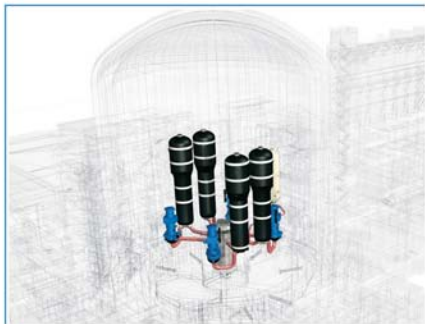


Vogel Fachbuch

Markus Borlein

Kerntechnik

Grundlagen



Markus Zink, geb. Borlein
Kerntechnik

*Wem der große Wurf gelungen,
Eines Freundes Freund zu sein;
Wer ein holdes Weib errungen,
Mische seinen Jubel ein!*

*Ja – wer auch nur eine Seele
Sein nennt auf dem Erdenrund!
Und wer's nie gekonnt, der stehle
Weinend sich aus diesem Bund!*

Aus der Ode «An die Freude»
von Friedrich Schiller.
Meiner Frau Corinna gewidmet, ohne deren
Geduld und Nachsicht die Entstehung
des Buches und die Vielzahl meiner
Aktivitäten nicht möglich wären.

M. Eng., Dipl.-Ing. (FH) Markus Zink, geb. Borlein

Kerntechnik

Grundlagen

2., überarbeitete Auflage

Vogel Buchverlag

M. Eng. Dipl.-Ing. (FH) MARKUS ZINK, geb. Borlein

Jahrgang 1980, studierte elektrische Energietechnik und «Elektro- und Informationstechnik» an der Hochschule für angewandte Wissenschaften, Fachhochschule Würzburg-Schweinfurt mit den Abschlüssen Dipl.-Ing. (FH) und M. Eng.

Er hat dort seit 2006 Lehraufträge für «Kerntechnik» und «Grundlagen der Elektro- und Energietechnik». Seine berufliche Tätigkeit führte vom Forschungszentrum Karlsruhe (heute KIT) über die Babcock Noell GmbH zur EnBW, wo er seit 2010 als Doktorand im Kernkraftwerk Philippsburg angestellt ist. Markus Zink ist Mitglied der Kerntechnischen Gesellschaft e.V. sowie im VDE e.V.

Weitere Informationen:
www.vogel-buchverlag.de

ISBN 978-3-8343-3253-0

2. Auflage. 2011

Alle Rechte, auch der Übersetzung, vorbehalten.

Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (Druck, Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Hiervon sind die in §§ 53, 54 UrhG ausdrücklich genannten Ausnahmefälle nicht berührt.

Printed in Germany

Copyright 2009 by

Vogel Business Media GmbH & Co. KG,
Würzburg.

Titelmotiv: AREVA NP GmbH, 91058 Erlangen

Vorwort

Eine wachsende Weltbevölkerung, verbunden mit einem steigenden Wohlstand in ärmeren Ländern, und neue Technologien der Industrienationen führen künftig zu einer erheblichen Steigerung des Energiebedarfs. Bis zum Jahr 2030 wird von der Internationalen Energie Agentur (IEA) ein Wachstum des Primärenergieverbrauchs weltweit von 50% prognostiziert (Quelle: World Energy Outlook, 2006). Dabei sind große Zuwächse in den Entwicklungsländern zu erwarten. Aber auch die Industriestaaten sind dabei, ihren Energiebedarf weiter zu steigern.

Die Sicherstellung einer umweltverträglichen, wirtschaftlichen und zuverlässigen Energieversorgung gehört zu den Kernproblemen, die die Menschheit heute und in Zukunft zu bewältigen hat. Wir alle müssen auf eine ressourcen- und umweltschonende Energieversorgung hinwirken und unser Handeln sowie unsere Politik auf dieses Ziel ausrichten. Der in diesem Zusammenhang oft zitierte Begriff einer «nachhaltigen Energieversorgung» wurde 1987 von der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung folgendermaßen definiert: *«Eine nachhaltige Entwicklung ist die Fähigkeit, die Bedürfnisse der Gegenwart zu befriedigen, ohne gleichzeitig die Möglichkeit zukünftiger Generationen zur Befriedigung ihrer eigenen Bedürfnisse einzuschränken.»*

Unsere Energieversorgung beruht zum Großteil auf fossilen Energieträgern. Es wird, infolge der Verfeuerung dieser Energie und dem damit verbundenen Anstieg von CO₂ in der Atmosphäre, in der Öffentlichkeit kaum noch bezweifelt, dass bereits heute erste Kennzeichen eines durch den Menschen herbeigeführten Klimawandels zu beobachten sind.

«Die Frage nach dem Ja oder Nein des Klimawandels hat sich erledigt. Die Veränderung des Klimas ist Teil unseres Alltags. Jetzt kommt es darauf an, alle Kräfte und Erkenntnisse zu bündeln, um die Folgen des Klimawandels in den Griff zu bekommen.» (WOLFGANG KUSCH, Präsident des Deutschen Wetterdienstes (DWD), 2008.)

Die Kernkraft mindert bereits heute in einem Mix zusammen mit regenerativen Energieträgern den CO₂-Ausstoß bei der Stromproduktion und bietet gleichzeitig wirtschaftliche Strompreise sowie eine sichere Versorgung mit elektrischer Energie. Nach wie vor spielen aber auch fossile Energieträger eine entscheidende Rolle. Zukünftige Reaktorkonzepte, wie beispielsweise der Hochtemperaturreaktor, neuartige Reaktoren der so genannten 4. Generation – deren (Weiter-)Entwicklung

Ziel aktueller Forschungsprogramme ist –, können in Zukunft neben der Stromproduktion auch zur Deckung des weiteren Energiebedarfs beitragen, weil sie Prozesswärme auf einem hohen Temperaturniveau bereitstellen können. Sie wären beispielsweise in der Lage, für die Herstellung von Wasserstoff zum Einsatz im Straßenverkehr die nötige Energie zu liefern.

Die Kernenergie gewinnt aufgrund der steigenden Preise fossiler Brennstoffe zunehmend an Bedeutung. Besonders in der asiatischen Welt wird verstärkt auf Kernkraft gesetzt. Hier befinden sich zz. ca. 30 Reaktoren in Bau und viele weitere in Planung. In Westeuropa werden derzeit zwei Kernkraftwerke gebaut (Finnland und Frankreich), weitere Anlagen sind hier ebenso geplant.

Neben der Kernspaltungstechnik kann langfristig auch die Kernfusion, an deren Realisierung zz. weltweit geforscht wird, einen Beitrag zu einer CO₂-freien Energieversorgung leisten. Die Kernfusion kann für eine sehr lange Zeit eingesetzt werden, weil die benötigten Rohstoffe nahezu unbegrenzt auf der Erde vorhanden sind (in Frankreich begonnen: ITER, Internationaler Thermonuklearer Experimental-Reaktor – Tokamak-Prinzip –, in Deutschland zz.: Experiment Wendelstein 7-X – Stellarator-Prinzip).

Dieser Grundlagentitel behandelt das komplexe Thema der Kernkraft überschaubar und verständlich, insbesondere für Studierende der Kerntechnik, Elektro- und Energietechnik, Verfahrenstechnik, Maschinenbau, oder für Berufseinsteiger bzw. interessierte Laien. Ein spezielles Vorwissen wird dafür nicht benötigt. Wo es möglich war, wurde auf die Verwendung komplexer Formeln verzichtet. Zahlreiche Bilder, Tabellen und Diagramme veranschaulichen den Text.

Behandelt werden der Aufbau von Atomen, die kerntechnischen und physikalischen Grundlagen sowie die Brennstoffaufbereitung, die Technik verschiedener Reaktortypen und des konventionellen Kraftwerksteils sowie die Endlagerung der radioaktiven Reststoffe. Insbesondere wird die Technik der in Deutschland eingesetzten Leistungsreaktortypen des Druck- und Siedewasserreaktors sowie der beiden zukunftssträchtigen Reaktorkonzepte des Hochtemperatur- und Fusionsreaktors erörtert.

