

UNIVERSITÄT BONN

Physikalisches Institut

Entwicklung und Inbetriebnahme eines verteilten Rechnerkontrollsystems zur Steuerung der Elektronen-Stretcher-Anlage ELSA, unter besonderer Berücksichtigung der Anforderungen des Nachbeschleunigungsbetriebs bis 3.5 GeV

von
Thomas Götz

The **E**lectron **S**tretcher **A**ccelerator **ELSA** of Bonn University has been constructed as pulse stretcher for energies up to 3.5 GeV. Particles are injected from a booster synchrotron and extracted slowly to produce external beams for particle physics experiments with high duty factor. For stretcher operation as well as post acceleration and extraction of accumulated electron beams up to the final design energy, a new control system has been developed and successfully brought into operation. The system design is focused on an effective combination of control, on line beam diagnostics and accelerator modelling in one homogeneous environment. This text describes the design principles and implementation of the distributed control architecture, pointing out the extensive use of de facto standards for both hardware and software. The system is based upon a common communication infrastructure, a distributed database and a set of event-driven rule processors to perform all steering tasks as well as diagnostics and accelerator physics computations. It has been constructed for high transaction bandwidth on all levels and is scalable to cover envisaged upgrades of the accelerator complex. Particular attention is given to the integration of magnet control for post acceleration together with realtime spectral analysis for tune tracking by using a digital signal processor.

Post address:
Nussallee 12
53115 Bonn
Germany



BONN-IR-95-03
Bonn University
January 1995
ISSN-0172-8741

UNIVERSITÄT BONN
Physikalisches Institut

**Entwicklung und Inbetriebnahme eines verteilten Rechnerkontrollsystems zur
Steuerung der Elektronen–Stretcher–Anlage ELSA, unter besonderer
Berücksichtigung der Anforderungen des Nachbeschleunigungsbetriebs bis
3.5 GeV**

von
Thomas Götz

Dieser Forschungsbericht wurde als Dissertation von der Mathematisch - Naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Bonn angenommen.

Angenommen am: 21.12.1994
Referent: Prof. Dr. D. Husmann
Korreferent: Prof. Dr. W. Schwille

**Entwicklung und Inbetriebnahme eines verteilten Rechnerkontrollsystems zur
Steuerung der Elektronen-Stretcher-Anlage ELSA, unter besonderer
Berücksichtigung der Anforderungen des Nachbeschleunigungsbetriebs bis
3.5 GeV**

Inaugural-Dissertation
zur
Erlangung der Doktorwürde
der
Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der
Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität
zu Bonn

vorgelegt von
Thomas Götz
aus
Andernach

Bonn 1994

Ich versichere, daß ich diese Arbeit selbstständig verfaßt und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie die Zitate kenntlich gemacht habe.

Referent: Prof. Dr. D. Husmann

Korreferent: Prof. Dr. W. Schwille

Tag der Promotion: 21.12.1994

Inhalt

Einleitung	1
1 Anforderungen an das neue Kontrollsystem	3
1.1 Aufbau der Elektronen-Stretcher-Anlage ELSA	3
1.2 Motivation für ein neues Kontrollsystem	7
1.3 Anforderungen der Experimente	8
1.3.1 Makroskopisches und mikroskopisches Tastverhältnis	8
1.3.2 Experimentelles Programm an ELSA	9
1.3.3 Optimierung des makroskopischen Tastverhältnisses	10
1.4 Aufgabenstellung für das neue Kontrollsystem	12
1.4.1 Allgemeine Aufgaben	12
1.4.2 Nachbeschleunigung bei optimiertem Tastverhältnis	13
1.4.3 Strahldiagnostik und Simulation	15
1.5 Aspekte der Informationsverarbeitung	16
2 Aufbau des Kernsystems	19
2.1 Entwurfsentscheidungen	19
2.2 Aufbau der Hardware	23
2.3 Software-Architektur	26
2.4 Software für das Prozeßsystem	30
2.5 Kommunikationsschicht	32
2.6 Verteiltes Datenbanksystem	38
2.7 Prozeßgerüst des lokalen Kontrollsystem-Kerns	41
2.8 Parameter-Transaktionen im Kontrollsystem	43
2.9 Regeldatenbanken und verteilte "Experten"	48
3 Grafische Benutzeroberfläche	54
3.1 Allgemeine Konzeption	54
3.2 Werkzeuge zum Entwurf der Oberfläche	56
3.3 Interaktion mit dem Operateur	59
4 Timingsystem	65
4.1 Allgemeine Konzeption	65
4.2 Zyklusgenerator	69
4.3 Injektionsgenerator	70
4.4 Diagnosegenerator	73
4.5 Software	74

5	Kontrolle, Simulation und Strahldiagnose für die Nachbeschleunigung in ELSA	77
5.1	Implementierung der magnetoptischen Berechnungen	77
5.1.1	Berechnungsverfahren und Eich Tabellen	77
5.1.2	Konstruktion der Magnet-Experten	81
5.2	Simulation der linearen Maschinenoptik im Kontrollsystem	83
5.3	Steuerungskonzept für die Nachbeschleunigung in ELSA	86
5.4	Realisierung der Nachbeschleunigung mit dem Kontrollsystem	90
5.4.1	Tracking der Magnete und der Hochfrequenz-Amplitude	92
5.4.2	EPOS-Operatoren für Magnet- und HF-Tracking	93
5.4.3	Konstruktion des Booster-Experten	95
5.4.4	Arbiträre Funktionsgeneratoren zur Ramperzeugung	97
5.5	Zeitaufgelöste Strahldiagnostik für den Nachbeschleunigungsbetrieb	99
5.5.1	Allgemeines Konzept	100
5.5.2	Einbindung des ELSA-Monitor-systems	103
5.5.3	Spektralanalyse der transversalen Teilchenbewegung in ELSA	104
5.5.4	Fourieranalyse mit Fenstertransformationen	108
5.5.5	Parametrische Modelle zur Spektralberechnung	112
5.6	Aufbau des Meßsystems für die zeitaufgelöste Diagnostik	117
5.6.1	Echtzeitverarbeitung mit digitalem Signalprozessor	118
5.6.2	Konstruktion des Diagnose-Experten	125
5.6.3	”off line”-Signalverarbeitung mit EPOS	126
5.7	Zusammenwirken aller Komponenten	127
6	Ergebnisse der ersten Betriebsphase des neuen Kontrollsystems	129
6.1	Migration zum neuen Kontrollsystem	129
6.2	Strukturierung der Oberfläche für den ELSA-Betrieb	131
6.3	Konstruktion von zusätzlichen Experten	133
6.4	Optimierung der ELSA-Füllstruktur	133
6.5	Anpassung der magnetoptischen Berechnungen	140
6.6	Tests der Nachbeschleunigung	143
6.7	Diagnostik im Nachbeschleunigungs-Modus	144
6.8	Einstellung neuer Betriebsmoden für SAPHIR und ELAN	154
6.9	Langzeitdiagnose des Strahlverhaltens in ELSA	160
	Zusammenfassung	161
	Literaturverzeichnis	162
	Danksagung	167

Einleitung

Am Physikalischen Institut der Universität Bonn besteht seit geraumer Zeit Erfahrung im Bau und im Betrieb von Elektronensynchrotrons für die Grundlagenforschung im Bereich der Mittelenergie-Teilchenphysik und die Forschung mit Synchrotronlicht. Ein 500 MeV-Synchrotron mit starker Fokussierung wurde als erste derartige Anlage in Europa bereits 1958 in Dienst gestellt [26]. Im Jahre 1967 erfolgte der Ausbau der Anlagen um ein 2.5 GeV-Synchrotron [2]. Das Synchrotron beschleunigt Elektronen über ca. 10 msec bei einer Gesamtzykluslänge von 20 msec, die durch den netzsynchronen Betrieb der Anlage mit 50 Hz vorgegeben ist; dieser Ablauf des Beschleunigungszyklus führt bei einer Extraktionszeit von ca. 1 msec zu einem Tastverhältnis des extrahierten Strahls von ca. 5%.

Bislang letztes Element der Beschleunigeranlagen ist die **EL**ektronen-**St**retcher-**A**nlage ELSA, die im Jahre 1987 in Betrieb genommen wurde [46]. Die Aufgabe von ELSA ist die Verbesserung des Tastverhältnisses des für die Teilchenphysikexperimente präparierten Elektronenstrahls (d.h. eine Verbesserung des Verhältnisses aus experimentell nutzbarer Strahlzeit zur Gesamtzykluszeit der Anlage) und die Erhöhung der maximalen Strahlenergie auf 3.5 GeV. Das zugrundeliegende Konzept besteht darin, den aus dem Synchrotron extrahierten Strahl in ELSA zu speichern und über einen längeren Zeitraum so zu extrahieren, daß die angeschlossenen Experimente mit möglichst gleichförmiger Strahlintensität beliefert werden. Die auf diesem Konzept beruhende Auslegung von ELSA als Elektronen-Speicherring führt auch zu einer wesentlich verbesserten Nutzbarkeit der Anlagen für die Forschung mit Synchrotronlicht, da dieses nicht mehr, wie bei Messungen am Synchrotron, gepulst erscheint, sondern bei einer geeigneten Speicherung des Strahls wesentlich länger zur Verfügung steht.

Seit 1987 bedient ELSA die Experimente PHOENICS, SAPHIR und ELAN im sogenannten Stretcherbetrieb mit Energien zwischen 1.0 GeV und 1.6 GeV. In dieser Betriebsart wird keine Nachbeschleunigung durchgeführt; die Extraktionsenergie aus ELSA ist identisch zur Energie der vom Synchrotron gelieferten Elektronen. Das Experimentierprogramm des SAPHIR- und ELAN-Detektors ist jedoch auf den Nachbeschleunigungsbetrieb bis 3.5 GeV ausgerichtet, wobei in Zukunft besonders der Betrieb mit polarisierten Elektronen im Mittelpunkt des Forschungsinteresses stehen wird.

ELSA ist im Vergleich zum 2.5 GeV Synchrotron vom Umfang und von der Zahl beteiligter Komponenten wesentlich komplexer; aus diesem Grund war ein dediziertes Rechnerkontrollsystem notwendiger Bestandteil des Projekts. Die Planung dieses Systems begann 1983 unter den Rahmenbedingungen der zu dieser Zeit verfügbaren EDV-Technologie. Es wurde seit 1987 erfolgreich für die Inbetriebnahme und den Stretcherbetrieb eingesetzt. Unter Berücksichtigung der im Laufe der Zeit teilweise geänderten Anforderungen des geplanten Nachbeschleunigungsbetriebs stellte sich jedoch bald heraus, daß die Realisierung von Extraktionsenergien von mehr als 1.6 GeV mit diesem System aufgrund systematischer und technischer Beschränkungen nur sehr schwer durchführbar war. Insbesondere war abzusehen, daß das zugrundeliegende Konzept der erwarteten Komplexität der Steuerungsaufgaben im Nachbeschleunigungsbetrieb, verbunden mit der unverzichtbaren Integration strahl diagnostischer Messungen in den Steuerungsprozeß, nicht ausreichend gewachsen ist. Die Integration der Strahl diagnostik in das Kontrollsystem ist eine wichtige Forderung, da ausschließlich theoretisch motivierte Vorgaben der relevanten Steuergrößen erfahrungsgemäß nicht zu einer optimalen Einstellung von ELSA führen; das System muß vielmehr die bei einer konkreten Einstellung gemessenen Strahlparameter berücksichtigen und bei Bedarf Korrekturen der Vorgaben vornehmen, um die von den Experimenten gewünschte Strahlqualität reproduzierbar sicherzustellen. Da der Fortschritt der Rechnertechnologie seit 1983 die vernünftige Wartbarkeit und Finanzierbarkeit des bestehenden Systems ohnehin ernsthaft in Frage stellte, wurde 1990 die Entwicklung eines neuen Kontrollsystems beschlossen, dessen Potential alle bereits erprobten, aber auch sämtliche geplanten Betriebsarten der Beschleunigeranlagen abdecken soll und besonders auf die Belange der Nachbeschleunigung ausgerichtet ist.

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist der Entwurf, die Entwicklung und die Inbetriebnahme dieses neuen Rechnerkontrollsystems zur Steuerung und Überwachung der Elektronen-Stretcher-Anlage ELSA, mit besonderer Berücksichtigung der Anforderungen des Nachbeschleunigungsbetriebs bis zu Endenergien von 3.5 GeV. Aufgrund der Komplexität der Aufgabenstellung und der angestrebten möglichst kurzen Entwicklungszeit wurde das Thema des Entwurfs und der Implementierung des Systems an zwei sich ergänzende Dissertationen vergeben. Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt dabei neben der eigentlichen Kontrollsystementwicklung auf der Realisierung der Nachbeschleunigung und der dafür notwendigen strahl diagnostischen

Hilfsmittel. Die Konzeption der Steuerung für die langsame Teilchenextraktion im Nachbeschleunigungsbetrieb und die dazu benötigten strahl diagnostischen Untersuchungen werden durch M.Picard im Rahmen seiner Dissertation vorgenommen [68]. Der Entwurf, die Entwicklung und Integration von Hardware und Software sowie die Inbetriebnahme des neuen Systems wurde aber gemeinsam durchgeführt. Zur detaillierten Beschreibung des vollständigen Funktionsumfanges des neuen Kontrollsystems und aller erzielten Resultate sollten also beide Arbeiten zu Rate gezogen werden.

Ausgehend von dem in Kapitel 1 entwickelten Anforderungsprofil des neuen Kontrollsystems beschreibt Kapitel 2 zunächst das Kernsystem in seiner Hard- und Software-Struktur. Die Interaktion des Systems mit einem bedienenden Operateur oder Physiker wird durch die im Kapitel 3 beschriebene grafische Benutzeroberfläche vermittelt. In Kapitel 4 schließt sich die Beschreibung des für die Realisierung aller zukünftig geplanten Betriebsmodi neu entwickelten Timingsystems an.¹ Dessen Komponenten stellen zusammen mit dem Kernsystem und der grafischen Oberfläche die Basis für alle ELSA-spezifischen Anwendungen dar; in diesem Sinn bilden die Kapitel 2, 3 und 4 den kontrolltechnischen Schwerpunkt dieser Arbeit. Die auf dieser Basis aufbauenden Methoden und Werkzeuge zur Realisierung der Nachbeschleunigung sowie der Untersuchung des Strahlverhaltens in der Beschleunigungsphase werden anschließend in Kapitel 5 erläutert, wobei besonderes Gewicht auf die digitalen Verfahren zur Analyse des Strahlagesignals gelegt wird. Entsprechend der gewählten Aufgabenteilung bei der Entwicklung des neuen Systems bildet dieses Kapitel damit den beschleunigerphysikalischen Schwerpunkt der Arbeit. Eine Beschreibung der Extraktionsmethodik und der dazu erforderlichen Steuerungskonzepte ist analog in [68] zu finden. Die während der ersten Betriebsphase des neuen Systems erzielten Ergebnisse werden in Kapitel 6 diskutiert. Dabei werden die in Kapitel 5 beschriebenen Methoden und Werkzeuge besonders berücksichtigt, indem speziell auf die Problematik der Nachbeschleunigung und das während der Energierampe rekonstruierte Strahlverhalten eingegangen wird.

Das neue Kontrollsystem soll den Betrieb der Beschleunigeranlagen am Physikalischen Institut mindestens über die nächste Dekade gewährleisten. Das System ist, bedingt durch die komplexe Aufgabenstellung, aus einer Vielzahl eng miteinander verbundener Komponenten verschiedenster Technologiebereiche aufgebaut. Die vorliegende Arbeit hat sich neben der wissenschaftlichen Behandlung des Themenkomplexes zum Ziel gesetzt, die interne Struktur und die konzeptionelle Arbeitsweise des neuen Kontrollsystems zu dokumentieren und dadurch Hilfsmittel für die Pflege des Systems sowie für in Zukunft gewünschte Erweiterungen anzubieten.

¹Das Aufgabenfeld der Beschleunigerkontrolle ist aufgrund seiner engen Verzahnung mit der angewandten Informatik und EDV-Technologie zwangsläufig mit einer großen Zahl von Anglizismen behaftet. Im Verlauf dieser Arbeit wurde, so weit wie möglich, die Verwendung des jeweils entsprechenden deutschen Äquivalentes angestrebt. In einigen Bereichen existiert aber leider keine entsprechende deutsche Begriffsbildung; der Autor bittet in solchen Fällen um das Verständnis und die Nachsicht des Lesers.

1. Anforderungen an das neue Kontrollsystem

In diesem Kapitel werden – basierend auf der Beschreibung der Bonner Beschleunigeranlagen und des experimentellen Programms an ELSA – die wichtigsten Anforderungen an das neue Kontrollsystem entwickelt. Dazu wird eine Aufstellung der von den Experimenten geforderten Strahleigenschaften vorgenommen und die daraus folgenden Konsequenzen diskutiert. Die für das Kontrollsystem relevanten Aufgaben der Nachbeschleunigung und Strahldiagnose werden abgeleitet und resultieren in einer prinzipiellen Konzeption der beschleunigerphysikalischen und informationstechnischen Strukturen des neuen Systems.

1.1 Aufbau der Elektronen-Stretcher-Anlage ELSA

Die Beschleunigeranlagen des Physikalischen Instituts bestehen aus einer Elektronenquelle und einer Kette von drei nachfolgenden Beschleunigern: einem Linearbeschleuniger (LINAC), einem 2.5 GeV-Synchrotron [2] und der Elektronen-Stretcher-Anlage ELSA [45][46]. Aufgabe von ELSA ist zum einen die Verbesserung des sogenannten makroskopischen Tastverhältnisses — das Verhältnis aus nutzbarer Strahlzeit und Gesamtzykluszeit der Anlage —, und zum anderen eine Erhöhung der Energie der vom Synchrotron gelieferten Elektronen bis auf maximal 3.5 GeV.

Die am Beginn der Beschleunigerkette stehende Elektronenquelle arbeitet mit einer Spannung von 120 keV und kann einen maximalen Pulsstrom von ca. 1.5 A mit einer Pulsdauer von 1 μ sec emittieren. Speziell zur Erzeugung polarisierter Elektronen wurde zusätzlich eine Quelle aufgebaut, die auf dem Prinzip der photoinduzierten Emission von Elektronen aus einem GaAs-Kristall basiert.

Der Quelle nachgeordnet ist der Wanderwellen-LINAC (20 MeV) mit einer Betriebsfrequenz von 3 GHz. Der hierdurch beschleunigte Elektronenstrom beträgt maximal ca. 0.5 A. Durch Einsatz eines Energiekompressorsystems kann die Energiebreite des Strahls reduziert und damit besser an die Energieakzeptanz des nachfolgenden Synchrotrons angepaßt werden.

Das Synchrotron arbeitet netzsynchron mit einer Wiederholrate von 50 Hz und wird über 4 Umläufe gefüllt.¹ Der Magnetring ist nach dem sogenannten "Combined Function"-Prinzip aufgebaut und wird mit einem auf einer Vormagnetisierung B_{const} aufbauenden sinusförmigen Magnetfeldverlauf

$$B_{sync}(t) = B_{const} + B_0 \sin(\omega t), \quad \omega = 2\pi \cdot 50 \text{ s}^{-1}$$

betrieben; die Beschleunigung der injizierten Elektronen erfolgt während einer Zeit von etwa 10 msec nach dem Einschub. Die im Synchrotron verwendete Beschleunigungsfrequenz von 500 MHz ordnet die 3 GHz-Bunchstruktur des injizierten Strahls in insgesamt 116 sogenannte "Buckets", die annähernd gleichmäßig mit Elektronen gefüllt sind.

Das Synchrotron stellte (bis zur Inbetriebnahme von ELSA) für die Hochenergiephysik² zwei externe Elektronenstrahlen für Fixed-Target-Experimente zur Verfügung. Durch Einsatz eines Bremsstrahl-Targets konnten ebenfalls Untersuchungen mit reellen Photonen durchgeführt werden. Das durch die Extraktion maximal erreichbare Tastverhältnis war — systembedingt durch den netzsynchronen Magnetfeldverlauf und durch die Vorgabe einer maximalen Energiebreite des extrahierten Strahls — auf ca. 5% limitiert. Durch den weiteren Ausbau der Beschleunigeranlagen des Physikalischen Instituts beschränkt sich heute die Aufgabe des Synchrotrons auf die eines reinen Vorbeschleunigers für ELSA.

¹Die Umlaufzeit im Synchrotron beträgt 232 nsec, was bei einer vom LINAC gelieferten Pulslänge von 1 μ sec eine Zahl von $1000/232 \approx 4$ ergibt.

²Heute wird der Energiebereich von 0.5 GeV bis etwa 10 GeV der sog. "Mittelenergiephysik" zugeordnet.

Die für den Transfer der Elektronen vom Synchrotron nach ELSA erforderliche Extraktionsmethodik wurde von H.D.Nuhn im Rahmen einer Dissertation entwickelt [63]. Die Extraktion erfolgt dabei wahlweise über ein bis drei Umläufe im Synchrotron (Umlaufzeit: 232 nsec), um eine möglichst gute Füllung von ELSA (Umlaufzeit: 548 nsec) zu erreichen. Durch die Magneto-optik des Transferkanals wird eine Anpassung der strahl-optischen Eigenschaften für die Injektion der Elektronen in ELSA vorgenommen.

Die Injektion in ELSA wurde von A.Dreist realisiert [24] und basiert auf einer geschlossenen Beule der Sollbahn am Injektionspunkt. Das Injektionssystem gestattet das Akkumulieren von Strahlstrom in ELSA, d.h. ein bereits im Ring umlaufender Strahl wird durch eine neue Injektion nicht am Injektionsseptummagneten vernichtet. Durch dieses Verfahren kann in ELSA durch mehrfache Injektion mit der Wiederholrate des Synchrotrons ein Strom von bis zu 250 mA bei 1.2 GeV akkumuliert werden.

ELSA verwendet zwei Hochfrequenzsysteme zur Beschleunigung der Elektronen. Bis zu einer Endenergie von 1.6 GeV kommt ein einzelliger HF-Resonator (DORIS-Typ) zum Einsatz, welcher durch einen 50 kW-Leistungssender gespeist wird. Für höhere Energien ist ein System aus zwei fünfzelligen Resonatoren (PETRA-Typ) und einem 250 kW-Sender eingebaut. Die Hochfrequenz in ELSA wird, wie für das Synchrotron, aus einem Mutteroszillator abgeleitet, so daß eine starre Phasenbeziehung zwischen der Beschleunigungsspannung im Synchrotron und in ELSA hergestellt wird.

Die nachfolgende Tabelle gibt eine Gegenüberstellung der wichtigsten Daten des Synchrotrons und von ELSA.

