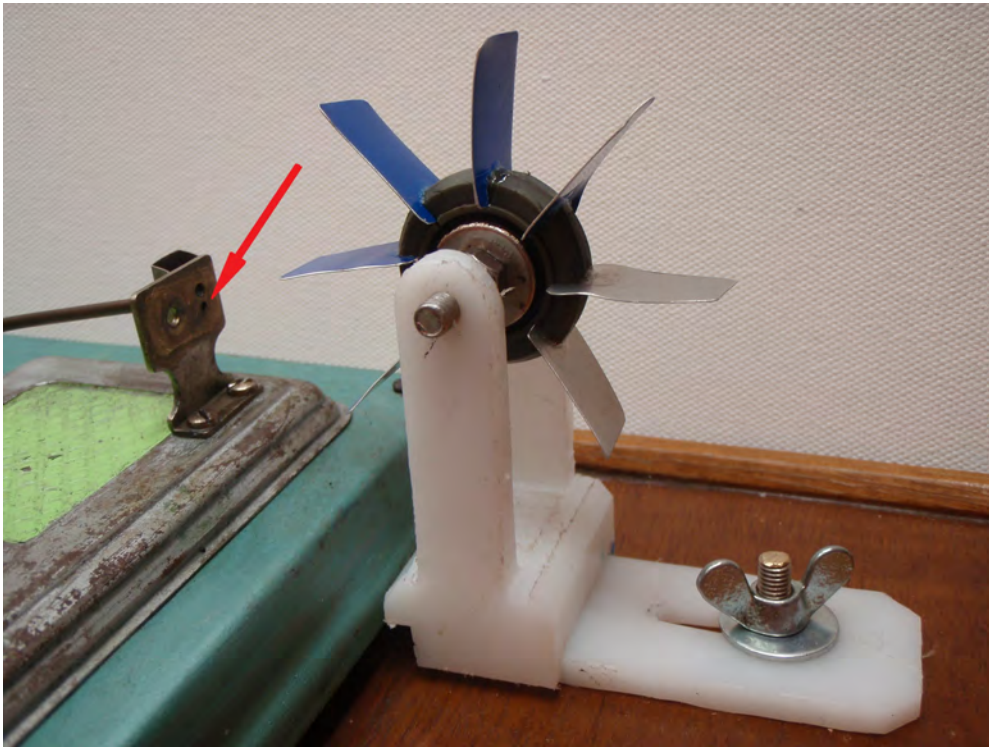


Abbildung 36: Erster Versuch, eine Turbine mit Dampf zu betreiben; der Pfeil zeigt das Austrittsloch für den Dampf

Nach einigem Experimentieren mit anderen Möglichkeiten von wesentlich leichteren Turbinenrädern, erwies sich die im Folgenden beschriebene, als einzig praktikable: Aus Aluminiumfolie wurde ein Kreis mit Schlitzten, wie in Abbildung 37 zu sehen, ausgeschnitten und die Flügel in einem Winkel von 45° aufgebogen (Abbildung 38). Dann wurde das Turbinenrad auf eine Achse aus dickem Draht gesteckt, wobei eine Scheibe aus Plastik und ein Stück Gummi jeweils vor und nach der Turbine positioniert wurde, um ein Kippen nach der Seite oder ein Verrutschen längs der Achse zu vermeiden. Diese Turbine drehte sich im Dampfstrom dann hervorragend. Außerdem wurde sie, im Gegensatz zum vorhergehende Versuch, axial angeströmt, was einer realen Dampfturbine auch eher entspricht. Es empfiehlt sich, für den Versuch mehrere Aluräder bereit zu halten, da diese sehr empfindlich sind.

3.8.3 Versuch zu Dampfturbine und Dampfkessel

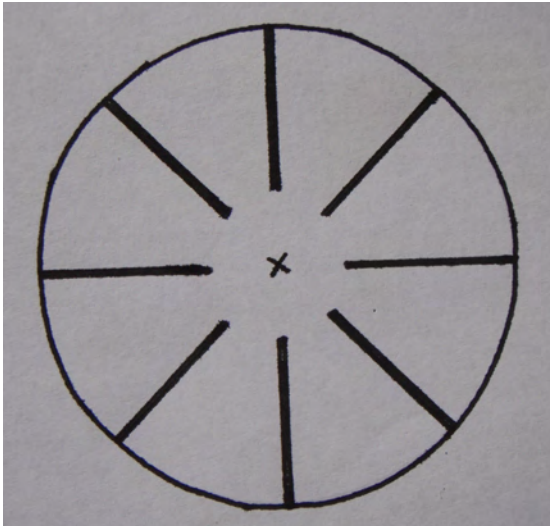


Abbildung 37: Zweiter Versuch, Schablone für die Turbine

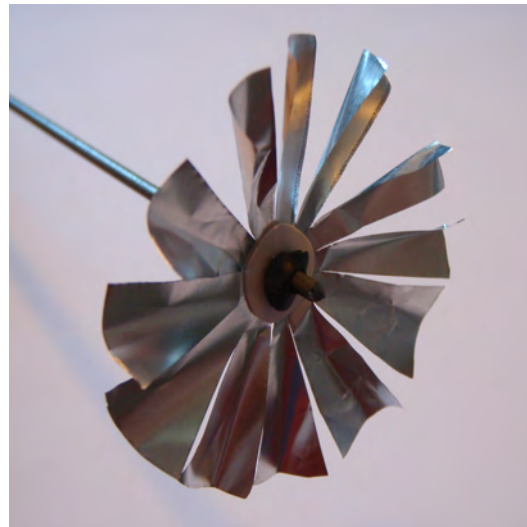


Abbildung 38: Zweiter Versuch, Turbine mit Achse

Abschließend muss noch folgende sehr wichtige Anmerkung gemacht werden: Ganz genau genommen, stellt der beschriebene Versuch nicht exakt das Prinzip dar, das für die Drehung einer Dampfturbine (oder einer Gasturbine, die sich aus dem gleichen Grund bewegt) verantwortlich ist, sondern eher das Funktionsprinzip eines Windrades. Ein Windrad dreht sich aufgrund des dynamischen Drucks, den die Luft beim Anströmen des Windrades ausübt. Eine Dampfturbine befindet sich im Gegensatz zum Windrad in einem geschlossenen Gehäuse. Sie besteht aus den Turbinenrädern mit Laufschaufeln und Leitschaufeln, die auf der Innenseite des Gehäuses angebracht sind. Der Spalt zwischen Lauf- und Leitschaufeln muss möglichst gering gehalten werden, damit sich die Verluste durch Vorbeiströmen an den Turbinenschaufeln, die sogenannten Spaltverluste, in Grenzen halten. Die Dampfturbinendrehung kommt dadurch zustande, dass überhitzter Dampf mit sehr hohem Druck auf die „Barriere“ aus Turbinenrad und Leitschaufeln trifft und er diese nur durch Drehung der Turbine und gleichzeitige Entspannung auf einen niedrigeren Druck überwinden kann. Beim Antrieb der Dampfturbine ist also vor allem auch statischer Druck im Spiel. Man könnte sogar so weit gehen, zu sagen, dass eine Dampfturbine, von der Funktionsweise her, eher mit einer Wasserturbine, als mit einem Windrad vergleichbar ist, da die Drehung aus dem Abbau statischen Drucks resultiert. Dies in einem Versuch nachzustellen, ist sehr aufwendig. Man müsste dafür unbedingt eine Turbine mit einem dichten Gehäuse bauen und Dampf mit hohem Druck erzeugen. Der Aufwand hierfür wäre allerdings sehr groß und steht in keinem Verhältnis zum Nutzen. Besser ist es, den Versuch wie beschrieben durchzuführen, der auf jeden Fall zumindest wiedergibt, dass strömender Dampf zu einer Turbinendrehung führt. Anschließend sollte allerdings noch erklärt werden, wie eine reale Dampfturbine im Vergleich dazu aussieht. Dabei muss insbesondere der hohe statische Druck und die Einhausung erwähnt werden. Die Funktionsweise eines Dampfkessels mit Feuerung, der Dampf mit Überdruck erzeugt, kann mit dem beschriebenen Versuch, natürlich sehr vereinfacht, aber korrekt dargestellt werden.

