

Das Hochfrequenzsystem von ANKA

F. Pérez, FGS

Einführung

Die Synchrotronstrahlungsquelle ANKA ist ein Elektronenspeicherring, in dem Elektronen auf eine Energie von 2,5 GeV beschleunigt und bei dieser Energie für einige Stunden gespeichert werden können. Ziel ist es, Synchrotronstrahlung für die Nutzung in den Bereichen Mikrostrukturtechnik und Analytik zur Verfügung zu stellen. Synchrotronstrahlung wird von Elektronen tangential emittiert, wenn diese in den Dipolmagneten radial beschleunigt werden [1]. Die Aufgabe des Hochfrequenzfeldes ist es erstens, die Elektronen auf die nominelle Energie von 2,5 GeV zu beschleunigen, und zweitens, den Energieverlust der Elektronen durch die Emission von Synchrotronstrahlung auszugleichen, während die Elektronen für meh-

rere Stunden bei der nominellen Energie gespeichert werden [2].

Das Hochfrequenzsystem für den ANKA Speicherring umfasst zwei Anlagen, die mit einer Frequenz von 500 MHz arbeiten. Jede Anlage besteht aus einem 250-kW-Klystron, dem Wellenleitersystem, dem Zirkulator, zwei Wasserlasten, zwei Cavities, der Low-Level-Elektronik, dem Kontrollsystem und weiteren Peripheriegeräten (Abb. 1). Im folgenden werden diese Komponenten des HF-Systems beschrieben.

Das HF-System

Im Speicherring ANKA kann bei der Energie von 2,5 GeV ein Elektronenstrom von maximal 400 mA gespeichert werden. Unter diesen Bedingungen emittieren die Elektronen in den Ablenkmagneten Synchrotronstrahlung

mit einer Leistung von 265 kW [3]. Um diesen Energieverlust auszugleichen, sind im Speicherring ANKA vier Cavities installiert. In jeder Cavity wird ein Hochspannungs-Wechselfeld der Frequenz 500 MHz mit einer maximalen Amplitude von 600 kV erzeugt. Bei jedem Umlauf nehmen die Elektronen in den Cavities genau so viel Energie auf, wie sie durch die Emission von Synchrotronstrahlung verlieren.

Die Cavities sind aus hochleitendem Kupfer hergestellt, so dass in den Wänden Ströme fließen, die zu ohmschen Verlusten von 56 kW je Cavity führen. Um die zum Ausgleich der Strahlungsverluste von 265 kW notwendige Hochspannung konstant halten zu können, müssen diese ohmschen Verluste zusätzlich ausgeglichen werden.