	Synchrotron	ELSA
Hochfrequenz	499.67 MHz	499.67 MHz
Harmonischenzahl	$h = 116$	$h = 274$
Magnetstruktur	Combined Function	Separated Function FODO
Umfang	69.9 m	164.4 m
Arbeitspunkt	3.4	3.3–6 (normalerweise 4.2–4.8)
Magnete	12	24 Dipole, 32 Quadrupole
nat. Chromatizität	$\xi_x = -4.8, \xi_z = -4.5$	$\xi_x = \xi_z = -6.8$
Momentum Compaction	11%	6.4%
Dipol-Krümmungsradius	7.65 m	10.88 m
Umlaufzeit	$T_0 = 232$ nsec	$T_0 = 548$ nsec
Energie	20 MeV – 2.3 GeV	0.5 GeV – 3.5 GeV
Injektionsenergie	20 MeV	0.5 GeV – 1.6 GeV
Extraktionsenergie	0.5 GeV – 1.6 GeV	0.5 GeV – 3.5 GeV
Extraktionszeit	$\tau_{extr} \approx 0.7$ msec	19.7 msec $\leq \tau_{extr} \leq 60$ sec
Zykluszeit	$\tau_{cycl} = 20$ msec	20 msec $\leq \tau_{cycl} \leq 65$ sec

Zur Zeit werden die Beschleunigeranlagen erweitert. Von der Universität Mainz wurden wesentliche Teile eines 300 MEV-LINACs übernommen, um einen neuen 20 MEV-LINAC aufzubauen. Während der bereits existierende Linearbeschleuniger für den Normalbetrieb weiter verwendet wird, soll der neue LINAC ausschließlich als Vorbeschleuniger für polarisierte Elektronen eingesetzt werden, da er aufgrund seiner geringeren Einschubenergie von 50 keV wesentlich bessere Möglichkeiten für die Konstruktion einer Quelle für polarisierte Elektronen bietet. Neben der bereits erwähnten Quelle für polarisierte Elektronen wird eine zweite Einheit aufgebaut, die speziell auf den Einschub in den neuen LINAC optimiert ist. Eine Studie dazu wurde in [94] durchgeführt.

Die ELSA-Betriebsmodi

ELSA wurde als Stretcheranlage und Speicherring in einem Energiebereich von 0.5 bis 3.5 GeV geplant. Im reinen *Stretchermodus* (siehe Abb. 1.1) wird der injizierte Strahl etwa 300 μ sec nach der Injektion mit einer langsamen Resonanzextraktion nahe eines drittelzahligen Betatronarbeitspunktes (normalerweise $4\frac{2}{3}$) über einen verbleibenden Zeitraum von 19.7 msec extrahiert und einem Experiment zugeführt. Nach Leerung des ELSA-Rings kann dann aus dem Synchrotron neu injiziert werden. Der vom Experiment gewünschte mittlere Strom muß dabei durch Wahl eines entsprechenden Synchrotronstroms eingestellt werden. Das maximal erreichbare, oben definierte makroskopische Tastverhältnis dieses Betriebsmodus liegt bei etwa 98%.

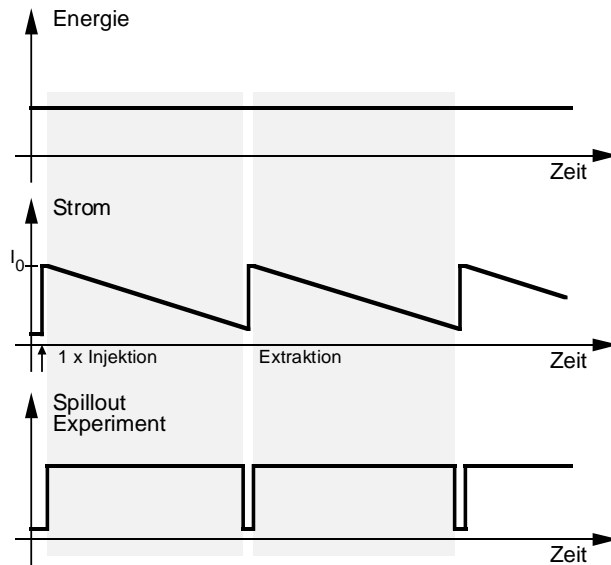


Abbildung 1.1: Prinzipieller ELSA-Betrieb im Stretcher-Modus

Im geplanten *Nachbeschleunigungsmodus* (Abb. 1.2) wird ein durch wiederholte Injektionen akkumulierter und gespeicherter Strahl der Stromstärke I_0 auf die gewünschte Endenergie beschleunigt und dann langsam extrahiert. Das erreichbare Tastverhältnis ist im Vergleich zum Stretchermodus reduziert, da die Injektionsphase zum Akkumulieren des notwendigen Stroms mehr Zeit beansprucht und die Rampzeiten berücksichtigt werden müssen.

Sowohl der Stretcher- als auch der Nachbeschleunigungsbetrieb soll in Zukunft optional mit polarisierten Elektronen erfolgen.

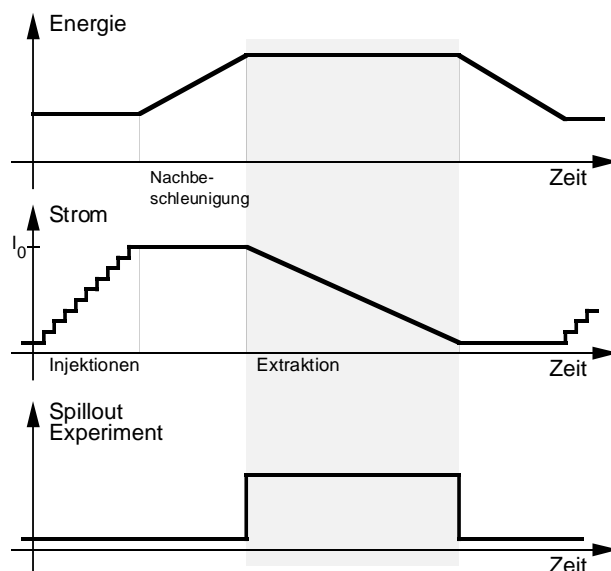


Abbildung 1.2: Prinzipieller ELSA-Betrieb im Nachbeschleunigungs-Modus

Neben den beiden vorgestellten Betriebsmodi für die Mittelenergie-Teilchenphysik ist auch ein reiner Betrieb als Speicherring bei höheren Energien realisiert (Abb. 1.3). Dies ist der Operationsmodus für die Grundlagen- und die anwendungsbezogene Forschung mit Synchrotronlicht. In dieser Betriebsart werden typischerweise in ELSA maximal 100 mA akkumuliert und bis zu einer Endenergie von 1.9 GeV oder 2.3 GeV

nachbeschleunigt. Die zur Zeit erreichten Lebensdauern liegen bei ca. 1 h (2.3 GeV) und 60 mA gespeichertem Strahl.

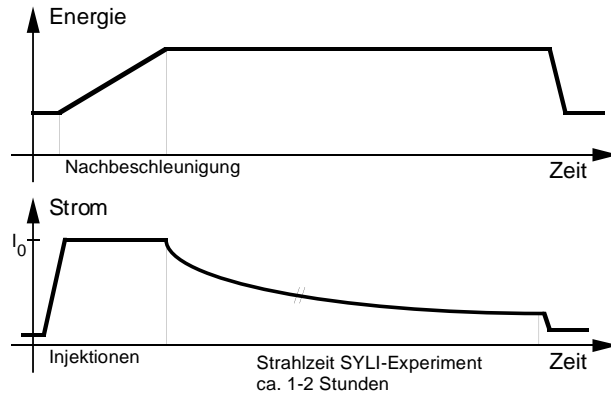


Abbildung 1.3: Speicherring-Betriebsmodus für Synchrotronlicht-Nutzer an ELSA

Die geographische Gesamtansicht der Beschleunigeranlagen des Physikalischen Instituts ist in Abbildung 1.4 skizziert.

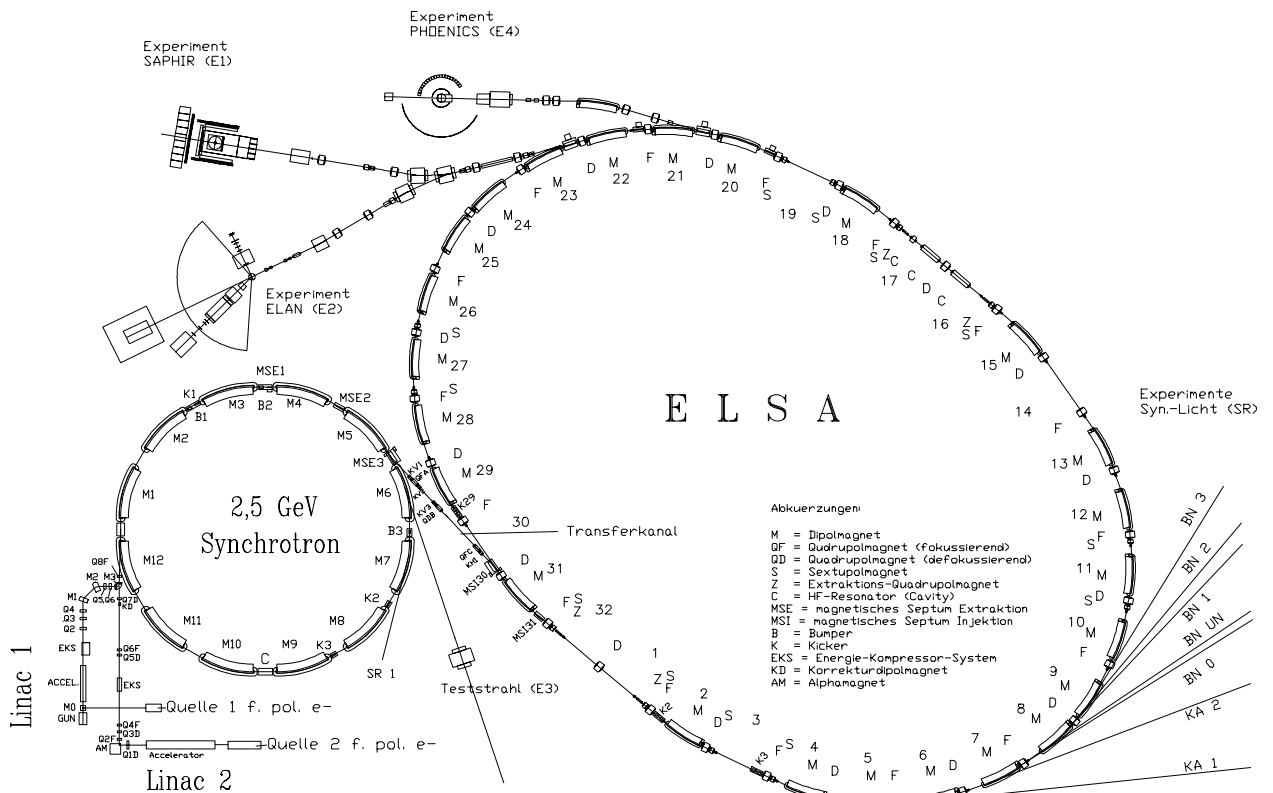


Abbildung 1.4: Die Beschleunigeranlagen des Physikalischen Instituts

1.2 Motivation für ein neues Kontrollsystem

Für den Aufbau und die erste Betriebsphase von ELSA im Stretchermodus wurde im Rahmen einer Dissertation ein rechnergestütztes Kontrollsystem konzipiert und in Betrieb genommen [95], welches auf einem geographisch verteilten Feldbussystem, bestehend aus Mikroprozessormodulen ("MACS-Prozessoren"³) mit $\mu P8085$ -Prozessor [76], und einem Zentralrechner vom Typ **Digital Equipment VAX 11/750** basiert. Die Feldbusprozessoren sind über zwei serielle Leitungen und einen eigens entwickelten **VAX-UNIBUS**-Adapter an den Zentralrechner angeschlossen. Beide Leitungen verwenden das sog. **HDLC**-Protokoll und werden mit einer Übertragungsrate von 1.25 Mbit/sec betrieben. Als Operateursschnittstelle kommt ein **DESY-PADAC**-System mit Rollbällen und Farbgrafikschirmen zum Einsatz. Das **PADAC**-System ist ebenfalls direkt an den **UNIBUS** des Zentralrechners angekoppelt.

Das Kontrollsystem wurde den Anforderungen der Physiker und der Operateure beim Aufbau und der Inbetriebnahme von ELSA gut gerecht. Zusammen mit dem Steuer- und Signalanalysepaket **EPOS** [31][67] deckte es die Aufgaben der Anlagensteuerung im Stretcher- und Synchrotronlicht-Modus zufriedenstellend ab. Das **EPOS**-System wurde besonders für die Sequenzsteuerung von Betriebsabläufen und die digitale Signalverarbeitung der vom ELSA-Monitorssystem [77] gelieferten Strahldaten entwickelt und ist mit einer Befehlssprache ausgestattet, welche die Entwicklung komplexerer Steuer- und Diagnoseprogramme erlaubt. Die Steuerung der Maschine für den Synchrotronlicht-Betrieb wurde dementsprechend mit speziell dafür entwickelten **EPOS**-Operatoren realisiert.

Eine Analyse [32] hat ergeben, daß der geplante ELSA-Nachbeschleunigungsmodus mit dem bestehenden System nicht in allen Anforderungen realisiert werden kann:

- Das System ist – bedingt durch die zentralisierte Struktur von Hard- und Software – nicht ausreichend in der Gesamtleistungsfähigkeit skalierbar. Dies hat insbesondere stark einschränkende Auswirkungen auf die simultane Verarbeitung großer Magnetfeldtabellen, deren Berechnung und Manipulation für den Nachbeschleunigungsbetrieb unbedingt notwendig ist, aber auch auf das Aufgabengebiet der digitalen Signalverarbeitung gemessener Strahldaten. Die Integration neuer Meßsysteme ist, bedingt durch die unzureichende Erweiterbarkeit, fast nicht möglich. Bereits die Anbindung des Monitorystems war nur unter fast vollständiger Umgehung des zentralen Kontrollsystems zu realisieren.
- Das in die Kontrollsystem-Hardware integrierte Timingsystem wurde für den Stretchermodus entworfen und ist für den Nachbeschleunigungsbetrieb nicht geeignet, da zu wenige voneinander unabhängig konfigurierbare Triggersignale zur Steuerung und Entkopplung der einzelnen Phasen im Nachbeschleunigungsbetrieb verfügbar sind.
- Das System entspricht in einer Vielzahl von Einzelaspekten nicht mehr dem Stand der Technik. Pflege oder Erweiterungen der Hardware und Software sind – bedingt durch den schnellen Fortschritt der EDV-Technologie seit 1983 – kaum noch zu verwirklichen. Die Wartungs- und Servicekosten haben – verursacht durch veraltete Rechnerstrukturen – eine nicht mehr akzeptable Höhe erreicht.

Das geographisch verteilte Feldbussystem kann hingegen auch weiterhin zur direkten Ansteuerung der meisten ELSA-Komponenten verwendet werden. Hervorzuheben sind insbesondere die hervorragenden Standzeiten sowie die gute Störsicherheit der eingesetzten Komponenten, die den Einsatz auch an Orten mit einem hohen Pegel elektromagnetischer Einstreuungen (z.B. in der Nähe von gepulsten Netzteilen o.a.) erlaubt. Die Verwendung von über 80 Prozessoren mit etwa 200 Steuerelektronikmodulen in mehr als 20 Übernahmen stellt darüber hinaus eine so große Investition dar, daß sich der vollständige Ersatz dieses Systems durch ein modernes Feldbussystem (wie z.B. den **CAN**-Bus) allein aus finanziellen Gründen nicht empfiehlt. Falls sich die mit den Feldbuskomponenten gegebenen Steuerungsmöglichkeiten in einem konkreten Fall als unzureichend erweisen, ist der Ersatz durch besser geeignete Komponenten vorgesehen.

Um den ELSA-Betrieb im Nachbeschleunigungsmodus (auch mit polarisierten Elektronen) zu realisieren, wurde die Neukonzeption des ELSA-Kontrollsystems mit einer weitgehenden Übernahme des bestehenden Feldbussystems beschlossen. Das Anforderungsprofil des neuen Systems soll nun in den nächsten Abschnitten systematisch entwickelt werden.

³MACS: "Microprocessor Aided Control System".

1.3 Anforderungen der Experimente

1.3.1 Makroskopisches und mikroskopisches Tastverhältnis

Das Tastverhältnis gibt an, wie weit ein veränderlicher Strom $I(t)$ einem Gleichstrom I_{const} nahekommt und ist wie folgt definiert (T ist die Zeitdauer der Strommessung, dt die Zeitauflösung der Meßapparatur):

$$TV[I(t), T, dt] := \frac{(\int_0^T I(t)dt)^2}{T \int_0^T I^2(t)dt} . \quad (1.1)$$

Unter Berücksichtigung der Betriebseinstellung der Beschleunigeranlagen kann man daraus abgeleitet zunächst ein sog. makroskopisches Tastverhältnis TV_{makr} definieren. Dieser Wert gibt das Verhältnis der Extraktionszeit τ_{extr} zur Gesamtzykluszeit τ_{cycl} des Beschleunigers an und soll so groß wie möglich sein:

$$TV_{makr} := \frac{\tau_{extr}}{\tau_{cycl}} . \quad (1.2)$$

Diese Forderung macht unter Bezugnahme auf das Betriebssystem des geplanten Nachbeschleunigungsmodus insbesondere die Minimierung der Rampzeiten erforderlich, da diese einen wesentlichen Beitrag zu τ_{cycl} bilden. Für den Betrieb von ELSA im Stretcher- wie auch im Nachbeschleunigungsmodus ist das sog. mikroskopische Tastverhältnis TV_{mikr} des extrahierten Elektronenstrahls als Gütefaktor der ELSA-Extraktion während der Zeit τ_{extr} von besonderer Wichtigkeit.⁴ Der Schwerpunkt des experimentellen Programms ist besonders auf die Stretchereigenschaft der Maschine zugeschnitten, d.h. auf die Fähigkeit, ein Experiment über einen längeren Zeitraum mit einem quasi-Gleichstrom extrahierter Teilchen zu bedienen. Aus den Werten TV_{mikr} und TV_{makr} bildet man zur Bewertung das sog. Gesamt-Tastverhältnis TV_{ges} :

$$TV_{ges} := TV_{makr} \cdot TV_{mikr} . \quad (1.3)$$

Die Angabe eines gemessenen Tastverhältnisses TV_{mikr} muß immer mit der Angabe der Auflösungszeit der Meßanordnung versehen sein. Diese Auflösungszeit definiert die für das Experiment sichtbaren Substrukturen im extrahierten Strahl — das gemessene TV_{mikr} verringert sich immer dann, wenn eine weitere Substruktur sichtbar wird.⁵ Die Bedeutung einzelner periodischer Substrukturen auf ein gemessenes TV_{mikr} wurde detailliert in [12] untersucht. Insbesondere läßt sich eine Faktorisierung von TV_{mikr} angeben, falls das Stromsignal $I(t)$ eine mehrfache Periodizität der Abstände $\tau_1 \gg \tau_2 \gg \dots \tau_n$ besitzt. Bei einer Meßzeit $T > \tau_1$ und einer experimentellen Zeitauflösung $dt \ll \tau_n$ gilt

$$TV_{mikr}[T, dt] = TV_{mikr,1}[T, \tau_1] \cdot TV_{mikr,2}[\tau_1, \tau_2] \cdot \dots \cdot TV_{mikr,n+1}[\tau_n, dt] . \quad (1.4)$$

Wegen dieser Faktorisierbarkeit des Tastverhältnisses folgt sofort, daß TV_{mikr} für jedes ELSA-Experiment durch das Tastverhältnis der Füllstruktur $I_{fill}(t)$ des ELSA-Ringes limitiert ist,⁶ da die Umlaufzeit bei inhomogener Füllung $I_{fill}(t) \neq I_{const}$ in ELSA eine periodische Struktur im extrahierten Strahl erzeugt:

$$TV_{mikr} \leq TV[I_{fill}(t)] . \quad (1.5)$$

Aus diesem Grund muß eine Optimierung der ELSA-Füllstruktur in Richtung $I_{fill}(t) \approx I_{const}$ gefordert werden. Da die Füllstruktur in ELSA wesentlich von der Einstellung der Synchrotron-Extraktion und vom Transferschema des Strahltransports vom Synchrotron nach ELSA bestimmt wird, besteht eine wesentliche Aufgabe des neuen Kontrollsystems darin, eine entsprechend optimale Einstellung der relevanten Subsysteme (Synchrotron-Extraktion und ELSA-Injektion) zu organisieren.

⁴Die Experimente an ELSA aktivieren die Datenerfassung lediglich während der Extraktionsperiode τ_{extr} . Dadurch entspricht der von einem Experiment gemessene TV-Wert dem Wert von TV_{mikr} und nicht dem Gesamt-Tastverhältnis TV_{ges} .

⁵Bei einer angenommenen (und für Teilchendetektoren realistischen) "Trigger"-Auflösungszeit von $\tau_{res} = 10$ nsec ist die gebunchte Struktur des ELSA-Elektronenstrahls mit einer Bunchlänge von weniger als 2 nsec nicht mehr sichtbar. Würde τ_{res} unter einem Wert von 2 nsec liegen, so würde dies zu einer deutlichen Reduktion des gemessenen TV_{mikr} führen, da dann eine 2 nsec-Pulsstruktur dominant wäre.

⁶Die Füllstruktur in ELSA ist die über den Ring mit der Ortskoordinate s verteilte Ladungsmenge $q(s)$. Bei der Beobachtung dieser in ELSA umlaufenden Ladungsmenge durch einen positionsfesten Monitor wird ein Strom $I_{fill}(t) = \frac{dq}{dt}|_{s=const}$ gemessen. Aus diesem Grund kann der Strom $I_{fill}(t)$ als Angabe der Füllstruktur $q(s)$ interpretiert werden.

1.3.2 Experimentelles Programm an ELSA

Die Experimente an ELSA sind dem Bereich der Mittelenergiephysik zugeordnet und untersuchen die fundamentalen Wechselwirkungen unter Berücksichtigung der Quarkstruktur der Nukleonen. Hierbei steht die Analyse einfacher Hadronensysteme wie d , 3H , 3He oder 4He mit elektromagnetischen Sonden (Elektronen und reellen Photonen) im Vordergrund des Meßprogramms [79].