3.8.4 Erweiterungsmöglichkeiten

3.8.4 Erweiterungsmöglichkeiten

Mit den folgenden Ideen kann der oben beschriebene Vorschlag für eine Unterrichtsstunde auf eine Unterrichtseinheit erweitert werden.

Falls eine Dampfmaschine mit Kolbenantrieb und Transmission verfügbar ist, kann ein Bogen geschlagen werden von den Anfängen der Dampfnutzung in der Industrie mit Kolbenmaschinen bis zu den heutigen Dampfkraftwerken mit Turbinen.

Besonders eindrucksvoll ist aber vor allem eine Betriebserkundung eines Dampfkraftwerks im Zusammenhang mit der Behandlung des Themas im Unterricht. Bezogen auf den oben vorgestellten Vorschlag für eine Unterrichtsstunde, wäre es denkbar, die einzelnen Kraftwerkskomponenten noch etwas genauer vorzustellen, um dann die Schüler eine Idee für einen Kraftwerkskreislauf entwickeln zu lassen. Hier würde die Stunde enden. Für die Betriebserkundung hätten die Schüler den Auftrag, an der Realität zu überprüfen, ob ihre Lösung stimmt und sie gegebenenfalls zu berichtigen. Eine weitere Aufgabe könnte sein, die Skizze um weitere, bisher ausgeklammerte Komponenten zu erweitern. In der folgenden Stunde wird die Lösung für den Aufbau besprochen und festgehalten. Außerdem werden eventuell noch weitere Komponenten, wie die Rauchgasreinigung oder die regenerative Speisewasservorwärmung, erklärt und eingefügt. Auf Basis dieses Wissens, könnte dann auch ein Nachvollziehen des Prozesses im p-V-Diagramm anschließen.

3.9 Unterrichtsvorschlag zu Laufwasserkraftwerken

3.9 Unterrichtsvorschlag zu Laufwasserkraftwerken

Der im Folgenden ausgeführte Unterrichtsvorschlag ist für eine 8. Klasse geplant. Die Stunde lässt sich sehr gut in den Themenkomplex „Die Energie als Erhaltungsgröße“ einbetten. Es geht dabei hauptsächlich um die potentielle Energie und ihre Umwandlung in andere Energieformen.

3.9.1 Allgemeines zum Thema

Die im folgenden Abschnitt beschriebene Unterrichtsstunde setzt voraus, dass die Schüler bereits verschiedene Energieformen kennen, mit der Formel für die potentielle Energie vertraut sind und über Leistung und Wirkungsgrad Bescheid wissen. Die Schüler sollen am Inhalt „Funktionsweise von Laufwasserkraftwerken“ Anwendungen der potentiellen Energie, der Leistung und von Energieumwandlungen kennen lernen und so zu einem vertieften Verständnis gelangen. Als Medien dient ein Versuch und ein Bild vom Aufbau eines Laufwasserkraftwerks. Außerdem kommt hier vor allem die Methode des fragend-entwickelnden Unterrichtsgesprächs zum Einsatz.

3.9.2 Vorschlag für einen Stundenverlauf

Als Einstieg in die Stunde ist die Frage „Welche regenerativen Energiequellen gibt es?“ denkbar. Neben einigen anderen, ist die Wasserkraft naheliegend und wird von den Schülern sicher sehr schnell genannt. Damit kann das Stundenthema bekannt gegeben werden: die Funktionsweise von Laufwasserkraftwerken. Anschließend folgt ein kurzer Lehrervortrag, der über die Situation in der Region informiert. Dazu können die Hinweise, die in den Abschnitten 1.3 , 2.3.16 und 2.5.1 gegeben wurden, verwendet werden. Dieser Teil der Unterrichtsstunde würde etwa 5 bis 10 Minuten in Anspruch nehmen.

Für die Erarbeitung der Funktionsweise ist es hilfreich, ein Bild vom Aufbau eines Laufwasserkraftwerks bei der Hand zu haben. Ein Beispiel dafür ist mit Abbildung 39 gegeben. Bei Wasserkraftwerken ist es sehr wahrscheinlich, dass die Schüler bereits etwas Vorwissen mitbringen, weil sie beispielsweise in ihrer Freizeit schon mit Stauseen in Berührung gekommen sind. Daher ist davon auszugehen, dass die Bestandteile eines Kraftwerks mit dem Vorwissen der Schüler und dem notwendigen Input des Lehrers gemeinsam an einer Abbildung erarbeitet werden können. Eine Sicherung dieser Ergebnisse ist in Form einer stark vereinfachten Skizze an die Tafel und bei den Schülern ins Heft sinnvoll. Ein Beispiel dafür zeigt Abbildung 40. Das Prinzip kann dann noch veranschaulicht und greifbar gemacht werden, indem der im nächsten Abschnitt beschriebene Versuch vorgeführt wird. Anschließend folgt eine kurze Phase der Partnerarbeit. Die Schüler sollen sich überlegen, welche Energieformen im Laufwasserkraftwerk vorkommen und eine Energieumwandlungskette erstellen. Diese würde dann wie folgt aussehen:

Potentielle Energie des Oberwassers → kinetische Energie des Wassers im Turbinenzulauf → mechanische Energie der Turbine → elektrische Energie durch Umwandlung durch den Generator

