

Netzanforderungen an fortschrittliche Kraftwerkskonzepte: Beispiel Kernfusion

T. Hamacher, IPP Garching, T. Haase, H. Weber, Universität Rostock

D. Ward, EURATOM/UKAEA Abingdon, Oxfordshire

1. Einleitung

Die Fusion, die Energiequelle der Sonne und anderer Sterne, verspricht eine der Ecksteine in einer zukünftigen, nachhaltigen Energieversorgung zu werden. Der nächste große Schritt der Fusionsforschung ist der Bau des ITER Experimentes. ITER wird die prinzipielle Machbarkeit der Fusion unter Beweis stellen können. Mit der Erfahrung bei Bau und Betrieb von ITER wird es möglich werden, erste Demonstrationskraftwerke zu planen und zu bauen.

Bild 1 zeigt eine schematische Zeichnung des ITER Experimentes [1]. Auch wenn damit

noch ein weiter Weg bis zum Bau eines

Fusionskraftwerkes zurückgelegt werden

muss, sollen schon heute die Rahmenbeding-

ungen einer zukünftigen Energiewirtschaft

Eingang in die Entwicklung der

Fusionstechnologie finden. Die Leistungsregel-

ung und Steuerung wird in der Zukunft

eine ganz besondere Bedeutung erhalten.

Viele Experten erwarten eine deutliche

Zunahme an Wind- und Sonnenkraftwerken

[2, 3]. Durch die zeitlich Fluktuation des

Energiedargebots können diese Techniken

nur durch zusätzlichen Aufwand – wie zum

Beispiel Speicher – Leistung garantieren.

Sollten Fusionskraftwerke in einem be-

stimmten Bereich regelfähig sein, dann

könnten sie im Verbund mit diesen Kraft-

werken die Fluktuationen ausgleichen.

Während diese Aufgabe vorerst von Kohle-

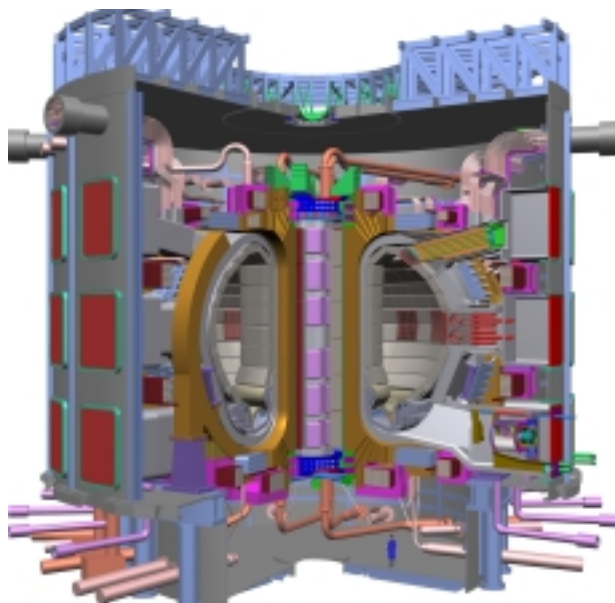


Bild 1: Schematische Darstellung des ITER Experimentes. ITER ist eine internationale Kooperation zwischen Japan, russischer Föderation, der Europäischen Union und bald auch wieder den USA, die zwischenzeitlich das Projekt verlassen hatten.

und Gaskraftwerken übernommen werden kann, müssen in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts zunehmend die fossilen Kraftwerke ersetzt werden.

Fossile Energieträger werden zunehmend aus der Strom- bzw. aus der Energiewirtschaft allgemein verdrängt werden. Die Schwere dieser Aufgabe wird deutlich, wenn man bedenkt, dass heute fast 90 % der globalen Primärenergie aus fossilen Energieträgern gedeckt wird und der Anteil fossiler Energien bei der Stromproduktion mehr als 60 % beträgt [4].

In diesem Beitrag soll untersucht werden, welche Rolle die Fusion in einer zukünftigen Energiewirtschaft unter regelungstechnischen Gesichtspunkten spielen kann. Vorab wird die Fusion kurz vorgestellt und ihre Prinzipien werden erläutert, dann wird daraus abgeleitet, welches Regelverhalten die Fusion erwarten lassen wird. Im letzten Teil wird modellhaft ein Fusionskraftwerk in einem Netz mit Photovoltaik- und Windkraftanlagen sowie einem Wasser- und GuD-Kraftwerk untersucht. Die Aufgabe dieses Beitrages ist es nicht, die mögliche Rolle der Fusion in zukünftigen Stromnetzen abschließend zu diskutieren, sondern es soll Anstöße für weitere Untersuchungen in dieser Richtung geben.

2. Fusion – eine Option für die Zukunft

2.1 Was ist Fusion

Wenn sich zwei leichte Atomkerne dicht aneinander annähern, dann kommt es mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit zu einer Fusionsreaktion [5]. Bild 2 zeigt die Verschmelzung von Deuterium und Tritium – bzw. von schwerem und überschwerem Wasserstoff – zu einem Heliumkern (α -Teilchen) und einem Neutron. Bei diesem Prozess wird Energie in Form der Bewegungsenergie der Reaktionsprodukte, des Heliumkerns und des Neutrons, gewonnen. Gleichzeitig geht Masse verloren: die Gesamtmasse der Reaktionsprodukte ist niedriger als die Massensumme der Ausgangsteilchen. Dabei liegt der Energiegewinn im Vergleich zu

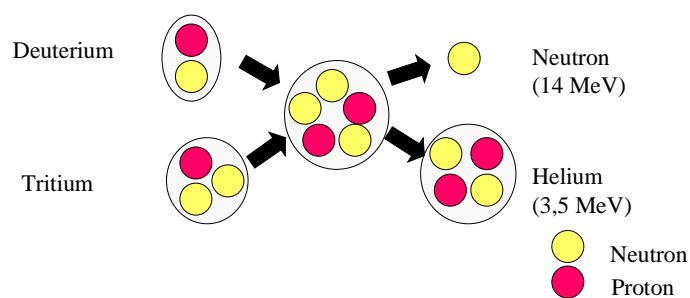


Bild 2: Bei der Verschmelzung leichter Atomkerne kommt es zur Bildung eines neuen Kerns und einer erheblichen Freisetzung von Energie.

einer normalen Kohlenstoffverbrennung um mehr als sechs Größenordnungen höher. Im Prinzip könnten viele Kerne als Brennstoff in einem Fusionskraftwerk dienen; die Reaktion von Deuterium und Tritium besitzt jedoch die höchste Reaktionswahrscheinlichkeit bei vergleichsweise niedriger Temperatur.