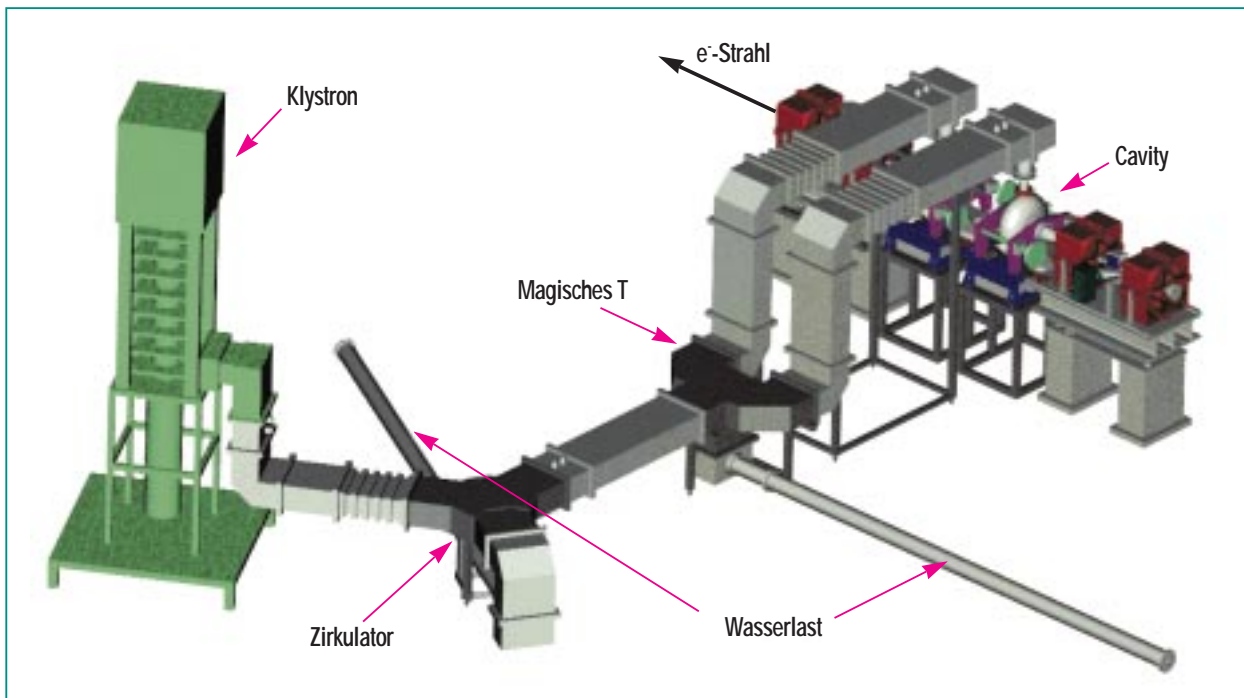


Abb. 1: 3D-Ansicht einer HF-Anlage.

Insgesamt wird somit eine HF-Leistung von etwa 500 kW (265 kW für die Strahlleistung und 225 kW für ohmsche Verluste in den Cavity-Wänden) bei einer Frequenz von 500 MHz benötigt. Dafür sind zwei HF-Anlagen mit je einem 250 kW-Klystron installiert, von denen jedes zwei Cavities speist. Abb. 1 zeigt eine 3D-Ansicht einer solchen Anlage, deren wichtigste Parameter in Tab. 1 zusammengefasst sind.

Cavities

Eine Cavity ist ein metallischer Hohlkörper, der als Resonator ausgebildet ist. Bei entsprechend resonanter Anregung schwingt in dem Hohlkörper ein elektromagnetisches Feld mit einer ganz bestimmten Frequenz, der sogenannten Eigenfrequenz, die durch die Geometrie des Hohlraumes bestimmt ist. Eine Cavity ist mit einem Mikrowellenherd vergleichbar, in dem Speisen durch Absorption von Mikrowellen erhitzt werden. Ähnlich werden die Elektronen durch HF-Absorption „erhitzt“, d.h. beschleunigt, wenn sie die Cavities durchqueren.

Anders als ein Mikrowellenherd haben die Cavities der Beschleuniger eine zylindrische Form und sind aus hochleitendem Kupfer hergestellt. Um den Elektronen auf ihrem Weg durch den Beschleuniger den Ein- und Austritt zu ermöglichen, weist die Cavity zwei axiale Öffnungen auf. Weitere Öffnungen dienen zur Einkopplung der Hochfrequenzleistung, als Durchführungen für Diagnostik Schleifen sowie zur Installation einer Vakuumpumpe.

Parameter	Einheit	Wert
Strahlenergie	GeV	2.5
Energieverlust pro Umlauf	keV	662
Strom (maximal)	mA	400
Synchrotron Strahlleistung	kW	265
Umlauffrequenz	MHz	2.72
HF-Frequenz	MHz	499.654
Anzahl des Cavities		4
Hochspannung pro Cavity	kV	600
Verlustleistung pro Cavity	kW	56
Gesamte Verlustleistung	kW	224
Anzahl der Klystrons Leistung pro Klystron	kW	2 250
Gesamte zur Verfügung stehende Leistung	kW	500
Gesamte benötigte Leistung	kW	489

Tab. 1: Hauptparameter des HF-Systems.