Bedanken möchte ich mich für wichtige Anregungen und Hinweise zu einzelnen Kapiteln bei den Herren Dipl.-Ing. Werner Bahm, Dr. rer. nat. Karl G. Bauer, Dr.-Ing. Tim Büscher, Dipl.-Ing. Sven Jansen, Dipl.-Ing. (FH) Carsten George, Dipl.-Ing. (FH) Sebastian Klengel, M. Eng. Michael Moser, Dipl.-Phys. Stefan Opel, Dipl.-Ing. Hagen Pohl, Dipl.-Ing. Norbert Rohleder, Dipl.-Ing. Daniel Scharf, Dr.-Ing. Thomas Schönmath, Dr.-Ing. Ralph P. Schorn, Dr. rer. nat. Günther Sikler, Dipl.-Ing. Christopher Weißmann und den Damen Dipl.-Ing. (BA) Evelyn Werner sowie Dipl.-Phys. Christine Kreuzer. Den Herren Dr. rer. nat. Günter Bärö und Dr. rer. oec. Dieter Herrmann danke ich besonders für die Gesamtdurchsicht und für wertvolle Diskussionen. Ebenso möchte ich mich besonders bei Herrn Dipl.-Ing. (FH) Torsten Maier für explizite Anmerkungen und Diskussionen bedanken.

Besonderer Dank in gleicher Form gilt den Firmen, Instituten und Forschungseinrichtungen, die mit zahlreichen Bildern geholfen haben, den Titel gehaltvoll zu illustrieren. Sie sind im Quellenverzeichnis aufgeführt.

Resonanz zum Buch ist stets willkommen, weil eine lebendige Wissensvermittlung Praxis und Lehrbetrieb immer wieder neu motivieren und inspirieren kann. Den schnellsten Kontakt erfüllt eine E-Mail an: borlein@vogel-buchverlag.de.

Vorwort zur 2. Auflage

Dieser Grundlagentitel, der das Themengebiet der Kerntechnik für Studierende, Berufseinsteiger oder interessierte Laien umfassend und verständlich darlegt, erschien in der 1. Auflage 2009. Erfreulich waren die durchweg positive Resonanz aus der Leserschaft und die hohe Nachfrage. Besonders die erschütternden Ereignisse im japanischen Kernkraftwerk Fukushima Daiichi vom 11. März 2011 hatten einen erhöhten Informationsbedarf bezüglich der im Buch behandelten Themen zur Folge.

In vielen Ländern entbrannte nach diesen Ereignissen in Japan eine neue Debatte über die Nutzung der Kernenergie. Insbesondere in Deutschland wird seither mehr denn je diskutiert, ob ein Ausstieg aus der Kernenergie schneller erfolgen kann, als bisher geplant. Aufgrund dieser Diskussionen wurde Abschnitt 1.2 «Kernkraft in der Energieversorgung» überarbeitet, aktualisiert sowie mit weiterführenden Überlegungen und Tabellen ergänzt. Damit ist es dem Leser möglich, sich ein objektives Bild unserer Energie- und Stromversorgung zu machen.

Die Kernenergie leistet heute immer noch einen wertvollen Beitrag zur Reduzierung der CO₂-Emissionen und stellt – zusammen mit anderen konventionellen, in der Regel fossilen Energieträgern – Energie planbar rund um die Uhr zur Verfügung. Es wird aber angestrebt, den Anteil der regenerativen Energieträger an der Stromproduktion weiter zu steigern und konventionelle Anlagen damit zu ersetzen. In diesem Kontext gilt es, den zukünftigen Einsatz der Kernenergie neu zu bewerten.

Bisher wurden Kernkraftwerke aus wirtschaftlichen Überlegungen zwar vor allem im Grundlastbetrieb eingesetzt, sie können im Lastfolgebetrieb aber auch eine hohe Regelleistung zur Verfügung stellen, um schwankende Einspeiseleistun-

gen regenerativer Energieträger und einen schwankenden Verbrauch sicher zu beherrschen. Denn solange noch keine ausreichenden Speicherkapazitäten für elektrische Energie vorhanden sind, müssen konventionelle Kraftwerke die für die regenerativen Energien notwendigen Regelreserven bereithalten. Gerade hier kann aus ökologischer und ökonomischer Sicht der Einsatz der Kernenergie durch ihre CO₂-freie und kostengünstige Stromproduktion sinnvoll sein. Der Betrieb von Kernkraftwerken muss einem verstärkten Ausbau regenerativer Energieträger demnach nicht im Wege stehen.

Was die energiepolitischen Entscheidungen jedoch bringen werden und welche Rolle zukünftig die Kernenergie im deutschen und weltweiten Energiemix haben wird, kann zum jetzigen Zeitpunkt schwer prognostiziert werden. Energie- und wirtschaftspolitische Entscheidungen müssen unter Berücksichtigung vieler Rahmenbedingungen getroffen werden, denn unsere Gesellschaft braucht zuverlässige, nachhaltige und bezahlbare Energie.

An dieser Stelle möchte ich mich besonders bei Lesern, die durch Hinweise und Diskussionen zu einer sinnvollen Überarbeitung des Werkes beigetragen haben, bedanken. Resonanz zum Buch ist mir auch weiterhin willkommen. Den schnellsten Kontakt erfüllt eine E-Mail: borlein@vogel-buchverlag.de.

Bergheimfeld

Markus Zink, geb. Borlein

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	5
1 Einführung	15
1.1 Geschichte der Kernenergie	15
1.2 Kernkraft in der Energieversorgung	18
1.2.1 Elektrische Energie	19
1.2.2 Primärenergie	24
2 Grundlagen	27
2.1 Aufbau des Atoms	27
2.2 Massendefekt, Bindungsenergie	31
3 Ionisierende Strahlung	35
3.1 Kernumwandlungen und Radioaktivität	35
3.1.1 Verschiedene Arten von Kernumwandlungen	36
3.1.2 Nuklidkarte	40
3.1.3 Zerfallsreihen	43
3.1.4 Halbwertszeit	45
3.2 Aktivität	46
3.3 Wechselwirkungen von Strahlung mit Materie	48
3.3.1 Wechselwirkung von α -Strahlung	48
3.3.2 Wechselwirkung von β -Strahlung	49
3.3.3 Wechselwirkung von γ -Strahlung	50
3.3.4 Wechselwirkung von Neutronenstrahlung	51
3.4 Wirkung ionisierender Strahlung	53
3.4.1 Beschreibung der biologischen Strahlenwirkung	53
3.4.2 Bestrahlung, Kontamination und Inkorporation	54
3.4.3 Strahlendosis	55
3.4.3.1 Energiedosis, Ionendosis	56
3.4.3.2 Organdosis	56
3.4.3.3 Effektive Dosis	58
3.4.3.4 Dosisleistung	60
3.4.3.5 Dosisfaktor	60
3.4.3.6 Folgedosis	61
3.5 Strahlenschutz	62

3.5.1	Messung ionisierender Strahlung	63
3.5.1.1	Ionisationskammer	63
3.5.1.2	GEIGER-MÜLLER-Zählrohr	64
3.5.1.3	Stabdosimeter	65
3.5.1.4	Filmdosimeter	66
3.5.1.5	Neutronenmessung	67
3.5.1.6	Gamma-Spektroskopie	67
3.5.2	Quellen ionisierender Strahlung	68
3.5.2.1	Natürliche Quellen	68
3.5.2.2	Künstliche Quellen	70
3.5.3	Schutz vor ionisierender Strahlung	72
3.5.3.1	Maßnahmen zum Schutz vor Strahlungseinwirkungen	73
3.5.3.2	Strahlenschutzmaßnahmen in einem Kernkraftwerk	75
3.5.3.3	Kontrollierte Abgabe radioaktiver Stoffe	80
4	Brennstoffversorgung	83
4.1	Uranvorkommen und Uranerzgewinnung	83
4.1.1	Reichweite der Uranvorräte	85
4.1.2	Uranabbau und Vorbereitung zur Weiterverarbeitung	88
4.2	Urananreicherung, Brennstoffaufbereitung	89
4.2.1	Ausgangsmaterial für die Anreicherung	89
4.2.2	Grundlagen der Urananreicherung	90
4.2.3	Anreicherungsverfahren	93
4.2.3.1	Trenndüsenverfahren	93
4.2.3.2	Diffusionsverfahren	94
4.2.3.3	Zentrifugenverfahren	95
4.3	Brennstoffverarbeitung	99
4.4	Brennelemente	100
4.4.1	Allgemeiner Aufbau von Leichtwasserreaktor-Brennelementen	100
4.4.2	Brennelemente für Druckwasserreaktoren	101
4.4.3	Brennelemente für Siedewasserreaktoren	103
5	Reaktorphysik	105
5.1	Kernspaltung	105
5.1.1	Potentialwall	105
5.1.2	Tröpfchenmodell, Bindungsenergie	108
5.1.3	Spontane Kernspaltung	112
5.1.4	Induzierte Kernspaltung	112
5.1.4.1	Anregungsenergie	113
5.1.4.2	Klassifizierung von Neutronen	115