Fusionsreaktionen treten in heißen ionisierten Gasen auf, sogenannten

Plasmen. Durch Aufheizen des Plasma erreichen die Teilchen ausreichende kinetische Energie, um die zwischen ihnen wirkenden elektromagnetischen Abstoßungskräfte zu überwinden. Dabei hängt die Anzahl der ausgelösten Fusionsreaktionen von der Temperatur und der Dichte des Plasmas ab. In einem späteren Kraftwerk muss die erzeugte Fusionsenergie deutlich höher sein als die Energie, die verbraucht wird, um das Plasma zu erzeugen und aufzuheizen. Dieses Verhältnis aus erzeugter zu aufgewandter Energie – die Energieverstärkung – wird auch Q-Wert genannt. Zu Anfang wird das Plasma durch verschiedene externe Quellen, zum Beispiel Mikrowellen, geheizt. Mit steigender Temperatur wächst die Zahl der ausgelösten Fusionsreaktionen und mittels der Bewegungsenergie der erzeugten Heliumkerne heizt sich das Plasma nun in wachsendem Maße von innen. Wird schließlich keine äußere Heizung mehr benötigt, d.h. wird der Q-Wert unendlich, ist die „Zündung“ erreicht. In der Praxis werden Kraftwerke jedoch bei Q-Werten zwischen 20 und 40 betrieben werden.

Zum Zünden des Plasmas sind Temperaturen von 100 bis 200 Millionen Grad erforderlich. Auf den ersten Blick könnte man meinen, dass mit solchen Temperaturen für das einschließende Gefäß unüberwindbare Materialprobleme verbunden seien. Da aber alle Plasmateilchen eine elektrische Ladung tragen, können sie „berührungsfrei“ durch ein Magnetfeld beeinflusst und eingeschlossen werden. Da die geladenen Teilchen um die magnetischen Feldlinien kreisen, sind hierfür in sich geschlossene, d.h. ringförmige magnetische Käfige geeignet. Tatsächlich sind die Verhältnisse etwas komplizierter: die magnetischen Feldlinien müssen nicht nur einen Torus formen, sie brauchen auch noch eine schraubenförmige, d.h. helikale Verdrehung.

Unter den zahlreichen Vorschlägen, ringförmige Magnetkäfige mit helikaler Verdrillung der Feldlinien zu erzeugen hat sich der Tokamak am erfolgreichsten erwiesen, der zuerst in Russland verwirklicht wurde [6]. Der magnetische Käfig entsteht hier aus der Überlagerung des toroidalen Feldes, das durch äußere Spulen erzeugt wird, und dem magnetischen Feld, das von dem Plasmastrom erzeugt wird. Dieser Strom wiederum wird durch eine im Zentrum des Torus stehende Spule im Plasma „induziert“ (siehe Bild 3): Solange

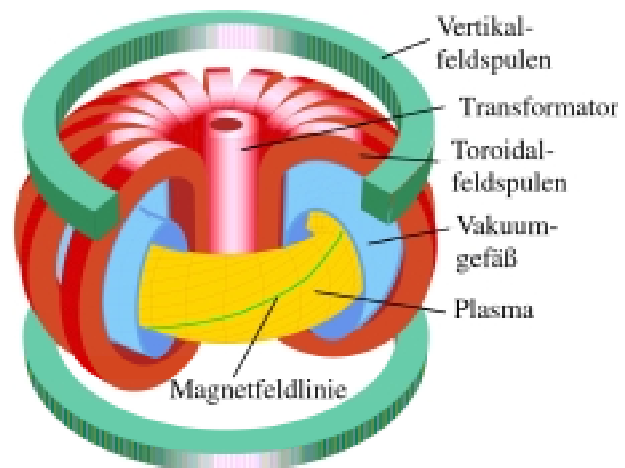


Bild 3: Der Tokamak ist die erfolgreichste Magnetfeldkonfiguration zum Einschluss heißer Plasmen. Das Magnetfeld wird durch äußere Spulen und einen Strom im Plasma erzeugt.

der Strom in dieser Spule erhöht wird, wird ein ansteigendes Magnetfeld erzeugt, was wiederum eine Spannung im Plasma hervorruft. Diese Spannung kann aber nur für eine begrenzte Zeit aufrecht erhalten werden – höchstens ein bis zwei Stunden. Da Grundlastkraftwerke jedoch kontinuierlich Strom erzeugen sollten, werden für den Stromtrieb im Plasma Alternativen – Stromtrieb mit Hilfe von Mikrowellenheizungen oder Teilcheninjektoren – untersucht oder aber Einschlusskonzepte wie der Stellerator weiterentwickelt (siehe unten), der keinen Plasmapstrom benötigt.

2.2 Aufbau eines Fusionskraftwerkes

Die konventionellen Teile eines Fusionskraftwerks wie Dampferzeuger, Turbine und Generator unterscheiden sich nicht wesentlich von ähnlichen Komponenten in Kohle- oder Kernkraftwerken. Der Kern eines Fusionskraftwerks ist schalenförmig wie eine Zwiebel aufgebaut: Das Plasma im Zentrum ist umgeben von der ersten Wand, dem Blanket und dem Vakuumgefäß, auf das die Magnetfeldspulen aufgefädelt sind. Wegen der bei tiefen Temperaturen arbeitenden supraleitenden Magnete wird der gesamte Kern in einem Kryostaten eingeschlossen [7].