Alle an ELSA aufgebauten Experimente stellen hohe Anforderungen an das Tastverhältnis TV_{mikr} des aus ELSA während der Extraktionsperiode gelieferten Elektronenstrahls. Da Reaktionen durch Koinzidenztrigger für mindestens zwei Teilchen im Endzustand erfaßt werden, ist die Rate zufälliger Koinzidenzen von entscheidender Bedeutung: Innerhalb der Auflösungszeit τ_K der Koinzidenzanordnung kann es dazu kommen, daß im Detektor Teilchen registriert werden, die nicht kausal einer einzelnen Primärreaktion zugeordnet werden können. Dadurch ist die auf einer eindeutigen Zuordnung von Reaktionsprodukten zum einlaufenden Projektil (Elektron oder reelles Photon) basierende Ereignisrekonstruktion nicht mehr möglich. Für die Bestimmung des Tastverhältnisses TV_{mikr} aus experimentell ermittelten Zählraten im Detektor gilt die Beziehung

$$TV_{mikr} = \frac{\langle \dot{N}_1 \rangle \cdot \langle \dot{N}_2 \rangle}{\langle \dot{N}_z \rangle} \tau_K, \quad (1.6)$$

wobei $\langle \dot{N}_1 \rangle$ bzw. $\langle \dot{N}_2 \rangle$ die mittleren Einzelzählraten der beiden Reaktionsprodukte und $\langle \dot{N}_z \rangle$ die mittlere Rate zufälliger Koinzidenzen darstellt. Die Problematik einer auf Zählraten basierenden Ermittlung des mikroskopischen Tastverhältnisses wird detailliert in [21] beschrieben.

Da die experimentelle Nachweiswahrscheinlichkeit für die Reaktionsprodukte bei einem realen Detektor nicht gleich 1 ist, können nicht alle Zufallskoinzidenzen als solche erkannt werden. Dies führt zu unvermeidbaren Fehlern in der Ereignisrekonstruktion und damit in der Messung. Damit die Meßfehler eine obere Grenze nicht überschreiten, muß die Zahl der zufälligen Koinzidenzen beschränkt werden. Dieser Sachverhalt setzt ein Limit für die vom Experiment noch tolerierbare Zählrate

$$\langle \dot{N}_{1,2} \rangle \leq \kappa \cdot \frac{TV_{mikr}}{\tau_K}, \quad (1.7)$$

wobei κ einen Proportionalitätsfaktor darstellt, in den vor allem die Nachweiswahrscheinlichkeit von Reaktionsprodukten im Detektor eingeht. Je höher das von ELSA bei der Extraktion erreichte Tastverhältnis TV_{mikr} , desto besser ist die Reduktion des Untergrundes an zufälligen Koinzidenzen, und desto höher ist die noch akzeptierbare Zählrate. Eine höhere Zählrate führt wiederum zu einer verkürzten Meßzeit oder – bei gleicher Gesamtmeßzeit – zu einer verbesserten Statistik für die Reaktionsauswertung.

Die im Physikalischen Institut aufgebauten Detektoren an ELSA werden im folgenden kurz vorgestellt. Ihre Anforderungen legen die Basis für den Betrieb der Beschleunigeranlagen und daher auch für die Konzeption des neuen Kontrollsystems.

- Der **PHOENICS**-Detektor ist ein Großraumwinkeldetektor mit einem Taggingssystem zur Energiemarkierung reeller Photonen. Die Photonen werden durch einen Bremsstrahlprozeß von Elektronen an einer Radiatorfolie erzeugt. Das Taggingssystem arbeitet bis zu einer Energie von 1.2 GeV und kann Photonen im Bereich von 20% bis 95 % der Elektronenenergie nachweisen [21][22]. Untersucht werden Reaktionen mit zwei Teilchen im Endzustand. Für die Reaktionsprodukte werden die Energiedeposition in Szintillatoren und die Flugzeit gemessen. Der PHOENICS-Detektor verwendet kein impulsseparierendes Magnetfeld. Durch die Energiemarkierung der reaktionsauslösenden Photonen ist die Reaktion so überbestimmt, daß eine Ereignisrekonstruktion mit guter Untergrundreduktion möglich wird. Als Target können in Zukunft auch polarisierte Protonen und Deuteronen verwendet werden. Doppelpolarisationsexperimente werden durch linear polarisierte Photonen, erzeugt durch einen Bremsstrahlprozeß an einem Kristall, ermöglicht. Der für PHOENICS maximal verwertbare ELSA-Strom beträgt ca. 100 pA. Dieser Wert ist abhängig von der Dicke der Bremsstrahlfolie und der Konfiguration der eingesetzten Kollimatoren in der PHOENICS-Strahlführung.
- Ein Detektor mit dem Namen **SAPHIR** wird zum Nachweis von Reaktionen mit vielen Teilchen im Endzustand eingesetzt [78]. Auch dieser Detektor arbeitet mit reellen, energiemarkierten Photonen [49]. Im Zentrum des Detektors befindet sich ein Protonen- bzw. Deuteronentarget, umgeben von einer zylinderförmigen Driftkammer in einem homogenen Magnetfeld von etwa 0.7 Tesla Stärke. Der Zentraldetektor ist von planaren Driftkammern sowie Hodoskopen und speziellen Szintillationszählern umgeben. Die Raumwinkelabdeckung beträgt ca. 2π . Durch Aufbau eines universellen Triggersystems

können alle Reaktionen im Energiebereich von 0.5 GeV bis 3.5 GeV mit mindestens einem bzw. zwei geladenen Teilchen im Endzustand erfasst werden. Das experimentelle Programm konzentriert sich auf die Erforschung von Nukleonenresonanzen und Teilchen mit "Strangeness", sowie der Untersuchung der Dibaryonenhypothese in der Reaktion $\gamma d \rightarrow pp\pi^-$. Besonderes Merkmal der SAPHIR-Analysekette ist die Tatsache, daß durch die Wahl einer relativ schwach einschränkenden Triggerbedingung viele verschiedene Reaktionen mit hoher Ereignisrate "on line" erfasst, vorklassifiziert und für spätere Analysen gespeichert werden können.

Bedingt durch die Verwendung einer zentralen Driftkammer muß bei SAPHIR besonders auf eine sichere Begrenzung der Ereignisrate geachtet werden. Überschreitet diese Rate eine gewisse Schwelle, kommt es zum Ausfall der zentralen Driftkammer, und die Messung kann erst nach einer längeren Erholzeit fortgesetzt werden. Aus diesem Grund kann das Tastverhältnis bei SAPHIR etwas niedriger liegen, wenn dafür eine burstartige Überschreitung der maximal vertretbaren Ereignisrate vermieden wird. Optimale Ergebnisse erzielt der SAPHIR-Detektor zur Zeit bei einem mittleren extrahierten ELSA-Strom von ca. 10 pA. Dieser geringe Strom stellt bei der Forderung nach Vermeidung von Bursts und hohem mikroskopischen Tastverhältnis sehr hohe Anforderungen an die Qualität und Langzeitstabilität der Extraktion aus ELSA.

- Das **ELAN**-Experiment ist ein Elektronenstreuexperiment mit einem Zweiarm-Spektrometer, bestehend aus einem Elektronen- und Hadronen-Spektrometer. Das Elektronenspektrometer wird fokussierend betrieben und erreicht eine Impulsauflösung des gestreuten Elektrons von 0.5%.⁷ Die zur Reaktionsauswertung maximal verwertbare Energie des gestreuten Elektrons beträgt ca. 2.2 GeV. Hadronische Reaktionsprodukte werden mit einem nichtmagnetischen, jeweils speziell auf die zu untersuchende Reaktion zugeschnittenen Detektorarm, z.B. einer Flugzeitwand, nachgewiesen. Der Einsatz eines polarisierten ND_3 -Targets erlaubt die Streuung polarisierter Elektronen aus ELSA an polarisierten Neutronen, was eine Untersuchung des magnetischen Formfaktors des Neutrons möglich macht. Um eine möglichst hohe Statistik bei guter Untergrundunterdrückung an zufälligen Koinzidenzen zu erreichen, muß auch bei ELAN ein möglichst hohes Tastverhältnis TV_{mikr} des ELSA-Strahls erreicht werden. Bedingt durch die geringere Akzeptanz der Spektrometer wird ein im Vergleich zu PHOENICS und SAPHIR wesentlich höherer Strom von 5 nA bis maximal 100 nA gefordert.

1.3.3 Optimierung des makroskopischen Tastverhältnisses

Für alle ELSA-Betriebsmodi gilt die Forderung nach Optimierung von TV_{mikr} und eine möglichst gute Betriebseinstellung für ein hohes TV_{makr} . Die Optimierung des makroskopischen Tastverhältnisses ist für das PHOENICS-Experiment unnötig, da keine Nachbeschleunigung erforderlich ist: im Stretchermodus gehen von der Zykluszeit $\tau_{cycl} = 20$ msec lediglich ca. 300 μ sec für die Injektion verloren, was ein TV_{makr} von ca. 98% ergibt. Die Experimente SAPHIR und ELAN sind aber, bedingt durch das experimentelle Programm, an den Nachbeschleunigungsmodus gebunden. Das makroskopische Tastverhältnis kann dann prinzipiell wie folgt angegeben werden:

$$TV_{makr} = \frac{\tau_{extr}}{\tau_{inj} + \tau_{R\uparrow} + \tau_{extr} + \tau_{R\downarrow}} . \quad (1.8)$$

Hierbei ist τ_{inj} die für die Injektion(en) verwendete Zeit, $\tau_{R\uparrow}$ bzw. $\tau_{R\downarrow}$ die Rampzeiten und τ_{extr} die Extraktionszeit. Durch die technisch bedingten, minimal realisierbaren Rampzeiten wird eine untere Schranke für τ_{extr} gesetzt, falls das makroskopische Tastverhältnis einen gewissen Wert TV_{min} überschreiten soll:

$$\tau_{extr} \geq \frac{\tau_{inj} + \tau_{R\uparrow} + \tau_{R\downarrow}}{TV_{min}^{-1} - 1} . \quad (1.9)$$

Die Zeit τ_{inj} kann wie folgt abgeschätzt werden: Der in ELSA einzufüllende Strom I_0 wird bestimmt durch den gewünschten extrahierten Strom I_{extr} des Experiments, die Extraktionszeit τ_{extr} und die Extraktionseffizienz ϵ_{extr} :

$$I_0 = \frac{1}{\epsilon_{extr}} \frac{I_{extr} \tau_{extr}}{T_0}, \quad T_0 = 548 \text{ nsec} .^8 \quad (1.10)$$

⁷In der nichtfokussierenden Betriebsart ist die Impulsauflösung mit 1.5% angegeben.

⁸Die Effizienz ist dabei als das Verhältnis der beim Zielsystem abgelieferten Ladung q_2 zu der vom Erzeugersystem bereitgestellten Ladung q_1 definiert ($\epsilon := q_2/q_1$). Die Effizienz ϵ_{extr} beschreibt dementsprechend die beim Experiment abgelieferte Gesamtladung im Vergleich zu der in ELSA gespeicherten Ladungsmenge.

Dieser Strom kann bei gegebenem Synchrotronstrom I_S und gegebener Transfereffizienz $\epsilon_{S \rightarrow E}$ näherungsweise durch N_{inj} Injektionen in ELSA akkumuliert werden:

$$N_{inj} = \frac{1}{\epsilon_{S \rightarrow E}} \frac{T_0 I_0}{T_S I_S}, \quad T_0 = 548 \text{ nsec}, \quad T_S = 232 \text{ nsec} .^9 \quad (1.11)$$

Hierzu ist wegen des netzsynchronen Betriebs eine Zeit $\tau_{inj} = N_{inj} \cdot 20$ msec notwendig. Eine an den experimentellen und steuerungstechnischen Randbedingungen orientierte Abschätzung kann darauf aufbauend Aufschluß über die durch das neue Kontrollsystem abzudeckenden Extraktionszeiten und die realisierbaren Werte für TV_{makr} liefern. Dazu muß die technische Auslegung der Netzgeräte für die Magneto-optik des ELSA-Ringes, und dabei besonders die Ansteuerung der Dipolmagnete, betrachtet werden. Diese können in zwei Betriebsarten eingesetzt werden: In der "normalen" Betriebsart kann eine maximale Steigung von ca. 1 GeVs^{-1} erreicht werden, in der "schnellen" Betriebsart wird hingegen durch Hinzuschalten eines Zusatznetzgerätes eine Steigung von ca. 8.5 GeVs^{-1} möglich.¹⁰ Für τ_{extr} werden daher beispielhaft Rampzeiten von 2 sec bzw. 0.24 sec für einen Energiehub von 2 GeV (entspricht der Nachbeschleunigung von 1.5 GeV auf 3.5 GeV) angenommen. Der an ein fiktives Experiment zu liefernde Strom soll 10 nA betragen. Bei einer angenommenen Extraktionseffizienz von 50% und einer Extraktionszeit von 2 sec muß nach 1.10 in ELSA ein Strom von ca. 70 mA akkumuliert werden, was bei einer wiederum angenommenen Transfereffizienz von 60% und einem Synchrotronstrom von 5 mA nach 1.11 etwa 55 Injektionen mit $\tau_{inj} = 1.1$ sec beansprucht. Dadurch ergibt sich in der "normalen" Betriebsart das makroskopische Tastverhältnis von

$$TV_{makr} = \frac{2 \text{ sec}}{1.1 \text{ sec} + 2 \text{ sec} + 2 \text{ sec} + 2 \text{ sec}} \approx 28\%$$

und in der "schnellen" Variante

$$TV_{makr} = \frac{2 \text{ sec}}{1.1 \text{ sec} + 0.24 \text{ sec} + 2 \text{ sec} + 0.24 \text{ sec}} \approx 56\% .$$

Zur allgemeineren Betrachtung ist für $\tau_{inj} = 1$ sec die Relation 1.9 zwischen Tastverhältnis TV_{makr} und Extraktionszeit τ_{extr} für $TV_{makr} \geq 50\%$ in Abbildung 1.5 aufgetragen.

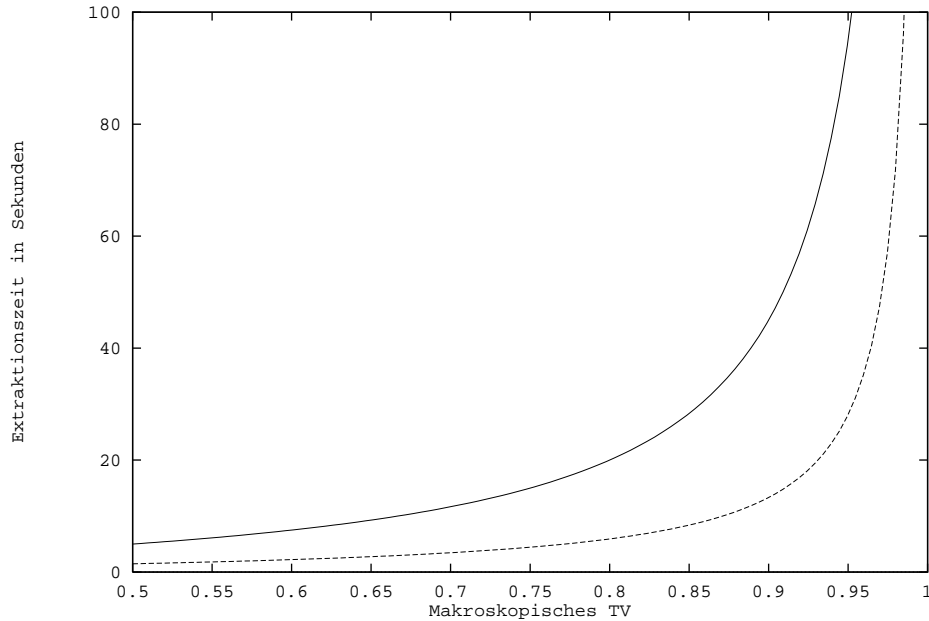


Abbildung 1.5: Relation zwischen Tastverhältnis und Extraktionszeit im Nachbeschleunigungsbetrieb

⁹Die Zeit T_S beschreibt die Umlaufzeit der Elektronen im Synchrotron.

¹⁰Ursprünglich war ein Wert von 150 msec für die Beschleunigung von 1.8 GeV auf 3.5 GeV anvisiert ($\approx 11 \text{ GeV/sec}$). Siehe dazu z.B. [95]. Nach dem Einbau aktiver Filter in die Dipolnetzgeräte mußte dieser Wert auf 200 msec korrigiert werden, was dem Wert von 8.5 GeVs^{-1} entspricht. Sämtliche Quadrupol- und Sextupolmagnete sind ebenfalls für das schnelle Rampen ausgelegt.

Die Rampzeiten $\tau_{R\uparrow}$ bzw. $\tau_{R\downarrow}$ nehmen für die obere Kurve einen Wert von 2 sec, für die untere Kurve einen Wert von 0.24 sec an. Man erkennt, daß mit $\tau_{R\uparrow} = \tau_{R\downarrow} = 2$ sec für alle Werte von $TV_{makr} \geq 0.7$ Extraktionszeiten von $\tau_{extr} \geq 10$ sec gefordert werden müssen. Will man unter realistischen Bedingungen ein TV_{makr} von mehr als 90% erreichen, so kann dies beim "normalen" Rampbetrieb nur mit Extraktionszeiten von mehr als 50 sec, beim "schnellen" Betrieb nur mit mehr als 10 sec realisiert werden.

1.4 Aufgabenstellung für das neue Kontrollsystem

1.4.1 Allgemeine Aufgaben

Das ELSA-Kontrollsystem muß die Komponenten der Beschleunigeranlagen in den drei beschriebenen Betriebsmodi steuern, überwachen und für einen korrekten Betriebsablauf miteinander synchronisieren. Die hierzu grundlegende Forderung nach Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit aller relevanten Parameter wird ergänzt durch die Forderung nach Integration beschleunigerphysikalischer Berechnungen und Regelalgorithmen. Erst diese Forderung führt zu einem System, welches die Komplexität der Anlage auf ein für den bedienenden Physiker bzw. Operateur akzeptables Maß reduziert.¹¹

Möchte man eine hohe Akzeptanz von seiten der Benutzer erreichen, so ist die "quasi-analoge" Steuerung von einzelnen Parametern erforderlich. Der Begriff "quasi-analog" bedeutet hier, daß einzelne Transaktionen (erfolgreich abgeschlossene Setz- oder Leseoperationen auf Parametern eines Endgerätes) mit einer ausreichend hohen Rate ablaufen und dadurch für den Operateur der subjektive Eindruck einer kontinuierlichen Änderung entsteht. Hierdurch kann die Auswirkung einer Parametermanipulation auf den Elektronenstrahl instantan beobachtet und in bezug zu der vorgenommenen Wertänderung gesetzt werden.¹² Dieses Merkmal zeichnete bereits das alte Kontrollsystem aus und hat sich als unverzichtbar für den flexiblen Betrieb der Anlage erwiesen.

Ergänzt werden muß diese Art der Steuerung durch eine autonome Istwerterfassung und -verarbeitung: Meßbare Parameter sind periodisch und in der Regel ohne besondere Aufforderung durch den Operateur einzulesen, zu digitalisieren und bei Bedarf, nach erfolgter Bewertung und Berücksichtigung von Alarmschwellen, auf einem dafür geeigneten Medium anzuzeigen. Dieses Merkmal ist besonders wichtig, damit das System jederzeit ein "lebendes" Abbild des Beschleunigerzustandes liefern kann. Bewährt hat sich die direkte Interaktion über eine möglichst einfach bedienbare grafische Benutzeroberfläche, die mit einer Vielzahl variabler Darstellungselemente eine Überwachung bzw. Manipulation der Beschleunigerparameter durch "simulierte Potentiometer" oder ähnliche Hilfsmittel erlaubt. Für die einfache Einstellung der Anlage ist zusätzlich die Archivierung und Dokumentation von Betriebszustandsprotokollen in einer Datenbank zu gewährleisten.

Die bisher aufgeführten Anforderungen bilden ein Profil, welches sich die meisten modernen Systeme zueigen gemacht haben (für einen Überblick siehe z.B. [36]). Die schnelle Entwicklung der verfügbaren Rechnerhardware und Netzwerkkonzepte, begleitet durch eine immer stärkere Standardisierung der verwendeten Software, haben für den Kontrollsystembau effiziente Mittel bereitgestellt. Das beschriebene Profil reicht allerdings nicht aus, um das System optimal an die Aufgabenstellung anzupassen.

In der Vergangenheit hat sich durch die mit dem alten Steuersystem gemachten Erfahrungen herausgestellt, daß die dort implementierten, fast ausschließlich an technischen Größen orientierten Zugriffsmöglichkeiten auf die Beschleunigeranlagen einen reinen Stretcherbetrieb zwar erlaubt haben, die Realisierung eines anspruchsvolleren Betriebsmodus wie den der Nachbeschleunigung durch dieses Konzept aber kaum sicherzustellen ist. Der Grund liegt in der – verglichen mit dem Stretchermodus – komplizierteren beschleunigerphysikalischen Aufgabenstellung, deren Erfüllung die Integration von zusätzlichen Berechnungen erforderlich macht. Dazu kommt die Erfahrung, daß ein komplexer Betriebsmodus ohne ausreichende Strahldiagnostik und deren vollständige Integration in das Kontrollsystem nicht in akzeptabler Zeit eingestellt werden kann. Die Ermittlung von Vorgabewerten für die Steuerung durch das Kontrollsystem kann im Nachbeschleunigungsmodus nicht mehr ausschließlich, wie bislang praktiziert, durch empirische Tests erfolgen, sondern muß

¹¹Die Reduktion der Komplexität ist auch deshalb wichtig, weil es bei ELSA kein festes Operateurspersonal gibt. Die Anlage muß auch von Experimentatoren (zumindest teilweise) eingestellt und überwacht werden können. Dies stellt in Anbetracht der Aufgaben des Nachbeschleunigungsbetriebs eine nicht zu unterschätzende Komplikation dar.

¹²Die quasi-analoge Steuerung ist naturgemäß nur bei solchen Parametern sinnvoll, deren Werte analogen Steuergrößen, wie z.B. Strömen oder Spannungen, zugeordnet sind.

durch geeignete Simulationsrechnungen zur Magneto-optik und Teilchenextraktion realisiert werden. Die Integration modellbasierter Berechnungsverfahren ist also, neben der Strahldiagnose, notwendiger Bestandteil des Kontrollsystems. Zusätzlich muß beachtet werden, daß der Nachbeschleunigungsbetrieb in ELSA große Zykluszeiten im Bereich von mehreren 10 Sekunden erfordert. In einem solchen Fall ist die oben beschriebene quasi-analoge Manipulation von magneto-optischen Parametern nicht mehr möglich, da jede fehlerhafte Einstellung mit hoher Wahrscheinlichkeit einen Strahlverlust und damit einen Verlust des kompletten Zyklus nach sich zieht.¹³ Die Einstellbarkeit und Korrigierbarkeit der wesentlichen Beschleunigerparameter ist im Nachbeschleunigungsbetrieb dementsprechend eingeschränkt. Das Kontrollsystem muß also Konstrukte zur Verfügung stellen, mit denen der Betriebsmodus weitgehend automatisch konfiguriert, gestartet, synchronisiert und überwacht werden kann. Das manuelle Eingreifen eines Operateurs soll nur noch in Ausnahmefällen erforderlich sein. Dies stellt einen wichtigen konzeptionellen Unterschied zum bislang praktizierten ELSA-Betrieb mit dem alten Kontrollsystem dar.