5.1.5	Wirkungsquerschnitt	116
5.2	Produkte der Kernspaltung	117
5.2.1	Spaltprodukte	117
5.2.2	Spaltneutronen	119
5.2.3	Effektive Neutronenausbeute	120
5.2.4	Energiebilanz der Kernspaltung	121
5.2.5	Nachzerfallswärme	122
5.3	Neutronenhaushalt	124
5.3.1	Kettenreaktion	124
5.3.2	Neutronenbilanz	125
5.3.3	Multiplikationsfaktor und 4-Faktoren-Formel	126
5.3.4	Reaktivität	129
5.4	Reaktorregelung	130
5.4.1	Verzögerte Neutronen	131
5.4.2	Steuer- oder Regelstäbe	132
5.4.2.1	Steuerelemente für Druckwasserreaktoren	133
5.4.2.2	Steuerelemente für Siedewasserreaktoren	137
5.4.3	Langzeitregelung	140
5.4.4	Streckbetrieb, Brennelementmanagement	141
5.4.5	Regelkreise im Reaktor	143
5.5	Moderator	145
5.5.1	Wirkungsweise des Moderators	145
5.5.2	Moderatorstoffe	146
5.5.3	Temperaturabhängigkeit der Moderation	149
5.6	Kühlmittel	149
5.6.1	Wasser als Kühlmittel	150
5.6.2	Gase als Kühlmittel	151
5.6.3	Flüssige Metalle als Kühlmittel	152
5.7	Homogener, heterogener Reaktor	153
5.8	Konversions- und Brutprozesse	154
5.8.1	Erzeugung von Plutonium	155
5.8.2	Erzeugung von $^{233}\text{Uran}$	157
5.9	Brennstoffabbrand	157
6	Kernkraftwerke	159
6.1	Statistischer Überblick kerntechnischer Anlagen	160
6.1.1	Kerntechnische Anlagen in Deutschland	160
6.1.1.1	Deutsche Leistungsreaktoren	161
6.1.1.2	Deutsche Forschungs- und Schulungsreaktoren	161
6.1.1.3	Sonstige kerntechnische Anlagen	162
6.1.2	Überblick aller Kernkraftwerke weltweit	167
6.1.3	Deutsche Kernkraftwerke im internationalen Vergleich	168

6.2	Aufbau eines Kernkraftwerks	168
6.3	Kraftwerk-Kennzeichnungs-System	173
6.4	Sicherheitskonzepte	175
6.4.1	Sicherheitsphilosophien	176
6.4.1.1	Redundanz	177
6.4.1.2	Diversität	179
6.4.1.3	«2-aus-3»-Prinzip, Drahtbruchsicherung	180
6.4.1.4	Gebäude- und Geländekonzeptionierung	181
6.4.1.5	Fail-save-Prinzip	183
6.4.1.6	Sicherheitsabschließungen	184
6.4.1.7	Fachkunde des Personals	185
6.4.1.8	Wiederkehrende Prüfungen	186
6.4.1.9	Erfahrungsaustausch	186
6.4.2	Reaktorschutz	188
6.4.3	Ereignisbaum, Fehlerbaum	190
6.4.4	Auslegungsstörfälle beim Druckwasserreaktor	192
6.4.4.1	Großes Primärleck	194
6.4.4.2	Mittelgroßes Primärleck	195
6.4.4.3	Kleines Primärleck	196
6.4.4.4	Dampferzeuger-Heizrohrleck	196
6.4.5	Kühlmittelverluststörfälle beim Siedewasserreaktor	196
6.5	Druckwasserreaktor	197
6.5.1	Aufbau des Druckwasserreaktors	198
6.5.2	Reaktordruckbehälter	200
6.5.3	Hauptkühlmittelpumpen	202
6.5.4	Dampferzeuger	205
6.5.5	Druckregelsystem	207
6.5.6	Volumenregelsystem	212
6.5.7	Nach- und Notkühlsysteme	213
6.5.7.1	Notspeisesystem	213
6.5.7.2	Nachkühlsystem	216
6.5.7.3	Sicherheitseinspeisesystem	218
6.5.7.4	Zusatzboriersystem	219
6.5.7.5	Druckspeicher	220
6.5.7.6	Beckenkühlsystem	220
6.5.8	Hilfssysteme	222
6.5.8.1	Lüftungssysteme	222
6.5.8.2	Kühlkreisläufe	223
6.5.8.3	Elektrizitätsversorgung im Kernkraftwerk	224
6.6	Siedewasserreaktor	229
6.6.1	Komponenten des Siedewasserreaktors	232
6.6.1.1	Reaktordruckbehälter	232

6.6.1.2	Kühlmittelumwälzpumpen	234
6.6.1.3	Wasserabscheidung und Dampftrocknung	236
6.6.2	Reaktorsteuerung und Reaktorregelung	236
6.6.3	Hilfssysteme	237
6.6.3.1	Druckentlastungssystem	237
6.6.3.2	Not- und Nachkühlssystem	239
6.6.3.3	Vergiftungssystem	240
6.6.3.4	Abdichtung der Turbinenwelle	240
6.7	Hochtemperaturreaktor	241
6.7.1	Aufbau des THTR	243
6.7.2	Brennelemente	243
6.7.3	Reaktorkomponenten	244
6.7.3.1	Reaktordruckbehälter und Einbauten	244
6.7.3.2	Gebläse	247
6.7.3.3	Dampferzeuger	248
6.7.4	Steuer- und Abschaltvorrichtungen	249
6.7.5	Nachwärmeabfuhr und Sicherheitsaspekte	249
6.8	Kernfusionsreaktor	250
6.8.1	Grundlagen der Kernfusion	251
6.8.2	Fusionsprodukt	254
6.8.3	Plasmaeinschluss	257
6.8.4	Tokamak	261
6.8.5	Stellarator	262
6.8.6	Hilfssysteme	263
6.8.6.1	Heizung	264
6.8.6.2	Divertor-Vakuumsystem	266
6.8.6.3	Blanket	268
6.8.6.4	Tritiumkreislauf	270
6.8.6.5	Supraleitende Magnetspulen	271
6.8.6.6	Ports und Peripherie	273
6.8.7	Sicherheitsaspekte	273
6.8.8	Aktuelle Projekte zur Kernfusion	275
6.8.8.1	ITER – «Der Weg» zur Kernfusion	275
6.8.8.2	Wendelstein 7-X	278
7	Konventionelle Kraftwerkstechnik	281
7.1	Wasser-Dampf-Kreislauf	281
7.2	Komponenten des Sekundärkreises	284
7.2.1	Turbine	285
7.2.2	Kondensatoren, Kühlwasser	288
7.2.3	Wasserabscheider und Zwischenüberhitzer	294
7.2.4	Speisewasserbehälter	294
7.2.5	Speisewasserpumpen	296

7.2.6	Vorwärmstraßen	297
7.3	Generator, Maschinentransformator	297
8	Behandlung radioaktiver Reststoffe	299
8.1	Entladen der Brennelemente aus dem Reaktor	301
8.2	Transport- und Lagerbehälter für radioaktive Stoffe	304
8.3	Zwischenlager, Standortzwischenlager	307
8.4	Wiederaufarbeitung von ausgedienten Kernbrennstoffen	309
8.4.1	Verfahren zur Wiederaufarbeitung	310
8.4.2	Handhabung der Abfälle aus der Wiederaufarbeitung	312
8.5	Direkte Endlagerung, Konditionierung radioaktiver Reststoffe	314
8.6	Endlagerkonzepte	317
8.6.1	Endlagerung in tiefen geologischen Formationen	319
8.6.2	2-Endlager-Konzept in Deutschland	321
8.6.2.1	Schacht Konrad	322
8.6.2.2	Salzstock Gorleben	323
8.6.3	Barrierenkonzept, Langzeitsicherheit	325
	Weiterführende Literatur	329
	Quellenverzeichnis	330
	Stichwortverzeichnis	333

1 Einführung

*Ein Gelehrter in seinem Laboratorium ist nicht nur ein Techniker;
er steht auch vor den Naturgesetzen wie ein Kind vor der Märchenwelt.*

MARIE CURIE, französische Physikerin und Nobelpreisträgerin, 1867–1934

Die über 2000 Jahre alte Geschichte der Atom- und Kernphysik ist gekrönt von brillanten wissenschaftlichen und technischen Leistungen. Sie steckt aber auch voller Widersprüche und Irrtümer über die Deutung der Vorgänge in der Welt des Unsichtbaren.