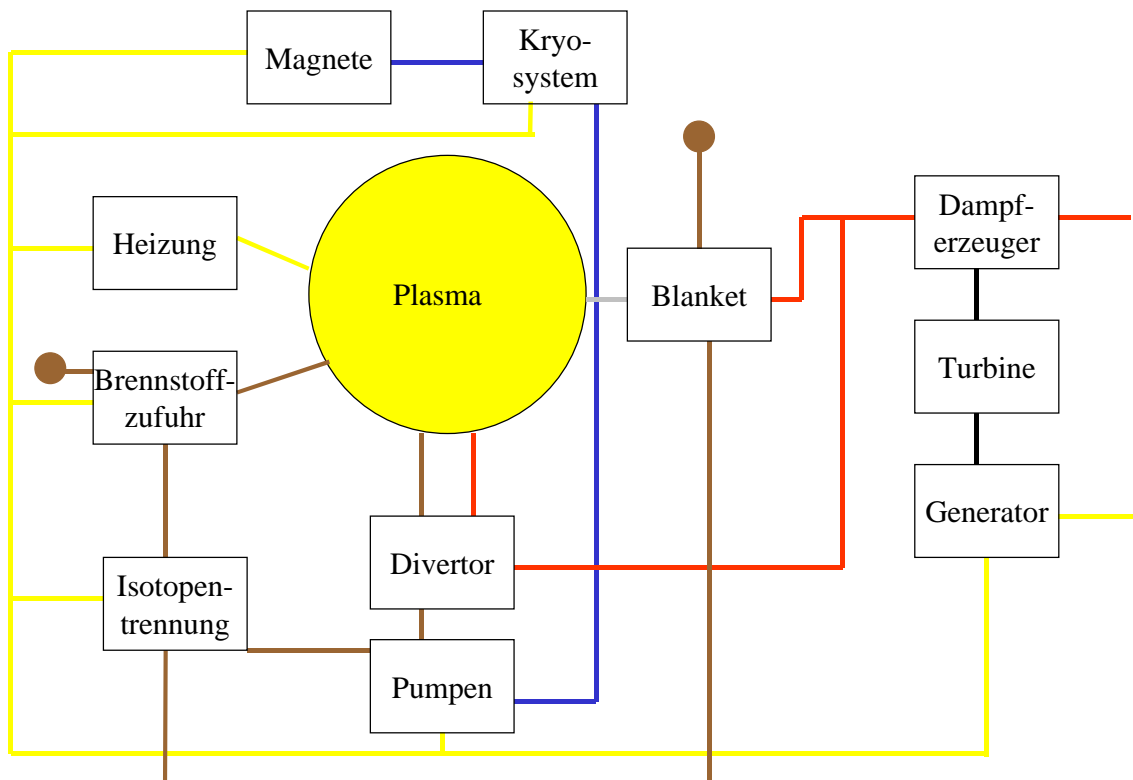


Bild 4: Energie- und Materialflüsse: Elektrizität gelb, Brennstoff braun, Wärme rot, Neutronen grau und mechanische Energie schwarz

Der Brennstoff – Deuterium und Tritium – wird in Form gefrorener Kügelchen tief in das Plasma hinein geschossen. Die bei der Fusion entstehenden Neutronen verlassen das Plasma ungehindert und werden im sogenannten Blanket, der inneren Verkleidung der Gefäßwand, abgebremst. Dort geben sie ihre gesamte kinetische Energie in Form von Wärme ab. Im Blanket erzeugen die Neutronen zudem aus Lithium den Brennstoffbestandteil Tritium, das mit Hilfe eines Spülgases – voraussichtlich Helium – aus dem Blanket transportiert und dem Brennstoffkreislauf zugeführt wird. Die „Asche“ der Fusionsreaktion – das Helium – wird durch den Divertor abgeführt. Da nur ein kleiner Teil des Brennstoffs verbrannt wird, befindet sich auch ein großer Anteil an Deuterium und Tritium im Abgas, das entsprechend rezykliert wird.

Die Wärme, die in Blanket und Divertor erzeugt wird, wird durch ein Kühlmittel – Helium oder Wasser – zum Dampferzeuger transportiert, um Strom zu erzeugen, der dann an das Netz abgegeben wird. Ausgenommen hiervon ist der kleine Anteil, den das Kraftwerk selbst verbraucht, hauptsächlich im Kryosystem zur Abkühlung von Helium, für die Magneten, den Stromtrieb und die Plasmaheizung. Eine schematische Zeichnung der Energie- und Materialflüsse im Fusionskraftwerk sind in Bild 4 gezeigt.

2.3 Leistungsregelung des Plasmas

Die Leistung eines Fusionskraftwerkes kann über Veränderungen von Dichte, Temperatur oder Zusammensetzung des Plasma beeinflusst werden. Die Leistung eines Fusionskraftwerkes lässt sich wie folgt beschreiben [8]:

$$P_{fus} = \alpha \cdot (1 - \alpha) \cdot n_i^2 \cdot f(T) \cdot E_{fus} \quad (1)$$

Dabei ist E_{fus} die Energie, die bei einer Fusionsreaktion frei wird, n_i die Dichte der Ionen und α das Verhältnis von Deuterium zu Tritium im Plasma. Darüber hinaus gibt es noch eine Abhängigkeit der Fusionsleistung von der Plasmatemperatur $f(T)$. Die Abhängigkeit von der Temperatur ergibt sich aus der Überlagerung zweier Effekte. Mit steigender Temperatur verändert sich die Geschwindigkeitsverteilung der Brennstoffteilchen hin zu höheren Geschwindigkeiten. Die Wahrscheinlichkeit einer Fusionsreaktion hängt wiederum von der Relativgeschwindigkeit der beiden Brennstoffkerne ab.

Die mögliche Geschwindigkeit der Leistungsänderungen hängt vorab von den typischen Zeitskalen im Plasma ab. Diese Zeitskalen sind die mittlere Aufenthaltszeit eines Teilchens im Plasma und die Energieeinschlusszeit. Beide Skalen liegen auf der Sekundenebene,

Veränderungen der Dichte und der Zusammensetzung des Plasmas können also im Bereich von Sekunden ausgeführt werden.

2.4 Zeitverhalten der Wärmeauskopplung

Die Reaktion des Plasmas auf Leistungsänderungen erfolgt in einem Zeitraum von weniger als einer Minute. Bleibt die Frage, welche Zeitkonstanten Blanket und Divertor haben. Die Fusionsenergie wird zum überwiegenden Teil in kinetische Energie der Heliumkerne und Neutronen umgewandelt. Die Neutronen verlassen den Magnetfeldkäfig und fliegen in das Blanket. Die Heliumkerne heizen erst das Plasma auf, die Wärme wird über den Divertor abgeführt. Das Verhältnis der Energie ist vier zu eins. Vier Teile werden über das Blanket und ein Teil über den Divertor abgeführt. Der Energietransport durch das Blanket erfolgt mit einiger Zeitverzögerung, zum einen, weil auch durch nukleare Zerfälle Wärme produziert wird, zum anderen, weil das Blanket eine erhebliche Wärmekapazität hat. Jede Veränderung des Leistungsflusses macht sich deswegen erst nach einiger Zeit bemerkbar. Im Blanket selber kommt es durch die nuklearen Reaktionen darüber hinaus zu einer festen „Energieverstärkung“ von 1,2.

Veränderungen des Leistungsflusses durch das Blanket können durch eine Veränderung der Kühlmitteltemperatur oder durch eine Veränderung des Kühlmittelflusses ausgeglichen werden. In Blankets mit erzwungener Konvektion und turbulentem Kühlmittelfluss wird der Wärmeübergang allein durch eine Funktion der Reynoldszahl bestimmt, damit ist er proportional zur Fließgeschwindigkeit. Wird diese bei einer Leistungsänderung proportional zur Änderung erhöht oder abgesenkt, dann bleibt die Temperatur des Kühlmittels gleich [8].