Die im vorangegangenen Abschnitt besprochene Problematik motiviert die drei wesentlichen Ansatzpunkte des neuen ELSA-Kontrollsystems:

1. Die Einführung einer *konsistenten physikalischen Abstraktionsebene* soll eine weitgehend physikalische Sicht von ELSA ermöglichen. Dem Bediener sollen, wo immer möglich, beschleunigerphysikalische Größen anstelle technischer Größen zugänglich gemacht werden. Auch die Einstellung neuer Betriebsmodi soll auf diesem Merkmal beruhen.
2. Die *Integration der Strahldiagnostik* in das Kontrollsystem soll es diesem ermöglichen, Steuer- und Korrekturmaßnahmen weitgehend selbstständig vorzunehmen. Falls dies in besonderen Fällen nicht praktikabel erscheint, soll die Strahldiagnostik automatisch alle gemessenen Strahlparameter als normale Kontrollsystem-Parameter aufbereiten, so daß sie im Kontrollsystem zwecks weiterer Berechnungen bzw. als direkte Einstellhilfe für den Operateur verwendbar sind.
3. Die Struktur des Kontrollsystems soll so ausgelegt sein, daß die Einbindung beschleunigerphysikalischer *Simulations- und Modellierungsprogramme* so einfach wie möglich ist. Durch Bereitstellung geeigneter Simulatorsoftware können die Steuerungsalgorithmen des Kontrollsystems mit den benötigten Informationen für alle Betriebsmodi versorgt werden. Im Gegenzug kann ein Simulator durch Kopplung an das Kontrollsystem aktuelle Einstellungen des Beschleunigers abfragen und zur Grundlage seiner Berechnungen werden lassen.

1.4.2 Nachbeschleunigung bei optimiertem Tastverhältnis

Zur Entwicklung der beschleunigerphysikalischen Anforderungen an das neue System müssen die drei wesentlichen Betriebsphasen der Nachbeschleunigung — Injektionsphase, Rampphase und Extraktionsphase — separat voneinander betrachtet werden. Jede einzelne Phase ist durch ein spezifisches Anforderungsprofil charakterisiert und erfordert die getrennte Ansteuerung verschiedener Subsysteme, wie etwa der Synchrotron-Extraktion, der ELSA-Injektion, des Magnetsystems, der Hochfrequenzanlagen oder der schnellen Extraktionsmagnete. Die Synchronisation der einzelnen Abschnitte und Herstellung der entsprechenden physikalischen Anschlußbedingungen¹⁴ beim Übergang zwischen zwei Phasen, wie z.B. der Übergang zwischen zwei Einstellungen der Magneto-optik, ist eine Aufgabe des Kontrollsystems. Dies definiert die typischen Anforderungen einer Echtzeit-Prozeßsteuerung, wobei zwei wesentliche Aufgaben zu erfüllen sind:

1. Ein Zeitsteuersystem muß entwickelt werden, welches einen Maschinenzyklus und innerhalb dessen die drei Betriebsphasen durch Generierung jeweils zugeordneter Triggerpulse startet, stoppt und miteinander synchronisiert. Dabei ist auf eine konzeptionelle Entkopplung der einzelnen Phasen zu achten, damit eine Änderung der Einstellung einer Phase keine Seiteneffekte auf die anderen Phasen nach sich zieht. Die Bereitstellung dedizierter Triggerpulse für jede Phase erlaubt insbesondere die optimale Ausnutzung der Ausgabeschrittweite von Funktionsgeneratoren, da die durch diese Einheiten generierten Steuerkurven in ihrer Länge auf die jeweilige Betriebsphase, z.B. der Extraktion, beschränkt bleiben können. Für die Extraktionsphase muß zusätzlich ein Signal für die Datenerfassungssysteme

¹³ Im reinen Stretchermodus verliert man im Fehlerfall einen Zyklus von 20msec, was kaum ins Gewicht fällt, da sofort danach wieder injiziert wird.

¹⁴ Die Anschlußbedingungen müssen dabei so gewählt werden, daß ein einmal injizierter Strom nicht verloren geht und mit der gewünschten Extraktionseffizienz auch zum Experiment gebracht werden kann.

der ELSA-Experimente bereitgestellt werden, damit diese auf den Extraktionsbereich eines Zyklus synchronisierbar sind. Das Zeitsteuersystem muß lange Einzelphasen und in der Addition lange Zykluszeiten möglich machen (vergl. dazu die Ausführungen auf S.10).

2. Die Kontrollsystem-Hardware und -Software muß bei der Ansteuerung der ELSA-Komponenten Echtzeiteigenschaften besitzen. Echtzeitverhalten bedeutet, daß das System garantiert innerhalb einer definierten, kurzen Reaktionszeit auf ein externes Signal reagiert, unabhängig vom internen Zustand des Systems beim Auflaufen des Signals. Ein solches Signal kann z.B. der Befehl zum Start der Extraktion sein.

Weitere Forderungen ergeben sich durch die Steuerung der einzelnen Phasen innerhalb des Zyklus:

- In der *Injektionsphase* muß mit möglichst wenigen Extraktionen aus dem Synchrotron ein möglichst hoher Strom in ELSA akkumuliert werden. Dabei soll das Tastverhältnis der ELSA-Füllung $TV[I_{fill}(t)]$ sowie die Transfereffizienz $\epsilon_{S \rightarrow E}$ möglichst hoch sein (siehe dazu ebenfalls S.10).¹⁵
Das neue Kontrollsystem verfolgt zur Optimierung der ELSA-Füllung einen Ansatz, der besonders für den Nachbeschleunigungsbetrieb geeignet ist. In diesem Modus sind in der Regel mehrere Injektionen in ELSA zum Erreichen eines ausreichenden Stroms I_0 für die Extraktion notwendig. Es liegt daher nahe, die Füllung des Synchrotrons über einen Umlauf mit hoher Effizienz zu extrahieren und zeitlich so in ELSA zu plazieren, daß nach 20 msec die nächste injizierte Synchrotron-Füllung direkt hinter das bereits umlaufende "Strahlstück" plaziert werden kann. Da das Umfungsverhältnis von ELSA zum Synchrotron sehr gut durch 7/3 approximiert wird, sollte mit drei um jeweils die Länge einer Synchrotron-Füllung zeitlich versetzten Injektionen eine akzeptable, mit sieben Injektionen eine sehr gute ELSA-Füllung zu realisieren sein.¹⁶ Die Umsetzung und Erprobung dieses Schemas war mit dem alten Kontrollsystem — bedingt durch technische Beschränkungen — nicht möglich.
- In der *Nachbeschleunigungsphase* muß ein gegebener Energiehub in einer möglichst kurzen Zeit überbrückt werden. Dazu muß vom Kontrollsystem die Berechnung und zeitliche Korrelation der zeitvariablen Steuerwerte für Dipol-, Quadrupol- und Sextupolmagnete sowie die Stärke des beschleunigenden Hochfrequenzfeldes in den Resonatoren vorgenommen werden. Die dadurch eingestellten optischen Eigenschaften von ELSA müssen während der Beschleunigung in einem stabilen Arbeitsbereich bleiben, so daß Strahlverluste auf der Rampe vermieden werden. Am Ende der Rampphase müssen die optischen Eigenschaften der Maschine so präpariert werden, daß ein Übergang zu den Startbedingungen der nachfolgenden Extraktionsphase möglichst schnell und ohne Strahlverlust erreicht wird. Die Ansteuerung der Hochfrequenz muß entsprechend dem gewählten Extraktionsverfahren ebenfalls in dieser Phase geändert werden.
- In der *Extraktionsphase* erfolgt nach vorangegangener Präparation der ELSA-Optik eine langsame Teilchenextraktion mit zu optimierendem mikroskopischen Tastverhältnis. Zwei Methoden werden bei ELSA eingesetzt:
 1. Bei der "normalen" Resonanzextraktion wird horizontal durch Sextupolmagnete eine drittelzahlige Resonanz bei $Q_x = 4\frac{2}{3}$ angeregt. Durch langsames Fahren des Arbeitspunktes Q_x in diese Resonanz (durch Steuerung schneller eisenloser Quadrupole [25]) wird der stabile Phasenraumbereich so eingeengt, daß Elektronen mit einer konstanten Rate über ein geeignet positioniertes Septum extrahiert werden. Eine genaue Beschreibung dieses Mechanismus ist z.B. in [62] zu finden. Diese Methode ist besonders für das Experiment ELAN geeignet, da hohe extrahierte Ströme erzielt werden können.

¹⁵Die Optimierung des Tastverhältnisses der ELSA-Füllung durch eine entsprechende Steuerung der Synchrotron-Extraktion und ELSA-Injektion erwies sich in der Vergangenheit als schwierig. Die besten Resultate konnten durch Ausnutzung einer sogenannten Shaving-Extraktion aus dem Synchrotron über zwei Umläufe mittels einer geschlossenen Kickerbeule erreicht werden. Eine genaue Diskussion der Problematik bei der Einstellung der Synchrotron-Extraktion ist in der Arbeit von M.Neckenig [62] ausgeführt. Die erreichte Optimierung resultierte in einem Tastverhältnis der ELSA-Füllstruktur von etwa 55% bis 65%, welche damit eine obere Schranke des mit ELSA im Stretchermodus realisierbaren mikroskopischen Tastverhältnisses setzte.

¹⁶Die Umlaufzeit im Synchrotron beträgt 232 nsec, die in ELSA 548 nsec. Das Verfahren setzt natürlich voraus, daß die Form einer Synchrotronfüllung annähernd rechteckförmig ist. Dieses ist in der Praxis zu überprüfen. Bei stärkeren Abweichungen von der Rechteckform müssen die Zeitversatzwerte bei der Injektion in Hinsicht auf eine Optimierung der Füllstruktur entsprechend angepaßt werden.

2. Bei der hochfrequenzbasierten Extraktion wird die Größe eines HF-Buckets im longitudinalen Phasenraum so eingeschränkt, daß die durch Abstrahlung von Synchrotronlicht hervorgerufene Impulsänderung der Elektronen bei einem Teilensemble zum Verlassen des stabilen Bereichs führt. Die horizontale Chromatizität ξ_x von ELSA ist dabei so eingestellt, daß die relative Impulsabweichung $\frac{\delta p}{p_0}$ wegen $\Delta Q_x = \xi_x \frac{\delta p}{p_0}$ den Arbeitspunkt Q_x um ΔQ_x in die drittelzahlige Resonanz bewegt. Dadurch werden dann die Teilchen wie bei der "normalen" Resonanzextraktion aus dem eingeschränkt stabilen transversalen Phasenraum extrahiert und gelangen über einen Septummagneten zum Experiment. Die Abnahme des Stroms in ELSA muß im Laufe der Extraktion durch Reduktion der Hochfrequenzamplitude so kompensiert werden, daß die Extraktionsrate aus dem Bucket möglichst konstant bleibt. Die schnellen Quadrupolmagnete werden zur feineren Arbeitspunktkontrolle im Extraktionsbereich ebenfalls herangezogen. Die erzielbaren Raten reichen normalerweise nicht zum Extrahieren großer Ströme aus; die Methode ist also für ELAN weniger, für das SAPHIR-Experiment aber gut geeignet. Sie hat den besonderen Vorteil, daß der zugrundeliegende Effekt stochastischer Natur ist und daher ein hohes mikroskopisches Tastverhältnis erlaubt.

Die beschriebenen Extraktionsmethoden erfordern die Berechnung und Applikation von Steuerkurven für die Extraktionssextupole, die schnellen Extraktionsquadrupole und die Amplitude der Hochfrequenz. Die Länge der Steuerkurven muß im Bereich von mehreren 10 sec liegen können, wobei eine möglichst hohe zeitliche Auflösung gefordert wird, um ein gutes mikroskopisches Tastverhältnis zu erreichen. Die Auswirkung der Zeitauflösung auf das mikroskopische Tastverhältnis wurde eingehend von [62] untersucht.

1.4.3 Strahldiagnostik und Simulation

Die erfolgreiche Steuerung des Nachbeschleunigungsmodus in jeder seiner einzelnen Betriebsphasen bedingt, wie bereits motiviert wurde, die Integration wesentlicher Komponenten der Strahldiagnose. Alle Ergebnisse der strahldiagnostischen Messungen sollten periodisch als Kontrollsystem-Parameter aufbereitet werden und "on line" im gesamten System zur Verfügung stehen. Dies bildet die Basis für den Bau erweiterter Steuer- und Korrekturalgorithmen.

Die Kontrolle der einzelnen Betriebsphasen soll im neuen System durch die folgenden Elemente der Diagnostik unterstützt werden:

- In der *Injektionsphase* ist die Beobachtung und Analyse der in ELSA entstehenden Füllstruktur $I_{fill}(t)$ notwendig. Deren Messung soll mit einer möglichst hohen Frequenzbandbreite erfolgen, um die empirische Anpassung des Zeitversatzes an die realen Gegebenheiten für aufeinanderfolgende Injektionen gemäß dem vorgestellten Schema zu erlauben. Das Tastverhältnis der Füllstruktur soll berechnet und dem Kontrollsystem als Gütefaktor zur Bewertung des Injektionsprozesses zur Verfügung gestellt werden.
In der Injektionsphase ist zusätzlich die Bestimmung der eingestellten Betatronarbeitspunkte und des Arbeitspunktes der Synchrotronoschwingung von großer Bedeutung. Die Genauigkeit des gewählten Verfahrens muß das präzise Ansteuern eines stabilen Arbeitspunktbereiches für die nachfolgende Rampphase erlauben.
- Die optischen Eigenschaften von ELSA werden in der *Nachbeschleunigungsphase* durch Steuerkurven für die Magnete und das Hochfrequenzsystem vorgegeben. Um zu verifizieren, daß diese Einstellungen korrekt sind bzw. beim Rampen im strahlstabilen Bereich bleiben, muß die zeitaufgelöste Analyse der Teilchenbewegung im Ring, d.h. im wesentlichen die Ermittlung der Verläufe von $Q_x(t)$, $Q_z(t)$ bzw. $Q_s(t)$, möglich sein. Das System muß dazu die Definition von Zeitpunkten oder Energiewerten zulassen, bei denen die Einzelmessungen durchgeführt werden sollen. Die ermittelten Werte sind so aufzubereiten, daß sie im Kontrollsystem für nachfolgende Korrekturrechnungen nutzbar sind. Die zeitliche Auflösung, d.h. der zeitliche Abstand zweier aufeinanderfolgender Messungen, muß eine möglichst große Zahl von Messungen während der Rampphase erlauben, um den Verlauf der Arbeitspunkte ausreichend genau zu rekonstruieren.
- In der *Extraktionsphase* muß zunächst die Konfiguration der optischen Eigenschaften beim Start der Extraktion verifiziert werden. Auch hierzu kann eine geeignete Untersuchung der Teilchenbewegung dienen. Für die Extraktion sind aber besonders zwei weitere Aufgaben relevant:

1. Die Rekonstruktion des transversalen Phasenraumes sowie die Verfolgung der Arbeitspunkte aus gemessenen Lagedaten und der Vergleich mit numerisch simulierten Teilchentrajektorien bzw. Arbeitspunktverläufen stellt sicher, daß die bei ELSA verwendete drittelzahlige Resonanzextraktion optimiert werden kann. Die Methodik der Phasenraumrekonstruktion bei ELSA ist in [67] untersucht worden.
2. Die Erfassung, Aufbereitung und Bewertung des vom Experiment gemessenen Spillout-Signals erlaubt die Berechnung des Tastverhältnisses in der Extraktionsphase. Durch Untersuchung der Auswirkung veränderter Betriebseinstellungen auf die gemessenen Werte kann der zugrundeliegende Prozeß besser verstanden werden, was wiederum eine Optimierung der Resonanzextraktion erlaubt.

Neben den für die einzelnen Betriebsphasen spezifischen Aufgaben der Diagnostik fallen viele Meßaufgaben an, die zur Untersuchung interessanter physikalischer Effekte dienen, aber beim Routinebetrieb nicht regelmäßig vorgenommen werden müssen. Um solche Untersuchungen mit einem minimalen Aufwand und in einer vertretbaren Zeit so flexibel wie möglich durchführen zu können, muß das Kontrollsystem die entsprechende Infrastruktur anbieten. Hierzu gehört mindestens ein System zur Erzeugung eines frei definierbaren Diagnosetriggerpulses oder eine Kette einzelner Diagnosetriggerpulse, der/die zu jedem Zeitpunkt in einem ELSA-Zyklus aktivierbar ist/sind. Mit einem solchen Triggerpuls kann z.B. eine kohärente Strahlanregung durch einen Kickermagneten erzeugt und die Strahlantwort durch Messung des Strahllagesignals untersucht werden. Zusätzlich gefordert werden muß die Integration externer Meßgeräte (Digitaloszilloskope, Vektorvoltmeter u.a.) über einen Standard-Meßgerätebus (typischerweise den IEC-Bus), sowie die Unterstützung der Programmierung bzw. Datenauslese dieser Meßgeräte durch das Kontrollsystem. Darüber hinaus ist die Bereitstellung universell verwendbarer Algorithmen zu digitalen Signalverarbeitung im Zeit- und Frequenzbereich wünschenswert, dazu die Verfügbarkeit grundlegender Verfahren für die digitale Bildverarbeitung.¹⁷ Die implementierten Algorithmen müssen miteinander kombinierbar und direkt auf Parameter des Kontrollsystems anwendbar sein.

Die dadurch beschriebene Funktionalität sollte so zur Verfügung gestellt werden, daß das Hauptaugenmerk auf das zu untersuchende physikalische Problem und weniger auf den experimentellen Aufbau selbst gelenkt werden muß.

Die oben aufgeführten Systeme zu Strahldiagnose an ELSA müssen durch entsprechende Simulation der Teilchenbewegung in ELSA unterstützt werden. Hierzu wurde von J.Wenzel im Rahmen einer Dissertation ein an das Kontrollsystem gekoppelter, interaktiv arbeitender Simulator zur Analyse der linearen und nichtlinearen Teilchendynamik in ELSA implementiert [93]. Durch dessen Einsatz können, neben der hauptsächlich angestrebten Optimierung der Maschineneinstellung, zum einen die verwendeten Diagnosealgorithmen unter realistischen Randbedingungen getestet werden, zum anderen können aber auch Ergebnisse der Diagnose mit denen der Simulation verglichen werden, was Rückschlüsse auf das dynamische Verhalten von ELSA erlaubt. Der Simulator stellt alle Ergebnisse in Kontrollsystem-Parametern zur Verfügung und hat selbst auf alle Parameter Zugriff, die das Kontrollsystem zum Einstellen von ELSA manipuliert. Dieses Konzept führt zu der erwünschten engen Kopplung von Kontrolle, Diagnose und Simulation.

1.5 Aspekte der Informationsverarbeitung

Neben der Berücksichtigung der durch das experimentelle Programm und den Nachbeschleunigungsmodus gestellten Anforderungen müssen bei der Konstruktion eines Kontrollsystems Entwurfsentscheidungen getroffen werden, die sich auf die informationstechnischen Strukturen des neuen Systems auswirken. Die konkrete Entscheidung für oder gegen einen Lösungsansatz wird durch die beschleunigerphysikalische Aufgabenstellung mit beeinflußt. Daneben existieren auch Anforderungspunkte, die sich "nur" aus der Informatik selbst ableiten und zum heutigen "Stand der Technik" gehören. Die folgenden Punkte sollen diese informationstechnischen Anforderungen an das neue System näher beschreiben. Detailliertere Ausführungen dazu sind z.B. in [84] zu finden.

- *Standardisierung:*

Das neue Kontrollsystem soll über einen Zeitraum eingesetzt werden, der wesentlich länger ist als die

¹⁷Die Bereitstellung digitaler Verfahren der Bildverarbeitung ist durch den geplanten Einsatz eines Synchrotronlichtminotors (ausgelesen über eine CCD-Kamera) sowie durch die Strahlprofilmessung mit Folienmonitoren in den Transferkanälen motiviert.

heute typische Produktlebensdauer im EDV-Sektor. Dieses fordert den Einsatz absehbar zukunftssicherer Rechnerarchitekturen und die weitgehende Verwendung von Standardlösungen im Hardware- als auch Softwarebereich. Dadurch erhöht sich die Wartbarkeit des Systems beträchtlich und macht darüber hinaus den Einsatz von kommerziell verwendbaren Software-Werkzeugen zugänglich, ohne deren Hilfe viele Routineaufgaben der Datenverarbeitung nur mit hohem Zeit- oder Personalaufwand zu bearbeiten wären.

- *Transparenz:*

Mit dieser Forderung kann eine einheitliche Systemsicht zum Vorteil des Benutzers hergestellt werden: Dem Bediener wird ein einziger, "virtueller" Rechner präsentiert, der mit der Kontrollaufgabe betraut ist, ohne daß die darunterliegende Menge voneinander unabhängig arbeitender Einheiten wahrgenommen wird.¹⁸ Gefordert werden muß die

- *Ortstransparenz:* Die geographische Lokalität eines zu steuernden bzw. zu messenden Parameters oder Subsystems soll dem Bediener vollständig verborgen sein. Dies erleichtert eine konsistente Sicht der Beschleunigeranlage.
- *Zugriffstransparenz:* Die einzelnen Zugriffsmechanismen der Hardware und Software für die Steuerung oder Messung einzelner Parameter sollen verborgen werden. Der Zugriff muß für alle Parameter oder Subsysteme einheitlich aussehen.
- *Migrationstransparenz:* Die Benutzer benötigen keine Kenntnis über die Zuordnung einzelner ELSA-Parameter oder Subsysteme zu einzelnen Rechereinheiten im Kontrollsystem. Die Zuordnung kann jederzeit geändert werden, ohne daß sich der Name eines Parameters oder Subsystems ändert.
- *Nebenläufigkeitstransparenz:* Mehrere Benutzer können sowohl auf ELSA-Parameter als auch auf ganze Subsysteme parallel zugreifen.

- *Skalierbarkeit:*

Der Ausbau von Hard- und Software sollte so modular möglich sein, daß jederzeit auf erweiterte Anforderungen des Beschleunigerbetriebs reagiert werden kann. Skalierbarkeit bedeutet hier, daß das System nicht in einen strukturbedingten Engpaß läuft, wenn man die Zahl der eingesetzten Rechner oder die Anzahl der zu steuernden bzw. zu messenden Parameter wesentlich erhöht. In der Grundversion sollte das System so dimensioniert sein, daß die Leistungsreserven für den geplanten ELSA-Betrieb der nächsten Jahre ausreichen.