3.9.2 Vorschlag für einen Stundenverlauf

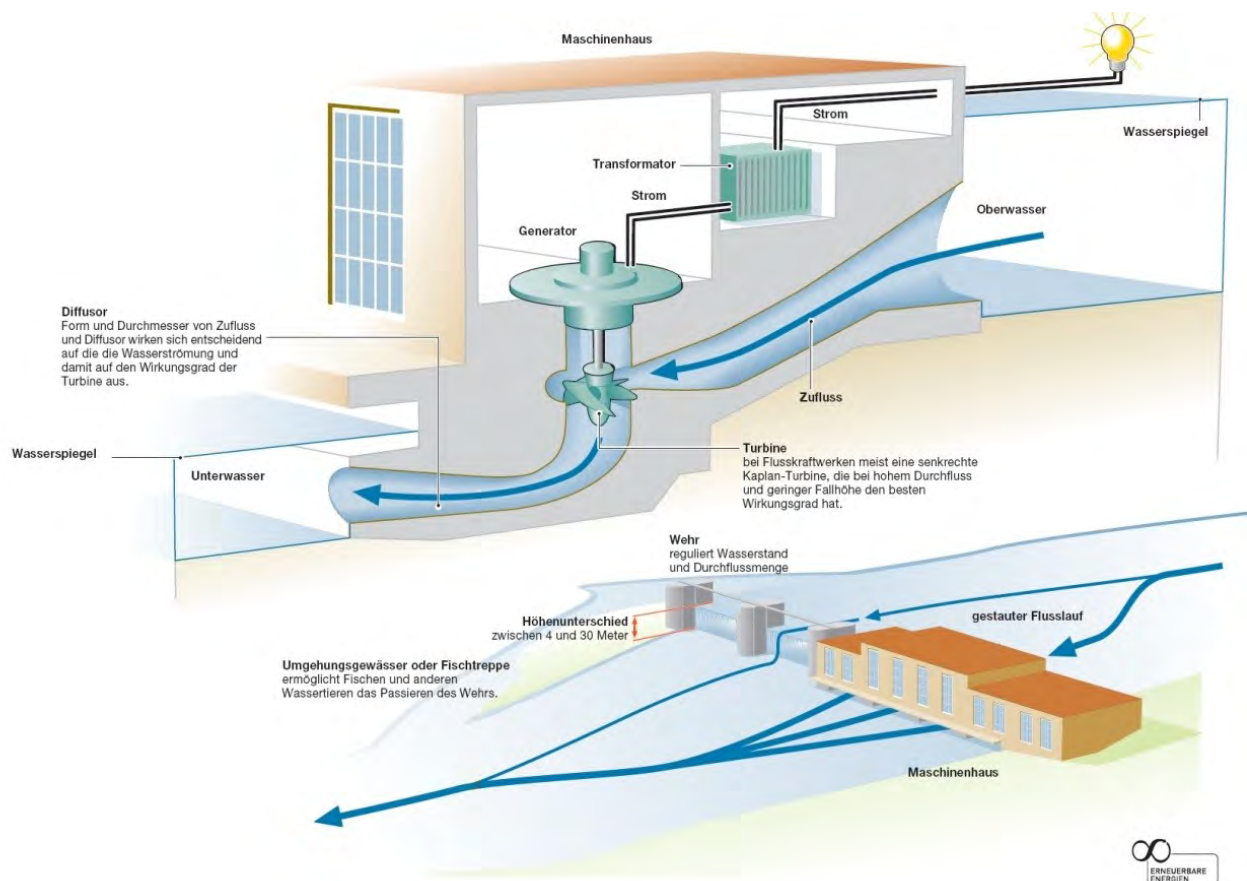


Abbildung 39: Aufbau eines Laufwasserkraftwerks

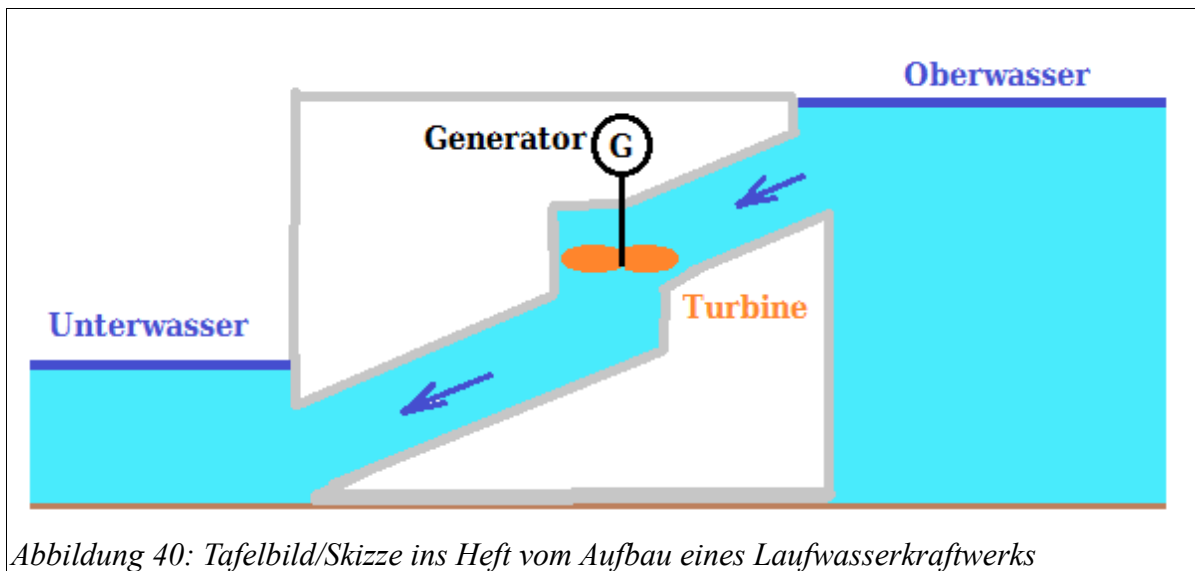


Abbildung 40: Tafelbild/Skizze ins Heft vom Aufbau eines Laufwasserkraftwerks

Nach Besprechen der Aufgabe der Partnerarbeit und Festhalten des Ergebnisses im Heft, werden nun quantitative Betrachtungen angestellt. Zunächst soll die potentielle Energie des Kraftwerks betrachtet werden. Der Zusammenhang $E_{pot} = m \cdot g \cdot h$ ist den Schülern bereits bekannt (m Masse, $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ Erdbeschleunigung, h Fallhöhe). Bei einem Laufwasserkraftwerk

3.9.2 Vorschlag für einen Stundenverlauf

kann man jedoch im Gegensatz zu einem Speicherkraftwerk keine Masse angeben, da das Wasser ununterbrochen fließt. Weil man aber weiß, wie viel Masse an Wasser pro Sekunde durch die Turbinen fließen kann, kann man die Leistung P angeben, also die Arbeit, die bezogen auf einen bestimmten Zeitraum t verrichtet wird. Also:

$$P = \frac{m}{t} \cdot g \cdot h$$

Werte für die einzelnen Größen wären beim neuen Kraftwerk am Hochablass für den maximalen Massenstrom je Turbine (es gibt zwei Turbinen) $32 \text{ m}^3/\text{s}$ ²⁵⁴ und für die Fallhöhe $5,80 \text{ m}$ ²⁵⁵. Die maximale (elektrische) Leistung der gesamten Anlage wird mit 3.100 kW angegeben. Berechnet man die Leistung nun mit obiger Formel, so erhält man $P \approx 3.600 \text{ kW}$. Dies ist die sozusagen die potentielle Leistung, die durch die Wirkungsgrade der Zuleitung (Reibungsverluste), der Turbine und des Generators noch gemindert wird. Der Gesamtwirkungsgrad der Anlage beträgt, wenn man die elektrische und die potentielle Leistung miteinander in Beziehung setzt, etwa 85% .

Bei der Berechnung der Leistung wäre aber auch ein anderer Ansatz denkbar. Man könnte die Aufgabe als Schätzaufgabe durchführen lassen. Dies würde allerdings voraussetzen, dass die Schüler den Hochablass kennen oder dass man ein sehr gutes Foto hat, wobei dann die Fließgeschwindigkeit des Lechs immer noch geraten werden muss. Führt man diese Berechnung also als Abschätzung durch, so empfiehlt es sich, die Wassermasse, die pro Zeit abfließt, nicht direkt zu schätzen, sondern diese noch wie folgt aufzuschlüsseln:

$$\frac{m}{t} = \rho \cdot \frac{V}{t} = \rho \cdot c \cdot A$$

mit ρ : Dichte von Wasser, V : Volumen, c : Fließgeschwindigkeit, A : durchströmte Querschnittsfläche. Zumindest die durchströmte Querschnittsfläche kann dann begründet geschätzt werden.

3.9.3 Versuch zur Wasserturbine

Dieser Versuch soll die Drehung einer Turbine zeigen, wenn das Rohr, in das sie eingebaut ist, von Wasser durchströmt wird. Das Turbinenrad wurde, wie die erste Dampfturbine von Abschnitt 3.8.3, aus einem Schaltungsrädchen einer Fahrradschaltung gebaut, ähnlich wie in Abbildung 35 zu sehen ist. Dies hat den Vorteil, dass man eine hervorragende Lagerung hat. Die Turbinenschaufeln wurden einer Kaplan turbine nachempfunden. Dazu muss man sagen, dass die Schaufeln für eine schnellere und bessere Drehung eher noch größer hätten sein dürfen. Optimal ist es, wenn möglichst wenig Wasser zwischen den Schaufeln vorbei strömen kann. Bezogen auf die hier gezeigte Turbine heißt das, dass man auch getrost doppelt so viele Schaufeln hätte anbringen können. Dies ist insbesondere dann zu bedenken, wenn die Lagerung nicht so gut ist. Die Turbine ist in den folgenden Abbildungen 41 und 42 dargestellt.