1.1 Geschichte der Kernenergie

Es begann mit dem Naturphilosophen DEMOKRIT rund 400 Jahre v. Chr. Während eines Spaziergangs mit seinen Schülern soll er einst gesagt haben:

*«Nur scheinbar hat ein Ding eine Farbe, nur scheinbar ist es süß oder bitter.
In Wirklichkeit gibt es nur Atome und den leeren Raum.»*

Damit gilt DEMOKRIT, zusammen mit seinem Lehrer LEUKIPPOS VON MILET, als Begründer der «Atomistik». Die Bezeichnung Atom kommt vom griechischen Wort «atomos», das übersetzt «unteilbar» bedeutet. Die alten Griechen glaubten, dass alle Stoffe aus winzigen Teilchen bestehen, die nicht weiter geteilt werden können. Die verschiedenen Eigenschaften der Stoffe schrieben sie den unterschiedlichen Anordnungen der Teilchen zu.

Im Mittelalter waren es vor allem die Alchimisten, die eifrig an der Materie der verschiedenen Stoffe forschten. Ihr Ehrgeiz wurde besonders von dem Ziel getrieben, mit abenteuerlichen Methoden aus allen möglichen Dingen Gold zu erzeugen. Sie glaubten z.B., aus Wasser könne man Erde herstellen. Sie waren damit, wie wir heute wissen, der Wirklichkeit, dass ein Element in ein anderes umwandelbar ist, gar nicht so fern, wie es auf den ersten Blick scheint.

Erst rund 2000 Jahre nach DEMOKRIT rückte das Atom wieder in den Blickpunkt wissenschaftlicher Untersuchungen. Besonders die Arbeiten der Naturforscher ROBERT BOYLE und ANTOINE LAURENT LAVOISIER aus dem 17. Jahrhundert (letzterer kannte zur damaligen Zeit bereits 31 chemische Elemente) haben es JOHN DALTON 1808 ermöglicht, seine Atomtheorie zu formulieren:

«Die Elemente bestehen aus Atomen, aus kleinen, in keiner Weise weiter teilbaren Partikelchen. Die Atome verschiedener Elemente haben unterschiedliches, die Atome ein- und desselben Elements stets gleiches Gewicht...»

Damit schien zunächst bewiesen, was Demokrit schon lange zuvor verkündet hatte. Und dennoch waren beide, wenn auch nur geringfügig, im Irrtum.

DALTONS Atomtheorie beruht u.a. auf der Annahme, die Elemente seien nicht in andere Elemente umwandelbar, sondern fest definiert. Sollte also der Traum der Alchimisten, Gold herzustellen, ewig unerfüllt bleiben? Dies widersprach doch aber den zur damaligen Zeit schon bekannten Erfahrungen, dass z.B. auch verschiedene Formen der Energie, wie Licht, Wärme, Bewegung oder elektrische Energie, ineinander umgewandelt werden können.

Zum Ende des 19. Jahrhunderts gab es dann Anzeichen, die DALTONS Lehre widerlegen sollten. Hier ist zunächst der deutsche Arzt WILHELM CONRAD RÖNTGEN zu nennen, der mit der Katodenstrahlröhre experimentierte und 1895 eine bis dahin unbekannte Strahlung entdeckte, die von grünlich leuchtenden Stellen der Röhrenwand ausging. Er taufte die sonderbaren Strahlen auf den Namen X-Strahlen und bekam für seine Entdeckung im Jahr 1901 den ersten Nobelpreis für Physik. Diese später nach ihm benannten Röntgenstrahlen konnten leichte Stoffe durchdringen, während sie von dichtem Material, wie Knochen oder Metall, aufgehalten wurden. Überall auf der Welt versuchte man nun, diesen Strahlen auf die Spur zu kommen. So z.B. auch in Paris, wo der Chemiker BECQUEREL auf den Gedanken kam, dass die von den grünlich leuchtenden Stellen der Katodenstrahlröhre ausgehenden Röntgenstrahlen auch von anderen grün leuchtenden (fluoreszierenden) Stoffen ausgesendet werden. Er experimentierte zunächst mit den gelbgrün leuchtenden Uransalzen, die auch als färbender Zusatz für Vasen und Gläser verwendet wurden. Tatsächlich fand er auch bei ihnen eine leicht nachzuweisende Strahlung. Des Weiteren entdeckte BECQUEREL, dass diese Strahlung auch bei völliger Dunkelheit eine Fotoplatte schwärzen konnte. Außerdem beobachtete er 1896, dass diese Strahlung auch dann vorhanden war, wenn keine fluoreszierende Materie beteiligt war, und folgerte daraus, dass sie aus den Uran-Atomen kam. Er konnte ebenfalls nachweisen, dass durch die Strahlung auch eine Ionisation von Gasen ausgelöst werden kann. Er hatte damit die Radioaktivität entdeckt und bekam für seine Forschungen 1903 zusammen mit MARIE CURIE den Physik-Nobelpreis.

Es war ein Fund des Ehepaares CURIE, der die Grundanschauungen der damaligen Physik und Chemie erschütterte. Sie hatten herausgefunden, dass manche Erze, die Uran enthielten, stärker strahlten, als selbst reines Uran und waren deshalb auf der Suche nach dem Ursprung dieser Strahlen. Die Überraschung schlummerte in einer besonders stark strahlenden Uranprobe aus der böhmischen Stadt Johannisthal. In dieser Probe entdeckten sie 1898 ein neues Element und gaben ihm den Namen Polonium, da MARIE CURIE aus Polen stammt. Sie fanden heraus, dass dieses Element ohne erkennbare Ursache ständig eine Strahlung sehr hoher Energie abgibt. MARIE CURIE erhielt für Ihre Entdeckungen 1911 den Nobelpreis für Chemie.

Energie, so wusste man, kann jedoch niemals vernichtet oder erzeugt werden, sondern kann nur ihre Form ändern. Dies trug schließlich mit dazu bei, dem Wesen

der ionisierenden Strahlung auf die Spur zu kommen. Eine genaue Untersuchung der ausgesandten Strahlung ergab, dass sie aus verschiedenen Teilen bestehen konnte: Alpha-, Beta- und Gammastrahlen. Dabei entpuppten sich die Betastrahlen als Schwärme von Elektronen, also von Katodenstrahlen bzw. Elektrizität, während die Gammastrahlen eine Art Röntgenstrahlen waren. Die Alphastrahlen jedoch bargen die größte Überraschung. Bei ihnen handelt es sich um positiv geladene Teilchen. Weiter wurde beobachtet, dass sich z.B. Radium durch die ständige Abgabe von Strahlung nach und nach in Blei verwandelte. Was also Generationen von Alchimisten vergeblich versucht hatten und was DALTON, wie auch DEMOKRIT für schlicht unmöglich hielten, geschieht hier ganz von selbst. Elemente wandeln sich in andere um.

Nun konnte weiter an der Entwicklung von Modellen um den Aufbau und das Wesen der Atome geforscht werden. Eine bedeutende Persönlichkeit in diesem neuen Teil der Physik war ERNEST RUTHERFORD. 1904 hatte er die Radioaktivität als Zerfall von Atomkernen erklärt und wenige Jahre später (1911) ein Modell über den Aufbau des Atoms entwickelt. Er postulierte, dass alle Atome aus denselben Grundbausteinen aufgebaut sind. Ein weiterer Wissenschaftler kam in Kopenhagen zu ähnlichen Resultaten. NILS BOHR präziserte die von RUTHERFORD postulierte Theorie und führte das bis heute gebräuchliche BOHRsche Atommodell ein.

Die Geschichte der Kernspaltung, die die Grundlage unserer heutigen Energiegewinnung aus der Kernkraft darstellt, beginnt noch etwas später – schließlich hatte JAMES CHADWICK auch erst im Jahr 1932 das Neutron entdeckt, wofür er 1935 den Nobelpreis für Physik erhielt. Ende 1938 wurde von FRITZ STRASSMANN und OTTO HAHN die Vermutung geäußert, dass durch Neutronenbeschuss von Uran Barium entstanden ist. Damit wurde von ihnen die Pionierarbeit um die Erforschung der Kernspaltung geleistet. Anfang 1939 kann die Kollegin OTTO HAHNS, LISE MEITNER, (sie war jüdischer Abstammung und nach der Flucht vor dem NS-Regime am Nobel-Institut in Schweden tätig) wertvolle Erkenntnisse um die Deutung des von HAHN und STRASSMANN entdeckten Phänomens beitragen. Von 1939 wird auch erstmals das Wort Kernspaltung verwendet und eingeführt. OTTO HAHN erhielt für seine Arbeiten 1944 den Nobelpreis für Chemie.

Ebenfalls im Jahr 1939 wurden vom Team um FRÉDÉRIC JOLIOT die bei der Kernspaltung frei werdenden Neutronen nachgewiesen. Somit wurde auch klar, dass durch die Kernspaltung eine Kettenreaktion ausgelöst werden könnte.