Das Blanket wird wie folgt modelliert, wobei für f eine Exponentialfunktion angenommen wird.

$$P_{out}(t) = \int_0^t m \cdot P_{in}(\tau) f(t - \tau) d\tau \quad (2)$$

In einem nächsten Schritt soll f durch ein verfeinertes thermodynamisches Modell des Blankets beschrieben werden.

3 Das Regelverhalten des Fusionskraftwerkes

3.1 Regelungstechnisches Modell des Fusionskraftwerkes

Das Netzberechnungsprogramm DlgSILENT PowerFactory ist ein Entwicklungstool zur Analyse von elektrischen Energieversorgungssystemen [9]. Mit Hilfe von DlgSILENT wurde ein vereinfachtes Modell eines Fusionskraftwerkes entworfen. Mit diesem Modell ist man in der Lage, das Verhalten eines möglichen Fusionskraftwerkes im Verbundbetrieb im Minuten- und Stundenbereich zu untersuchen. Regelungstechnisch ist es wie ein fossiles Kraftwerk aufgebaut; mit einem Spannungsregler, einem drehzahlgeführten Leistungsregler und einer Erzeugungseinheit inklusive Generator. Eingangsgröße des Modells, in Bild 5 dargestellt, ist der vom Leistungsregler vorgegebene Ventilquerschnitt und Ausgangsgröße des Modells ist die Turbinenleistung.

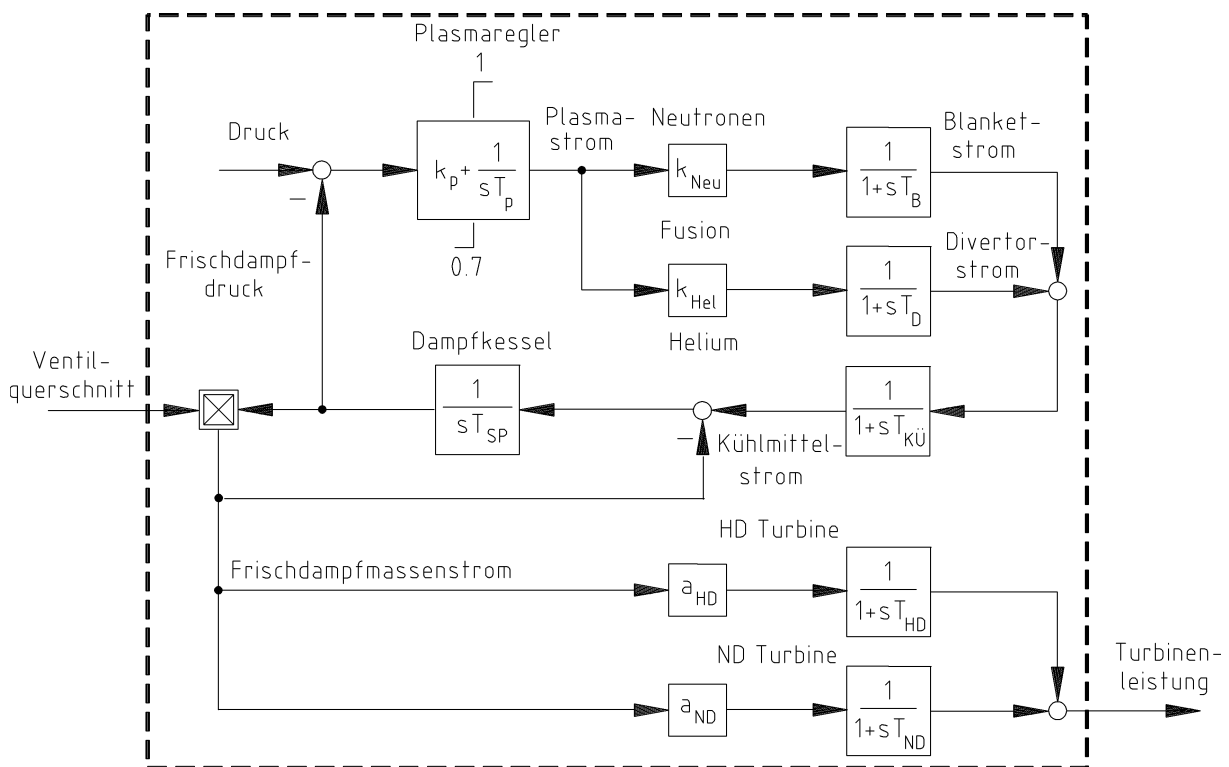


Bild 5: Blockschaltbild des Fusions- und Dampfteils

Die wesentlichen Komponenten des Fusionsteils sind das Plasma, das Blanket und der Divertor. Es wurden Zeitkonstanten für den Plasmaregler von 600 s, für den Divertor von 100 s und für das Blanket von 1000 s unterstellt. Das Modell des Dampfteils ist nur bei schneller Temperaturregelung des Frischdampfes gültig, was aber angenommen wird. Die Zeitkonstanten im Dampfteil liegen für den Dampfkessel bei 60 s sowie für die Hoch- und Niederdruckturbine bei 0,5 s bzw. 10 s.

In einem ersten Schritt wurde untersucht, wie das Fusionskraftwerk auf eine sprunghafte Veränderung der Leistungsnachfrage in einem einfachen Modellnetz, bestehend aus einer Last und dem Kraftwerk reagiert. Die Nachfrage in diesem Netz wurde sprunghaft von 70% auf 75 % der Kraftwerksnennleistung erhöht. In Bild 6 ist das Übergangsverhalten wiedergegeben.

Sicherlich wird das Fusionskraftwerk – zumindest in dieser Kombination – nicht an der Primärregelung teilnehmen können. Das liegt an der großen Zeitkonstante im Blanket, die keine schnellen Leistungsänderungen zulässt. Im Dampfsystem wäre ausreichend Energie gespeichert, aber es würde zu lange dauern bis sich eine Leistungserhöhung im Plasma auch im Dampferzeuger bemerkbar machen würde. Selbstverständlich könnten hier in der Zukunft andere Konzepte angedacht werden. Für die Sekundärregelung ist das Kraftwerk aber geeignet, ein Einsatz im Zeitbereich der Tertiärregelung erscheint aufgrund der o.g. Eigenschaften am sinnvollsten.