254 <http://www.wkw-hochablass.de/kraftwerk/daten-und-fakten/>

255 <http://www.augsburgwiki.de/index.php/AugsburgWiki/Hochablass>

3.9.3 Versuch zur Wasserturbine

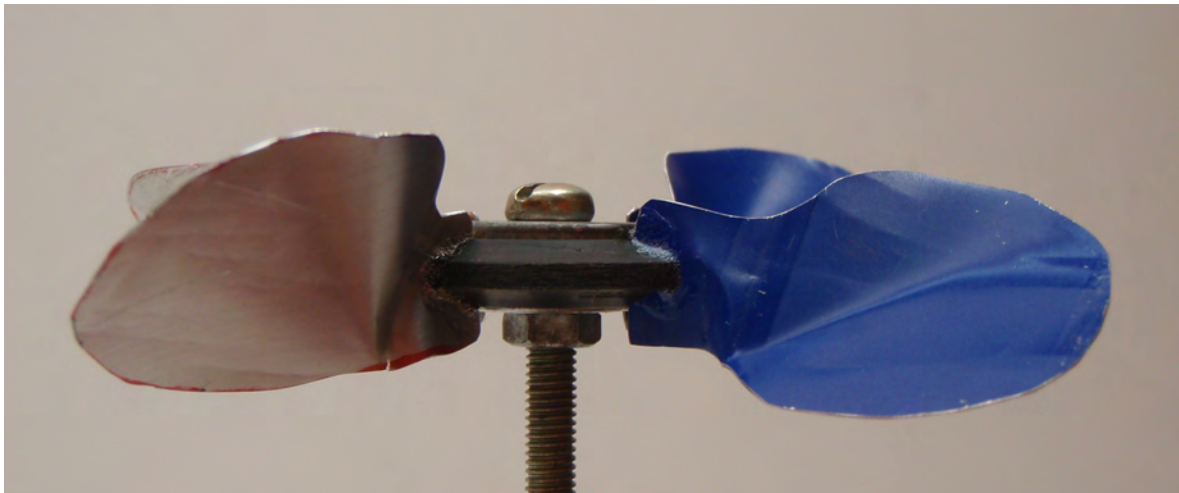


Abbildung 41: Wasserturbine von der Seite

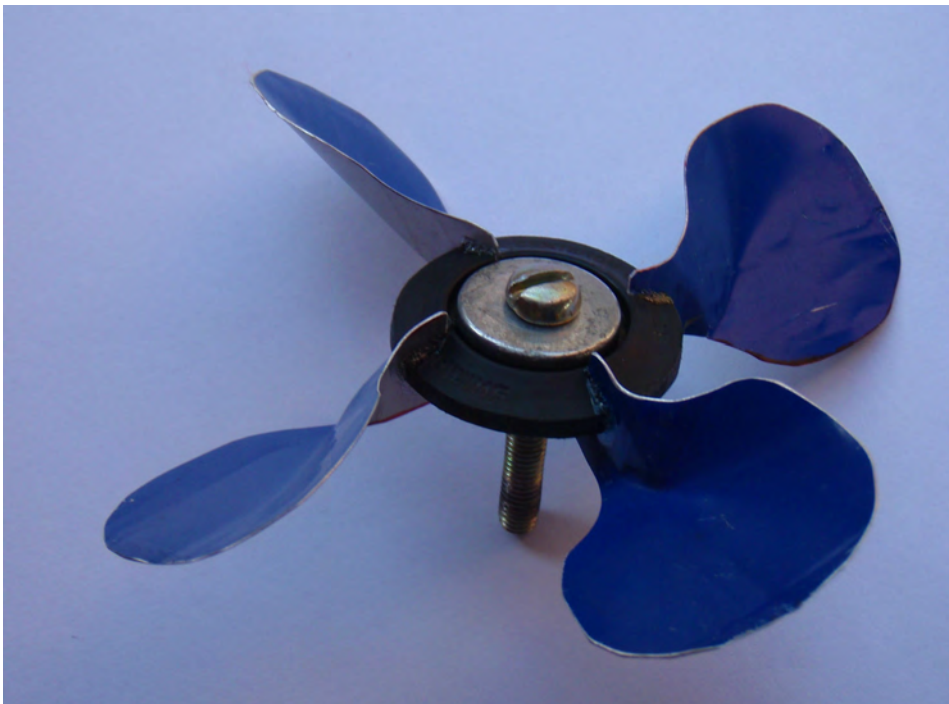


Abbildung 42: Wasserturbine schräg von oben

Das Rohr für die Turbine wurde aus einer Plastikflasche geschnitten, als Abfluss diente ein Plastikrohr unten seitlich an der Flasche. In den Boden der Flasche wurde ein Loch gebohrt, durch das die Achse, auf der die Turbine montiert war, geschoben und mit Gummidichtung und Schraubenmutter festgeschraubt wurde. Dieser Aufbau ist in Abbildung 43 sichtbar.

Dreht sich die Turbine nicht oder nicht schnell genug, dann muss entweder die Lagerung verbessert oder der Volumenstrom erhöht werden. Ebenfalls hilfreich ist, die Turbine möglichst leicht zu bauen.

3.9.3 Versuch zur Wasserturbine

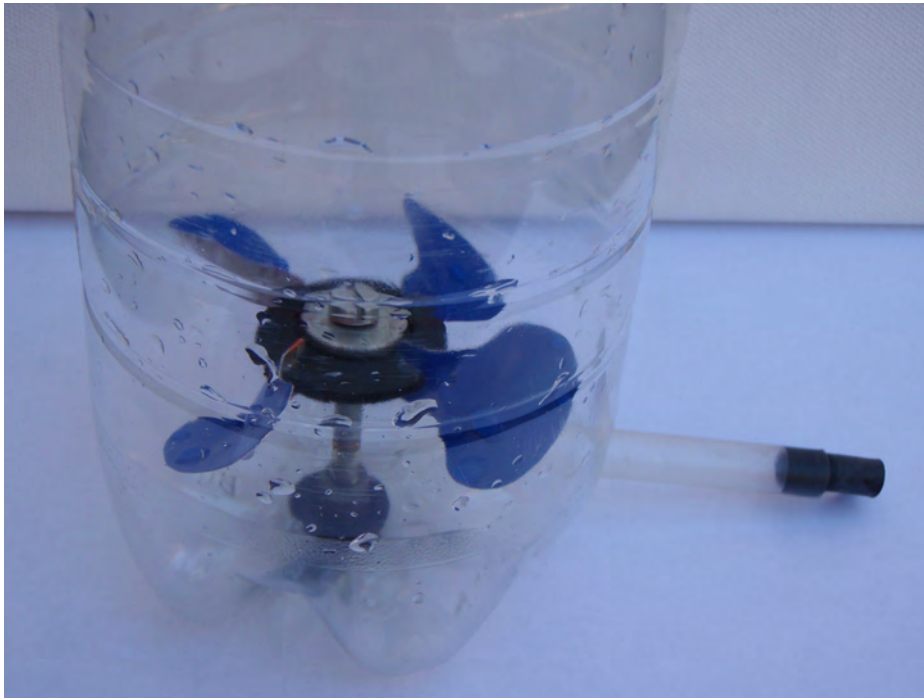


Abbildung 43: Versuchsaufbau Wasserturbine

3.9.4 Erweiterungsmöglichkeiten

Eine Möglichkeit, das Thema Wasserkraft noch zu erweitern, ist eine Betriebskundung. Allerdings sind bei Laufwasserkraftwerken nur die oberirdischen Teile zu sehen. Eine Turbine kann selten betrachtet werden, außer es ist eine ausrangierte im Kraftwerk ausgestellt. In Augsburg wäre denkbar, das alte Wasserwerk mit dem integrierten kleinen Wasserkraftwerk, von dem aber nur die Turbinengehäuse und Generatoren sichtbar sind, anzuschauen. Anschließend kann dann noch in etwa fünf Minuten Gehzeit zum Ostufer des Hochablass gewechselt werden und, je nach Zeitpunkt, die Baustelle oder das fertige neue Laufwasserkraftwerk besichtigt werden. An dieser Stelle könnte dann auch eine Schätzaufgabe zur Leistung des Kraftwerks sinnvoller durchgeführt werden.