Bereits 1942 konstruierte und baute ENRICO FERMI, der 1938 für seine Forschungen zur Kernspaltung den Nobelpreis für Physik bekam, an der Universität in Chicago den ersten Kernreaktor mit einer kontrolliert ablaufenden Kettenreaktion – den Chicago Pile 1. Am 20. Dezember 1951 wurde erstmals durch den Experimental Breeder Reactor 1 (EBR-I) in den USA Strom durch Kernenergie erzeugt. 1957 begann auch in Deutschland die Forschung zur Kerntechnik mit der Inbetriebnahme des ersten Forschungsreaktors, dem FRM-I («Atomei») in Garching bei München. 1961 wurde vom Kernkraftwerk Kahl zum ersten Mal in

Deutschland Strom aus Kernenergie ins Netz gespeist. 1972 nahmen die ersten beiden kommerziellen Kraftwerke in Deutschland (Stade und Würgassen), ihren Betrieb auf. Weitere statistische Daten zur Kernenergie sind zu Beginn des Kapitels 6 aufgeführt.

Die sich abzeichnende, teilweise rasante Entwicklung im Bereich der Kerntechnik wurde jedoch auch durch zwei tragische Reaktorunglücke beschattet. Zum einen ereignete sich am 28.03.1979 im Kernkraftwerk Three-Mile-Island nahe Harrisburg (USA) ein schwerer Reaktorunfall mit partieller Kernschmelze. Dank der vorhandenen Barrieren und Sicherheitskonzepte konnte ein größeres Austreten von radioaktivem Material verhindert werden. Der 26.04.1986 war das Datum des bislang schwersten Reaktorunglücks im sowjetischen Kernkraftwerk Tschernobyl. Bei diesem Unfall wurde eine sehr große Menge radioaktiven Materials in die Umgebung freigesetzt.

Seit nunmehr ca. 50 Jahren wird weltweit auch an der Erforschung einer weiteren Energiequelle, der Kernfusion, gearbeitet. Bei der Kernfusion handelt es sich quasi um das «Gegenteil» zur Kernspaltung. Hierbei wird Energie nicht durch die Spaltung schwerer, sondern durch die Verschmelzung leichter Atomkerne gewonnen. Die Aufrechterhaltung einer Fusionsreaktion stellt sich jedoch ungemein schwieriger dar, als die Kernspaltung, die in einer kontrollierten Kettenreaktion von selbst abläuft. Deshalb wird es auch noch viel Forschungsarbeit brauchen, bis die Kernfusion eines Tages Strom ins Netz liefern kann. Sollte dies jedoch möglich sein und genutzt werden können, wovon die Forscher heutzutage überzeugt sind, dann ist ein sehr großer Schritt zur Lösung der weltweiten Energieprobleme getan. Die Rohstoffe der Kernfusion, Deuterium und Tritium (bzw. dessen Brutmaterial Lithium), sind auf der Erde in großen Mengen vorhanden und würden für die Energieversorgung der Menschheit für eine sehr lange Zeit ausreichen (Abschnitt 6.8).

1.2 Kernkraft in der Energieversorgung

Unser heutiger Lebensstil und unser Wohlstand sind zum allergrößten Teil auf die Verfügbarkeit von Energie und insbesondere auf die der elektrischen Energie zurückzuführen. Ohne die Versorgung mit Energie rund um die Uhr und ohne planmäßig einsetzbare Energieträger wäre das Leben in Industrienationen wie Deutschland in der Art, wie wir es heute gewohnt sind, nicht denkbar.



Anmerkung

Der Einsatz von Energie steigert die Produktivität, ermöglicht Wirtschaftswachstum und einen höheren Lebensstandard. Es lässt sich feststellen, dass sich der Energieverbrauch einer Nation im Allgemeinen proportional zum Bruttoinlandsprodukt entwickelt. Im Rahmen dieser Grundtendenz lösen sich

längere Perioden gegenseitig ab, in denen es entweder verstärkt zum Ausbau neuer ergebiger Energiequellen oder zu Energieeinsparung und Effizienzerhöhungen kommt. Beides sind notwendige Seiten einer nachhaltigen Entwicklung. Gelegentlich wird in stark vereinfachter Sichtweise nur die Einsparung bzw. Effizienzsteigerung und damit die mögliche zeitweise Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Energieverbrauch als nachhaltig angesehen.

Beispielsweise wurden zu Beginn der vermehrten Nutzung der fossilen Energieträger, als deren Marktpreise noch niedrig waren, viele Häuser mangelhaft wärmeisoliert, weil dies nicht wirtschaftlich war (der Preis für die zusätzliche Wärmeisolation war höher als die benötigten Heizkosten). Heute, wo die Marktpreise für fossile Brennstoffe sehr hoch sind und sich eine Verknappung der Reserven andeutet, werden alte Häuser mit Wärmeisolationen nachgerüstet bzw. neue Häuser gleich entsprechend gebaut und neue Energiequellen (z.B. Solarheizung) genutzt, um den künftigen Bedarf zu decken.

Im Folgenden wird die Energieversorgung der Bundesrepublik Deutschland erläutert. Als Basis wurden soweit als möglich die Daten aus dem Jahr 2009 herangezogen. Im Wesentlichen lassen sich die Verhältnisse auch auf andere Industrieländer der westlichen Welt übertragen.

1.2.1 Elektrische Energie

Tabelle 1.1 zeigt sowohl die installierte elektrische Leistung der einzelnen Energieträger als auch deren durchschnittliche Ausnutzungsdauer und die daraus resultierende Stromerzeugung. Es wird deutlich, dass knapp 60% unserer elektrischen Energie auf der Nutzung fossiler Energieträger beruht.

Die Kernenergie hatte 2009 einen Anteil von 23%, regenerative Energien deckten unseren Strombedarf zu 12...14% (nicht explizit aufgeführt ist der Anteil der Biomasse und anderer regenerativer Energieträger, die unter Sonstige enthalten sind).

Die Angabe der durchschnittlichen Ausnutzungsdauer zeigt die zeitliche Verfügbarkeit der jeweiligen Energieträger. Es ist zu erkennen, dass z.B. die Windenergie trotz ihrer im Vergleich zur Kernenergie um 25% höheren installierten Leistung nur zu 7% beiträgt, während die Kernenergie etwa dreimal mehr Strom erzeugt.

Anmerkung

Es ist zunächst anzunehmen, dass sich durch die Multiplikation der installierten Kraftwerksleistung mit der durchschnittlichen Ausnutzungsdauer die erzeugte Strommenge ergibt. Waren aber z.B. installierte Kraftwerke nur bedingt verfügbar, trugen sie auch nicht zur erzeugten Strommenge bei.



Tabelle 1.1 Installierte Netto-Kraftwerksleistung, durchschnittliche Ausnutzungsdauer und Nettostromerzeugung der BRD im Jahr 2009 (a) [1.1], b) [1.2])

Energieträger	installierte Kraftwerksleistung netto a)	durchschnittliche Ausnutzungsdauer b)	Nettostromerzeugung a)	
			[TWh]	[%]
	[GW]	[h]		
Steinkohle	28,0	3580	100	18
Erdgas	21,7	3150	75	13
Braunkohle	20,3	6610	134	24
Kernenergie	20,5	7710	128	23
Wasser	5,3	3530	19	3
Wind	25,8	1520	38	7
Sonne	9,8	890	6	1
Sonstige	24,1	–	61	11
Summe	155,5	–	561	100



Anmerkung

1 kWh (Kilowattstunde) ist die Energie, die umgesetzt wird, wenn eine Leistung von 1000 W (1 kW) über die Zeitdauer von 1 h erbracht wird. Zum Vergleich: Der Mensch ist in der Lage, eine Dauerleistung von ca. 100 W zu erbringen. Spitzensportler können kurzzeitig auch ca. 1500 W leisten. Um z.B. die Energie zu erzeugen, die ein Elektroherd mit einer Leistung von 2000 W während eines ein-stündigen Betriebs verbraucht (2 kWh), müsste ein Mensch ca. 20 h arbeiten (z.B. auf einem Fahrrad mit angeschlossenem Generator). Der Preis für diese Energiemenge liegt beim heutigen Strompreis von ca. 20 ct/kWh bei 40 ct.

Neben der Wattsekunde (W s) sind auch das Joule (J) und das Newtonmeter (N m) Grundeinheiten der Energie bzw. der Arbeit. Diese Größen können einander gleichgesetzt werden, d.h., $1 \text{ J} = 1 \text{ W s} = 1 \text{ N m}$.

Die kWh ist eine abgeleitete Einheit (1 kWh = 3 600 000 W s).