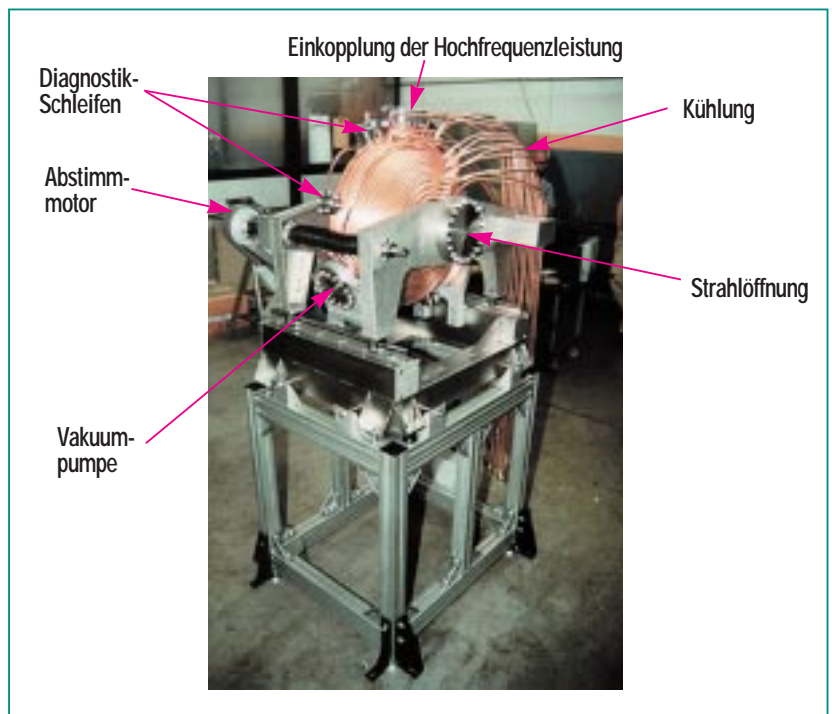


Abb 2.: ANKA Cavity.

In Abb. 2 ist eine Cavity von ANKA wiedergegeben. Die wichtigsten Parameter der Cavities sind in Tab. 2 zusammengefasst.

Bei ANKA werden 4 Cavities benötigt [4], um die Elektronen mit einer Spannung von insgesamt 2.4 MV je Umlauf zu beschleunigen. Die Cavities sind paarweise in den Sektoren 2 und 4 der Maschine angebracht

Entsprechend der Frequenz des HF-Systems weist der Elektronenstrahl eine 500-MHz-Struktur auf, d.h. die umlaufenden Elektronen sind zu Paketen („bunches“) gebündelt. Die Pakete (Ausdehnung etwa 10 mm, entsprechend etwa 1.5% der HF-Wellenlänge) haben einen räumlichen bzw. zeitlichen Abstand

von 0,6 m bzw. 2 ns voneinander. Für eine effektive Beschleunigung der Elektronenpakete müssen sie alle Cavities zur gleichen Hochspannungsphase passieren. Die Phasen der Cavities müssen daher entsprechend synchronisiert sein (siehe Abb. 3).

Die Phasenlage eines jeden Cavity-Paares ist durch ihren geometrischen Abstand festgelegt. Die Phase in den beiden diametral gegenüber liegenden Anlagen wird durch zwei ferngesteuerte Phasenschieber geregelt. Die Einstellung dieser Phasenschieber muss während des Beschleuniger Betriebes eingeregelt werden, da je nach Betriebsart der tatsächliche Orbit des Strahls geringfügig kürzer oder länger sein kann.

Parameter	Einheit	Wert
Resonanzfrequenz	MHz	499.654
Qualitätsfaktor		40000
Querimpedanz	MΩ	3.3
Maximal Kupplungskoeffizient		3.5

Tab. 2: Parameter des Cavities.