3.10 Unterrichtsvorschlag zur regionalen Energieversorgung in der Zukunft

3.10 Unterrichtsvorschlag zur regionalen Energieversorgung in der Zukunft

Der nun folgende Unterrichtsvorschlag eignet sich im Prinzip für alle Klassen ab Mitte der 8. Jahrgangsstufe. Im Folgenden werden keine konkreten Vorgaben gemacht, denn diese Unterrichtseinheit soll den Schülern die Gelegenheit bieten, sich nach ihren Interessen mit einem idealerweise selbst gewählten Thema auseinanderzusetzen.

3.10.1 Allgemeines zum Thema

Grundlegend für die Durchführung dieser Unterrichtseinheit ist, dass die Schüler ein Grundverständnis von der Energie haben. Je nach gewähltem Thema, sind aber auch Kenntnisse der Wärmelehre unentbehrlich. Vorteilhaft ist außerdem, wenn diese Unterrichtseinheit nicht die erste Berührung der Schüler mit dem Thema Energieversorgung ist.

An dem Inhalt „regionale Energieversorgung in der Zukunft“ soll ein breites Spektrum an Technologien kennen gelernt werden, das den Schülern hilft, sich in der aktuellen Diskussion über den Wandel von bestehenden Versorgungsstrukturen und Erzeugungsanlagen zu orientieren. Als methodische Großform soll der Lehrer-Schülergesteuerte bzw. der projektorientierte Unterricht dienen. An Medien kommt prinzipiell alles in Frage, was sinnvollen Informationsgehalt für das jeweilige behandelte Thema hat.

3.10.2 Vorschlag für eine Unterrichtseinheit

Als Einstieg eignen sich aktuelle Zeitungsartikel sehr gut. Aufgrund der anhaltenden Aktualität des Themas, ist es auch nicht schwierig solche zu bekommen. Ein Beispiel ist der Artikel zum Smart Grid „Wenn die Waschmaschine ans Sparen denkt“ von Antosch in der Augsburger Allgemeinen vom 16.10.2012. Aus diesem Anlass können dann Vorschläge gesammelt werden, welche Projekte in der Region geplant oder verwirklicht werden, sowie welche ungenutzten Energiequellen es noch gibt oder welche Technologien auch für die Region geeignet wären. Für Augsburg liefert der Abschnitt 2.5 fünf Aspekte zu aktuellen und zukünftigen Entwicklungen. Eine Quelle, um einen Überblick über die Energieversorgung einer bestimmten Region zu bekommen, ist im Übrigen der im Internet aufrufbare Energieatlas Bayern.

Nach dieser Phase der Ideensammlung können Gruppen mit drei bis vier Schülern gebildet werden, die sich jeweils mit einem selbstgewählten Thema näher auseinandersetzen und dazu selbstständig recherchieren. Hier sollte der Lehrer insofern eingreifen, als das die Themen aus dem Blickwinkel der Physik betrachtet und sachgerecht behandelt werden. Außerdem gibt er, wenn nötig, Hilfestellungen. Am Ende der Unterrichtseinheit sollte eine Präsentation stehen, in der die einzelnen Gruppen ihre Ergebnisse vorstellen. Idealerweise wird von jeder Gruppe noch ein Plakat erarbeitet, das dann im Klassenzimmer oder im Schulhaus aufgehängt wird.

3.10.2 Vorschlag für eine Unterrichtseinheit

Diese Unterrichtseinheit nimmt, je nach Tiefe, mit der die Themen bearbeitet werden, drei bis fünf Unterrichtsstunden ein. Eine wesentlich zeitsparendere Möglichkeit ist, ein Gruppenpuzzle durchzuführen, bei dem in den Expertengruppen ein vom Lehrer vorgegebener Informationstext gelesen, diskutiert und für die Vorstellung in der Stammgruppe zusammengefasst wird. Allerdings ist der Motivationsgehalt bei diesem Vorgehen wesentlich geringer, da die Schüler nicht mitbestimmen und ihre individuellen Interessen nur in einem geringen Maß, nämlich durch Wahl eines der vorbereiteten Themen, entfalten können.

3.10.3 Erweiterungsmöglichkeiten

Wird über die Energieversorgung in der Zukunft nachgedacht, so ist eine Nähe zu Themen der Geographie offensichtlich. Es wäre also gut möglich, bei diesem Thema fächerübergreifend mit Geographie zusammenzuarbeiten. Insbesondere auf dem Gebiet des Vorkommens von Energiequellen in einer Region, kann die Geographie einen wichtigen Beitrag leisten.

4 Schlusswort

In der nun zurückliegenden Arbeit, wurde am Beispiel Augsburg ein Überblick gegeben, wie die Energieversorgung einer Stadt aussehen kann. Selbstverständlich lässt sich dieses Konzept auch auf andere Städte übertragen. Allerdings ist dann sehr wahrscheinlich die Zusammensetzung der Kraftwerkstypen und der genutzten Energiequellen eine etwas andere. In der Nähe des Ruhrgebiets werden beispielsweise viele Kraftwerke mit Kohle befeuert. Andere Regionen werden eher von Windkraftanlagen oder Kernkraftwerken versorgt. Dies zeigt auch, dass die in dieser Arbeit ausgeführten Themen beliebig um zahlreiche andere Aspekte der Energieversorgung erweitert werden können. Da sich, vor allem auf dem Gebiet der regenerativen Energien, die Technologien ständig weiterentwickeln und ändern, ist es insbesondere hier wichtig, noch zusätzlich zu der hier gebotenen, aktuelle Informationen in den Unterricht mit einzubeziehen.

Außerdem kann man davon ausgehen, dass die Energieversorgung und ihre Zukunft in den kommenden Jahren nicht an Aktualität verlieren wird. Vor allem, wenn dabei ein Bezug zur Region hergestellt werden kann, ist davon auszugehen, dass das die Motivation und das Interesse der Schüler positiv beeinflusst. Dies ist nicht zuletzt aus dem Grund wichtig, weil in der Zukunft vermehrt Entscheidungen getroffen werden müssen, die den Wandel der Energieversorgung betreffen und die kritisch diskutiert werden müssen. Es kommt nämlich auch vor, dass technisch sinnvolle Technologien politisch nicht gewollt sind oder politisch gewollte Projekte technisch nicht sinnvoll sind. Gerade auch in dieser Hinsicht, habe ich die Beschäftigung mit den in dieser Arbeit behandelten Themen als Bereicherung empfunden. Denn wenn man einen vertieften Einblick in die Materie bekommt, kann das teilweise dazu führen, das man die eigene, zuvor gebildete Meinung revidieren muss. Insofern kann die Beschäftigung mit der Energieversorgung auch zur Erziehung der Schüler zu kritischen, mündigen Bürgern beitragen.