- *Verfügbarkeit:*

Der Ausfall einzelner Hardware- oder Softwarekomponenten darf nicht in einem Ausfall des Gesamtsystems resultieren. Nur so kann die geforderte Verfügbarkeit für den Routinebetrieb mit ELSA gewährleistet werden. Natürlich sollen auch die Einzelkomponenten hohe Standzeiten haben; dieses legt die Beschaffung qualitativ hochwertiger Hardware (geeignet für den Einsatz in einem industriellen Umfeld) sowie die Verwendung robuster Algorithmen in der Software nahe.

- *Bandbreite:*

Die Forderung nach einer quasi-analogen Steuerung aller wichtigen Parameter ist nur mit einer "sichtbaren" Transaktionsrate von ca. 20 Hz realisierbar und erfordert erfahrungsgemäß eine interne Durchsatzrate, die im Vergleich dazu etwa eine Größenordnung höher liegt. Nimmt man beispielsweise an, daß die Sollenergie von ELSA mit einer Rate von 20 Hz geändert wird (was durchaus realistischen Bedingungen bei manueller Einstellung der Maschinenenergie entspricht), so muß man alle physikalischen Berechnungen, die von diesem Energiewert abhängen (Fokussierungsstärken, u.v.m.), in einer ausreichend kurzen Zeit durchführen, um dem Bediener eine unverändert quasi-analoge Reaktion des Systems zu liefern. Soll also der Ansatz einer möglichst vollständigen physikalischen Sicht auf ELSA realisiert werden, so kann man bei einer Betrachtung der involvierten Parameter und der durchzuführenden Berechnungen ableiten, daß das Basiskontrollsystem Transaktionsraten von mindestens 200 Operationen pro Sekunde erlauben muß, um bei gleichzeitiger, autonomer Istwerverfassung einem Operateur die quasi-analoge Steuerungsmöglichkeit zu geben.¹⁹

¹⁸ Gerade bei großen Anlagen wie beispielsweise dem LEP-Kontrollsystem ist die Transparenz eine wesentliche Designforderung, wie z.B. [48] oder [17] bzw. [18] zeigt.

¹⁹ Eine Extrapolation des Datenaufkommens im alten Kontrollsystem mit Zielrichtung des Nachbeschleunigungsbetriebs ergibt ein Parameteraufkommen von etwa 5000 Skalarwerten, von denen etwa 100-200 pro Sekunde als Istwerte geliefert werden.

Nicht alle Parameter sind aber skalarwertige Größen, die mit hoher Transaktionsrate verarbeitet werden müssen. Schätzt man grob die Datenmenge ab, die zum Setzen der Hauptmagnete für die Nachbeschleunigung an die Steuerprozessoren der Magnetnetzgeräte übermittelt werden muß, so ergibt sich eine Durchsatzforderung von ca. 0.25 MByte/sec,²⁰ wenn kurze Reaktionszeiten und damit eine einfache Bedienbarkeit beibehalten werden soll. Gerade das Setzen einer in sich konsistenten Menge an Magnetrampen für einen ELSA-Zyklus erfordert die kurzzeitige Bereitstellung von deutlich mehr Rechenleistung, als dies während der normalen Maschinenüberwachung nötig wäre.

Durch die weitgehende Integration der Strahldiagnose in das Kontrollsystem fallen punktuell Meßdaten an, die das oben beschriebene Datenvolumen noch deutlich übersteigen — die zu verarbeitenden Rohdaten-Volumina liegen meistens im Bereich von 0.25 MByte bis 1 MByte. Die Bandbreite des Kontrollsystems muß daher auch für die schnelle Übermittlung und Verarbeitung großer Rohdatenblöcke ausgelegt sein, besonders wenn diese Ausgangspunkt für beschleunigerphysikalische Berechnungen oder Korrekturen sind.

Zusammenfassend soll hier festgehalten werden, daß eine hohe Bandbreite und damit verbundene kurze Reaktionszeiten ein wesentliches Entwurfsziel des neuen Kontrollsystems darstellt.

- *Bedienbarkeit:*

Die gute Bedienbarkeit erfordert neben kurzen Reaktionszeiten die Präsentation des Beschleunigers mittels einfach zu verstehender Visualisierungs- und Steuerungselemente auf einer passenden Oberfläche. Zum Stand der Technik gehört heute der Einsatz hochauflösender Rastergrafik, ausgestattet mit einem sogenannten Fenstersystem, dessen Objekte sich durch eine Maus oder ein ähnliches "Zeiger"-Instrument manipulieren lassen. Alle modernen Beschleuniger-Kontrollsysteme haben diesen Ansatz erfolgreich übernommen. Die Verwendung hochauflösender Grafik gestattet die zeichnerische Darstellung von Beschleunigerkomponenten in ihrem geographischen Kontext (z.B. dem skizzenhaften Bild der Magnetanordnung einer Strahlführung) oder in ihrem Wirkungszusammenhang (z.B. durch Block- oder Flußdiagramme). Manipulierbare Elemente (wie z.B. simulierte Schalter oder Potentiometer) können unmittelbar in die Grafiken integriert werden, was eine annähernd intuitive Bedienung des Beschleunigers ohne große Einarbeitungszeit erlaubt. Durch die Integration technischer Skizzen oder digitalisierter Bilder läßt sich ein Störkatalog oder die Dokumentation zum Beschleunigerbetrieb ebenfalls vorteilhaft einbeziehen.

- *Universalität:*

Obwohl das Kontrollsystem zur Steuerung von ELSA verwendet werden soll, muß die Universalität des Kernsystems gefordert werden. Hierunter ist die konzeptionelle Trennung der Kernfunktionen des Kontrollsystems von den spezifischen Aufgaben der ELSA-Steuerung zu verstehen. Durch eine saubere Trennung erleichtert man einerseits den Entwurf und die Optimierung, andererseits kann jederzeit — unabhängig vom Kernsystem — die Modifikation der eigentlichen Beschleunigersteuerung erfolgen, ohne daß ein laufender ELSA-Betrieb nennenswert beeinträchtigt werden muß.

- *Flexibilität:*

Das verwendete Datenmodell und die Strukturierung der Parametermenge sollten die unterschiedlichen Anforderungen an Datenrepräsentation, -volumen und -transport berücksichtigen. Die interne Repräsentation der Daten sollte so gestaltet sein, daß die Vielfalt der erwarteten Datentypen mit nur wenigen Grundfunktionen manipuliert werden kann. Die Anbindung von Benutzerapplikationen an das Kontrollsystem sollte ebenfalls so einfach und flexibel wie möglich erfolgen können. Jede Applikation sollte die Wahl zwischen synchronen und asynchronen (jeweils bezogen auf den aktuellen Ausführungskontext der Applikation) Zugriffsmechanismen auf Parameter haben. Nimmt man die Beteiligung mehrerer Rechner an allgemeinen Kontrollaufgaben an, so stellt die Forderung nach Transparenz zusätzlich heraus, daß alle Zugriffsmechanismen für den Zugriff jeder Applikation auf jeden Parameter gelten müssen, unabhängig davon, auf welchem Rechner sich die Applikation und auf welchem Rechner sich die verwendeten Parameter befinden.

²⁰Die Zahl von 0.25 MByte/sec ist das Resultat einer Abschätzung, die die Auflösung der verwendeten Digital-Analog-Konverter sowie die notwendige Zeitauflösung der diskretisierten Rampen (bei vorgegebener Rampenlänge) berücksichtigt.

2. Aufbau des Kernsystems

Das folgende Kapitel beschreibt den Aufbau des Kontrollsystem-Kerns. Ausgehend von den wichtigen Entwurfsentscheidungen wird die Hardware-Konzeption und die dazugehörige Software-Architektur vorgestellt. Ein Schwerpunkt liegt dabei auf der Realisierung der verteilten Datenbank und der verwendeten Kommunikationsverfahren. Nach einer Skizzierung der Ereignisverarbeitung und des Zusammenwirkens der aktiven Kernbestandteile folgt abschließend die Beschreibung des Systems verteilter Regelprozesse (der sog. "Experten"), die den Ansatzpunkt zur Integration beschleunigerphysikalischer Berechnungen darstellen.

Die Beschreibung der Integration von Beschleunigerphysik, Diagnose und Simulation durch den Einsatz von "Experten" bleibt dem fünften Kapitel vorbehalten.

2.1 Entwurfsentscheidungen

Architektur

Die erste (und wichtigste) Entwurfsentscheidung betrifft die Gesamtarchitektur des Systems. Zwei mögliche Ansätze stehen zur Wahl:

- Aufbau als *zentralisiertes System*:
In einem zentralisierten System werden alle Berechnungen und Verwaltungsaufgaben durch einen Zentralcomputer vorgenommen. Dieser kann zwar zur Unterstützung parallel arbeitende Einheiten mit jeweils eigener Rechenkapazität angeschlossen haben (sog. "master-slave-Konzept"), die Aufgaben der eigentlichen Kontrolle sind aber auf den Zentralrechner beschränkt. Nur er hat die vollständige und konsistente Sicht der Beschleunigeranlage.¹
- Aufbau als *verteilt System*:
In einem verteilten System teilen sich mehrere, voneinander weitgehend unabhängig arbeitende Rechner die Aufgabe der Kontrolle. Kein Rechner hat die vollständige Gesamtsicht der Beschleunigeranlage. Diese wird vielmehr erst durch Kommunikation und Kooperation zwischen den einzelnen Komponenten erzeugt.

Für beide Ansätze sollen nun kurz die Vor- und Nachteile unter Berücksichtigung der ELSA-Randbedingungen abgewogen werden. Für eine detaillierte Analyse der verschiedenen Konzepte sei z.B. auf [60],[34] oder [85] verwiesen.

- Zentralisiertes Kontrollsystem:
Folgende Vorteile kämen beim zentralisierten Aufbau des ELSA-Kontrollsystems zum Tragen:
 - Durch die Wahl eines Zentralrechners mit einem komfortablen und leistungsfähigen Betriebssystem kann die Implementierungsdauer minimiert werden, da zum einen die Konzepte der Programmierung eines Steuersystems auf einem einzelnen Rechner gut verstanden sind und zum zweiten kein nennenswerter Aufwand in die Kommunikationsinfrastruktur investiert werden muß – jede Kommunikation zwischen aktiven Einheiten des Kontrollsystems ist eine rechnerlokale Kommunikation und wird vom Betriebssystem vermittelt.
 - Wartungs- und Serviceaufgaben im System sind durch die Zentralisierung besonders einfach.

¹Das alte ELSA-Kontrollsystem kann als klassisches zentrales System verstanden werden. Die Kopplung eines Zentralrechners mit einer Anzahl geographisch verteilter Feldbusprozessoren dient in erster Linie zur Entlastung des Zentralrechners von zeitaufwendigen Routineaufgaben der Gerätesteuerung, beläßt aber die eigentliche Kontrollaufgabe des Gesamtsystems bei einer zentralen Instanz.

- Durch das zentralisierte Konzept bedingt, existiert von allen Informationen garantiert nur eine gültige Referenz. Die Herstellung einer konsistenten und vollständigen Sicht der Beschleunigeranlage ist damit bereits durch den Ansatz sichergestellt.

Dem müssen die Nachteile entgegengestellt werden:

- Der Ausfall des Zentralrechners führt zum Ausfall des gesamten Kontrollsystems. Dies schränkt die Verfügbarkeit stark ein. Selbst in Perioden der routinemäßigen Wartungsarbeiten am Zentralrechner ist der Beschleunigerbetrieb zumindest stark behindert.
 - Die Leistungsfähigkeit ist begrenzt, da keine einfache Erweiterungsmöglichkeit der Rechenkapazität durch Hinzunahme eines weiteren Rechners erreicht werden kann. Einzige Möglichkeit ist der vollständige Ersatz des Zentralrechners durch ein leistungsfähigeres Modell. Da erfahrungsgemäß zwischen Rechenleistung und Investitionskosten kein linearer Zusammenhang besteht, muß ab einer gewissen Ausbaustufe überproportional viel investiert werden, um selbst kleine Verbesserungen der Leistungsfähigkeit zu erzielen. Dies setzt der Skalierbarkeit des Systems starke Grenzen.
- Verteiltes Kontrollsystem:

Die Vorteile eines verteilt arbeitenden ELSA-Kontrollsystems wären:

- Das System ist durch Hinzunahme weiterer Rechnerkomponenten in der Leistungsfähigkeit einfach skalierbar. Die verwendeten Rechner selbst können durchaus verschiedenen Leistungsklassen angehören. Für jede geplante Erweiterung kann daher eine passende und kostengünstige Ergänzung des Rechnersystems vorgenommen werden.
- Der Ausfall eines Rechners gefährdet bei geeigneter Auslegung nicht den Betrieb des gesamten Kontrollsystems. Bei Ausfall eines einzelnen Rechners sind lediglich die ELSA-Komponenten nicht mehr kontrollierbar, die ausschließlich über den betroffenen Rechner bedient werden; alle anderen Einheiten arbeiten weiter.
- Durch die Verteilung verschiedener Berechnungsaufgaben auf mehrere Rechner wird die Parallelität der Aufgaben besser ausgenutzt: Der Gesamtdurchsatz kann dadurch beträchtlich erhöht werden.²

Dem stehen gegenüber:

- Die Programmierung eines verteilten Systems ist komplexer als die eines zentralen Systems, da viel in den Aufbau einer geeigneten Kommunikationsinfrastruktur investiert werden muß. Die Kommunikation mehrerer Rechner untereinander erfolgt üblicherweise über ein Netzwerk; dieses Netzwerk kann einen signifikanten Engpaß für den Datentransport bilden und selbst eine nicht unerhebliche Quelle von Fehlern sein. Die Programmierung muß daher auf hohe Geschwindigkeit ausgelegt werden und potentielle Fehler ausreichend berücksichtigen.
- In einem verteilten System gibt es keine einheitliche Zeitachse, was die systemweite Zuordnung einer Zeitmarke zu einem Ereignis schwierig macht. Da ein auf einer einheitlichen Zeitachse basierendes kausales Verhalten für ein Kontrollsystem aber unverzichtbar ist, muß diese Eigenschaft durch besondere Konstruktionen speziell gesichert werden.
- Die Synchronisierung paralleler Zugriffe auf einen Parameter ist in einem verteilten System sehr viel schwieriger zu lösen als in einem zentralen System, wenn die Zugriffe von verschiedenen Rechnern aus erfolgen.
- Da keine zentrale Instanz eine vollständige, jederzeit gültige Gesamtsicht besitzt, muß beträchtlicher Aufwand in die Erzeugung eines konsistenten Systemzustandes gelegt werden. Da das Kontrollsystem eine widerspruchsfreie Sicht auf ELSA darstellen soll, ist dies ein wesentlicher Punkt.

²Es läßt sich zeigen, daß unter realistischen Voraussetzungen bei paralleler Bearbeitung verschiedener voneinander unabhängiger Berechnungen auf N Rechnern mit der Rechenleistung L der Gesamtdurchsatz deutlich höher ist als bei der Bearbeitung desselben Problems auf einem Zentralrechner der Rechenleistung $N \cdot L$. Siehe dazu z.B. [85].

Für die Konstruktion des neuen Kontrollsystems sind, gemäß dem in Kapitel 1 entwickelten Aufgabenprofil, vor allem die Kriterien Skalierbarkeit und Bandbreite, d.h. Leistungsfähigkeit, maßgebend. Unter besonderer Berücksichtigung dieser Kriterien wurde entschieden, das neue ELSA-Kontrollsystem als *verteilt*es *Kontrollsystem* aufzubauen. Die als Nachteile eines verteilten Systems bekannten Probleme können beim Entwurf durch entsprechende Konzeption der Hardware und Software ausgeschaltet werden, im Gegensatz zu den strukturbedingten Nachteilen eines zentralen Systems.³

Die Aufgabe der Konstruktion des Kontrollsystems kann analog zur Aufgabe der Konstruktion eines Rechnerbetriebssystems verstanden werden. Ein Betriebssystem verwaltet, steuert und synchronisiert den Zugriff mehrerer Benutzer auf eine Anzahl von Betriebsmitteln wie Prozessoren, Speicher, Festplatten, Kommunikationskanälen usw. Die "Betriebsmittel" des ELSA-Kontrollsystems sind die Beschleunigerparameter oder intelligenten Subsysteme, wie z.B. Magnetnetzgeräte oder Hochfrequenzsysteme. Eine wesentliche Ergänzung ergibt sich aus der Forderung nach Integration von Strahldiagnose und Simulation: Ein Meßsystem für die zeitaufgelöste Spektralanalyse des vom Monitorsystem gemessenen Strahllagesignals oder ein Simulationsprogramm zur "on line"-Berechnung der linearen Maschinenoptik können ebenfalls als Betriebsmittel interpretiert werden, die vom System verwaltet, gesteuert und synchronisiert werden. Durch die Rückkopplung der Ergebnisse der Strahldiagnose und Simulation in das System wird eine enge Verbindung der einzelnen, traditionell getrennten Aufgabengebiete untereinander erreicht. Das neue ELSA-Kontrollsystem kann somit zusammenfassend charakterisiert werden als verteiltes Beschleuniger-Betriebssystem zur Integration von Kontrolle, Diagnose und Simulation.

Leitlinien für Entwurf und Implementierung

Ausgehend von der gewählten Systemarchitektur und unter Berücksichtigung der im ersten Kapitel entwickelten informationstechnischen Anforderungen wurden folgende Leitlinien für die Konstruktion des neuen Systems festgelegt:

- Die weitestgehende Verwendung von Standards für alle Hardware- und Software-Komponenten soll die Zukunftssicherheit gewährleisten und ein "offenes", einfach erweiterbares Kontrollsystem schaffen:
 - Einsatz von modernen, miteinander vernetzten RISC-Workstations als universell verwendbare Rechnersysteme. Workstations bieten die zum Kontrollsystembau geforderte Hardware-Funktionalität (Rechenleistung, Grafik und Netzwerkfähigkeit) und zeichnen sich durch ein günstiges Preis-Leistungsverhältnis aus. "RISC" ist eine Abkürzung für "Reduced Instruction Set Computer" und charakterisiert eine besondere Prozessorarchitektur: Da erfahrungsgemäß durch Programme in der Regel nur eine relativ kleine Menge von möglichen Prozessorbefehlen verwendet wird, ist es besonders effektiv, einen Prozessor mit nur wenigen, dafür aber sehr schnellen Befehlen zu konstruieren. Man erhält ein einfaches und leistungsfähiges Design mit hoher Rechenleistung, erzwingt aber auch die sehr sorgfältige Optimierung des auszuführenden Programmcodes, der auf relativ wenige Instruktionen beschränkt bleiben muß. Die Erzeugung von Code für Prozessoren mit einem komplexen Befehlssatz (sog. "CISC"-Prozessoren, von "Complex Instruction Set Computer") ist im Gegensatz dazu einfacher, durch die erhöhte Bearbeitungszeit pro Befehl kommt es aber zu einer insgesamt geringeren Ausführungsgeschwindigkeit des Programms. Bedingt durch die Fortschritte in der Software- und Rechnertechnologie sowie durch den Bedarf nach immer mehr Rechenleistung sind die meisten der heutigen Computer mit RISC-Prozessoren ausgestattet.
 - Wahl des UNIX-Betriebssystems für die Workstations. Das UNIX-Betriebssystem ist aus Gründen der Portabilität und seiner ausgeprägten Fähigkeit zur Interoperabilität gewählt worden und entwickelt sich zum Standard auch in der Beschleunigerkontrolle. Es ist für alle nennenswerten neuen Kontrollsystem-Entwicklungen gewählt worden (z.B. CERN/LEP, ELETTRA, ESRF, COSY, DELTA, MAMI, CEBAF, ALS u.a.).⁴
 - Verwendung von Farbgrafiksystemen hoher Qualität und Einsatz eines "de facto"-Grafikstandards: "X Windows" [64] als Fenstersystem und "OSF/Motif" [59] als darauf aufbauende Infrastruktur.

³ An dieser Stelle sollte eine Bemerkung von Lampert angeführt werden ([85], S.477), die dieses Problem ironisch beleuchtet: "Ein verteiltes System ist ein System, mit dem man plötzlich nicht mehr arbeiten kann, weil ein Rechner ausgefallen ist, von dem man noch nie etwas gehört hat."

⁴ Das alte ELSA-Kontrollsystem setzte auf dem VMS-Betriebssystem von Digital Equipment auf. Der Kern wurde in VAX-Assembler programmiert.

Das **X Window**-System ist nicht nur als Grafiksoftware zu sehen, sondern realisiert auch die Infrastruktur für den Aufbau interaktiv arbeitender, über Netzwerke gekoppelter Rechnersysteme mit gemeinsamer grafischer Oberfläche durch ein geeignetes Multiprozesskonzept. Es ist daher zum Kontrollsystembau besonders geeignet. Aus diesem Grund ist es als wesentlicher Bestandteil der meisten modernen Beschleunigerkontrollsysteme etabliert.

- Verwendung der Programmiersprache "C" auf allen Ebenen. Diese Sprache erlaubt besonders die Entwicklung effizienten, systemnahen und optimierten Programmcodes. "C" ist auch die Entwicklungssprache des **UNIX**-Betriebssystems.
- Einsatz der "Ethernet"-Netzwerktechnik für die Vernetzung aller Komponenten, und Ausnutzung der unter **UNIX** verfügbaren, auf dem Internetprotokoll (**IP**) basierenden Kommunikationsprotokolle (**TCP** und **UDP**). Die Ethernet-Technologie bietet ein standardisiertes, kostengünstiges Breitbandmedium für die Rechnerkommunikation an. Durch die Verwendung von Glasfaserleitungen als physikalisches Trägermedium kann zukünftig von der preisgünstigeren Verfügbarkeit leistungsstärkerer Netzwerktechnik (z.B. **FDDI**) profitiert werden.
- Verwendung von Motorola-Prozessoren der **MC680X0**-Familie in **VME**-Bus basierten Einheiten zur Unterstützung spezieller Kontroll- und Diagnostikaufgaben. "VME" ist eine Abkürzung für "Versey Modules Eurocard" und ist eine spezielle asynchrone Busarchitektur zur Kopplung von 16- und 32 Bit-orientierten Prozessoren mit modularer Hardware in einem Doppeleuropakartenformat. Die **VME**-Spezifikation (siehe z.B. [89]) wurde ursprünglich unter Regie von Motorola entworfen und hat sich zu einem Standard für modulare, industrietaugliche 32 Bit-Systeme entwickelt. Der **VME**-Bus erzielt durch sein asynchrones Konzept eine Durchsatzrate von ca. 40 Mbyte/sec bei 16 Bit-Zugriffen. Die besondere Auslegung der parallelen Busstruktur sowie die genau definierten Spezifikationen des Busprotokolls und der Hardware haben den **VME**-Bus zu einem auch industriell einsetzbaren, "offenen" Universalbus gemacht. Der Einsatz von Motorola-Prozessoren unter dem **VME**-Bus ist ebenfalls etablierter Industriestandard; dies sichert den Zugriff auf eine große Palette kommerziell verfügbarer Module und verringert daher den Entwicklungsaufwand erheblich.
- Verwendung eines allgemein verfügbaren und zukunftssicheren Echtzeitbetriebssystems für die **VME**-Komponenten. Mehrere leistungsfähige Systeme sind am Markt etabliert.
- Einheitliche Entwicklungsumgebung für alle Software-Komponenten auf Workstations und Einsatz von Entwicklungswerkzeugen für Programmerstellung, Pflege und Dokumentation. So wird die Software-Konstruktion in einem Team und die computerunterstützte Generierung und Verteilung der Kontrollsystem-Software erleichtert.