1 GW entspricht 1 Mio. kW, 1 TWh = 1 000 000 000 kWh.

Da elektrische Energie derzeit nur sehr bedingt und in kleinem Umfang gespeichert werden kann, muss die von den Verbrauchern benötigte Energie «just in time» in das Stromnetz eingespeist werden. Verbrauch und Einspeisung bzw. Erzeugung müssen sich also zu jeder Zeit ausgleichen. Kommt es z.B. witterungsbedingt zu Schwankungen in der Einspeisung mancher Energieträger, müssen andere Kraftwerke den Leistungsbedarf ausregeln (Regelreserve). Für diesen Zweck dienen heutzutage vor allem Kohle- und in zunehmendem Maße auch Gas- und Kernkraftwerke. Damit diese Schwankungen in der Verfügbarkeit einzelner Energieträger nicht zu Energieengpässen führen, ist ein ausgewogener Mix an verschiedenen Energieträgern nötig.

Neben den witterungsbedingten Schwankungen in der Einspeisung, muss die erzeugte Menge an elektrischer Energie auch dem Bedarf der Verbraucher angepasst werden. Der Bedarf an elektrischer Energie ist über den Tag verteilt nicht konstant, sondern schwankt gemäß unseren Lebensgewohnheiten. So ist z.B. der Bedarf im Sommer um die Mittagszeit und im Winter bei Nacht am größten (Bild 1.1). Die sog. Grundlast ist dabei die Menge an elektrischer Energie, die rund um die Uhr benötigt wird. Die Kernkraft trägt zu 45% zur Deckung der Grundlast bei (Bild 1.2). Daneben wird Braunkohle und Wasserkraft für die Grundlastdeckung verwendet. Des Weiteren wird zwischen der Mittel- und Spitzenlast unterschieden. Zur Deckung der Mittellast werden insbesondere Kohlekraftwerke eingesetzt. Für die Spitzenlast stehen neben den Kohlekraftwerken auch Gas- und in gewissem Umfang auch Pumpspeicherkraftwerke zur Verfügung. Letztere werden verwendet, um den schwankenden Bedarf etwas zu vergleichmäßigen, indem sie zu Zeiten niedrigen Bedarfs (z.B. nachts) Energie dazu verwenden, Wasser auf ein höheres Potential zu pumpen, das sie dann zu Zeiten großen Bedarfs (z.B. mittags) wieder zur Stromerzeugung ablassen (Bild 1.1).

Diese Kraftwerke stellen heutzutage in der BRD mit rund 6,7 GW und etwa 40 GWh nur eine sehr geringe Kapazität. In Zukunft wird der Bedarf an Speicherkraftwerken durch den weiteren Ausbau der regenerativen Energieträger stark ansteigen. Durch das Erneuerbare Energien Gesetz (EEG) ist geregelt, dass der Strom der regenerativen Energieträger vorrangig vom Netz aufzunehmen ist – unabhängig davon, ob er (z.B. nachts) gerade benötigt wird. Deshalb müssen heute konventionelle Kraftwerke diese Regelaufgabe bewältigen und sowohl die schwankende Einspeisung der regenerativen Energieträger als auch die schwankende Nachfrage der Verbraucher ausgleichen.

Auch die Kernenergie wird in zunehmendem Maße für diese Regelung eingesetzt. Kernkraftwerke sind auf Laständerungen, die sich aus dem Lastfolgebetrieb ergeben, ausgelegt und können sowohl technisch als auch physikalisch für die Lastwechsel eingesetzt werden – siehe Abschnitt 5.4 [1.3]. Sie erreichen im oberen Leistungsbereich (etwa 80...100% der Nennleistung) Änderungsgeschwindigkeiten, die denen von Gaskraftwerken gleichen und können in einem großen Leistungsbereich geregelt werden. Gleichzeitig tragen sie durch ihre CO₂-freie Stromproduktion zur Einsparung der Treibhausgasemissionen bei und können somit zusammen mit den regenerativen Energien zu einem sowohl aus ökologischer als auch aus ökonomischer Sicht günstigen Energiemix führen.

Anmerkung

Die Höchstlast (Bild 1.1) beträgt im Sommer ungefähr 60 GW, im Winter bis zu 80 GW. Die Grundlast liegt im Sommer ca. bei 30...40 GW. Die von der Photovoltaik eingespeiste Leistung variiert täglich zwischen 0 und dem verfügbaren Maximum von bis zu 10 GW (s. Tabelle 1.1). Gleichzeitig kann auch die von der



Windkraft erzeugte Leistung innerhalb weniger Stunden um viele GW schwanken. Diese Änderungen bei der Einspeisung und beim Verbrauch müssen von den Regelkraftwerken entsprechend ausgeglichen werden, sodass Erzeugung und Verbrauch zu jeder Zeit gleich sind. Zuverlässige Vorhersagen der Einspeisung und des Verbrauchs ermöglichen es, sich auf die zu erwartenden Schwankungen Tag für Tag einzustellen, sodass die Änderungen nicht völlig unerwartet auftreten. Abweichungen von der Prognose können jedoch den Energieversorgern viel Geld kosten, da der Strom für die BRD an der Leipziger Strombörse gehandelt wird und i.d.R. einen Tag im Voraus gekauft bzw. verkauft wird.

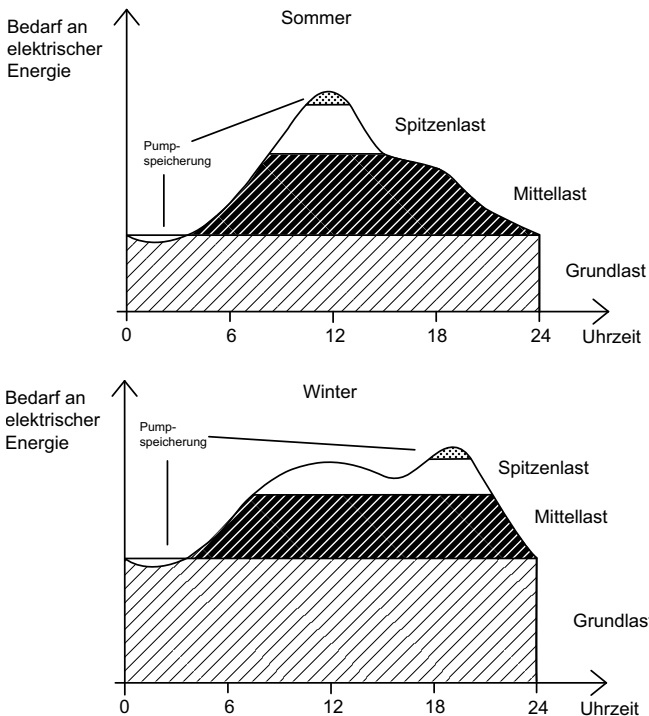
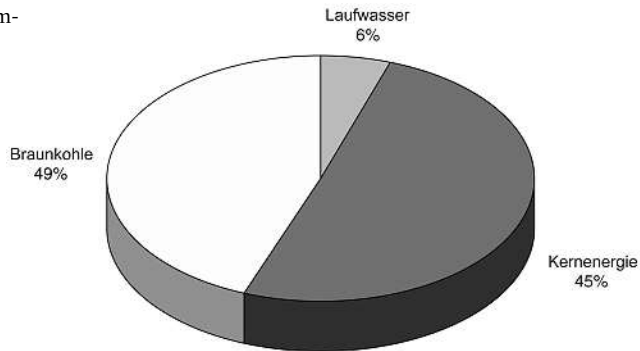


Bild 1.1 Schematischer Lastgang des elektrischen Energiebedarfs im Sommer und im Winter – der tatsächliche Lastgang ist auch vom Wochentag, Wetter und anderen Parametern abhängig.

Die dargelegten Zahlen zeigen, dass der bloße Anteil an der erzeugten Strommenge eines Energieträgers, wie er in Tabelle 1.1 aufgeführt ist, für sich alleine kein befriedigendes Qualitätsmerkmal darstellt. Es muss auch die Verfügbarkeit bzw. die Planbarkeit des Energieträgers in Betracht gezogen werden, damit Strom zu jeder Zeit in der benötigten Menge zur Verfügung steht. Die sog. Grundlastfähigkeit spiegelt diese Eigenschaft der einzelnen Energieformen wieder und beurteilt, ob ein Energieträger auch «rund um die Uhr» für die Stromerzeugung zur Verfügung ste-

hen kann bzw. aus wirtschaftlichen Gründen hierfür eingesetzt wird. Über die Verteilung der Grundlaststromversorgung der BRD im Jahr 2009 gibt Bild 1.2 Auskunft:

Bild 1.2 Grundlaststromversorgung 2009 in der BRD [1.1]



Unser Stromverbrauch wird in den nächsten Jahren weiter ansteigen. Der Verband der Großkesselbesitzer (VGB) prognostiziert in [1.4] einen Anstieg des Strombedarfs der EU-27 Mitgliedsstaaten um 17% bis zum Jahr 2020 (von bisher 3.400 TWh auf etwa 4.000 TWh jährlich). Als Grund hierfür werden der Nachholbedarf der neuen EU-Länder sowie die steigende Zahl der mit elektrischem Strom betriebenen Verbraucher in den Haushalten genannt. Auch die vermehrte Verwendung der elektrischen Energie zur Verringerung des Primärenergieeinsatzes (z.B. Wärmepumpen für Gebäudeheizung und -klimatisierung) tragen zur Steigerung des Stromverbrauchs bei.