5 Quellenverzeichnisse

5.1 Literaturverzeichnis

5.1.1 Gedruckte Literatur

Antosch, M.: Wenn die Waschmaschine ans Sparen denkt. In: *Augsburger Allgemeine* : (2012-10-16), Nummer 239, S. 33

Bresler, S.: Betriebserkundung im Physikunterricht. In: *Naturwissenschaft im Unterricht/Physik* Nr. 78 (2003), S. 10-14

Ganser, K.; Regio Augsburg Tourismus GmbH (Hrsg.): *Industriekultur in Augsburg - Pioniere und Fabrikschlösser*. Context Verlag.

Heuck, K.; Dettmann, K.-D.; Schulz, D.: *Elektrische Energieversorgung - Erzeugung, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie für Studium und Praxis*. 8. Auflage. Wiesbaden : Vieweg + Teubner Verlag, 2010

Homann, C.: Welden hofft aufs Kraftwerk. In: *Augsburger Allgemeine* : (2012-12-07), Nummer 283, S. 31

Krog, S.: Die Stromjongleure. In: *Augsburger Allgemeine* : (2012-12-29), Nummer 300, S. 30

Krog, S.: Kraftpaket im Keller. In: *Augsburger Allgemeine* : (2013-01-17), Nummer 14, S. 38

Lüders, K.; Pohl, R. O.: *Pohls Einführung in die Physik - Band 1: Mechanik, Akustik und Wärmelehre*. 20. Auflage. Berlin Heidelberg : 2009

Nolting, W.: *Grundkurs Theoretische Physik 4 – Spezielle Relativitätstheorie, Thermodynamik*. 7. Auflage. Berlin Heidelberg : Springer Verlag, 2010

Reiner, A.; Teuber B.: Gasbedarfsprognose mit neuronalen Netzen bei den Stadtwerken Augsburg. In: *gwf Das Gas- und Wasserfach, Gas – Erdgas* Jg. 146, Nr. 7/8 (2005), S. 387-391

Risch, M. R.: Energiesparen durch Kraft-Wärme-Kopplung an Beispielen. In: *Praxis der Naturwissenschaften – Physik* Nummer 47 (1998), S. 27-32

Ruckdeschel, W.: *Technische Denkmale in Augsburg - Eine Führung durch die Stadt*, 1. Auflage. Brigitte Settele Verlag, 1984

Strauß, K.: *Kraftwerkstechnik - Zur Nutzung fossiler, nuklearer und regenerativer Energiequellen*. 6., aktualisierte Auflage. Berlin Heidelberg : Springer Verlag 2009

Wiater, W.: *Unterrichtsplanung - Prüfungswissen – Basiswissen Schulpädagogik*. 1. Auflage. Donauwörth : Auer Verlag, 2011

5.1.1 Gedruckte Literatur

Zahoransky, R.; Allelein, H.-J.; Bollin, E.; Oehler, H.; Schelling, U.: *Energietechnik - Systeme zur Energieumwandlung - Kompaktwissen für Studium und Beruf*. 5. Auflage. Wiesbaden : Vieweg + Teubner Verlag, 2010

5.1.2 Internetseiten

Stand: 3. März 2013

Abfallverwertung Augsburg GmbH (AVA):

- Abfallverwertung, Abfallheizkraftwerk: http://ava.ve.m-online.net/cms/index.php?option=com_content&task=view&id=15&Itemid=40 und http://ava.ve.m-online.net/cms/index.php?option=com_content&task=view&id=15&Itemid=40&limit=1&limitstart=1
- Besichtigung: <http://www.ava-augsburg.de/service/ava-vor-ort-erleben/>
- Geschäftsbericht 2010: http://ava.ve.m-online.net/cms/index.php?option=com_docman&task=cat_view&gid=12&Itemid=124
- Umweltschutz, Augsburger Modell: http://ava.ve.m-online.net/cms/index.php?option=com_content&task=view&id=53&Itemid=107

Abfallwirtschaftsamt Augsburg:

- http://www.abfallwirtschaft-landkreis-augsburg.de/webarba/webcms.nsf/pa_webFrameSet_1024?OpenPage

Amprion:

- Grundlast, Mittellast, Spitzenlast: <http://www.amprion.de/grundlast-mittellast-spitzenlast>
- Netzfrequenz: <http://www.amprion.de/netzfrequenz>
- Primärregelung, Sekundärregelung, Minutenreserve: <http://www.amprion.de/primarregelung-sekundaerregelung-minutenreserve>
- Regelenergie: <http://www.amprion.de/regelenergie>

Augsburger Wasserpfad:

- Kraftwerk Eisenbahnerwehr: http://wasserpfad.augsburg-tourismus.de/6_1_eisenbahnerwehr.html
- Kraftwerk Wolfzahnau: http://wasserpfad.augsburg-tourismus.de/2_1_kraftwerk_wolfzahnau.html

Augsburgwiki

- Hochablass: <http://www.augsburgwiki.de/index.php/AugsburgWiki/Hochablass>

Bayerisches Landesamt für Umwelt:

- Hausmüll in Bayern – Bilanzen 2010 – Informationen aus der Abfallwirtschaft, 2011, Seite nicht direkt aufrufbar, aber über die Seite: www.bestellen.bayern.de/ und den Pfad: „Abfallwirtschaft“ (links oben) → „Abfallbilanzen und Abfallstatistiken“ → „Hausmüll in Bayern - Bilanzen 2010 - Informationen aus der Abfallwirtschaft“ → Download

5.1.2 Internetseiten

BINE Informationsdienst:

- Publikation Nr. 20 „Energie sparen bei der Kälteerzeugung“:
http://www.bine.info/fileadmin/content/Publikationen/Basis_Energie/Basis_Energie_Nr._20/basis20internetx.pdf

BioIN:

- Bioabfallverwertung in Ingolstadt: <http://www.in-kb.de/index.phtml?NavID=1271.134&La=1>

BS-Energy:

- Fernwärme: <http://www.bs-energy.de/engagement/engagement-fuer-nachhaltigkeit/unsere-fernwaerme/geschichte-der-fernwaerme/>

Deutsche Energie-Agentur (dena): Strategieplattform „Power to Gas“

- Energiesysteme der Zukunft: <http://www.powertogas.info/power-to-gas/energiesystem-der-zukunft.html>
- Erneuerbaren Strom erzeugen: <http://www.powertogas.info/power-to-gas/erneuerbaren-strom-erzeugen.html>
- Gas nutzen: <http://www.powertogas.info/power-to-gas/gas-nutzen.html>
- Gas speichern: <http://www.powertogas.info/power-to-gas/gas-speichern.html>
- Startseite: <http://www.powertogas.info/>
- Strom in Gas umwandeln: <http://www.powertogas.info/power-to-gas/strom-in-gas-umwandeln.html>
- Strom speichern: <http://www.powertogas.info/power-to-gas/strom-speichern.html>

Deutscher Bundestag, Wissenschaftlicher Dienst:

- Begriff „Power to Gas“:
http://www.bundestag.de/dokumente/analysen/2012/Power_to_Gas.pdf

Energie-Atlas Bayern:

- Karte Bayern: <http://geoportal.bayern.de/energieatlas-karten/>
- URLs zur Auswahl bestimmter Energiequellen können nicht angegeben werden. Man kann jedoch die Karte so vergrößern, dass ein Ausschnitt vom Raum Augsburg gezeigt wird. Dann können in der Liste links Energiequellen ausgewählt und ihre verschiedenen Aspekte angezeigt werden. Für diese Arbeit wurden insbesondere die Informationen für Windenergie und Abwärme betrachtet.

