

Anlagenzustände des Fusionsexperiments Wendelstein 7-X

Jörg Schacht, Dirk Naujoks, Steffen Pingel, Andreas Wölk, CoDaC team

Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Teilinstitut Greifswald, Wendelsteinstr. 1, 17491 Greifswald, Germany

Abstrakt

Das Anlage W7-X ist eine komplexe Anlage zur Durchführung von Fusionsexperimenten, bestehend aus einer Vielzahl von Komponenten und Diagnostiken, deren Betriebsfunktionen durch ein hierarchisch aufgebautes Steuerungs- und Datenerfassungssystem überwacht und kontrolliert werden.

Für die einzelnen Betriebsszenarios der Anlage W7-X wurden entsprechende Betriebszustände definiert, die den Zustand der Anlage als auch den Umfang der Betriebsfunktionen festlegen. Zum Erreichen und Halten der Betriebszustände und auch zum Ausführen von Betriebsfunktionen der Anlage W7-X müssen Komponenten von W7-X durch die Zentrale Steuerung koordiniert werden.

Nach einer kurzen Einführung in die Struktur und die Aufgaben der Steuerung von W7-X werden die Betriebszustände von W7-X, ihre Darstellung als Zustandsautomat und wichtige Betriebsfunktionen vorgestellt. Weiterhin wird der Zusammenhang zwischen den Betriebszuständen von W7-X und den von der Zentralen Sicherheitssteuerung vorgegebenen Sicherheitsstufen erläutert.

Schlüsselwörter

Steuerungssystem; Fusionsexperiment; Wendelstein 7-X; Betriebszustände; Sicherheitssteuerung

1. Einführung

Das Fusionsexperiment Wendelstein 7-X (W7-X), welches gegenwärtig am Max Planck Institut für Plasmaphysik/Teilinstitut Greifswald aufgebaut wird, ist ein voll optimierter Stellarator. Zum Einschluss des toroidalen Plasmas wird ein Magnetfeld verwendet, welches ausschließlich durch externe Spulen erzeugt wird. Zur Erzeugung des magnetischen Einschlusses kommt am W7-X ein supraleitendes Magnetsystem, bestehend aus 50 nichtplanaren und 20 planaren Feldspulen, zum Einsatz. Der Betrieb von Stellaratoren ohne einen externen Stromtrieb im Plasma und die Verwendung eines supraleitenden Magnetsystems ermöglicht den Dauerbetrieb von W7-X. Hauptziel des Forschungsprojektes W7-X ist der Nachweis der Reaktorfähigkeit eines optimierten Stellarators für ein zukünftiges Fusionskraftwerk. Forschungsschwerpunkte der Arbeit mit W7-X werden u.a. die Untersuchungen des stationären Betriebs, Instabilitäten, der turbulente Transports, die Plasma-Wand Wechselwirkungen bei langen Plasmaentladungen und die Entwicklung und Erprobung eines Insel-Divertors sein.

In Tabelle 1 sind einige wichtige Kenngrößen der Maschine W7-X zusammengefasst. Eine Beschreibung des Aufbaus von W7-X ist in früheren Veröffentlichungen (siehe [1-3]) zu finden.

Die Aufbauphase des Experiments wird im Jahre 2014 abgeschlossen sein. Nach der sich anschließenden Inbetriebnahme der Anlage wird der wissenschaftliche Experimentbetrieb starten. Es sind verschiedene Typen von Plasmaentladungen geplant: stationäre Langzeitentladungen mit bis zu 30 min Entladungsdauer bei voller Heizleistung, kurze Pulse mit variabler Länge und Aneinanderreihung von einzelnen Experimentsequenzen in einer Entladung.