Die Aufzählung charakterisiert viele moderne Kontrollsysteme, die in den letzten Jahren entwickelt wurden. Ein solcher Ansatz wird oft auch treffend als "Standardmodell der Beschleunigerkontrolle" bezeichnet [54].

- Optimale Ressourcenausnutzung durch einen ereignisgesteuerten Datenfluß in einem asynchron arbeitenden Gesamtsystem. Dies impliziert, daß das System nur dann aktiv wird, wenn eine Änderung des Beschleunigerzustandes es erfordert — alle Kernbestandteile absorbieren nur kurzzeitig zur Bearbeitung eines Auftrages Prozessorzeit.
- Konzeptionelle Trennung der Grundfunktionen des Systems von beschleunigerphysikalischen Aufgaben durch Konstruktion eines universell und flexibel einsetzbaren Software-Kerns, und daran lose gekoppelte Einheiten zur Durchführung der eigentlichen physikalischen Berechnungen.
- Erzielung einer hohen Bandbreite durch Einsatz mehrerer paralleler Netzwerke sowie durch Einsatz schneller lokaler Interprozesskommunikationsmechanismen.
- Flexibles Datenmodell durch die Trennung von Datenspeicherung und bedarfsorientierter Interpretation der Daten.
- Flexible Ankopplung von Benutzerapplikationen durch Unterstützung synchroner und asynchroner Zugriffsmechanismen auf Kontrollsystemparameter.

Zusammenfassend beschreibt dieses Vorgabenprofil ein auf standardisierter Hard- und Software aufbauendes, rein ereignisorientiert arbeitendes System mit hoher Bandbreite.

2.2 Aufbau der Hardware

Bei der Strukturierung der einzelnen Hardware-Komponenten hat sich bei vielen modernen Kontrollsystemen eine einheitliche Vorgehensweise etabliert (für einen Überblick siehe z.B. [36]). Das Gesamtsystem wird in logische Schichten ("Layers") eingeteilt, denen die unterschiedlichen Aufgaben der eingesetzten Rechnerkomponenten in natürlicher Weise zugeordnet sind. Die Erfahrung mit verschiedenen Kontrollsystemen hat gezeigt, daß eine saubere Trennung in solche Schichten die Entwicklungsarbeiten maßgeblich erleichtert. Die Anzahl der Schichten ist von System zu System verschieden; zusammenfassend kann aber festgestellt werden, daß sich die Mehrzahl der im Betrieb oder Planung befindlichen Systeme in drei Ebenen gliedern lassen. So auch das neue ELSA-Kontrollsystem:

1. Die Kontrollebene:

Hier werden übergeordnete Aufgaben bearbeitet, die jederzeit einen konsistenten Gesamtzustand voraussetzen. Diese Schicht wird durch ein System vernetzter Workstations realisiert. Mit den von ihnen bereitgestellten Farbgrafiksystemen und Eingabemitteln (Mauszeiger, Tastatur) bilden sie gleichzeitig die unmittelbare Schnittstelle für die Bedienung des Beschleunigers. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit werden sie mit dem Begriff "Kontrollrechner" etikettiert.

2. Die Prozeßebene:

In dieser Ebene werden dedizierte Aufgaben durch einfacher strukturierte Rechereinheiten bearbeitet. Die Aufgabenstellung ist nicht so allgemein definiert wie in der darüberliegenden Kontrollebene, aber im Vergleich zur Steuerung eines einzelnen Endgerätes umfangreicher und in einem komplexeren Umfeld angesiedelt. Hier sind beispielsweise schnelle Meßdatenerfassung und -verarbeitung zu nennen, wie etwa Berechnung einzelner Frequenzspektren oder Analyse von Bilddaten aus einer CCD-Kamera. Im allgemeinen werden dieser Schicht die Aufgaben der Datenvorverarbeitung und Datenreduktion übertragen.

3. Die Feldebene:

Dieser Ebene bleibt der unmittelbare Anschluß der zu steuernden Endgeräte vorbehalten. Zum Einsatz kommen hier kostengünstige Prozessoren und Elektronikbaugruppen mit Analog-Digital bzw. Digital-Analog-Wandlern. Die Mehrzahl der Beschleunigerkomponenten fällt unter diesen Bereich. Das neue Kontrollsystem verwendet die bereits im alten System eingesetzten Feldebuseinheiten ("MACS-Prozessoren"); dieses System ist aber den neuen Erfordernissen entsprechend umstrukturiert und wurde teilweise mit einer neuen Programmierung versehen.

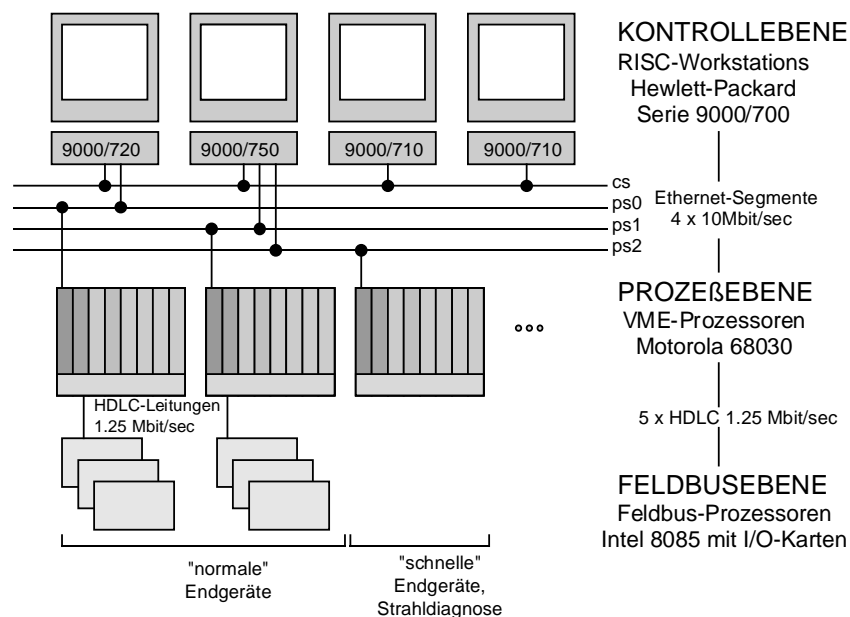


Abbildung 2.1: Die Hardware-Struktur und Ebenenbildung des neuen ELSA-Kontrollsystems

Abbildung 2.1 illustriert die Hardware-Struktur des neuen ELSA-Kontrollsystems.⁵ Die Workstations operieren mit dem UNIX-Betriebssystem HP-UX (einem UNIX-Derivat aus System V mit BSD 4.3-Erweiterungen) sowie einer grafischen Oberfläche unter X Windows und OSF/Motif. Es handelt sich um Farbgrafiksysteme mit einer Auflösung von 1248 · 1024 Pixeln bei 256 verschiedenen Farben pro Pixel. Zwei der Rechner sind mit einem bzw. zwei zusätzlichen Ethernet-Adaptern ausgerüstet.

Zwischen Kontroll- und Prozeßebene wird ein Ethernet-Netzwerk auf Koaxialkabel-Basis eingesetzt. Obwohl Ethernet kein deterministisches Kommunikationsmedium darstellt, kann eine gute Annäherung an dieses Verhalten dann erreicht werden, wenn die Dimensionierung des Netzwerks so erfolgt, daß die Belastung auf einen kleinen Prozentsatz der maximalen Bandbreite von 10 MBit/sec begrenzt ist. Aus diesem Grund verwendet das Kontrollsystem vier voneinander unabhängige Ethernet-Segmente, die jeweils zum Überbrücken größerer Distanzen über "Repeater" einzelne Untersegmente bilden.⁶ Ein Segment (als **cs** bezeichnet) dient ausschließlich zur Kommunikation der Workstations untereinander. Die drei anderen Segmente (bezeichnet als **ps0**, **ps1**, **ps2**) verbinden die Kontrollebene mit der Prozeßebene: zwei der Workstations haben durch ihre zusätzlichen Ethernet-Adapter die Möglichkeit des Zugriffs auf die Segmente (**ps0**, **ps1**, **ps2**) zur Ankopplung der VME-Systeme; die VME-Prozessoren sind direkt an die entsprechenden Untersegmente angekoppelt. Die Zuordnung einzelner Prozessoren zu einzelnen Untersegmenten ist variabel und richtet sich nach Datenaufkommen und geforderter Bandbreite. Unterschieden werden:

- a) "Langsame Geräte" mit geringem Datenaufkommen und kleiner Bandbreitenanforderung. Erfahrungsgemäß beziehen sich ca. 60% aller Kontrolleoperationen auf diesen Bereich.
- b) Geräte mit mittlerem Datenaufkommen und moderaten Anforderungen an die Bandbreite (rampfähige Netzgeräte, Korrekturmagnete, Magnete zur Steuerung der Extraktion). In diesem Bereich liegen ca. 30% aller Operationen.
- c) Subsysteme zur Strahldiagnose mit hohem Datenaufkommen und hoher Bandbreitenforderung. Ein Datentransfer findet hier meistens nur mit weniger als einem Hertz oder auf explizite Anforderung statt. Eine hohe Bandbreite wird daher in der Regel als "Burst" angefragt, und nur selten von mehreren Systemen gleichzeitig verlangt.

In Zukunft (Anfang 1995) werden alle Koaxialkabel durch Glasfaserleitungen ersetzt werden. Der dadurch erreichte Störabstand ist wesentlich besser als bei der Verwendung von Koaxialkabeln; ein solches System ist daher besonders gut für den Einsatz in Bereichen mit starker elektromagnetischer Störstrahlung geeignet. Dieser Punkt ist bei den vorliegenden geographischen und elektromagnetischen Randbedingungen von großer Bedeutung.

Die Hardware der Prozeßebene besteht aus insgesamt 12 VME-Überrahmen, aufgeteilt in zwei Gruppen. In der einen Gruppe wird pro Überrahmen mindestens ein Prozessormodul⁷ als sog. Systemcontroller eingesetzt. Ein solches Modul ist ausgestattet mit jeweils einer CPU MC68030/25MHz und 4 MB lokalem Speicher, Ethernet-Adapter und vier seriellen Schnittstellen. In der anderen Gruppe werden als Systemcontroller alternative Einheiten⁸ verwendet, die jeweils eine CPU MC68030/40MHz, einen Kommunikationscontroller MC68302 zum Anschluß des Feldbussystems sowie 4 MB lokalen Speicher und 2 serielle Schnittstellen beinhalten. Jeder Überrahmen ist darüber hinaus mit einer spezifischen Ausstattung an VME-Karten ausgerüstet, die auf die Belange des zu steuernden Subsystems oder einer Meßaufgabe der Strahldiagnostik zugeschnitten sind. Hierzu gehören z.B. IEC-Bus-Karten oder digitale bzw. analoge Schnittstellenkarten. Zusätzlich wird in jedem Überrahmen der ersten Gruppe ein Hardware-Diagnosemodul betrieben, welches bei Bedarf den Zustand des VME-Busses darstellen und Fehlerzustände zur Analyse "einfrieren" kann. Die VME-Prozessoren werden festplattenlos betrieben und booten über das Ethernet-Netzwerk, wobei die Workstations der Kontrollebene die benötigte Software als sogenannte "Server" bereithalten.

Die Feldbusebene ist über serielle Hochgeschwindigkeitsleitungen (1.25 Mbit/sec) mit dem HDLC-Protokoll ("High Level Data Link Control") an die entsprechenden MC68302-Controller angeschlossen [19]. Diese

⁵Zur Zeit werden ein Rechner Hewlett-Packard 9000/750 mit 64 MB Hauptspeicher und 1.5 GB Plattenspeicher, ein Modell 9000/720 mit 48 MB Hauptspeicher und 600 MB Plattenspeicher sowie zwei Einheiten 9000/710 mit 32 MB Hauptspeicher und 550 MB Plattenspeicher eingesetzt. Eine Erweiterung um einen Rechner 9000/755 mit 128 MB Hauptspeicher und 2 GB Plattenspeicher sowie zwei Modelle 9000/712 mit 64 MB Hauptspeicher wird Anfang 1995 erfolgen.

⁶Das gesamte ELSA-Netzwerk ist über eine "Bridge" vom Netzwerk des Physikalischen Instituts getrennt.

⁷Es handelt sich jeweils um ein Modul CPU-30 der Firma FORCE.

⁸Zum Einsatz kommen Prozessormodule VM30/VCOM der Firma PEP.

seriellen Controller wurden durch geringe Hardware-Modifikationen (im wesentlichen eine Änderung der Taktfrequenz) für den Anschluß der bereits vorhandenen HDLC-Leitungen präpariert. Sie sind wiederum über den jeweils zugeordneten MC68030-Prozessor an das Ethernet-Netzwerk angebunden. Die Auswahl des HDLC-Controllers aus einer Menge kommerziell verfügbarer Modellvarianten richtete sich nach möglichst hoher Durchsatzrate beim Transport einzelner Datenpakete; eine genauere Auflistung der Auswahlkriterien ist in [68] zu finden.

Das an ELSA eingesetzte Feldbusystem bestand ursprünglich aus zwei Leitungen, an denen zwei verschiedenen Gruppen von Überraumen mit ca. 80 MACS-Prozessoren angeschlossen waren. Diese Aufteilung richtete sich nach geographischen Gegebenheiten. Durch die Konzentration aller Endgeräte auf diese beiden Leitungen wurde die insgesamt erreichbare Durchsatzrate signifikant eingeschränkt, da auf einer Feldbusleitung zu einem Zeitpunkt immer nur ein einzelner Prozessor aktiv sein kann. Für die Übernahme in das neue Kontrollsystem wurde eine Neustrukturierung der bestehenden Hardware beschlossen, die sich ausschließlich nach den Durchsatzforderungen der zu steuernden Endgeräte richtet und eine möglichst hohe Bandbreite ermöglicht. Dies wird einerseits dadurch realisierbar, daß eine weitläufige geographische Abdeckung des ELSA-Geländes bereits durch das Ethernet-Netzwerk erfolgt ist und daher die Länge der notwendigen Feldbusleitungen auf ein Minimum reduziert werden kann, andererseits der modulare Anschluß der HDLC-Leitungen über VME-Systeme die Verwendung von deutlich mehr als zwei Leitungen erlaubt.

Die Neustrukturierung ist in Abbildung 2.2 skizziert. Das Kontrollsystem ist so aufgebaut, daß ein Umbau bei geänderten Randbedingungen einfach durchgeführt werden kann. Insgesamt werden zur Zeit fünf Feldbusleitungen eingesetzt, die auf die parallelen Ethernet-Segmente (ps0, ps1, ps2) geführt sind. Die Zuordnung einzelner Feldbusprozessoren zu einzelnen Endgeräten wurde dabei weitgehend unverändert übernommen; dies erlaubt unter anderem die einfache Abschätzung der pro Leitung zu bedienenden Parametermenge. Die Zuordnung einzelner Leitungen zu einzelnen Ethernet-Segmenten richtet sich nach dem Parametaraufkommen und den geforderten Durchsatzraten. Angestrebt wurde eine möglichst gleichmäßige Auslastung aller Netzwerkstränge.

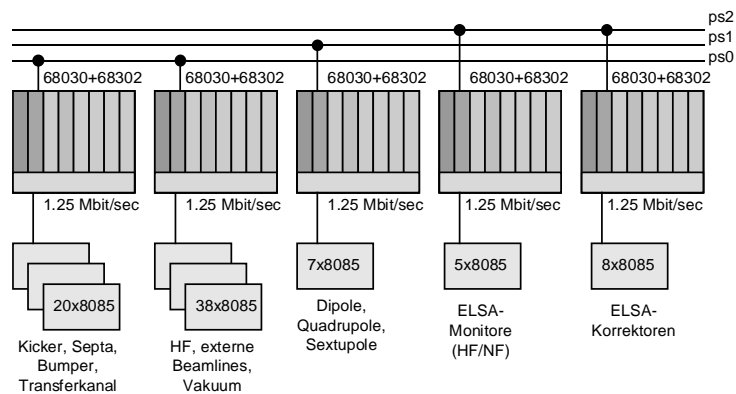


Abbildung 2.2: Die Neustrukturierung des MACS-Systems in der Feldbusebene

Die Aufteilung wurde dementsprechend wie folgt getroffen:

1. Eine Leitung bindet alle Prozessoren zur Steuerung der Synchrotron-Extraktion (Bumper, Kicker, Septa) sowie den Transferkanal zwischen Synchrotron und ELSA an. Es werden etwa 500 ELSA-Parameter über diesen Zweig angesprochen.
2. Eine Leitung bindet die Prozessoren der Hochfrequenzsysteme, des Vakuumsystems und der externen Beamlines an. Es handelt sich um eine Menge von etwa 1000 ELSA-Parametern.
3. Eine Leitung bindet die Prozessoren zur Ansteuerung der ELSA-Hauptmagnete (Dipole, Quadrupole und Sextupole) an. Da die Steuerung der ELSA-Hauptmagnete für den Nachbeschleunigungsbetrieb besondere Anforderungen stellt, ist diese Zuordnung in Hinsicht auf eine maximale Bandbreite (und damit Arbeitsgeschwindigkeit) getroffen worden. Die Steuerung bzw. Überwachung der Hauptmagnete umfaßt etwa 120 Parameter, von denen eine gewisse Menge die tabellierten Steuerkurven für die einzelnen Magnetfamilien aufnehmen können.

4. Eine Leitung ist ausschließlich dem ELSA-Monitorsystem zugeordnet, um auch hier einen möglichst hohen Durchsatz der Datenübertragung zu gewährleisten. Es sind etwa 250 Parameter involviert, die zum größten Teil die HF- bzw. NF-Elektronik des Systems ansteuern. Der verbleibende Teil dient zur Aufnahme von Rohdaten oder gemessenen Positionen des Elektronenstrahls.
5. Die fünfte Leitung bedient das Korrektorsystem, welches besonders für die Korrektur der Gleichgewichtsbahn in ELSA gefordert ist (siehe dazu [92]). Etwa 300 Parameter sind definiert.

Da insgesamt 5 Leitungen mit einer maximalen Bandbreite von 1.25 Mbit/sec verwendet werden, ergibt sich nur durch das Felddbusssystem eine theoretische Maximalauslastung der drei Ethernet-Stränge (**ps0**, **ps1**, **ps2**) von

$$\frac{5 \cdot 1.25 \text{ Mbitsec}^{-1}}{3 \cdot 10 \text{ Mbitsec}^{-1}} \approx 21\% .$$

Betrachtet man die zu transportierenden Datenpaketlängen und die zu erwartende Rate, mit der Pakete auf die HDLC-Leitungen gelegt werden, so kann man erfahrungsgemäß von einer deutlich kleineren mittleren Auslastung des Netzwerkes ausgehen, die im vorliegenden Fall nur bei einigen Prozent liegen dürfte. Durch den Einsatz geeigneter Meßinstrumente kann dies überprüft werden. Entsprechende Untersuchungen sind bei ELSA für alle Prozeßnetze durchgeführt worden und haben jeweils Werte von deutlich weniger als 5% ergeben. Diese Werte steigen auf maximal 10% bei Hinzunahme des durch die VME-Prozessoren verursachten Datenverkehrs.

Alle ELSA-Geräte oder Parameter, die wegen zu hoher Bandbreitenanforderungen für den Anschluß an das Felddbusssystem nicht geeignet sind, werden direkt über entsprechende VME-Einheiten angesteuert bzw. ausgelesen. Die den einzelnen Ethernet-Segmenten zugeordneten Bereiche umfassen

- die wesentlichen Komponenten des Timingsystems, im besonderen das System zur Optimierung der ELSA-Füllstruktur (**ps1**),
- die Extraktionsquadrupole, welche durch schnelle arbiträre Funktionsgeneratoren auf VME-Basis angesteuert werden (**ps1**),
- die Steuerung der Spitzenspannung in den Hohlraumresonatoren (ebenfalls realisiert durch einen VME-Funktionsgenerator) (**ps2**),
- alle externen, über den IEC-Bus angeschlossenen Meßinstrumente, wie beispielsweise digitale Speicheroszilloskope sowie ein analoger Spektrum-Analysator und diverse Universal- und HF-Millivoltmeter (**ps1**, **ps2**),
- das System zur breitbandigen Analyse der ELSA-Füllstruktur [51], welches zur Verifikation des neuen Injektionsverfahrens aufgebaut wurde (**ps2**),
- die Bilddatenverarbeitung für die Erfassung der Kamerasignale des in ELSA befindlichen Synchrotronlicht-Monitors [40], sowie des Folienmonitors im Transferkanal zwischen Synchrotron und ELSA [11] (**ps1**),
- das System für die zeitaufgelöste Spektralanalyse des vom Monitorsystem gelieferten Strahllagesignals, basierend auf einem digitalen Signalprozessor (**ps2**).

Die oben bereits im Ansatz beschriebenen Komponenten des Timingsystems und der Strahldiagnose werden im vierten und fünften Kapitel ausführlich behandelt.

Die in den vorangegangenen Abschnitten beschriebene Hardware-Struktur bildet den Rahmen für die Konstruktion eines dazu passenden Software-Kerns, der insbesondere die informationstechnischen Anforderungen eines verteilten Systems erfüllen muß und gleichzeitig die Ankopplung aktiver Einheiten mit "beschleunigerphysikalischer Intelligenz" so einfach wie möglich machen soll. Die Konstruktion dieses Kerns wird nun im verbleibenden Teil dieses Kapitels beschrieben.

2.3 Software-Architektur

Globale Definitionen

Die Konstruktion der Kontrollsystem-Software erfordert zunächst eine Festlegung aller Definitionen, die im gesamten System auf allen Rechnern gültig sind und während des Betriebs keiner Änderung unterworfen

werden. Die Architektur des Kerns ist aber von diesen Definitionen weitgehend unabhängig. Zu nennen ist insbesondere eine Netzwerkkarte und ein einheitliches Schema der Vergabe von Adressen, welche die Kennzeichnung der einzelnen Ethernet-Segmente und die Adressierung der daran angeschlossenen Kontroll- bzw. VME-Rechner umfasst und die das Vermitteln von Daten zwischen jeweils zwei beteiligten Einheiten ermöglicht. Zusätzlich verwendet wird ein über alle Rechner verteiltes Dateisystem, welches jedem Programm und jeder Applikation die gemeinsame Nutzung von Kontrollsystemdateien gestattet, unabhängig von dem Rechner, auf dem eine Datei physikalisch gespeichert ist. Das Kontrollsystem setzt das unter **UNIX** frei verfügbare und als "de facto"-Standard etablierte "**NFS**"-System ein ("network file system").