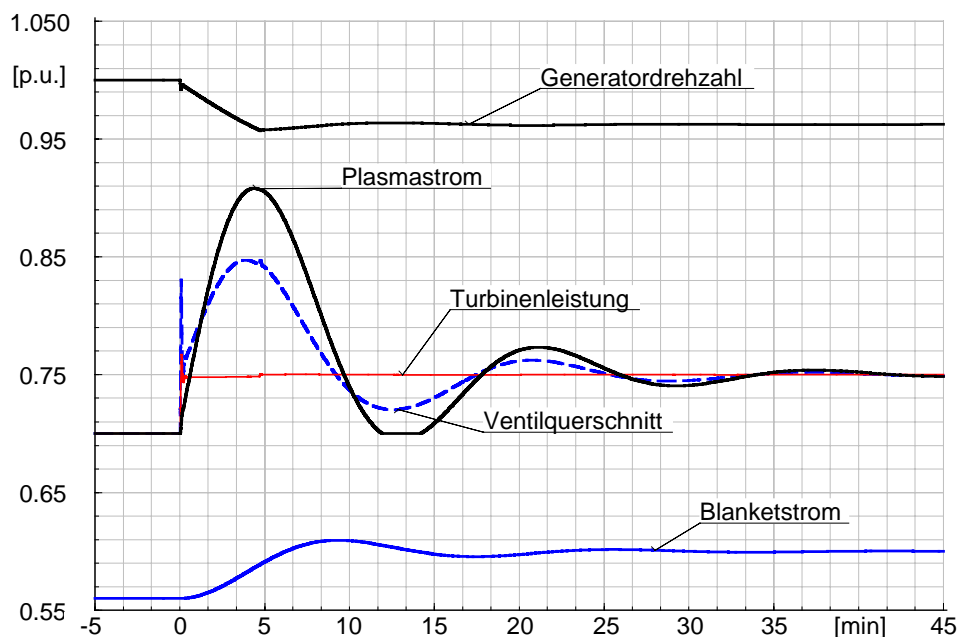


Bild 6: Übergangsverhalten Fusionskraftwerk von 70% auf 75% der Nennleistung

3.2 Anforderungen an eine zum großen Teil aus erneuerbaren Energien bestehende Energiewirtschaft

Viele Studien über die zukünftige Entwicklung des Energiesystems gehen von einer deutlichen Zunahme der erneuerbaren Energietechniken aus. Dabei spielen insbesondere die fluktuierenden Quellen wie Wind und Sonne eine ganz besondere Bedeutung. Um ein Gefühl für die zu erwartenden Veränderungen im System zu bekommen, wurden tatsächliche Zeitreihen von Sonne- und Winddargeboten [10, 11] für die Jahre 1996/97 ausgewertet.

Dabei lagen die Winddaten für die Nord- und Ostsee in sechsständiger und die Sonnendaten für sieben deutsche Großstädte (Hamburg, Berlin, Dresden, Düsseldorf, Frankfurt, Stuttgart, München) in halbstündiger Auflösung vor. Als erste Vereinfachung wurden die Stützpunkte des Windes durch eine Gerade verbunden und auf halbstündige Werte heruntergebrochen. Hierdurch wird sicherlich eine Vereinfachung des Problems vorgenommen, da in einem Zeitraum von sechs Stunden natürlich noch wesentlich größere Veränderungen auftreten können. Diese Analyse wird in einem nächsten Schritt verfeinert werden.

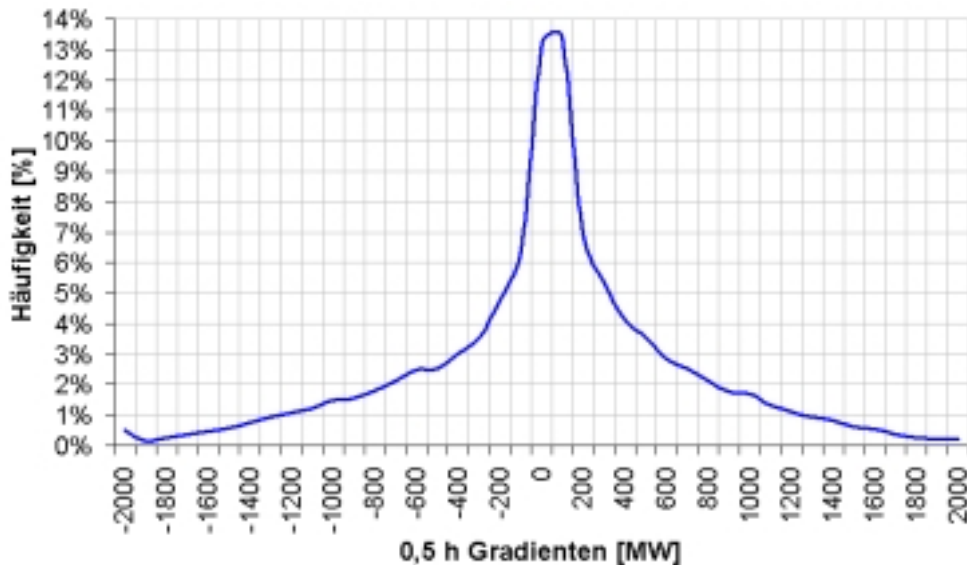


Bild 7: Häufigkeit der auftretenden halbstündigen Leistungsgradienten

Es wurde angenommen, dass in Deutschland insgesamt *21.5 GW Offshore-Wind-Leistung* installiert wären. Grundlage dessen sind die laut Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie in vier Ausbaustufen geplanten Offshore-Projekte in der Nordsee (ca. 18.5 GW) und Ostsee (ca. 3 GW) bis in das Jahr 2030 [12, 13]. Weiterhin wurde angenommen, dass *20 GWp Photovoltaik-Leistung*, die über ganz Deutschland gleich verteilt sind, installiert wären. Für die Untersuchung wurden die Leistungs-Kennlinien existierender Windturbinen (Nordex N 80) bzw. PV-Module (Siemens SM 50) genutzt, um aus Windgeschwindigkeiten bzw. Sonneneinstrahlungsdaten Leistungen auszurechnen. Bei der Berechnung der Leistungen wurden bei den Windparks Abschattungseffekte und Verfügbarkeiten bzw. Temperaturabhängigkeiten und Wirkungsgrade bei den PV-Anlagen berücksichtigt. Bild 7 zeigt eine Häufigkeitsverteilung der dabei aufgetretenen halbstündigen Leistungsgradienten. Eine große Häufung tritt im Bereich von -300 MW bis 300 MW Leistungsgradient pro halbe Stunde auf. Für das Netz ist dieser Bereich unkritisch, weil diese Gradienten auch heute schon durch die Verbraucher auftreten und von der Netzregelung beherrscht werden.