In den nächsten Jahren kommt zu dieser allgemeinen Steigerung des Stromverbrauchs auch ein großer Bedarf an Ersatzleistung für alte und unwirtschaftliche Kraftwerke hinzu. Viele Kraftwerke, nicht nur Kernkraftwerke, sondern vor allem auch Kohlekraftwerke, die heute einen großen Beitrag zur Stromerzeugung und insbesondere zur Grundlastdeckung liefern, müssen in den nächsten Jahren altersbedingt vom Netz genommen und durch neue Anlagen ersetzt werden. Der VGB nennt in [1.4] einen Neubaubedarf an Kraftwerksleistung in der EU-27 von 400 000 MW bis zum Jahr 2020. Das entspricht bei einer durchschnittlichen Kraftwerksleistung von ca. 1000 MWe etwa 400 neuen Großkraftwerken.

Anmerkung

Interessant ist auch die Aufteilung der elektrischen Energie auf die verschiedenen Verbraucher. Aus Bild 1.3 ist zu erkennen, dass im Bereich der Industrie und des Gewerbes der Verbrauch am höchsten ist.



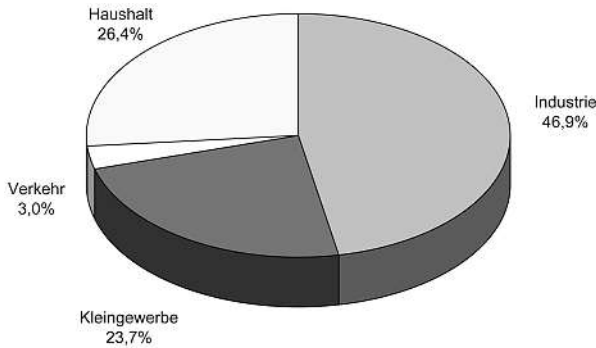


Bild 1.3 Übersicht der Stromverbraucher nach Sektoren 2005 [1.1]

1.2.2 Primärenergie

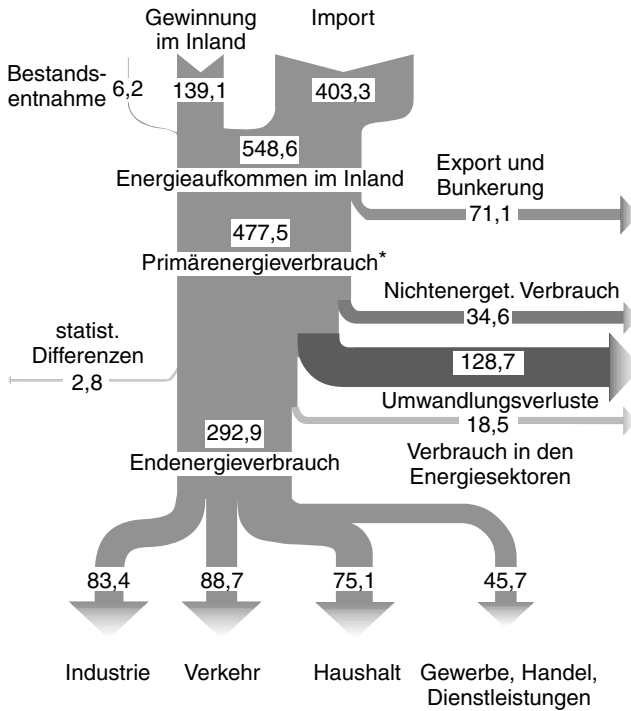
Die elektrische Energie ist aber nur eine von vielen Energieformen, auf die unsere heutige Gesellschaft nicht mehr verzichten kann. Die Summe der Energieträger, die in der Natur vorkommen und aus denen unsere für den Endverbrauch bestimmten Energieträger (z.B. Strom, Kraftstoff, Heizöl usw.) gewonnen werden, fasst man unter dem Sammelbegriff der Primärenergieträger zusammen. Tabelle 1.2 listet die verschiedenen Primärenergieträger der Bundesrepublik sowie deren Anteile.

Tabelle 1.2 Primärenergieträger der BRD 2009 [1.1]

Energieträger	Primärenergieanteil
Erdgas	22%
Kernenergie	11%
Braunkohle	11%
Steinkohle	12%
Mineralöl	35%
Windkraft	1%
Biomasse	5%
Biokraftstoff	1%
Solarthermie	0,1%
Wärmepumpe	0,1%
Sonstige	1,8%

Während die Kernenergie im Bereich der Stromerzeugung in der BRD einen Anteil von 23% hat (Tabelle 1.1), trägt sie zur Deckung der Primärenergie nur mit 11% bei. Dies kommt vor allem daher, weil zur Versorgung des Verkehrswesens und des Hausbrandes (Heizung), die zusammen rund 2/3 des Primärenergieverbrauchs

ausmachen, hauptsächlich die Energieträger Mineralöl und Erdgas herangezogen werden. Bild 1.4 zeigt das Energieflussbild der Bundesrepublik Deutschland für das Jahr 2007. Der dargestellte Primärenergieverbrauch von 477,5 Mt SKE (Steinkohleeinheiten) entspricht rund 3900 TWh.



*Der Anteil der erneuerbaren Energieträger liegt bei 7,2%.

Bild 1.4 Energieflussbild 2007 für die Bundesrepublik Deutschland, Zahlen in Mt SKE [1.5]

In den kommenden Jahrzehnten wird es immer schwieriger werden, den weltweiten Hunger nach Energie, vor allem in den aufstrebenden Nationen wie China, Indien oder auch Südamerika und Afrika, zu stillen. Bereits heute ist z.B. an den steigenden Preisen für Rohöl ein deutlicher Trend hin zu erhöhten Kosten und schließlich auch zur Verknappung der Ressourcen zu erkennen. Ebenso muss jedoch dringend auf eine klimaschonende und umweltverträgliche Nutzung von Energie, auch im Sinne der Nachhaltigkeit, geachtet werden. Hierfür ist ein ausgewogener Energiemix dringend nötig, um sich z.B. nicht in die Abhängigkeit von anderen, oft politisch instabilen, Ländern zu begeben. (Weitere statistische Daten, speziell zur Kernenergie, werden zu Beginn des Kapitels 6 aufgeführt.)

2 Grundlagen

*Welch triste Epoche, in der es leichter ist,
ein Atom zu zertrümmern, als ein Vorurteil!*

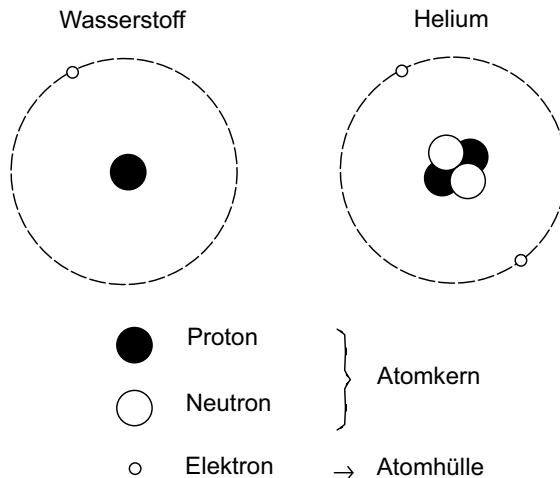
ALBERT EINSTEIN, deutscher Physiker und Nobelpreisträger, 1879–1955

Im Folgenden wird nach der einleitenden Beschreibung des prinzipiellen Atomaufbaus dargestellt, warum es bei der Spaltung eines schweren Atomkerns bzw. bei der Fusion von leichten Atomkernen zur Freisetzung von Energie kommt.