Tabelle 1: Hauptparameter von W7-X

Kenngröße	Wert
Gewicht des Experiments	ca. 725 t
Höhe des Experiments	ca. 4.5 m
Durchmesser des Experiments	ca. 16 m
Großer Plasmaradius R_{ax}	5,5m
Kleiner Plasmaradius a	≤ 0.53 m
Magnetfeld auf der Plasmaachse B_T	≤ 3 Tesla
Heizleistung Start/Endausbau	14 MW/ 30 MW
Plasmabetrieb mit max. Heizleistung	30 min

2. Die W7-X Anlagensteuerung

Das Fusionsexperiment Wendelstein 7-X besteht aus einer Vielzahl von Subsystemen, die im Rahmen des Betriebs von W7-X dedizierte Aufgaben realisieren. Die Subsysteme können in folgende Kategorien gegliedert werden: Infrastruktur (Versorgung von Komponenten mit Medien wie z.B. mit Energie, Gasen oder Kälte), technische Komponenten (Komponenten, die den allgemeinen Betrieb der Anlage und den Plasmabetrieb ermöglichen) und wissenschaftliche Komponenten (Diagnostiken zur Untersuchung des Plasmas). Eine Auswahl von W7-X Komponenten sind in Tabelle 2 beschrieben. Ein wesentliches Merkmal der Anlage W7-X ist, dass aufgrund der unterschiedlichen wissenschaftlichen Programme im Lebenszyklus von W7-X sich die Anzahl und die Ausstattung der am Betrieb beteiligten Komponenten (gilt insbesondere für die Diagnostiken) ständig ändern werden

Tabelle 2: Auswahl von W7-X Komponenten mit Angabe ihrer Aufgaben

Kategorie	Komponente	Hauptaufgabe
Infrastruktur	Netzversorgung NSHV	Versorgung aller elektrischen Verbraucher mit elektrischer Energie über verschiedene Versorgungsnetzte (ohne USV, mit USV, mit Diesel-Notstromaggregat,...).
	Hochspannungs-Gleichstromversorgung	Versorgung von Verbrauchern mit Gleichstrom im Bereich von 65kV/50A cw,
	Gasversorgung, Druckluftversorgung	Versorgung des Experiments mit allen benötigten Arbeits-, Beschichtungs- und Diagnostikgasen und mit Druckluft.
	Gebäudetechnische Anlagen (Be- und Entlüftungsanlage, Klimatisierung, ...)	Beleuchtung, Klimatisierung, Brandschutz und -bekämpfung in der Torushalle und in den angrenzenden Gebäuden,
Technische Komponenten	Kühlsystem	Versorgung von Komponenten im Plasmagefäß (KiP), das Plasmagefäß (PG), die Stützen und die Trimmspulen mit Kaltwasser/Kühlwasser. Ausheizen der KiP und des PG und der Stützen als Konditionierungsmaßnahme.

	Vakuumsystem	Evakuierung des Plasmagefäß-Volumens von Atmosphärendruck auf Basisvakuum und Aufrechterhaltung des Vakuums im Plasmagefäß, Abpumpen aller in das Plasmagefäß eingelassenen Gase (Experiment, Konditionierung, Beschichtung, Regenerierung der Kryopumpen), Fluten des Plasmagefäß-Volumens, Sammeln und Abführen der Abgase, Behandlung der Beschichtungsgase im Abgas,
	Kryoversorgung	Die Kryoversorgung des Kryostaten versorgt die Kühlkreise des W7-X-Magnetsystems und der thermischen Isolation mit gekühltem Helium, welches von der Helium-Kälteanlage bereit gestellt wird.
	Gaseinlass	Belegung des Ringleitungssystems mit Arbeits-, Beschichtungs- und Diagnostikgasen. Geregelter Gaseinlass in das Plasmagefäß zur Gefäßkonditionierung und für Plasmaexperimente.
	Magnetstromversorgung	Die sieben Spulengruppen des supraleitenden Magnetsystems werden durch jeweils eine Hochstrom-Gleichrichteranlage mit Gleichstrom versorgt ($I \leq 20\text{kA}$). Ein integriertes Schutzsystem hat die Aufgabe, bei auftretenden Störfällen die Schnellentregung aller sieben Spulensysteme sicherzustellen. Die Energie des Magnetsystems wird im Falle einer Schnellentregung in Entregungswiderstände transferiert.
	Plasma-Heizsysteme	Heizen des Plasmas unter Anwendung der Heizmethoden: <ul style="list-style-type: none"> - Heizen mit Mikrowellen: Elektronen Zyklotron Resonanz Heizung (engl. ECRH), 10 Gyrotrons mit einer Heizleistung von jeweils 1MW bei einer Frequenz von 140 GHz im Dauerstrichbetrieb. - Heizen mit Radiowellen: Die Ionen Zyklotron Resonanz Heizung (engl. ICRH) erzeugt eine Leistung von 4 MW. - Heizen mit Neutralteilchen: Die Neutralteilchenheizung (engl. NBI) beruht auf den Einschuss von energiereichen neutralen Wasserstoffatomen in das Plasma. Der Teilcheneinschuss in das Plasma bewirkt eine Erhöhung der Temperatur und auch der Dichte des Plasmas.
	Zentrale Steuerung	Koordination und Überwachung der Anlage W7-X in allen Betriebsphasen, Gewährleistung der Personen- und Anlagensicherheit, Durchführen von Abläufen zur Betriebsvorbereitung und zur Konditionierung des Plasmagefäßes, Ausführen und Überwachen der Experimentprogramme,
Wissenschaftliche Komponenten	Plasma-Diagnostiken	23 Diagnostiken für die Startup Betriebsphase von W7-X zur Durchführung von wissenschaftlichen Experimenten mit Plasma, Auswahl von Messverfahren: <ul style="list-style-type: none"> - Magnetische Messungen (Diamagnetische Schleife, Rogowski-Spulen), - Plasmateilchen-Flussmessungen (z.B. Langmuir Sonden), - Plasmabrechungsindex (z.B. Interferometer),