ENTSO-E:

- the frequency „50 Hertz: a delicate balance“: <https://www.entsoe.eu/system-operations/the-frequency/>

E.ON Bayern:

- Standardlastprofil: http://www.eon-bayern.com/pages/eby_de/Netz/Stromnetz/Netzzugang/Lastprofilverfahren/Standard_Lastprofil/index.htm

5.1.2 Internetseiten

Erdgas Schwaben:

- „Power to Gas“-Anlage: <http://www.erdgas-schwaben.de/zukunft-beginnt-in-augsburg>

Fraunhofer IWES:

- Power-to-gas:
http://www.iwes.fraunhofer.de/de/highlights20112012/highlights20102011/_power-to-gas_-_erneuerbaresgasverbindetenergienetze.html

Institut für Wärme und Öltechnik (IWO):

- Brennstoff Heizöl: <http://www.iwo.de/fachwissen/brennstoff/>

ISB – Staatsinstitut für Schulqualität und Bildungsforschung München:

- Das Gymnasium in Bayern: <http://www.isb-gym8-lehrplan.de/contentserv/3.1.neu/g8.de/index.php?StoryID=26350>
- G8, Lehrplan 7. Jahrgangsstufe, Natur und Technik: <http://www.isb-gym8-lehrplan.de/contentserv/3.1.neu/g8.de/index.php?StoryID=26436>
- G8, Lehrplan 8. Jahrgangsstufe, Physik: <http://www.isb-gym8-lehrplan.de/contentserv/3.1.neu/g8.de/index.php?StoryID=26437>
- G8, Lehrplan 9. Jahrgangsstufe, Physik: <http://www.isb-gym8-lehrplan.de/contentserv/3.1.neu/g8.de/index.php?StoryID=26438>
- Leitfaden zum W-Seminar: http://www.isb-oberstufegym.de/userfiles/Die_Seminare/W_Seminar_Leitfaden.pdf
- Lehrplan G8, Fachprofil Physik: <http://www.isb-gym8-lehrplan.de/contentserv/3.1.neu/g8.de/index.php?StoryID=26382>

KWKK-Infozentrum GbR:

- Absorptionskältemaschine: <http://www.kwkk.de/kwkk-technologien/abso.html>

Leuschner, U.:

- Die deutsche Gasversorgung von den Anfängen bis 1998: <http://www.udo-leuschner.de/pdf/gasversorgung.pdf>

LEW:

- Lastprofil: http://www.lew.de/CLP/downloads/Produktinfos/ERS_G_S_Lastprofil.pdf

Sonstige:

- Dämpfe: <http://www.daempfen-dampfkessel-blog.de/dampfencontainer/nasdampf-sattdampf-und-heisdampf/>

Stadt Ingolstadt:

- „Aus Biomüll wird Energie“: http://www2.ingolstadt.de/index.phtml?object=tx|1842.55.1&NavID=1842.86&Aktuell_ID=13222 (dieser Link muss, aufgrund eines Sonderzeichens, per Hand kopiert und in die Adressleiste des Browsers eingefügt werden)

Stadtwerke Augsburg:

- Betriebspraktika und Erkundungen: http://www.sw-augsburg.de/ueber_uns/Betriebspraktika%20und%20Erkundung.php

5.1.2 Internetseiten

- Erdgas Musterrechnung: http://www.sw-augsburg.de/geschaeftskunden/erdgas_musterrechnung.php
- Erdgastankstellen Augsburg: http://www.sw-augsburg.de/privatkunden/erdgas_erdgastankstellen.php
- Fakten zum Unternehmen: http://www.sw-augsburg.de/ueber_uns/fakten.php
- Fernwärme: <http://www.sw-augsburg.de/privatkunden/fernwaerme.php>
- Fernwärme FAQ: http://www.sw-augsburg.de/privatkunden/faq_fernwaerme.php
- Fernwärme Musterrechnung: http://www.sw-augsburg.de/geschaeftskunden/fernwaerme_musterrechnung.php
- Führungen: http://www.sw-augsburg.de/ueber_uns/Fuehrungen.php
- Konzernstruktur: http://www.sw-augsburg.de/ueber_uns/konzernstruktur.php
- Meldung zu BHKWs: http://www.sw-augsburg.de/ueber_uns/aktuelle_meldungen_7770.php
- Strom Musterrechnung: http://www.sw-augsburg.de/geschaeftskunden/strom_musterrechnung.php
- Strommix: http://www.sw-augsburg.de/downloads/20121031_Strommix_swa_2012.pdf
- Unternehmensbroschüre: <http://www.sw-augsburg.de/downloads/unternehmensbrosch.pdf>
- Versorgungsgebiet Strom: http://www.sw-augsburg.de/privatkunden/strom_versorgungsgebiet.php
- Wasserkraftwerk Hochablass: <http://www.wkw-hochablass.de/kraftwerk/daten-und-fakten/>
- Zahlenspiegel 2011: http://www.sw-augsburg.de/downloads/Zahlenspiegel_final_2011.pdf

Süddeutsche Zeitung:

- Methoden beim Landeskriminalamt: Dem Verbrechen auf der Spur, 16.02.2011: <http://www.sueddeutsche.de/muenchen/landeskriminalamt-dem-verbrechen-auf-der-spur-1.1061222>

Sunfire:

- „Power to Gas“: <http://www.sunfire.de/kreislauf/power-to-gas>

swissgrid:

- Frequenz: <http://www.swissgrid.ch/swissgrid/de/home/experts/topics/frequency.html>

Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau (IWHW):

- Lehrveranstaltungsunterlagen zu „Wasserwirtschaft und allgemeiner Wasserbau“, Kapitel 7: <http://iwhw.boku.ac.at/LVA816110/kap7Wasserkraftnutzung.pdf>

Universität Magdeburg:

- Lehrstuhl Thermodynamik und Verbrennung, Lehrveranstaltung zu Verbrennungstechnik, Skript Kapitel 3: http://www.uni-magdeburg.de/isut/TV/Download/Kapitel3_VerbrennungSS2003.pdf

Verband der Wasserkraftwerksbetreiber Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V.:

- Wissenswertes zur Wasserkraft, Kaplan-Turbine: <http://www.wasserkraftverband.de/wissenswertes-uber-wasserkraft/kaplan-turbine/>

5.1.2 Internetseiten

Wikipedia, Begriff „Isentrop“: <http://de.wikipedia.org/wiki/Isentrop>

Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW):

- Power-to-gas: <http://www.zsw-bw.de/themen/brennstoffe-wasserstoff/power-to-gas.html>

5.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Augsburg im 17. Jahrhundert mit Lech (unten), Wertach (oben rechts) und ihren vielen Seitenkanälen.....	12
Abbildung 2: Das Gaswerk in Augsburg Oberhausen 1932 von oben, rechts sind zwei Gasometer zu erkennen.....	13
Abbildung 3: Carnot-Prozess im p-V-Diagramm.....	18
Abbildung 4: Clausius-Rankine-Prozess im p-V-Diagramm.....	19
Abbildung 5: Gasturbinen- oder Joule-Prozess im p-v-Diagramm ($v = \text{Volumen/Masse}$).....	20
Abbildung 6: Mollier-Diagramm für Wasser.....	22
Abbildung 7: Zeitlicher Verlauf der Netzfrequenz am 15.12.2012 zwischen 13:40 und 13:45 Uhr.....	25
Abbildung 8: Beispiel für den Lastbedarf an einem Tag im Sommer und im Winter, hier wurde die benötigte Leistung gegen die Tageszeit in Stunden aufgetragen.....	27
Abbildung 9: Regelzonen der vier größten Stromversorger Deutschlands, die jeweiligen Zonen werden von den zum Versorgungsunternehmen zugehörigen Netzbetreibern betrieben.....	28
Abbildung 10: Standardlastprofil für den Typ H0 Haushalt bzw. Privatverbrauch an drei verschiedenen Tagen.....	31
Abbildung 11: Standardlastprofil für den Typ G1 Gewerbe werktags 8-18 Uhr für Montag, 04.02.2013.....	31
Abbildung 12: Standardlastprofil für den Typ G2 Gewerbe mit überwiegendem Verbrauch in den Abendstunden für Montag, 04.02.2013.....	32
Abbildung 13: Standardlastprofil für den Typ G5 Gewerbe/Bäckerei mit Backstube für Montag, 04.02.2013.....	32
Abbildung 14: Ausdehnung des Fernwärmenetzes der Stadt Augsburg.....	35
Abbildung 15: Prinzipieller Aufbau eines Dampfkraftwerks.....	43
Abbildung 16: Aufbau eines Kessels mit Rostfeuerung.....	45
Abbildung 17: offenes Turbinengehäuse einer Dampfturbine mit messingfarbenen Leitschaufeln.....	47
Abbildung 18: Dampfturbinen-Laufräder mit Laufschaufeln.....	47
Abbildung 19: Wasserturbinentypen: a) Pelton turbine, b) Francisturbine, c) Kaplan turbine.....	49