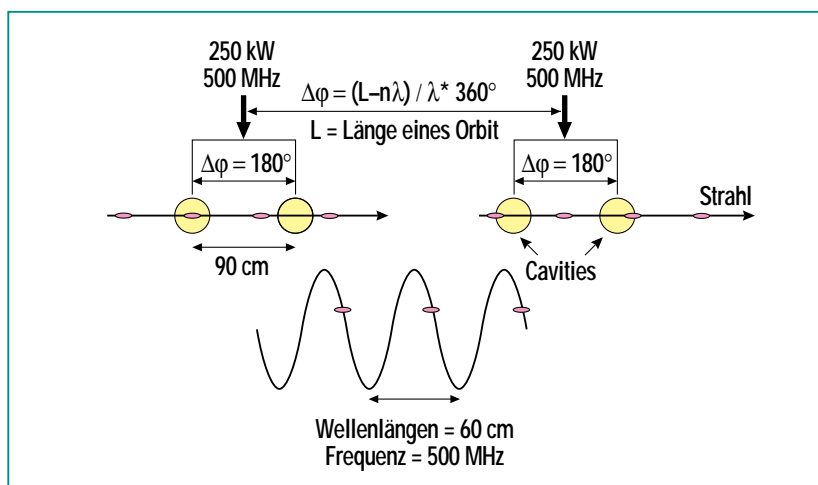


Abb 3.: Die Phase die Cavities muss abgestimmt sein.

Das Klystron

Die insgesamt benötigte Leistung von 500 kW wird mit zwei Klystrons erzeugt. Ein Klystron ist ein Hochspannungsverstärker, der ein HF-Signal ungefähr 10.000 mal verstärkt. Der Eingangssender muss deshalb mit ca. 25 W betrieben werden. Diese Leistung wird von einem Festkörperverstärker zur Verfügung gestellt, welcher wiederum von einem Signalgenerator mit genau 499,654 MHz angeregt wird.

Natürlich muss dem Klystron, wie jedem anderen Verstärker auch, Energie zugeführt werden. Das geschieht bei ANKA durch ein 52 kV / 9 A Gleichstrom Hochspannungsnetzgerät. Folglich wird in einem Klystron eine Gleichstromleistung von 400 kW (50 kV / 8 A) in eine 500 MHz Wechselfeldleistung von 250 kW umgewandelt. Die Effektivität des Klystrons beträgt somit ca. 60%. Die Spezifikationen des Klystrons und des Hochspannungsnetzgerätes sind in Tab. 3 und 4 zusammengestellt.

Abb. 4 zeigt den Aufbau des Klystrons und einige Bilder seiner Komponenten. Es besteht hauptsächlich aus einer Elektronenkanone, mit der ein Elektronenstrom erzeugt und mit den 52 kV des Netzgerätes beschleunigt wird, einer Eingangs-Cavity, in der Eingangssender dem Elektronenstrahl eine 500-MHz-Struktur aufprägt, drei Zwischen-Cavities, wo die Bündelung der Elektronen verstärkt wird, einer Ausgangs-Cavity, aus dem die Wechselfeldspannung ausgekoppelt wird (250 kW bei 500 MHz), und zum Schluss einem Kollektor, in dem

Parameter	Einheit	Wert
Betriebsfrequenz	MHz	499.654
HF Ausgangsleistung	kW	> 250
Verstärkung	dB	> 40
Effizienz	%	> 62.5

Tab. 3: Hauptparameter des Klystrons.

Parameter	Einheit	Wert
Spannung	kV	-20 to -52
Strom	A	9
Stabilität	%	± 0.5
Welle, Spitze zu Spitze	%	< 0.4

Tab. 4: Hauptparameter des Hochspannungsnetzgerätes.

die Elektronen gesammelt werden. An diesem Kollektor wird eine Leistung von 150 kW in Wärme umgesetzt. Auf der ganzen Länge des Klystrons (4 m) wird der Elektronenstrahl durch eine Magnetspule fokussiert.

Das Wellenleitersystem

Das Wellenleitersystem führt die aus dem Klystron über eine Schleife entnommene HF-Leistung zu den Cavities. Bei ANKA wurde ein spezielles Wellenleitersystem konstruiert, um zwei Cavities mit nur einem Klystron zu speisen (siehe Abb. 1).