Eine einheitliche und verbindlich vorgeschriebene Namensgebung aller Kontrollsystem-Parameter stellt die Identifizierbarkeit aller verwalteten Datenobjekte sicher. Die hierzu festgelegte Namenskonvention orientiert sich weitgehend an den Namen des alten Kontrollsystems, um den Einarbeitungs- und Wartungsaufwand zu minimieren.⁹ Das neue Kontrollsystem erlaubt allerdings eine wesentlich flexiblere Typisierung von Parametern und der gespeicherten Daten: Unterstützt werden Gleitkomma- und Ganzzahl-Parameter sowie Texte und reine Binärdaten. Jeder Parameter kann eine bestimmte "Größe" zugewiesen bekommen, die ihn entweder als skalarwertigen Parameter (Größe 1) oder vektor- bzw. matrixwertigen Parameter kennzeichnet (Größe N bzw. $N \cdot M$, wobei N die maximale Anzahl der Einträge bzw. mit M die maximale Dimension der Matrix angibt). Diese Definitionen werden ergänzt durch eine einheitliche Schlüsselvergabe für jeden Parameter. Das Kontrollsystem verwendet intern statt der Namen eindeutige Zahlen (32 Bit) als Schlüssel für einen Parameter-Zugriff. Die Zuordnung eines Schlüssels zu einem Parameter und dessen Namen ist variabel und wird beim Definitionsprozeß automatisch vorgenommen. Im Gegensatz zum alten ELSA-Kontrollsystem kann die Zuordnung jederzeit geändert werden. Damit bleiben die Namen die einzige unveränderliche Kennzeichnung eines Parameters.

Das System verwendet auf allen Ebenen ein einheitliches Adressierungsschema. Beim Zugriff auf einen Parameter wird eine Kette von Zuordnungen durchlaufen, die das Vermitteln von Daten über alle beteiligten Netzwerke und Feldbusleitungen des Kontrollsystems erlaubt. Für jeden Parameter existiert eine solche Zuordnungskette, in der entsprechende Kontrollrechner, VME-Prozessoren und optional Feldbusprozessoren definiert sind. Darüber hinaus existiert eine einheitliche Verwaltungsbeschreibung für einen Parameter. Hierzu gehören unter anderem

- Angaben über Größe und augenblickliche Belegung mit Werten,
- Angaben zum Wertebereich und zur Auflösung sowie zur physikalischen Einheit,
- Angaben über eine optionale lineare Transformation der Werte,
- die Definition von Alarm- und Warnungsintervallen, deren Unter- bzw. Überschreitung zum, Auslösen entsprechender Meldungen führt.

Jedem Parameter können "Attribute" zugeordnet werden, die ein Datenobjekt zusätzlich charakterisieren. Hierzu zählen beispielsweise Angaben über Schreibschutz, Zugriffsbedingungen oder die Alarmbehandlung. Das Kontrollsystem verwendet stets eine einheitliche Klassifikation von Meldungen im Kontrollsystem. Eingeführt werden dazu verschiedene Stufen (sog. "Level"), mit denen eine einzelne Meldung charakterisiert und mit einer Priorität versehen werden kann. Dies entspricht weitgehend einem bei vielen anderen Kontrollsystemen gewählten Ansatz (siehe z.B. [37]).

Architektur des virtuellen Kerns

Unter Berücksichtigung der informationstechnischen Anforderungen an das System und gemäß den in 2.1 angegebenen Leitlinien wurde entschieden, das Basiskontrollsystem aus einer Menge kooperierender aktiver Einheiten, den sog. Kernprozessen, aufzubauen. Alle Kernprozesse haben parallelen Zugriff auf eine Basis gemeinsam verwalteter Datenstrukturen, besitzen aber keine beschleunigerspezifische Programmierung. Jeder am Kontrollsystem beteiligte Rechner operiert mit einem identischen Satz solcher Kernprozesse, der im folgenden auch als "Prozeßgerüst des lokalen Kerns" bezeichnet wird. Diese grundlegende Struktur eines rechnerlokalen Kontrollsystems ist in Abbildung 2.3 illustriert.

⁹Im alten ELSA-Kontrollsystem waren etwa 2200 Namen definiert, die einzelnen Endgeräten und deren Steuer- bzw. Meßgrößen zugeordnet waren. Die Namensgebung hat sich im Zeitraum von 1987 bis 1994 nicht geändert und ist daher allen mit dem Kontrollsystem beschäftigten Personen vertraut. Dies erzwingt die möglichst vollständige Übernahme dieser Namen — wenn auch in einer leicht veränderten Struktur —, um den gewünschten "Wiedererkennungseffekt" im neuen Kontrollsystem zu erzielen.

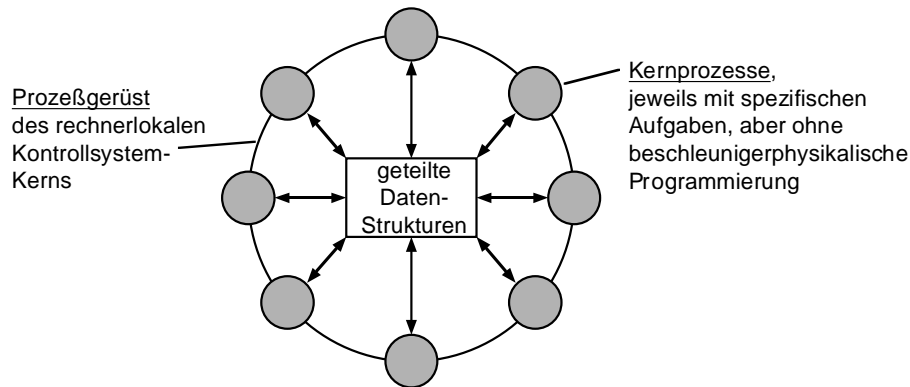


Abbildung 2.3: Der rechnerlokale Kern

Während der Startphase des Systems stellen die zunächst noch rechnerlokal operierenden Kernprozesse eine Kopplung untereinander her. Danach ist für eine beliebige Applikation auf einem beliebigen Kontrollrechner nur noch ein virtueller Kern sichtbar, die Struktur einzelner Rechner und Netzwerke wird vollständig verborgen. Durch den Vorgang der Verkopplung lokaler Kerne in der Startphase wird der Übergang von mehreren parallel arbeitenden Rechnern zu einem verteilten System vollzogen, in dem ein rechnerübergreifender, transparenter und synchronisierter Zugriff auf alle Ressourcen möglich ist. Der entstandene virtuelle Kern kann in drei Schichten eingeteilt werden, die im folgenden kurz beschrieben und in Abbildung 2.4 skizziert sind.

Im Inneren des virtuellen Kerns liegt die Kommunikationsschicht. Diese Schicht beinhaltet alle Mechanismen zum Austausch von Parameterdaten (den eigentlichen Werten für die Beschleunigersteuerung) und Verwaltungsinformationen des Kontrollsystems. Sie koordiniert den gesamten Datenfluß im System, synchronisiert alle auftretenden Ereignisse und vermittelt alle Datentransfers sowohl rechnerlokal als auch rechnerübergreifend. Bezugnehmend auf das vorgestellte Schichtenmodell der Hardware wird hier zwischen horizontaler (zwischen den Workstations) und vertikaler (zwischen Workstations und VME-Systemen) Kommunikation unterschieden; für die Implementierung der Software ist diese Unterscheidung allerdings nicht relevant. Oberstes Ziel dieser Schicht ist eine möglichst hohe Datentransferrate. Dies ist deshalb besonders wichtig, weil das verwendete Netzwerkmedium Ethernet mit einer Bruttobandbreite von 10 Mbit/sec wesentlich weniger Durchsatz erlaubt, als die Verarbeitung in schnellen RISC-Workstations oder VME-Prozessoren zuließe. Dieser "Netzwerk-Flaschenhals" muß also durch die Wahl dafür geeigneter Kommunikationsverfahren möglichst gut überbrückt werden. Da das Netzwerk darüber hinaus fehleranfällig ist, muß die Kommunikationsschicht für den Datentransport nicht nur schnelle, sondern auch fehlertolerante Protokolle verwenden. Hierbei ist besonders darauf zu achten, daß der Verwaltungsaufwand für die Kommunikation in einem vernünftigen Verhältnis zur Zeit des eigentlichen Nutzdatentransports steht. Der Aufbau der Kommunikationsschicht wird gesondert in Abschnitt 2.5 beschrieben.

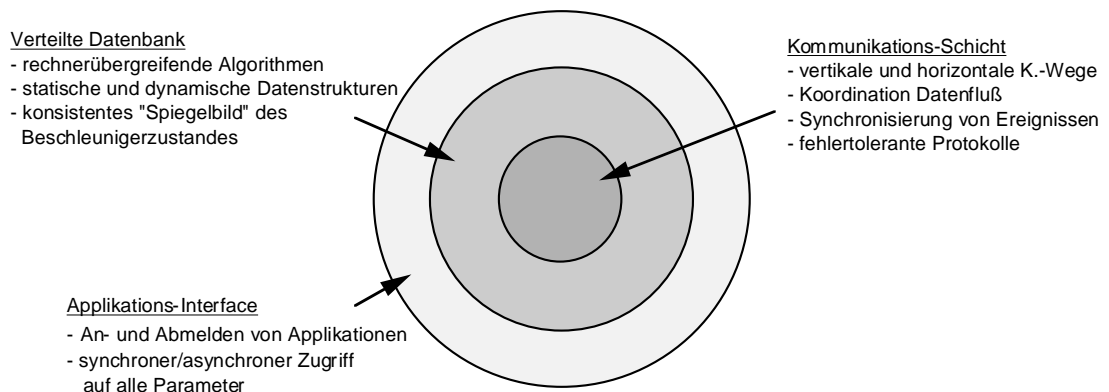


Abbildung 2.4: Struktur des virtuellen Kerns

Über der Kommunikationsschicht liegt die Schicht des verteilten Datenbanksystems. Dieses System hat die Aufgabe, rechnerübergreifend statische, d.h. zeitlich unveränderliche, und dynamische, d.h. einer dauernden Änderung unterworfenen, Parameterdaten zugänglich zu machen. Dazu gehört die Speicherung der Daten an einem passenden Ort auf einem dafür definierten Rechner, sowie die Bereitstellung einer Menge von schnellen Zugriffsalgorithmen. Die Gesamtheit der dynamischen Daten bildet zum einen ein konsistentes "Spiegelbild" des Beschleunigerzustandes, zum anderen ein aktuelles Zustandsbild der sich im verteilten System kontinuierlich verändernden Verbindungen zwischen einzelnen Rechnern, d.h. einzelnen Kernprozessen. Der Aufbau des verteilten Datenbanksystems wird detailliert in Abschnitt 2.11 beschrieben.

Das auf der Datenbankschicht aufsetzende Applikations-Interface stellt die eigentliche Verbindung zur "Außenwelt" des verteilten Systems her. Durch entsprechende Vorkehrungen wird beliebigen Applikationen, unabhängig vom Rechner, auf dem sie gestartet werden, eine Anmeldung an das System ermöglicht. Der Schreib- und Lesezugriff auf alle Parameter sowie auf die wesentlichen, global definierten Verwaltungsinformationen wird sichergestellt. Jede Applikation kann darüber hinaus einen der drei Zugriffsmechanismen auf Parameter im Kontrollsystem verwenden (innerhalb einer Applikation auch gemischt): einfache oder zyklische Abfragen, synchrone Benachrichtigung mit Servicefunktionen und asynchrone Benachrichtigung durch Unterbrechungen (sog. "Interrupts").

Aufgabenhierarchie im Kontrollsystem

Die im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Komponenten des Kernsystems und ihre Kooperation untereinander stellen den gleichberechtigten, parallelen und synchronisierten Zugriff beliebiger Applikationen auf die Gesamtmenge aller im System verteilt gespeicherten Beschleunigerparameter sicher. Der Zugriff auf jeden dieser Parameter ist sowohl vom Typ des Parameters als auch von dem gespeicherten Datenvolumen unabhängig. Dieses Konzept erfüllt daher die Forderung nach Implementierung eines universellen Kontrollsystem-Kerns, dessen Funktionen vollständig getrennt sind von beschleunigerspezifischen Aufgabenstellungen.

Der scheinbare Gegensatz zwischen Universalität und ELSA-spezifischen Aufgaben wird im neuen Kontrollsystem dadurch aufgehoben, daß alle beschleunigerspezifischen Funktionen und Berechnungen in dedizierte Regelprozesse konzentriert und eingekapselt werden. Diese Prozesse arbeiten autonom und parallel im Sinne von normalen Kontrollsystem-Applikationen, sind über alle Rechner der Kontrollebene verteilt und verwenden die Funktionalität des Kontrollsystem-Kerns zur Unterstützung ihrer Arbeit. Alle Prozesse, die unter diesen Aufgabenbereich fallen und als Applikationsprogramme auf dem virtuellen Kern aufsetzen, werden "Experten" genannt. Die Gesamtheit aller Experten stellt dem Kontrollsystem die beschleunigerphysikalische "Intelligenz" zur Verfügung, ohne die Universalität des darunterliegenden Kerns zu beeinflussen. Für die Aufgabenstellung der Entwicklung eines verteilten Kontrollsystems zur Integration von Kontrolle, Simulation und Diagnose ist dies ein großer Vorteil, da alle dadurch definierten Aufgaben in die Ebene der Experten verlagert werden können. Durch Zuweisung bestimmter Aufgaben zu einem oder mehreren dedizierten Experten ist besonders die Implementierung der Simulation und Strahldiagnose in das System sehr modular und flexibel durchführbar: Die Berücksichtigung neuer beschleunigerphysikalischer Konzepte, Berechnungsmethoden oder Analyseverfahren kann ausschließlich durch entsprechende Modifikation der Experten vorgenommen werden, ohne daß das eigentliche Kontrollsystem tangiert ist. Dies führt zu der Möglichkeit, während des Beschleunigerbetriebs einzelne Experten auszutauschen, zu entfernen oder das System durch neue Experten zu ergänzen. Im letzteren Fall erhält das Kontrollsystem instantan neue Funktionalitäten, ohne daß zuvor der Betrieb unterbrochen werden mußte. Durch das Konzept ergibt sich die in Abbildung 2.5 skizzierte Aufgabenhierarchie im ELSA-Kontrollsystem.

Ein "Experte" tritt nicht in Verbindung mit einem Operateur oder Physiker, sondern führt seine Arbeit unterhalb aller Applikationen aus, die die direkte Interaktion eines Anwenders mit dem Beschleuniger zulassen (etwa eine grafische Benutzeroberfläche), wie Abbildung 2.5 anzeigt. Diese oberste Schicht der Applikationen macht sich vielmehr die Funktionen der Experten zunutze, um eine einheitliche, beschleunigerphysikalische Sicht auf ELSA zu realisieren. Die Einführung dieser neuen Abstraktionsebene für das Kontrollsystem wurde in der Aufgabenstellung bereits erläutert.

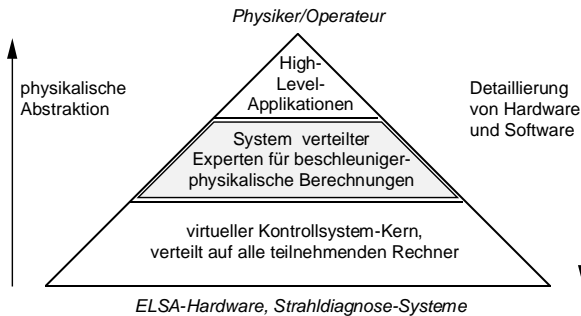


Abbildung 2.5: Die Hierarchie der Aufgabenverteilung im ELSA-Kontrollsystem

Durch die in Abbildung 2.5 skizzierte Aufgabenpyramide wird der gewählte Lösungsansatz zur Erfüllung dieser Aufgabe verdeutlicht. Eine detaillierte Beschreibung der Konzeption des Regelsystems erfolgt in Abschnitt 2.9.

2.4 Software für das Prozeßsystem

Bei der Entwicklung der Kernsoftware für das Prozeßsystem mußte besonders auf die Echtzeitanforderungen geachtet werden, die viele Aufgaben der Beschleunigersteuerung oder Strahldiagnose stellen. Da aus heutiger Sicht die Eigenentwicklung eines echtzeitfähigen Betriebssystems für VME-basierte Prozessoren nicht mehr vertretbar erscheint,¹⁰ wurde die Beschaffung eines kommerziell verfügbaren Echtzeitsystems beschlossen. Der Stand der Software-Technologie gestattet heute die Auswahl zwischen verschiedenen Systemen, die alle ein mehr oder weniger spezifisches Leistungsprofil aufweisen. Für das ELSA-Kontrollsystem waren die folgenden Auswahlkriterien relevant:

- Möglichst gute Echtzeiteigenschaften, d.h. kurze Reaktionszeiten auf ein externes Signal. Die mittlere Reaktionszeit vom Auftreten eines externen Signals bis zur Ausführung des ersten benutzerspezifischen Kommandos zur Behandlung dieses Signals wird Interrupt-Latenzzeit genannt und muß bei ELSA weniger als 20 μsec betragen.
- Verfügbarkeit standardisierter Verfahren der Netzwerkkommunikation, die kompatibel mit dem Rest der Kontrollsystem-Software sind (Internet-Protokollfamilie UDP, TCP/IP), sowie deren ausreichend leistungsfähige Implementierung zur Erzielung einer möglichst hohen Bandbreite.
- Wichtige Eigenschaften des Kernbetriebssystems (Multitasking, Preemptives Scheduling mit Prioritätssteuerung, Intertask-Kommunikation und -Synchronisation). Multitasking ist deshalb besonders wichtig, da ein VME-Prozessor in der Regel mehrere, voneinander unabhängige Aufgaben zu bearbeiten hat. Zwischen einzelnen Berechnungen muß eine faire Verteilung der Rechenzeit erfolgen (Scheduling). Falls eine Berechnung den Prozessor blockiert, dieser aber auf ein externes Signal reagieren soll, muß die Berechnung temporär gestoppt werden (preemptives Verhalten).
- Herstellerunabhängige Unterstützung verschiedener Prozessorarchitekturen, insbesondere der bei ELSA eingesetzten MC68302-Kommunikationscontroller.
- Komfortable, einfach bedienbare Entwicklungsumgebung auf UNIX-Workstations. Eine Entwicklung direkt auf VME-Prozessoren ist wegen der dort im allgemeinen schlechteren Infrastruktur nicht mehr Stand der Technik und nur spezialisiertem Personal zuzumuten.
- Komfortable Mechanismen für "Test und Fehlersuche vor Ort", ohne Verbindung zu einer Workstation.
- Standardisierung der Software sowie Zukunftssicherheit.

¹⁰Die Entwicklung eines VME-Echtzeit-Betriebssystems beansprucht in der Regel mehrere Mannjahre Aufwand und eine lange Test- und Fehlerbehebungsphase.

Die Bewertung eines Echtzeitsystems für die Belange der Beschleunigerkontrolle ist bei genauer Untersuchung aller kontrollsystemrelevanten Eigenschaften aufwendig. Für das geplante SSC-Kontrollsystem wurde eine umfangreiche Analyse durchgeführt, deren Ergebnis eine Entscheidungshilfe gab [57][10]. Das "VxWorks"-System der Firma Wind River ([28]) nahm unter allen Konkurrenzprodukten einen vorderen Platz ein und wurde infolge einer positiven Bewertung als Kandidat für das ELSA-Kontrollsystem ausgewählt. Die endgültige Entscheidung fiel nach einem mehrwöchigen Test von VxWorks im Physikalischen Institut. Mit der Wahl dieses Systems wurde die Basis für eine darauf aufbauende Entwicklung der Prozeßsystem-Software geschaffen, ohne Grundfunktionen, z.B. hardwarenahe Interruptverarbeitung, selbst entwickeln zu müssen.

Auch die VME-Software ist entsprechend der Software-Architektur des Kontrollsystems aufgebaut. Dazu kommen aber zusätzliche, prozeßsystem-spezifische Funktionen. Insgesamt ergibt sich die Trennung in drei Bereiche:

- Kernfunktionen: Hierzu gehört die Implementierung einer Kommunikationsschicht, eines Datenbanksystems (der "Prozeßdatenbank") und eines Applikations-Interfaces. Diese drei Ebenen entsprechen der Strukturierung des allgemeinen Kontrollsystem-Kerns:
 - Die Kommunikationsschicht ist identisch zur Kommunikationsschicht der Workstation-Software aufgebaut und verwendet die gleichen Protokolle und Sicherungsverfahren. Daher wird auf dieser Ebene keine Unterscheidung zwischen Workstations und VME-Rechnern sichtbar.
 - Die Prozeßdatenbank erlaubt die Speicherung von statischen und dynamischen Daten, die im Kontext des VME-Prozessors von Bedeutung sind. Da auf der Ebene eines einzelnen VME-Prozessors kein Gesamtüberblick über ELSA notwendig ist, reicht die Speicherung der Informationen für diesen eingeschränkten Kontext. Die Datenbank basiert auf dynamischen, rekursiv definierten Datenstrukturen und wird beim Starten des Prozessors über das verteilte Datenbanksystem der Kontrollebene mit Informationen geladen. Durch dieses Vorgehen erhält jeder VME-Prozessor seinen Arbeitskontext in der Startphase des Systems — aber erst, nachdem das Kontrollsystem den Übergang zum verteilten System durchgeführt hat.
 - Das Applikations-Interface gestattet zwei der geforderten Zugriffsmöglichkeiten auf Parameter: normale Lese/Schreiboperationen und ein synchrones, ereignisorientiertes Verfahren. Das besondere Merkmal dieses Interfaces ist die einfache Ankopplung sogenannter Servicefunktionen: Durch Angabe eines Parameternamens und einer Servicefunktion wird eine dauerhafte Abbildung des Parameters auf die Funktion hergestellt. Bei jeder Operation auf dem Parameter wird dann diese Servicefunktion ausgeführt. Für den Programmierer einer beschleunigerphysikalischen Anwendung beschränkt sich die Arbeit daher nur auf das Erstellen von Servicefunktionen, z.B. dem Einlesen von Meßdaten oder dem Berechnen eines Frequenzspektrums, und das Binden dieser Funktionen an einen ausgewählten Parameter. Die Arbeit des dahinterliegenden Kontrollsystems bleibt bei diesem Ansatz vollständig verborgen. Dies erleichtert die Entwicklung ELSA-spezifischen Codes (besonders für die Strahldiagnose) wesentlich.
- Echtzeitfunktionen: Hierzu wurde ein System entwickelt, welches die Verarbeitung von bis zu vier extern aufgelegten Triggersignalen unter Echtzeitanforderungen gestattet. Das System ist in das Applikations-Interface integriert; jede Applikation kann sich bei diesem System anmelden und eine sog. Aktionsliste angeben, die bei Auftreten eines Triggers bearbeitet werden soll. Zusätzlich ist auch ein blockierendes Warten auf einen Trigger möglich. Dies gestattet z.B. die Synchronisation der Software auf den Start des Extraktionsprozesses in ELSA.
- Unterstützungsfunktionen: Zwei Teilbereiche sind wesentlich:
 - Ein System zur Generierung von Meldungen der verschiedenen Stufen, gemäß den getroffenen globalen Definitionen.
 - Ein System zum Anschluß externer Instrumente über den IEC-Bus. Eingeschlossen ist eine einfache Verwaltung angeschlossener Einheiten, ein auf Durchsatz optimierter Treiber und die Möglichkeit des netzwerk-basierten Zugriffs auf Instrumente, die an entfernte und nur über das Netzwerk erreichbare VME-Rechner angeschlossen sind. Der eigens entwickelte IEC-Treiber für VxWorks ermöglicht Durchsatzraten von etwa 250 kByte/sec [51].¹¹ Durch die Bereitstellung von Ser-

¹¹ Dieser Wert wurde gemessen mit einer VME-CPU MC68030/40MHz und einem Digitaloszilloskop LeCroy 9024E.

vicefunktionen kann ein beliebiges Gerät einer Gruppe von Kontrollsystem-Parametern zugeordnet werden. Für das Gesamtsystem realisiert dies einen transparenten Zugriff auf beispielsweise einen Spektrumanalysator, Signalgeneratoren oder Synthesizer. Dies erleichtert die Integration der Strahldiagnose in das Kontrollsystem wesentlich.