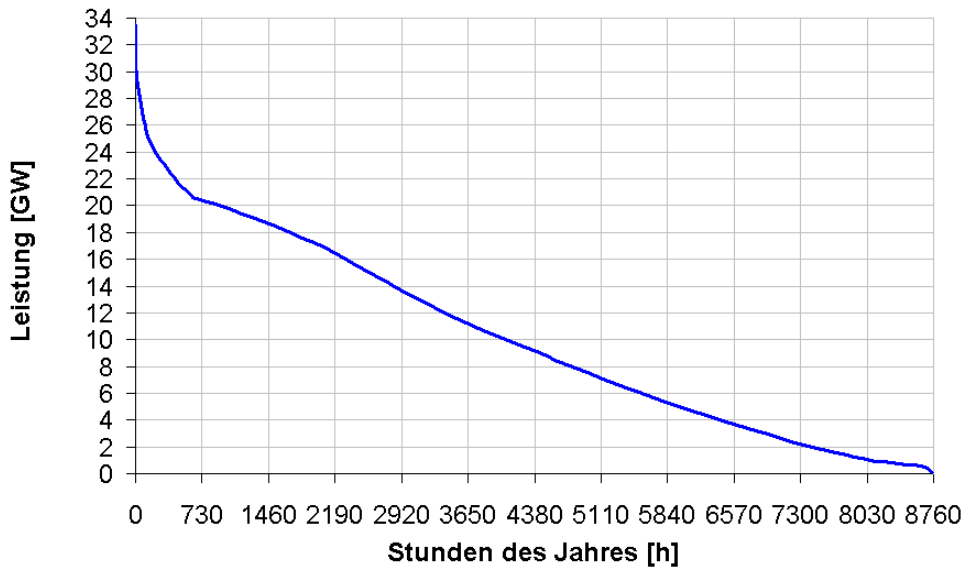


Bild 8: Jahresdauerlinie für das untersuchte System aus Wind- und Sonnenenergie

Problematisch sind die Gradienten, die größer 1000 MW in beide Richtungen auftreten. Ursachen dafür können plötzliche Windflauten, Abschaltungen von ganzen Windparks in Folge von Sturmböen, oder auch das Heraufziehen von Schlechtwetterfronten sein. Als weiteres Ergebnis dieser Betrachtung ist in Bild 8 die Jahresdauerlinie dargestellt – also die maximalen Anteile verfügbarer Leistung aufgetragen gegenüber der Anzahl der Stunden, in denen diese Leistung verfügbar ist. Die durchschnittliche Auslastung der Offshore-Windparks würde ca. 35 % und die der PV-Anlagen etwa 11 % betragen. Die Energieerzeugung aus Sonne und Wind in der o.g. Größenordnung würde ca. 84.6 TWh pro Jahr ergeben. Die Bereitstellung von Regelernergie wird ein großes Problem für die Kraftwerks- und Netzbetreiber sein, da sie unabhängig vom Lastzustand vorgehalten werden muss. Sie ist nicht nur mehr von der Lastprognose, sondern auch von der Wind- und Wetterprognose abhängig. Heutige Prognosen können den Wind für den Folgetag etwa mit 90 % Genauigkeit vorhersagen. Das ist ein guter Ansatz für die kurz- und mittelfristige Kraftwerkseinsatzplanung.

3.3 Ökonomische Überlegungen

An dieser Stelle sollen einige Anmerkungen zu ökonomischen Aspekten gemacht werden. Als Ausgangspunkt dient ein kleines ökonomisches Modell der Kraftwerkseinsatzplanung. Dabei werden die Investitionskosten der Kraftwerke nicht weiter berücksichtigt. Der Kraftwerkspark besteht aus einem GuD-Kraftwerk, einem Wasserkraftwerk und einem Fusionskraftwerk. Die Wirkungsgrade der Kraftwerke wurden mit $\eta_{\text{GuD}} = 0.58$, $\eta_{\text{Was}} = 0.73$ und $\eta_{\text{Fus}} = 0.35$ berücksichtigt. Gesucht wird nach der ökonomischen Fahrweise. Hierbei wird

eine einfache Optimierung zum Einsatz gebracht. Die Kosten ergeben sich aus den Brennstoffkosten $E_{t,j}$. Hier könnten im Prinzip andere variable Kosten hinzu addiert werden. Es werden die Kosten über alle Technologien 1 ... j und alle Zeitschritte $t_0 \dots t_{\text{end}}$ aufsummiert.

$$\text{Kosten} = \sum_{t=t_0}^{t_{\text{end}}} \sum_{j=1}^n E_{t,j} s_j \quad (3)$$

Die Fahrweise, bei der die Gesamtkosten minimal sind, wird dann ausgewählt. Folgende Nebenbedingungen müssen erfüllt sein: Die Stromnachfrage muss gedeckt sein und bestimmte Emissionswerte dürfen nicht überschritten werden. Weiterhin kann ein Kraftwerk nur soviel Leistung abgeben, wie an installierter Leistung vorhanden ist.

$$\sum_{j=1}^n E_{t,j} \eta_j > D_j \quad (4)$$

$$\sum_{t=t_0}^{t_{\text{end}}} \sum_{j=1}^n E_{t,j} * emi_j < \text{Emissionsgrenze} \quad (5)$$

$$\forall_t E_{t,j} \eta_j < P_j \quad (6)$$

Der Einsatz der Kraftwerke geschieht demnach allein nach den variablen Kosten. Dabei wird zur Vereinfachung angenommen, dass die variablen Kosten von Wind und Sonne nahe Null sind, die Fusion etwas höhere Kosten hat, Gas etwa 50% höhere Kosten als die Fusion aufweist und Wasser aufgrund der teuren Regelernergie die höchsten variablen Kosten besitzt. Tatsächlich werden die Stromgestehungskosten eines Fusionskraftwerkes im Teillastbetrieb höher sein als bei Vollast. Ist die Absenkung der Leistung des Fusionskraftwerkes nicht mehr als 30 % der Nennleistung, dann sind die Kosten etwa um 10 % höher [14]. Das liegt zum einen daran, dass das Verhältnis aus abgegebener Energie und Eigenverbrauch (oben als Q definiert) sinkt, und zum anderen, dass die Kapitalkosten erst über einen längeren Zeitraum amortisiert werden. Allerdings müssten Blanket und Divertor weniger häufig ausgetauscht werden, was wiederum Kosten spart. Insofern ist das obige ökonomische Modell sehr stark vereinfacht.