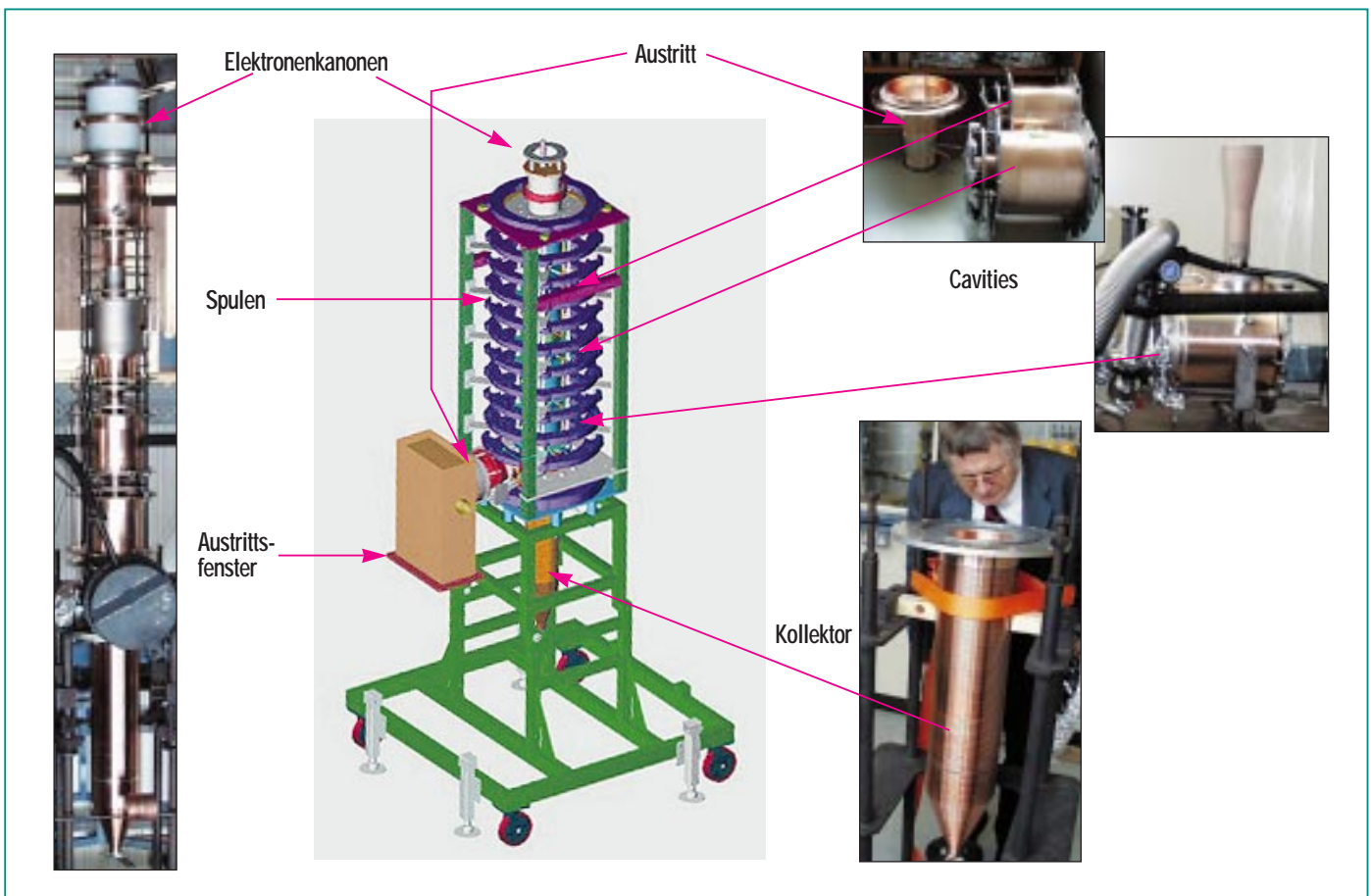


Abb. 4: Aufbau des Klystron und einige Bilder seiner Komponenten.

Die Komponenten des Wellenleitersystems sind:

- Der Zirkulator, welcher verhindert, dass Leistung von den Cavities ins Klystron reflektiert wird.
- Das „magische T“, welches die HF-Leistung zu gleichen Teilen und mit gleicher Phase auf das Cavity-Paar verteilt.
- Zweiseitige Entkoppler, um die zugeführte und reflektierte Leistung zu überwachen. Hier von sind vier erforderlich, von denen eine nach dem Klystron, eine nach dem Zirkulator und zwei vor den Cavities installiert sind.
- Zwei Wasserlasten zur Absorption der reflektierten Leistung: Eine im dritten Arm des Zirkulators und die andere im vierten Arm des „magischen T“.
- Übergänge, Biegungen und gerade Leiterstrecken, welche die Komponenten des Wellenleitersystems miteinander verbinden.