5.2 *Abbildungsverzeichnis*

Abbildung 20: Schaubild eines Biomasse-Heizkraftwerks.....	52
Abbildung 21: Schema der AVA.....	53
Abbildung 22: Luftbild des AVA-Hauptgebäudes (in dem das HKW untergebracht ist) und der Fernwärme-Übergabestation der Stadtwerke Augsburg (swa).....	54
Abbildung 23: „Kernstück“ einer Gasturbinenanlage: Verdichter, Brennkammer und Turbine.....	55
Abbildung 24: geöffnete Gasturbine mit Brennkammer und Verdichter.....	56
Abbildung 25: Kaplan-Turbine.....	58
Abbildung 26: vertikaler Schnitt durch einen möglichen Aufbau eines Laufwasserkraftwerks mit Kaplan-Rohrturbine (gelb).....	59
Abbildung 27: Überblick über den Hochablass und die Baustelle für das neue Wasserkraftwerk....	64
Abbildung 28: Hochablass mit Blick vom West- zum Ostufer des Lechs.....	65
Abbildung 29: Anwendungsfelder des Power-to-Gas-Prozess.....	68
Abbildung 30: Schema einer Absorptionskältemaschine.....	69
Abbildung 31: Gasmengenangabe auf einem Gaszähler in m ³	75
Abbildung 32: Strommengenangabe auf einem Stromzähler in kWh.....	75
Abbildung 33: Lösungsvorschlag für das Arbeitsblatt.....	87
Abbildung 34: Versuchsaufbau mit der Turbine des ersten (gescheiterten) Versuchs.....	89
Abbildung 35: Schaltungsrad einer Fahrradgangschaltung, oben ganz, unten mit abgeschliffenen Zähnen und auseinandergenommenem Lager.....	90
Abbildung 36: Erster Versuch, eine Turbine mit Dampf zu betreiben; der Pfeil zeigt das Austrittsloch für den Dampf.....	91
Abbildung 37: Zweiter Versuch, Schablone für die Turbine.....	92
Abbildung 38: Zweiter Versuch, Turbine mit Achse.....	92
Abbildung 39: Aufbau eines Laufwasserkraftwerks.....	95
Abbildung 40: Tafelbild/Skizze ins Heft vom Aufbau eines Laufwasserkraftwerks.....	95
Abbildung 41: Wasserturbine von der Seite.....	97
Abbildung 42: Wasserturbine schräg von oben.....	97
Abbildung 43: Versuchsaufbau Wasserturbine.....	98

5.3 Bildnachweis

5.3 Bildnachweis

Die Nummern beziehen sich auf die Nummern der Abbildungen.

- 1: http://www.augsburg-tourismus.de/tl_files/augsburg_tourismus/literatur/context_industriekultur-in-augsburg_lp.pdf, S. 31
- 2: <http://www.udo-leuschner.de/basiswissen/SB100-01.htm>
- 3: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Carnot_pv.jpg
- 4: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:CR-Prozess_p-v-Diagramm.svg
- 5: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Joule-Prozess-p-v_v2.jpg
- 6: Strauß, 2009, S. 514
- 7: <http://www.netzfrequenzmessung.de/verlauf.htm>
- 8: <http://www.amprion.de/grundlast-mittellast-spitzenlast>
- 9: http://www.en-nova.org/energy_purchasing_strategy_power.html
- 10, 11, 12, 13: <http://www.eon-mitte.com/index.php?parent=9215> (Daten für Bayern)
- 14: http://www.sw-augsburg.de/downloads/Versorgungsplan_Fernwaerme_web_04_2012.pdf
- 15: Heuck, 2010, S. 8
- 16: Zahoransky, 2010, S. 342
- 17: <http://www.fotocommunity.de/pc/pc/cat/7429/display/20826925>
- 18: <http://www.sulzer.com/de/Products-and-Services/Turbomachinery-Services/Equipment-Supported/Steam-Turbines>
- 19: Strauß, 2009, S. 447
- 20: http://www.unendlich-viel-energie.de/uploads/media/Technische_Skizze_-_Biomasse.jpg
- 21: http://ava.ve.m-online.net/cms/index.php?option=com_content&task=view&id=15&Itemid=40&limit=1&limitstart=1
- 22: http://maps.google.de/maps?q=ava+augsburg&oe=utf-8&rls=org.mozilla:de:official&client=firefox-a&um=1&ie=UTF-8&sa=X&ei=5HfjUKyVM5CLswb-w4GoCA&ved=0CAsQ_AUoAA
- 23: http://www.stahl-info.de/stahlinnovationspreis/stahlinnovationspreis_2009/Bilder/Sonderp_Gas_Turbine15_RGB.jpg
- 24: http://www.dlr.de/next/desktopdefault.aspx/tabid-6327/11173_read-25485/gallery-1/10164_read-3/

5.3 Bildnachweis

25: <http://www.hydro-energy.com/technologie/kaplan/>

26: http://www.hsi-hydro.com/cms/upload/turbinen/HSI_KAPLANROHRTURBINE_BAUFORM_A.pdf

27: <http://www.wkw-hochablass.de/kraftwerk/daten-und-fakten/>

28: <http://www.hydroprojekt.de/leistungen/wasser/wasserkraftanlagen.html>

29: <http://www.powertogas.info/power-to-gas/strom-in-gas-umwandeln.html>

39: http://www.unendlich-viel-energie.de/uploads/media/Technische_Skizze_-_Wasserkraft.jpg

Bild von Seite 73: <http://www.amprion.net/netzfrequenz>

6 Danksagung

6 Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die mich bei der Realisierung dieser Arbeit unterstützt und beraten haben.

Insbesondere das Praktikum bei den Stadtwerken Augsburg in der Anfangsphase meiner Arbeit hat mir sehr geholfen, mich über die unterschiedlichen Aspekte der Energieversorgung zu orientieren und einen Überblick zu bekommen. Ich möchte mich hier vor allem bei der Abteilung Erzeugung der Stadtwerke Augsburg Energie GmbH bedanken, deren Mitarbeiter ich stets unkompliziert bei ihrer Arbeit begleiten durfte.

Des Weiteren möchte ich Herrn Professor Dr. Thomas Wilhelm meinen Dank aussprechen, der diese Arbeit betreut hat und dessen Rückmeldungen stets sehr schnell kamen und hilfreich waren.

Außerdem danke ich meiner Familie und meiner Studienkollegin Jil Hümmer für die konstruktive Kritik und die Geduld beim Korrekturlesen.

6 Danksagung

7 Selbstständigkeitserklärung

7 Selbstständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die Arbeit in allen Teilen selbstständig angefertigt und keine anderen als die in der Arbeit angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Bildliche Darstellungen habe ich, soweit nicht anders angegeben, selbst angefertigt. Die Quellenangaben zu Textverweisen und Abbildungen finden sich im Literaturverzeichnis bzw. im Bildnachweis.

Friedberg, den

Ramona Merkle