3.4 Fusion im Verbundnetzbetrieb

Das Fusionskraftwerk wurde in ein fiktives Netz mit einem GuD-Kraftwerk, einem Wasserkraftwerk, sowie Windturbinen und Photovoltaikanlagen eingesetzt. Dieses Netz soll eine in die Zukunft gewandte Energieversorgung mit wenig CO₂-Emissionen repräsentieren. Für die Verbraucher wurden typische Tagesgänge für Sommer und Winter hinterlegt. Für die Windturbinen und die PV-Anlagen wurden aus den o.g. Zeitreihen typische Verläufe sowie Verläufe mit maximal auftretenden Leistungsgradienten für einen Sommer- und Wintertag

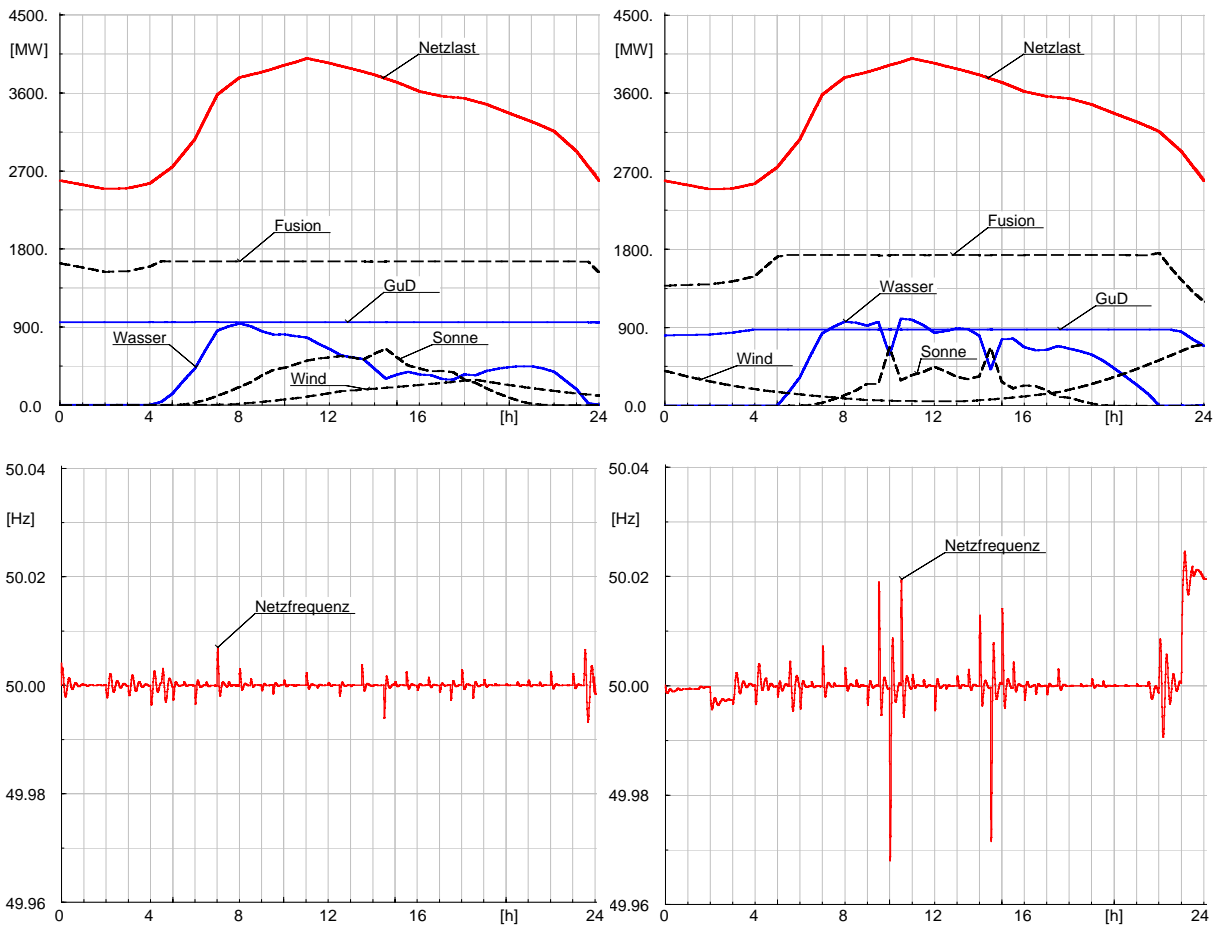


Bild 9: Simulation Sommer Typ Tag

Bild 10: Simulation Sommer Extrem Tag

herausgesucht. Die Einspeiseleistung aus den regenerativen Quellen entspricht in etwa dem, was bei o.g. Installation im deutschen Netz zu erwarten wäre. An der Primärregelung nehmen das GuD- und das Wasserkraftwerk teil. Die Sekundärregelleistung wurde aus den erwarteten Leistungsspitzen von Wind- und PV-Einspeisung dimensioniert und auf das Fusions- und Wasserkraftwerk aufgeteilt. Als weitere Nebenbedingung gilt, dass das Fusionskraftwerk nicht weniger als 70 % und das GuD-Kraftwerk nicht weniger als 40 % der Nennleistung fahren darf. Die Kraftwerkseinsatzplanung wurde mit dem ökonomischen Modell bestimmt. Die Simulationsergebnisse sind in den Bildern 9, 10, 11, 12 dargestellt. Daraus kann abgeleitet werden, dass das Fusionskraftwerk sinnvoll an der Netzregelung, insbesondere am tages- und jahreszeitlichen Ausgleich teilnehmen kann. Die Aufgabe des Wasserkraftwerkes liegt vorwiegend in der Ausregelung der fluktuierenden Einspeisung aus Sonne und Wind. Bei gut vorhergesagten Verläufen von Wind- und Sonneneinspeisung ist die Frequenzkonstanz im Netz gewährleistet. In Extremsituationen, besonders bei Abschaltungen von Windparks aufgrund von Sturmböen könnte das Netz in einen kritischen Zustand geraten.