		<ul style="list-style-type: none"> - Elektromagnetische Emission freier Elektronen (Zyklotron-/Synchrotron-Emission, Bremsstrahlung), - Elektromagnetische Emission gebundener Elektronen (UHV Spektrometer HEXOS) - Streuung elektromagnetischer Wellen (z.B. Thomson-Streuung),
	Flußflächenmessung	Vermessung des Magnetfeldes von W7-X

W7-X besitzt ein komplexes, hierarchisch aufgebautes Steuerungs- und Datenerfassungssystem [4-6]. Die W7-X Komponenten für technische und diagnostische Aufgaben besitzen ihr eigenes, lokales Steuerungssystem, welches eine autonome Betriebsweise für die Inbetriebnahme, für Tests und für die Vorbereitung auf die Experimente ermöglicht. Während der Experimentphasen werden die Aktivitäten der am Experiment beteiligten Komponenten durch ein Zentrales Steuerungssystem koordiniert und überwacht. Das Verhalten der Maschine W7-X während der Experimentabläufe wird durch sogenannte Segmentprogramme vorgegeben. Nach der Auswahl und dem Start eines Segmentprogramms durch den Operator erfolgt die Umsetzung der im Programm vorgegebenen Einstellungen und Abläufe automatisch [7, 8].

3. Der Betrieb von W7-X

Der zukünftige Betrieb von W7-X lässt sich in mehreren Phasen pro Jahr gliedern. Für Plasmaexperimente mit W7-X sind ca. 80 Tage/Jahr eingeplant, wobei in Experimentkampagnen an ca. 2 bis 3 Tage in der Woche experimentiert wird. Der Experimenttag wird je nach Notwendigkeit im Einschicht- oder im Zweischichtbetrieb durchgeführt. Die Dauer der Plasmaexperimente umfasst einen Zeitbereich von einigen Sekunden (Kurzpulsentladungen) bis hin zu 30 min für stationäre Entladungen mit maximaler Heizleistung. In der Experimentphase werden dann viele einzelne Plasmaexperimente, unterbrochen von kurzen Experimentpausen, nacheinander abgearbeitet. Während der Experimente und in den kurzen Experimentpausen ist die Aktivität der Komponenten von W7-X am höchsten. So z.B. sind die Hauptsysteme Kühlsystem, Kryoversorgung, Vakuumsystem und Magnetstromversorgung voll aktiv. In längeren Experimentpausen über Nacht, tageweise und an den Wochenenden werden wichtige Betriebsparameter der Hauptsysteme so eingestellt, dass ein ökonomischer Standby Betrieb der Anlage durchgeführt werden kann, ohne dass der Übergang in den Experimentbetrieb sich zu zeitintensiv gestaltet. Das Magnetsystem wird im Standby von < 5 K (Experimentbetrieb) auf 10 K erwärmt und die Induktion auf der Plasmaachse B_{Axis} von $\leq 2,5$ T bis max. 3 T (Experimentbetrieb) auf 1,85 T (Standby mit Magnetfeld) bis 0 T (Standby ohne Magnetfeld) abgesenkt. In den Phasen ohne Experimentbetrieb finden Aktivitäten zur Experimentvorbereitung und zur Konditionierung des Gefäßes statt. Bei Unterbrechungen von einer Woche und mehr wird die Temperatur des Magnetsystems auf das Niveau von ca. 80 K angehoben.