Der Mittelpunktsabstand zwischen den beiden Cavities einer HF-Anlage beträgt 900 mm entsprechend 1,5 Wellenlängen des HF-Feldes. Deshalb wird die Leistung-Eingangs-Schleife an einer der beiden Cavities um 180° gedreht, damit es zu der richtigen Phasenbeziehung zwischen den Cavities kommt. Die Phasendifferenz zwischen den beiden Armen der „magischen T's“ von ANKA wurde zu weniger als 1° bestimmt.

Die Low-Level-Elektronik

Die Low-Level-Elektronik für das HF-System von ANKA besteht aus vier Frequenzregelungen (eine für jede Cavity), zwei Amplituden- und Phasenregelungen (eine für jede HF-Anlage), sowie weiterem Zubehör, um die beiden HF-Anlagen mit der Interlock-Elektronik abzustimmen. Diese Regelungsschleifen haben folgende Aufgaben:

- Amplitudenregelung, um die Spannung in den Cavities auf dem Sollwert zu halten.
- Phasenregelung, um die Phase in den Cavities konstant zu halten; sie regelt hauptsächlich den Phasensprung, der durch die Verstärker verursacht wird.
- Frequenzregelung, um die Cavities auf die Frequenz des Hauptoszillators (499,654 MHz) abzustimmen.

Beim Design der Low-Level-Elektronik wurden die verschiedenen Betriebsbedingungen von ANKA berücksichtigt, bei denen der Strahl mit einer Energie von 500 MeV injiziert und im Speicherring auf die Endenergie von 2.5 GeV gerammt wird: Die Amplitude und die Phase der Cavity-Spannungen muss während der verschiedenen Phasen des Maschinenbetriebs (Injektion, Ramping und Strahlspeicherung) konstant gehalten werden, und zwar unter Berücksichtigung der Tatsache, dass die gesamte Low-Level-Elektronik über den Strahl gekoppelt ist und sich daher wechselseitig beeinflusst.

Die Low-Level-Elektronik für das HF-System von ANKA, die wegen der einfacheren Wartung und Störungsbeseitigung nach dem Baukastensystem aufgebaut wurde, befindet sich in sechs Gestellen, d.h. in je drei Gestellen für die beiden Anlagen.

Interlock und Kontrolle

Um den sicheren Betrieb der HF-Anlagen sicherzustellen, sollte ein angemessenes Kontroll- und Interlocksystem implementiert werden [5]. Bei ANKA wurde für die Kontrolle und das langsame Interlock ein industrieller PLC Standard gewählt, und zwar das SPS-System von BOSCH. Dieses System kontrolliert die HF-Anlage von den Hochspannungsnetzgeräten bis zu den Interlock-Signalen der Cavities und schaltet die Anlage aus, wenn irgendein Fehler auftritt.

Das HF-System verfügt über drei Kontrollebenen: Die Maschinenkontrolle mit einer Reaktionszeit von 1 s, die Sender-Interlock-Kontrolle mit einer Reaktionszeit von 20 ms, und das schnelle Interlock mit einer Reaktionszeit von 10 μ s.

Die erste Kontrollebene basiert auf Java für Windows NT und LonWorks, die zweite auf einem industriellen PLC-System, und die dritte wurde als Hardware-Elektronik realisiert. Die Maschinenkontrolle überwacht das gesamte HF-System, jedoch wird jede Anweisung, die der Sender erhält, vom PLC-System gefiltert, welches die Aktion abhängig vom Status des Interlocks ausführt oder nicht. Das schnelle Interlock läuft parallel und schaltet die Anlage unabhängig von den beiden