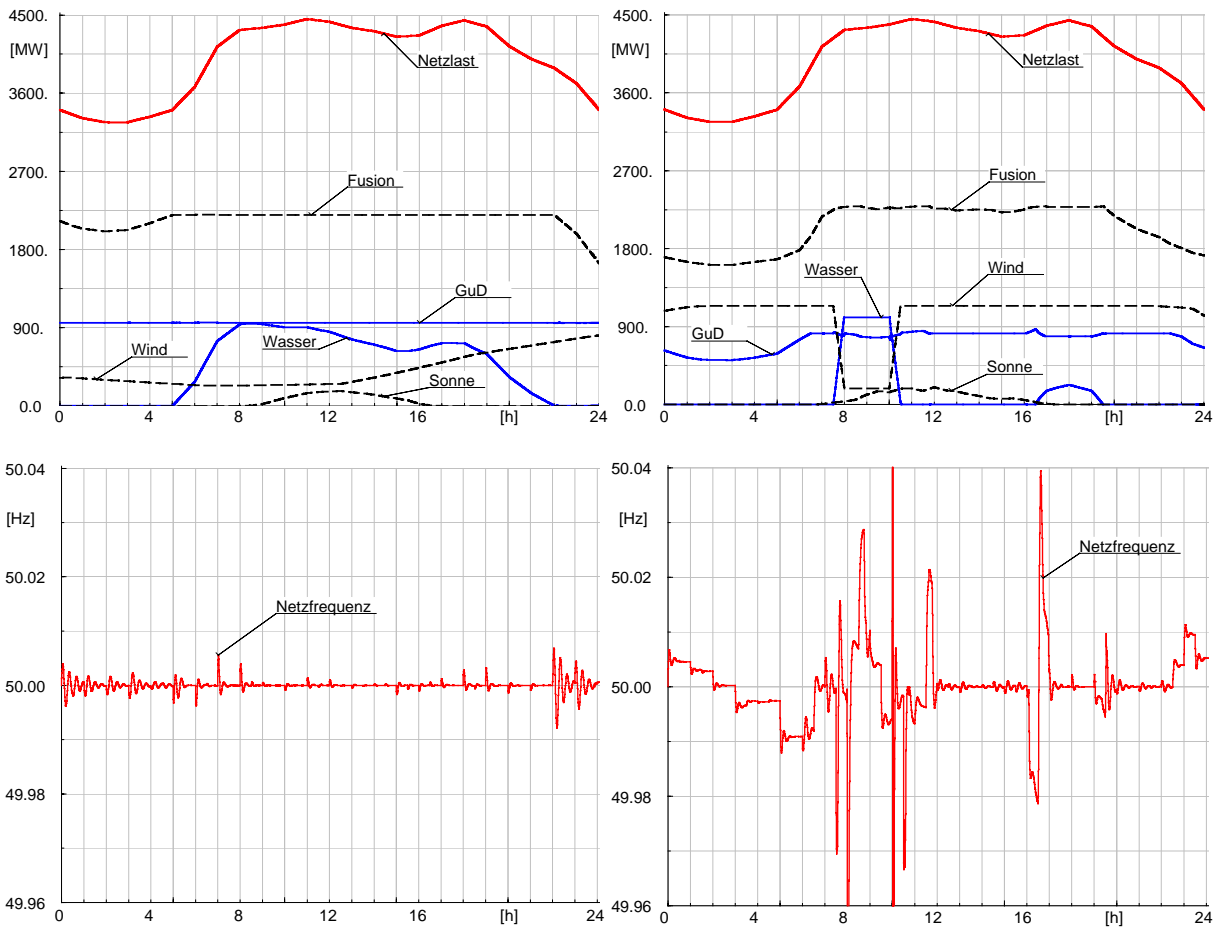


Bild 11: Simulation Winter Typ Tag

Bild 12: Simulation Winter Extrem Tag

4 Zusammenfassung und Ausblick

Anhand eines vereinfachten Modells eines Fusionskraftwerkes wurde dessen Regelfähigkeit untersucht. Aufgrund der großen Zeitkonstante im Blanket ist das Fusionskraftwerk nicht primärregelfähig. Eine Teilnahme an der Sekundär- und Tertiärregelung ist aber möglich und notwendig, um die fluktuierenden Leistungsanteile aus Sonnen- und Windeinspeisung tages- und jahreszeitlich zu kompensieren. Neben den Fusionskraftwerken sind in einer zukünftigen Energieversorgungslandschaft weitere Regelkapazitäten notwendig. Die Primärregelleistung, welche die Frequenzkonstanz des Netzes gewährleisten muss, kann durch schnelle Wasserkraftwerke und moderne GuD-Kraftwerke zur Verfügung gestellt werden. Die Sekundärregelleistung kann neben den Fusionskraftwerken durch Wasserkraft- und Pumpspeicherkraftwerke sowie durch andere zukünftige Speichermedien (z.B. Wasserstoff) bereitgestellt werden.

In einem nächsten Schritt wird in Zusammenarbeit mit Experten aus der Fusionsforschung ein detaillierteres Modell eines Fusionskraftwerkes erstellt werden, womit dann die Aussagen zum Regelverhalten präzisiert werden sollen.

5 Literatur

- [1] ITER-FEAT outline design report, in: Technical Basis for the ITER-FEAT Outline Design ITER EDA Documentation No. 19, IAEA, www.iter.org
- [2] Nakicenovic et al. Global Energy Perspectives, IIASA 1998
- [3] Energy Needs, Choices and Possibilities: Scenarios to 2050, Global Business Environment, Shell International Limited, London 2001
- [4] BP statistical review of world energy 2002, www.bpamaco.com
- [5] Hamacher, T.; Bradshaw, A. M.: Fusion as a future power source. Recent achievements and prospects, in: Proceedings of the 18th World Energy Congress, Buenos Aires 2001. World Energy Council (Hrsg.), London 2002, 01-06-06
Kernfusion, Berichte aus der Forschung, Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (Hrsg.), Garching-Greifswald, 2002
- [6] Artsimovich L. A. "Tokamak devices", Nucl. Fus., 12, 2 (1972) 215
- [7] J. Raeder et al.
Kontrollierte Kernfusion: Grundlagen zur ihrer Nutzung für die Energieversorgung, Stuttgart, Teubner, 1981
- [8] Malang: private Mitteilung
- [9] DIgSILENT GmbH, Gomaringen, Deutschland, www.digsilent.de
- [10] World-Wind-Atlas:
Sander + Partner GmbH, Schweiz, www.sander-partner.ch
- [11] Satel-Light:
The European Database of Daylight and Solar Radiation, www.satel-light.com
- [12] Strategie der Bundesregierung zur Windenergienutzung auf See
Berlin, 1/2002
- [13] Sonne Wind & Wärme:
Offshore-Projekte in Nord- und Ostsee, 7/2002
- [14] Ward, D, Operation of a fusion power plant at reduced power,
SERF3/UKAEA/DFCA1.1, UKAEA, Abingdon, 2002