4. Betriebszustände der Anlage W7-X

Für die verschiedenen Betriebsphasen von W7-X wird eine definierte Menge an Betriebszuständen für die Anlage W7-X festgelegt. Diese diskreten Zustände definieren einen Erwartungsbereich für die grundlegenden Betriebsparameter der Anlage W7-X. Ein weiterer wesentlicher Parameter für die Definition der Betriebszustände ist der Grad des Gefährdungspotenzials für das Personal und die Anlage W7-X. Eine Zielstellung für die Verwendung von Betriebszuständen ist die übersichtliche und strukturierte Gestaltung der Steuerung und der Bedienung der Gesamtanlage und der beteiligten Komponenten.

Die Betriebszustände von W7-X werden über das Zentrale Betriebsmanagement (cOPM) durch einen autorisierten Bediener eingestellt und überwacht. Den Betriebszuständen der Anlage W7-X sind Betriebsfunktionen zugeordnet, die durch eine oder mehrere Komponenten der Anlage W7-X ausgeführt werden. Die Betriebsfunktionen werden über das Mensch-Maschine Interface (HMI) des cOPMs ausgewählt und gestartet oder sie sind direkt an W7-X Betriebszustände gebunden.

Die Zentrale Sicherheitssteuerung ist ein eigenständiges System, welches organisatorisch der Zentralen Steuerung zugeordnet ist. Sie regelt über die Vorgabe von Sicherheitsstufen mit den damit verbundenen Freigaben und Verriegelungen für gefährliche Aktivitäten in der Torushalle sowie über die Zugangsregelungen zur Torushalle die Bedingungen für einen Wechsel der Betriebszustände von W7-X. Es sind die 6 Sicherheitsstufen Aus, Standby, Experimentpause, Experiment, W7-X Not –Halt definiert.

Betriebsfunktionen der Anlage W7-X, die Personen oder Teile der Anlage gefährden können, sind nur in bestimmten Sicherheitsstufen / W7-X Betriebszuständen ausführbar. Die Festlegung der aktuellen Sicherheitsstufe kann nur durch einen autorisierten Bediener (Experimentingenieur oder Experimentleiter) über das Bedienpult der Zentralen Sicherheitssteuerung vorgenommen.

Änderung des Betriebszustandes und das Auslösen von Betriebsfunktionen von W7-X werden im Regelfall über das Zentrale Betriebsmanagement durch einen berechtigten Benutzer initiiert. Eine automatische Änderung des Betriebszustandes von W7-X ist nur für genau festgelegte Ereignisse implementiert. Ein Beispiel hierfür ist der Wechsel in den Betriebszustand „Not-Halt W7-X“, der durch das Ereignis „Mindestens ein Not-Halt Taster ist aktiviert“ automatisch angefahren wird.

Der aktuelle Betriebszustand und die eingestellte Sicherheitsstufe werden durch Anzeigen an exponierten Stellen dargestellt. Alle beteiligten Komponenten erhalten die Information über den Betriebszustand und über die Sicherheitsstufe durch periodische Meldungen des Betriebsmanagements.

Tabelle 3: Übersicht der Betriebszustände der Anlage W7-X

Nr.	Kategorie	Betriebszustand W7-X	Steuerung des Betriebszustandes
1	Sonderbetriebszustände	- Montage, - Umbau, - Demontage	nein (Zentrale Steuerung und Zentrale Sicherheitssteuerung sind nicht vorhanden oder sind deaktiviert)
2	Stillstand	Aus	ja
3	Normale Betriebszustände	Anfahren	ja
4		Abfahren	ja
5		Standby ohne Magnetfeld	ja
6		Standby mit Magnetfeld	ja
7		Experimentpause	ja
8		Experiment: - Experiment mit Plasma, - Experiment ohne Plasma,	ja
9	Fehlerbetriebszustände	Not-Halt W7-X	ja
10		¹ Funktionsausfall: - Störung NN,	ja

¹ Funktionsausfälle sind keine eigenständigen Betriebszustände, sondern treten als nebenläufiger Zustand zu den Betriebszuständen von W7-X auf.