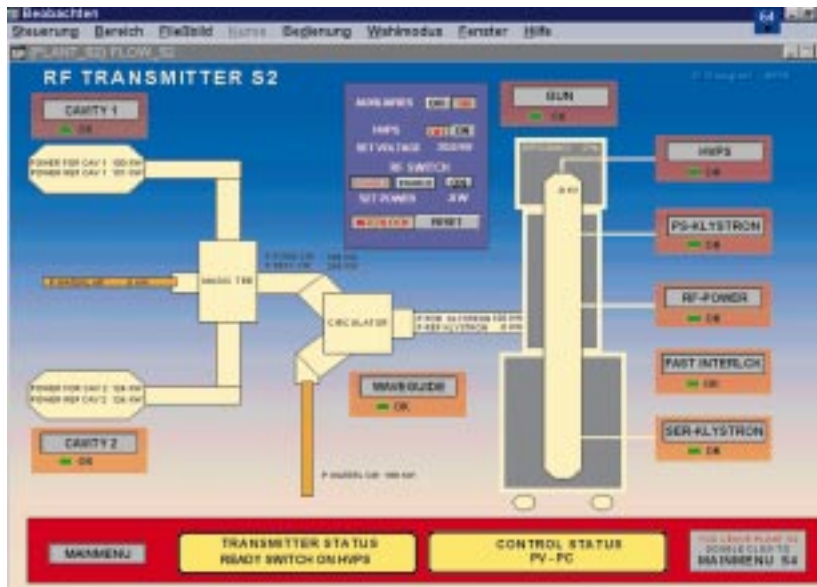


Abb. 5: Interface Panels für den Zugriff auf die Informationen des SPS-Systems.

anderen Kontrollsystemen ab, wenn ein Fehler auftritt.

Abb. 5 zeigt eines der Interface Panels für den Zugriff auf die Informationen des PLC-Systems. Die Konfiguration einer der HF-Anlagen ist schematisch dargestellt: Ein Klystron, das zwei Cavities durch das „magische T“ des Wellenleitersystems speist. Die HF-Energie in Durchlassrichtung und die reflektierte Energie an den verschiedenen Punkten, an denen sich die lenkenden Kuppelungen befinden, werden ebenfalls auf diesem Panel angezeigt.

Die Box oben in der Mitte des Interface Panels ermöglicht dem Operateur folgende Aktionen:

- Ein- und Ausschalten der Hilfsmittel, d.h. der kleineren Netzgeräte und anderer Peripherie-Komponenten.
- Ein- und Ausschalten des Hochspannungsnetzgerätes und Festlegung des Levels der Betriebsspannung.
- Ein- und Ausschalten des HF-Antriebs.
- Reset des Interlocks.

Die verschiedenen Interlock-Signale werden auf dem Panel in neun Boxen zusammengefasst, denen folgende Überwachungsfunktionen zugeordnet sind:

SER-KLYSTRON: Wasser- und Luftkühlungssignale.

GUN: Strom und Spannung der Elektronenkanone.

HVPS: Hochspannungs-Versorgungs-Interlock.

PS-KLYSTRON: Versorgung für die Spulen und die Vakuumpumpe.

RF-POWER: Interlock für den Überschuss an HF-Energie.

WAVEGUIDE: Kühlungs- und Bogen-Detektor-Signale des Wellenleiter-Systems.

CAVITY 1: Interlocks für Cavity 1.

CAVITY 2: Interlocks für Cavity 2.

FAST INTERLOCK: Schnelles Interlock.

Die Sicherheit von allen Komponenten des HF-Systems ist garantiert durch dieses Kontroll- und Interlock-System. Es ist ein störungsfreies System, das HF-System ist sicher bei Leistungsfehlern, bei Kurzschluss und auch bei Bedienungsfehlern.

Literatur

[1] H.Wiedemann, "Particle Accelerator Physics", I & II. Springer-Verlag (1993 & 1995).

[2] "CAS RF Engineering for Particle Accelerators", Vol 1 & 2, CERN 92-03 (1992)

[3] D. Einfeld, F. Pérez, S. Voigt, A. Fabris, M. Svandrlík. EPAC 98, Stockholm, p.1820.

[4] M. Boccai, A. Fabris, C. Pasotti, P. Pittana, M. Svandrlík, D. Einfeld, F. Pérez, S. Voigt. EPAC 98, Stockholm, p. 1817.

[5] D. Einfeld, F. Pérez, S. Voigt, M. Humpert. PAC 99, New York, p. 806