2.1 Aufbau des Atoms

In der Einleitung wurde die Geschichte der Kernenergie dargelegt und u.a. das nach seinem Entdecker NIELS BOHR benannte Atommodell erwähnt. Dieses Modell beschreibt den prinzipiellen Aufbau des Atoms, bei dem der Atomkern im Zentrum von den Elektronen umkreist wird. Allerdings stellen die «Bahnen» der Elektronen keine wirklichen Kreise dar, und nur bildhaft sind Elektronen kleine «Kügelchen», die um den Atomkern kreisen (Bild 2.1). Vielmehr sind Elektronen quantenmechanische Teilchen, für deren Eigenschaften (Impuls, Aufenthaltsort, Energie usw.) lediglich Angaben zur Wahrscheinlichkeitsverteilung gemacht werden können. Die Ansammlung der im Atom gebundenen Elektronen wird daher auch als «Elektronenwolke» bezeichnet.

Bild 2.1
BOHRsches Atommodell



Protonen und Neutronen, die sog. Nukleonen (Kernbausteine), bilden gemeinsam den Atomkern, der von den Elektronen umkreist wird.

Der Durchmesser eines Atoms beträgt ca. 10^{-10} m. Im Vergleich dazu ist der Durchmesser des Atomkerns ca. 100 000-mal kleiner. Trotz seiner winzigen Abmessungen ist fast die gesamte Masse des Atoms im Kern gebündelt – die Dichte im Atomkern beträgt ca. 10^{17} kg/m³. Die Masse der Protonen und der Neutronen ist annähernd gleich und mit rund $1,67 \cdot 10^{-27}$ kg ca. 1837-mal größer als die des Elektrons.

Neben der Masse ist auch die elektrische Ladung ein Unterscheidungskriterium der Bausteine eines Atoms. Während das Neutron elektrisch neutral ist, ist das Proton elektrisch positiv und das Elektron elektrisch negativ geladen. Ein Atom mit der gleichen Anzahl von Protonen und Elektronen ist gegenüber seiner Umwelt elektrisch neutral. Ist die Anzahl der Elektronen und der Protonen nicht identisch, handelt es sich, je nachdem, welche Ladung überwiegt, um ein positives oder negatives Ion. Da die absoluten Massen der Nukleonen sehr klein sind, wird in der Kernphysik bzw. der Chemie meistens mit der Anzahl der in einem Kern befindlichen Bausteine gerechnet. Die Elemente werden daher nach einem Schema, das in Bild 2.2 wiedergegeben ist, gekennzeichnet.

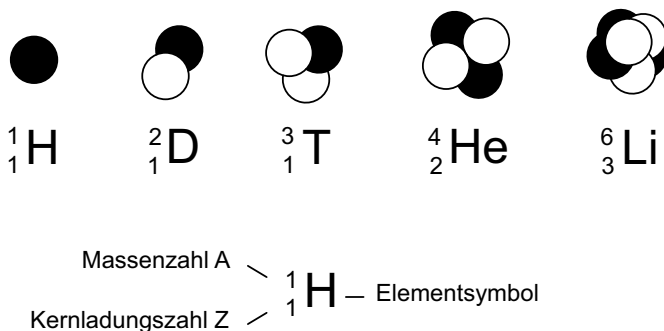


Bild 2.2 Schematischer Aufbau und Kennzeichnung der Atomkerne am Beispiel der ersten stabilen Nuklide des Periodensystems

Die Zahl links unten am Symbol ist die sog. Kernladungszahl Z. Dies ist die Anzahl der im Kern enthaltenen Ladungen, also der Protonen. Die obere Zahl wird als Massenzahl A bezeichnet. Sie gibt an, wie viele Nukleonen insgesamt im Kern enthalten sind. Die Neutronenzahl erhält man aus der Differenz von Massenzahl und Kernladungszahl. Diese Schreibweise ist nützlich, um z.B. bei der Betrachtung radioaktiver Zerfälle oder Kernspaltungsprozesse die Veränderung von Atomkernen mittels Kernreaktionsgleichungen beschreiben zu können. Auch die Atombausteine selbst lassen sich in dieser Schreibweise angeben (s. Tabelle 2.1).

Tabelle 2.1 Kennzeichnung der Atombausteine

Proton	Neutron	Elektron
${}^1_1\text{p}$	${}^1_0\text{n}$	${}^{-1}_{-1}\text{e}$

Die Kernladungszahl (Anzahl der Protonen) ist das einzige Kriterium nach dem Atome in das Periodensystem der chemischen Elemente (s. Bild 2.3) eingeordnet werden. Sie wird daher auch Ordnungszahl genannt. Im Gegensatz zum Begriff des Elements ist das «Nuklid» durch die Protonen- und Neutronenzahl charakterisiert. Es gibt Nuklide mit derselben Kernladungszahl, die jedoch eine unterschiedliche Neutronenzahl aufweisen. Deuterium beispielsweise ist ein Wasserstoffelement, da es nur 1 Proton im Kern hat. Es unterscheidet sich jedoch vom herkömmlichen Wasserstoff durch das zusätzliche, im Kern vorhandene Neutron. Nuklide mit der gleichen Anzahl an Protonen, jedoch mit unterschiedlicher Anzahl an Neutronen, nennt man Isotope. Sie weisen zwar die gleichen chemischen Eigenschaften auf, können sich jedoch in ihren kernphysikalischen Eigenschaften deutlich voneinander unterscheiden (s. Abschnitt 3.1).

Anmerkung

Neben dem Begriff des Isotops (Nuklide mit der gleichen Anzahl an Protonen, aber unterschiedlicher Anzahl von Neutronen) hat man noch zwei weitere Bezeichnungen für Kerne mit gleichen Eigenschaften eingeführt. Zum einen werden Kerne mit gleicher Neutronenzahl Isotone, zum anderen Kerne mit gleicher Massenzahl Isobare genannt. In der Darstellungsform als Nuklidkarte (Abschnitt 3.1.2) liegen Isotope auf waagrecht en Linien, Isotone auf senkrechten Linien und Isobare auf diagonalen Geraden mit der Steigung -1 .

Beim Wasserstoff hat man die beiden Isotope ${}^2\text{H}$ und ${}^3\text{H}$ mit speziellen Namen versehen – Deuterium und Tritium.

Die Elemente unterscheiden sich chemisch in der Anzahl ihrer Elektronen (dadurch ist für elektrisch neutrale Atome auch die Anzahl der Protonen, also das Element selbst, festgelegt). Nach diesem Kriterium in Reihenfolge geordnet und nach ihren chemischen Eigenschaften gruppiert, sind sie im Periodensystem der Elemente zusammengefasst (s. Bild 2.3).

Anmerkung

Während Elektronen bei allen chemischen Reaktionen ausschlaggebend sind, spielen sie bei Reaktionen, die im Atomkern stattfinden, quasi keine Rolle (vgl. Abschnitt 3.1).

Periodensystem der Elemente

VIII

I		II		III										IV										V										VI										VII										VIII																																																																																																																									
H Wasserstoff		He Helium		Li Lithium		Be Beryllium		B Bor		C Kohlenstoff		N Stickstoff		O Sauerstoff		F Fluor		Ne Neon		Na Natrium		Mg Magnesium		Al Aluminium		Si Silizium		P Phosphor		S Schwefel		Cl Chlor		Ar Argon		K Kalium		Ca Calcium		Sc Scandium		Ti Titan		V Vanadium		Cr Chrom		Mn Mangan		Fe Eisen		Co Cobalt		Ni Nickel		Cu Kupfer		Zn Zink		Ga Gallium		Ge Germanium		As Arsen		Se Selen		Br Brom		Kr Krypton		Rb Rubidium		Sr Strontium		Y Yttrium		Zr Zirkon		Nb Niob		Mo Molybdän		Tc Technetium		Ru Ruthenium		Rh Rhenium		Pd Palladium		Ag Silber		Cd Cadmium		In Indium		Sn Zinn		Sb Antimon		Te Tellur		I Jod		Xe Xenon		Ba Barium		La Lanthanum		Ce Cerium		Pr Praseodym		Nd Neodym		Pm Promethium		Sm Samarium		Eu Europium		Gd Gadolinium		Tb Terbium		Dy Dysprosium		Ho Holmium		Er Erbium		Tm Thulium		Yb Ytterbium		Lu Lutetium		Cs Cäsium		Fr Francium		Ra Radium		Ac Actinium		Th Thorium		Pa Protactinium		U Uran		Np Neptunium		Pu Plutonium		Am Americium		Cm Curium		Bk Berkelium		Cf Californium		Es Einsteinium		Fm Fermium		Md Mendelevium		No Nobelium		Lr Lawrencium	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109																																																																			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109																																																																			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109																																																																			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109																																																																			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109																																																																			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109																																																																			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109																																																																			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109																																																																			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109																																																																			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109																																																																			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109																																																																			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109																																																																			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37																																																																																																																																											