Eine grafische Übersicht der Betriebszustände der Anlage W7-X und die erlaubten Übergänge zwischen den einzelnen Zuständen zeigt Abbildung 1.

Der Betrieb der Anlage von W7-X basiert auf den Aktionen und Aktivitäten der in der Anlage integrierten Komponenten. Die Betriebsfunktionen von W7-X dienen dem Einstellen und Halten des festgelegten Parameterraumes für den jeweiligen Betriebszustand der Anlage. Eine Betriebsfunktion von W7-X ist eine durch die Zentrale Steuerung koordinierte und überwachte Ausführung einer einzelnen Funktion oder mehrerer Funktionen einer oder mehrerer Komponenten. Diese Funktionen können je nach Festlegung gleichzeitig oder sequentiell ausgeführt werden.

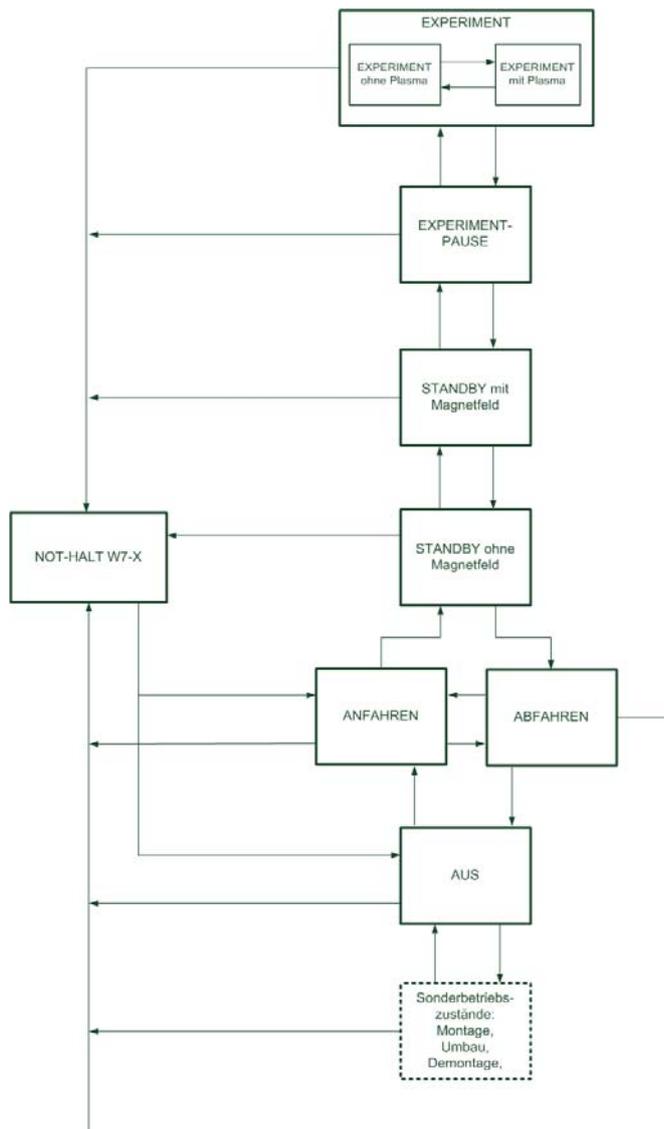


Abbildung 1: W7-X Zustandsdiagramm für die Betriebszustände der Anlage W7-X

Eine Betriebsfunktion kann in einem oder in mehreren Betriebszuständen von W7-X ausgeführt werden. In einem Betriebszustand können auch gleichzeitig mehrere Betriebsfunktionen ausgeführt werden. Haben Betriebsfunktionen ein Gefährdungspotenzial für Personen und für die Anlage, dann ist die Ausführung dieser Betriebsfunktionen an Freigaben bzw. an Verriegelungen gebunden, die durch die Zentrale Sicherheitssteuerung über die Einstellung von Sicherheitsstufen verwaltet werden. Das Starten und Beenden von W7-X Betriebsfunktionen kann manuell durch den Operator über das Zentrale Betriebsmanagement oder automatisch über den Wechsel von W7-X Betriebszuständen erfolgen. Details hierzu müssen in der Spezifikation der Betriebsfunktionen festgelegt werden.

Tabelle 4 zeigt eine Zusammenstellung von W7-X Betriebsfunktionen im W7-X Betriebszustand Experimentbetrieb und in Tabelle 5 sind für die Betriebszustände von W7-X wichtige Parameter einiger Hauptsysteme angegeben.

Tabelle 4: W7-X Betriebsfunktionen im Betriebszustand Experimentbetrieb

Betriebszustand W7-X	Betriebsfunktion W7-X	Bemerkungen
Experimentbetrieb	Kalthalten des Magnetsystems	Definition von Teilgesicherten Betrieben (TGB) nach Bedarf
	Kühlbetrieb Plasmagefäß und Stutzen	
	Kühlbetrieb KIP-Komponenten	
	Vakuum halten Kryostat	
	Vakuum halten Plasmagefäß	
	Kühlbetrieb Plasmagefäß und Stutzen	
	Magnetfeld einstellen, halten oder entregen	
Experimentierbetrieb mit Segmentsteuerung	Steuerung von Experimentabläufen mit und ohne Plasmabetrieb mittels Experimentprogrammen und deren Umsetzung mit Hilfe der Segmentsteuerung.	

Tabelle 5: Parameter von Hauptsystemen

W7-X Betriebszustand	Vakuum Plasmagefäß	Vakuum Kryostat	Temperatur Magnetsystem	Magnetfeld	Plasma
Aus	Kein Vakuum	Kein Vakuum	Raumtemperatur	0 T	kein
Anfahren	Beliebig	beliebig	beliebig	0 T	kein
Abfahren	Beliebig	beliebig	beliebig	0 T	kein
Standby ohne Magnetfeld	evakuiert	evakuiert	10 K	0 T	kein
Standby mit Magnetfeld	evakuiert	evakuiert	< 5 K	> 1.85 T*	kein
Experimentpause	evakuiert	evakuiert	< 5 K	> 1.85 T	kein
Experimentbetrieb	evakuiert	evakuiert	< 5 K	> 1.85 T	möglich
Not-Halt W7-X	Beliebig	beliebig	beliebig	beliebig	kein

* Der genaue Wert muss noch festgelegt werden.

5. Betriebszustände von Komponenten

Das lokale Betriebsmanagement einer Komponente ist für den Umfang und für die Verarbeitung der Betriebszustände zuständig. In der Regel wird das Betriebsmanagement in das Programm der Master SPS der Komponente implementiert. Für den Betrieb einer lokalen Komponente im Steuerungsprojekt W7-X können maximal 6 Standard-Betriebszustände verwendet werden:

1. Betriebszustand Aus (Off): keine Differenzierung,
2. Betriebszustand Vorbereitung (Preparation): 16 Sub-Zustände sind möglich,
3. Betriebszustand Bereit (Standby): keine Differenzierung,
4. Betriebszustand Ein (On): 16 Sub-Zustände sind möglich,
5. Betriebszustand Not-Aus (Emergency Stop): 8 Sub-Zustände sind möglich,
6. Betriebszustand Fehler (Error): 16 Sub-Zustände sind möglich, wobei Zustand 16 für Simulationsbetrieb reserviert ist.

Die Betriebszustände 1-4 können als „Normale“ Betriebszustände klassifiziert werden, da sie für den Normalbetrieb einer Komponente verwendet werden. Die Betriebszustände 5 und 6 sind Betriebszustände für kritische Störungen im Betrieb der Komponente. Der Mindestumfang für die Verwendung von Standard-Betriebszuständen umfasst die Betriebszustände Aus, Ein und Fehler.

Bei komplexen Steuerungen kann es sinnvoll bzw. notwendig sein, die vorgegebenen Standard-Betriebszustände weiter zu differenzieren. Diese Möglichkeit wurde geschaffen, indem ausgewählte Betriebszustände durch eine Definition von komponentenspezifischen Sub-Betriebszuständen erweitert werden können.

Tabelle 6: Zustandstabelle für die Beschreibung der Betriebszustände einer Komponente

Aktueller Betriebszustand	Ereignis	Aktion	Folge-Betriebszustand
<i>Not-Aus</i>	Not-Aus Signal aktiv	Not-Aus Programm ausführen	<i>Not-Aus</i>
	Not-Aus Signal nicht aktiv und Not-Aus quittiert	Not-Aus Programm beenden	<i>Aus</i>
<i>Aus</i>	Einschalten	Initialisierung	<i>Vorbereitung</i>
<i>Vorbereitung</i>	Vorbereitung angewählt	Vorbereitungsprogramm starten	<i>Vorbereitung</i>
	Vorbereitung abgeschlossen und Anwahl <i>Bereit</i>	Betriebszustand <i>Bereit</i> aktivieren (Pumpen einschalten, Ventile öffnen,...)	<i>Bereit</i>
...			

6. Status und Ausblick

Die in diesem Beitrag vorgestellten Kategorien Betriebszustände, Betriebsfunktionen und Sicherheitsstufen sind fester Bestandteil im Design und bei der Realisierung der Steuerungen für die Komponenten und für die Anlage W7-X. Eine Vielzahl der Konzepte für die Steuerung und Datenerfassung, insbesondere auch die Betriebszustandslogik, wurde an dem Stellarator-Experiment WEGA, welches im IPP Greifswald betrieben wird, mit Erfolg erprobt [9]. Eine Mehrzahl der technischen Komponenten ist bereits realisiert oder befindet sich in der Umsetzungsphase. Bis zum geplanten Betriebsbeginn der Anlage W7-X im Jahre 2014 müssen noch eine große Anzahl von Diagnostiken geplant und aufgebaut werden.

Referenzen

- [1] M. Wanner, J.-H. Feist, H. Renner, J. Sapper, F. Schauer, H. Schneider, V. Erckmann and the W7-X Team, Design and construction of Wendelstein 7-X, 21st Symposium on Fusion Technology, Madrid, Spain, September 2000, paper IN-18 ,
- [2] M. Wanner, V. Erckmann, J.-H. Feist et al., Status of WENDELSTEIN 7- Construction, Nucl. Fusion 43 (2003) 416-424,
- [3] H.-S. Bosch, Wendelstein 7-X Team, Wendelstein 7-X, Overview and Status of Construction, Invited paper to the 21st IEEE Symposium on Fusion Technology, Knoxville, TN 26.-29. September 2005,
- [4] Schacht, J., Niedermeyer, H. and Laqua, H., System Control of WENDELSTEIN 7-X, Proc 3rd IAEA Technical Committee Meeting on Steady-State Operation of Magnetic Fusion Devices, Greifswald (Germany) and Arles (France),
- [5] Laqua, H., Niedermeyer, H., Schacht, J.: Control system of WENDELSTEIN 7-X experiment, 22nd Symposium on Fusion Technology, Sept. 9-13 2002. To be published in Fusion Engineering and Design,
- [6] J. Schacht, H. Laqua, M. Lewerentz, I. Müller, S. Pingel, A. Spring and A. Wölk, Overview and status of the control system of WENDELSTEIN 7-X, Fusion Engineering and Design, Volume 82, Issues 5-14, October 2007, Pages 988-994 ,
- [7] A. Spring, H. Laqua and H. Niedermeyer, User interaction concept for plasma discharge control on WENDELSTEIN 7-X, Fusion Engineering and Design, Volume 81, Issues 15-17, July 2006, Pages 1957-1961,
- [8] H. Riemann et al., From a physics discharge program to device control- linking the scientific and technical world at Wendelstein 7-X, SOFT conference, Rostock, Sept. 2009, will be published in Fusion engineering and design,
- [9] J. Schacht et al., Stellarator WEGA as a test-bed for the WENDELSTEIN 7-X control system concepts, Fusion Engineering and Design 84 (2009) 1723–1728,