Alle anderen Softwareteile sind applikationsspezifisch. Hierzu gehört insbesondere auch die Software zum Betrieb der **MC68302**-Kommunikationscontroller, die für den Anschluß der Feldbusleitungen verwendet werden. Aufbauend auf einem neu entwickelten Treiber werden wiederum Servicefunktionen bereitgestellt, die für den lesenden und schreibenden Zugriff auf Parameter die entsprechende Verbindung herstellen. Der Aufbau dieser Software ist detailliert in [68] beschrieben. Die Prozeßdatenbank enthält in diesem Fall alle über den Feldbus angeschlossenen Parameter. Zusammen mit der Kommunikationssoftware wird so eine breitbandige Kopplung zwischen dem Feldbussystem, dem **VME**-System und der Kontrollebene hergestellt. Die Trennung der Software in einen universellen Kern und die applikationsspezifischen Teile erlaubt beispielsweise auch den Anschluß einer Feldbusleitung, mehrerer Meßinstrumente und "normaler" Analog-Digitalwandler-Karten an einen Prozessor. Durch das Multitasking-Konzept von **VxWorks** laufen alle Applikationen parallel, ohne sich gegenseitig zu beeinflussen. Jede Applikation kann darüber hinaus durch Ausnutzung der Echtzeitfunktionen eine von anderen Applikationen unabhängige Synchronisierung auf verschiedene externe Trigger des **ELSA**-Timingsystems herstellen.

Da trotz der universellen Struktur der Prozeßsystem-Software jede **VME**-CPU spezifische Steuer- bzw. Meßaufgaben durchzuführen hat, ist die Konfiguration des Gesamtsystems, also die Zuordnung einzelner Softwareteile und Applikationen zu einer bestimmten CPU, notwendig. Zu diesem Zweck wurde ein Programmgenerator entworfen, welcher ein Start-Skript¹² für eine **VME**-CPU erzeugt. Dieses Start-Skript wird an einem speziellen, der CPU zugewiesenen Platz im Dateisystem abgelegt. Beim Starten der CPU lädt diese das Skript über das **NFS**-System und ist danach sowohl mit der notwendigen Software, allen Servicefunktionen als auch den auszuführenden Aufgaben (in Form von Befehlen) ausgestattet. Auf dieser Basis werden die Kommunikationsschicht etabliert, die Prozeßdatenbank geladen und alle Applikationen, z.B. die Feldbussteuerung, oder das exemplarisch in [68] beschriebene System zur Kontrolle der Quelle polarisierter Elektronen, gestartet.

2.5 Kommunikationsschicht

Die Kommunikationsschicht versieht das Kontrollsystem mit der eigentlichen Fähigkeit des rechnerübergreifenden Datenaustauschs. "Einzige" Aufgabe dieser Schicht ist die Bereitstellung von Mechanismen zum sicheren und möglichst schnellen Transport unterschiedlich großer Datenmengen — im Bereich von wenigen Bytes bis zu Megabytes — zwischen Kernprozessen und Applikationen auf einem oder verschiedenen teilnehmenden Rechnern (Kontrollrechner und **VME**-Prozessoren). Dabei soll die Struktur des Netzwerksystems bzw. die Zuordnung einzelner Rechner nicht mehr explizit sichtbar sein. Die Kommunikationsschicht hat also die Aufgabe, eine transparente, lokale als auch rechnerübergreifende Interprozeßkommunikation (engl.: "IPC" für "Inter Process Communication") mit der höchst möglichen Bandbreite zu etablieren.

Rechnerlokale Kommunikation

Die Verarbeitungsleistung des lokalen Kommunikationssystems muß alle im Kontrollsystem erwarteten Datenraten abdecken können, da das System sonst einen bremsenden Effekt auf das Gesamtsystem hat. Dieser bremsende Effekt resultiert daraus, daß zur Vermeidung von Datenverlust, z.B. der Verlust der Störmeldung eines angeschlossenen Endgerätes, die Rate eines Senders und ihm zugeordnetem Empfänger immer angeglichen werden muß und das System daher immer nur so schnell wie die langsamste Teilkomponente arbeitet. Der Effekt pflanzt sich zwangsläufig auf die rechnerübergreifende Kommunikation fort.

Für die rechnerlokale Kommunikation zwischen zwei Prozessen stellt das **UNIX**-Betriebssystem eine Reihe von Standardverfahren zur Verfügung.¹³ Dabei ist ein Verfahren bei Forderung nach einer möglichst hohen

¹²Ein Skript ist üblicherweise eine in einer reinen Textdatei gespeicherte Anweisungsfolge für ein Programm oder Betriebssystem, in diesem Fall für ein **VxWorks**-Programm (die sog "shell"). Dieses Programm wickelt in der Startphase eines Prozessors alle Befehle ab.

¹³Zu den Standardverfahren zählen die Mechanismen des "shared memory" sowie der Signale, Semaphore, Warteschlangen und

Bandbreite des Kontrollsystems allen Alternativen deutlich überlegen: Das Konzept des geteilten Speichers ("shared memory"). Durch Einbettung eines Kernspeicherbereichs in die virtuellen Adressräume aller beteiligten Prozesse kann der Datenaustausch instantan durch Schreiben und Lesen auf/von entsprechende(n) Adressen erfolgen. Die Vermeidung von Zugriffskonflikten kann über Semaphore gelöst werden. Das ELSA-Kontrollsystem beschreitet diesen Weg für die lokale Kommunikation.

Da gemäß den getroffenen Entwurfsentscheidungen der Kern des ELSA-Kontrollsystems nur dann aktiv werden soll, wenn sich im System eine Zustandsgröße ändert (z.B. ein Parameterwert des Beschleunigers), muß diese Änderung durch ein "Ereignis" bekanntgegeben werden. Das Auftauchen eines solchen Ereignisses zieht dann in der Regel einen Datenaustausch nach sich, um z.B. neue Werte zu berechnen, zu protokollieren oder zu überprüfen. Zur Bekanntgabe eines Ereignisses an einen Prozeß wird der Signalmechanismus des UNIX-Betriebssystems verwendet. Ein "Signal" entspricht einer Software-Unterbrechung, die einen laufenden Prozeß in seiner aktuellen Arbeit stoppt, in eine Funktion zur Unterbrechungsbehandlung leitet und nach Abschluß derselben die gestoppte Arbeit wieder aufnimmt. In der Unterbrechungsfunktion kann dann beispielsweise ein Austausch von Daten über das Konzept des "shared memory" erfolgen.

Treten sehr viele Ereignisse in einem sehr kurzen Zeitintervall auf, so kann es vorkommen, daß die Verarbeitungsgeschwindigkeit des Empfängerprozesses nicht ausreicht, um alle Ereignisse mit der Rate ihres Erscheinens abzuarbeiten. Zu diesem Zweck verfügt das Kontrollsystem über einen Mechanismus, der auflaufende Ereignisse zwischenspuffert und eine zeitliche Synchronisierung zwischen Sender und Empfänger herstellt. Damit kann die Rate der Ereignisverarbeitung an die Verarbeitungsleistung des Empfängers angeglichen werden. Der benötigte Zwischenpuffer wird ebenfalls im "shared memory" bereitgestellt und kann dynamisch seine Größe ändern, damit der Sender wartende Ereignisse ablegen und der Empfänger bei Bedarf neue Ereignisse daraus abholen kann — durch die dynamische Änderung der Größe kann sich das System selbstständig an Unterschiede in der Verarbeitungsleistung anpassen. Diese Methode der lokalen Ereignisverarbeitung wird durch Abbildung 2.6 verdeutlicht.

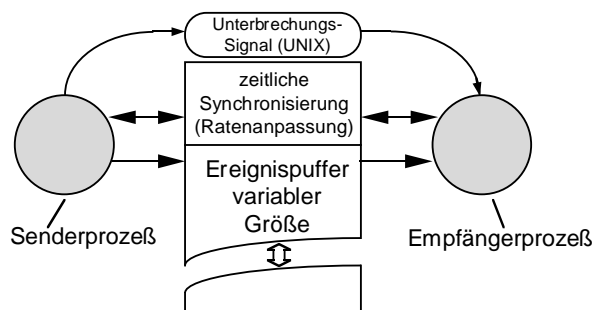


Abbildung 2.6: Lokale Ereignisverarbeitung im Kern

Rechnerübergreifende Kommunikation

Bevor die Methode des rechnerübergreifenden Datentransports im ELSA-Kontrollsystem besprochen wird, soll zunächst die Topologie des Systems beschrieben werden. Die Hardware gibt durch die Verwendung des Ethernet-Netzwerkmediums ein lose gekoppeltes System vor, da die Netzwerkbandbreite wesentlich unter der Verarbeitungsbandbreite der beteiligten Rechner liegt. Ein stark gekoppeltes Hardwaresystem verwendet in der Regel einen gemeinsamen Speicher für alle beteiligten Rechner, bzw. ein Kommunikationsmedium mit einer Bandbreite, die nur unwesentlich unter der verfügbaren Rechnerbandbreite liegt. Für den Aufbau von Kommunikationskanälen in der Software kann der Begriff der Kopplung ebenfalls verwendet werden. Unterschieden wird dabei prinzipiell eine

- *enge Kopplung*: Hierbei besteht zwischen allen Prozessen zu jeder Zeit ein festes Verbindungsschema entsprechend einer gewählten Topologie (z.B. "jeder-mit-jedem-", "alle-über-einen", Ringstruktur, etc.).

sog. Pipelines. Eine genaue Beschreibung dieser Konstrukte soll hier unterbleiben; sie kann in entsprechender UNIX-Literatur (z.B. [83]) gefunden werden.

- *lose Kopplung*: Verbindungen zwischen einzelnen Prozessen werden jeweils nur kurzfristig aufgebaut; es existiert kein festes Schema.

Das Konzept einer engen Kopplung wurde für das ELSA-Kontrollsystem verworfen, da die Anforderungen der Skalierbarkeit und Flexibilität nicht ausreichend erfüllt werden können. Nimmt man zum Erreichen einer maximalen Bandbreite bei N Kommunikationspartnern eine "jeder-mit-jedem"-Kopplung an, so muß man $N(N - 1)$ unidirektionale Kommunikationskanäle aufbauen. Es ergibt sich daher bereits bei der Erweiterung um wenige Rechner ein überproportionaler Aufwand, der die verfügbaren Ressourcen immer weiter einschränkt.

Für jede Setz- oder Leseoperation im Kontrollsystem ist das Verschicken von Datenpaketen notwendig, entweder zwischen Kontrollrechnern oder vom Kontroll- zu einem VME-Rechner bzw. umgekehrt, aber auch zwischen einzelnen VME-Rechnern. Jedes Datenpaket hat dabei eine definierte Länge, die im wesentlichen durch das Volumen der zu transportierenden Parameterinformationen und die Länge eines "Paketkopfes" definiert wird, sowie einen zugeordneten Empfänger, dessen Adresse im Kopf des Datenpakets eingetragen ist. Da das zugrundeliegende Ethernet-Netzwerk eine maximale Rahmenlänge von 1500 Bytes¹⁴ vorgibt (siehe z.B. [84]), die auf dem Netzwerk zusammenhängend übermittelt werden kann, müssen alle Datenpakete, die länger als diese Maximallänge sind, in Einzelstücke aufgeteilt, stückweise verschickt und beim Empfänger wieder in der korrekten Reihenfolge zusammengesetzt werden. Da ein Datenpaket für einen skalaren ELSA-Parameter in der Regel nur etwa 30 Bytes umfaßt, kann dieser bei der durch Ethernet gegebenen maximalen Rahmenlänge immer in einem einzelnen Paket verschickt werden.

Für den Transport der Datenpakete gibt es zwei Möglichkeiten für die Implementierung:

1. Ein *verbindungsloser Service* entscheidet für jedes Datenpaket die zu wählende Route über das Netzwerk zum Empfänger, und verschickt das Paket entsprechend der gewählten Route. Beim nächsten Datenpaket wird neu entschieden. Dadurch sind alle Pakete unabhängig voneinander. Der bei diesem Protokoll notwendige Aufwand besteht nur in der Berechnung der Route für den Transport.
2. Ein *verbindungsorientierter Service* ermittelt einmal die zu wählende Route für eine Kette von Datenpaketen, baut eine feste Verbindung auf und transferiert dann alle Datenpakete über diese Verbindung. Danach wird die Verbindung wieder abgebaut. Der Aufbau bzw. Abbau der Verbindung erfordert im Vergleich mit der verbindungslosen Variante einen erheblichen Mehraufwand, der sich aber lohnen kann, wenn sehr viele Datenpakete über einen einzigen Kommunikationskanal gehen müssen.

Diese Aufteilung wird vom "OSI-Modell" vorgeschlagen und auch für die Diskussion der Kommunikation im Kontrollsystem verwendet. Das Modell beruht auf dem von der internationalen Standardisierungsorganisation ISO entwickelten Referenzmodell für alle Ebenen der Rechnerkommunikation. "OSI" ist eine Abkürzung für "Open Systems Interconnection reference model".

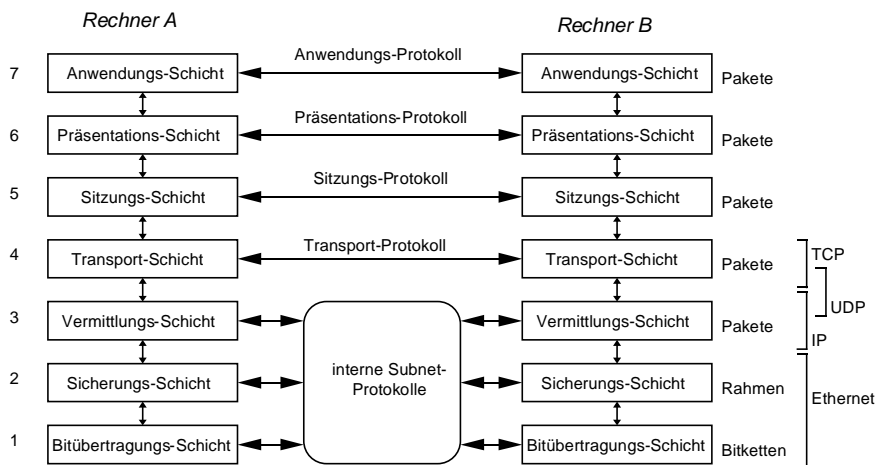


Abbildung 2.7: Das OSI-Referenzmodell für die Rechnerkommunikation

¹⁴Dieser Wert wird durch den MTU-Wert ("Maximum Transmission Unit") der Ethernet-Spezifikation vorgegeben. Die Rahmenlänge gibt die Zahl an 8-Bit-Gruppen an, die auf dem physikalischen Übertragungsmedium (z.B. Koaxialkabel) en bloc in einer Operation seriell versendet bzw. empfangen werden kann.

Das **OSI**-Modell unterteilt den Vorgang der Rechnerkommunikation in sieben Schichten, wobei jede Schicht einen spezifischen Aspekt der Kommunikation behandelt. Das Modell ist in Abbildung 2.7 skizziert. Eine genaue Beschreibung der einzelnen Schichten ist z.B. in [84] zu finden.

Zwischen den Schichten werden Schnittstellen eingeführt, die für den Anwender eine Anzahl von Funktionen zur Kommunikation anbietet. Für den Aufbau der Kommunikation im **ELSA**-Kontrollsystem ist es wesentlich, daß für die Implementierung die obersten Schichten weggelassen werden können, wenn damit eine höhere Durchsatzrate erzielt werden kann.

Die Entscheidung für ein Netzwerk auf Ethernet-Basis legt für das **ELSA**-Kontrollsystem den Umfang und die spezifischen Merkmale der Bitübertragungs- und Sicherungsschicht von vorneherein fest. Die nächsthöhere Vermittlungsschicht implementiert die Methode der Addressierung im Netzwerk, d.h. die Lösung des Problems, über welchen Weg ein Datenpaket vom Absender zu einem bestimmten Empfänger gelangt ("Routing"). Ein standardisiertes Protokoll zur Lösung dieses Routing-Problems heißt **IP** ("Internet Protocol"); dieses Protokoll arbeitet als verbindungsloser Service (s.o.). Jedes **IP**-Paket ist von allen anderen Paketen unabhängig.¹⁵ Die Vermittlungsschicht kann aber nicht Fehler des darunterliegenden Netzwerkmediums ausschalten — Pakete können z.B. verlorengehen oder in der falschen Reihenfolge ausgeliefert werden. Zur Abhilfe etabliert die Transportschicht ein Transportprotokoll. Es stellt sicher, daß ein Datenpaket mit einer definierten Länge gegebenenfalls in Einzelteile aufgespalten, stückweise versendet und beim Empfänger wieder in der richtigen Reihenfolge zusammengesetzt wird; bei Datenverlust wird ein Paket erneut gesendet, usw.

Die bei heutigen **UNIX**-Rechnern in der Regel verwendeten und als quasi-Standard etablierten Transportprotokolle heißen **TCP** ("Transmission Control Protocol") und **UDP** ("Universal Datagram Protocol"); sie bauen beide auf dem Netzwerkprotokoll **IP** auf. Für **TCP** wird deshalb der Name **TCP/IP** gebildet. Bei **TCP/IP** wird immer eine feste Punkt-zu-Punkt-Verbindung etabliert, bei **UDP** werden Pakete unabhängig voneinander in Form einzelner "Datagramme" versendet. **UDP** geht nur unwesentlich über **IP** hinaus und kann den sicheren Datentransport aller Einzelpakete nicht, wie **TCP/IP**, garantieren; weder die Reihenfolge der abgesendeten Pakete bleibt garantiert, noch der korrekte Transport. Möchte man also einen verbindungslosen sicheren Transportservice auf der Basis von **UDP** etablieren, so erfordert dies die Bereitstellung wesentlicher Eigenschaften der Transportschicht. Eine umfassende Beschreibung der Internet-Protokollfamilie ist z.B. in [15] zu finden.

Es ist offensichtlich, daß ein verbindungsloser Service (**UDP**) für den Transport skalarer Parameter im **ELSA**-Kontrollsystem besonders gut geeignet ist, weil die Daten für den Transport nur ein einzelnes Netzwerk-Paket erfordern und daher kein zusätzlicher Verwaltungsaufwand in den Aufbau einer festen Verbindung investiert werden muß. Würde vielmehr für den Transport des einzelnen Parameterpakets ein verbindungsorientierter Service verwendet (**TCP/IP**), so wäre das Verhältnis aus Verwaltungszeit und Nutzdatentransport sehr ungünstig und würde eine "Bremsen" im Kommunikationssystem erzeugen. Für den Transport großer Datenmengen ist jedoch das verbindungsorientierte Protokoll **TCP/IP** besser geeignet. In diesem Fall ist nämlich die Zeit für Verbindungsauf- und -abbau im Vergleich zur Transportzeit der Nutzdaten vernachlässigbar klein. Da die Berechnung der Route nur einmal erfolgt, kann eine sehr hohe Transportgeschwindigkeit zum Empfänger erzielt werden.

Überschreitet der Umfang der zu transportierenden Daten eine gewisse Größe, kann man ein über **TCP/IP** hinausgehendes Verfahren verwenden, welches zwar wiederum erhöhten Verwaltungsaufwand mit sich bringt, gleichzeitig aber wesentliche Vorteile für den bequemen und sicheren Transport großer Datenvolumina hat. Dieses verbindungsorientierte Verfahren heißt **RPC** ("Remote Procedure Call",) und ermöglicht "entfernte Unterprogrammaufrufe". Für die Programmierung der Kommunikation bedeutet dieses, daß man zur Ausführung einer Operation einen rechnerlokalen Aufruf verwendet, der vom **RPC**-System auf einen anderen Rechner vermittelt wird. Die Ausführung der eigentlichen Arbeit findet auf diesem anderen Rechner statt. Mittels der Aufrufparameter können Daten zwischen Aufrufer und Aufgerufenem ausgetauscht werden. Die Instanz, die den Aufruf auslöst, wird "Client" genannt, der Prozeß, der den Aufruf lokal auf einem anderen Rechner ausführt und die Ergebnisse zurücksendet, heißt "Server". Systeme, die ihre wesentlichen Operationen, wie z.B. Datenbankabfragen, auf diesem Konzept basieren lassen, werden häufig auch als "Client-Server-Systeme" bezeichnet.

¹⁵Beispiel für ein verbindungsorientiertes Protokoll der Vermittlungsschicht ist das **X.25**-Protokoll, das im wesentlichen in öffentlichen Weitverkehrsnetzen eingesetzt wird.

RPC beinhaltet Verfahren der Präsentationsschicht zur Strukturierung und Konversion verschiedener Datenformate. Im ELSA-Kontrollsystem ergibt sich gerade bei der Kommunikation mit Subsystemen der Strahlendiagnose das Problem, rechnerübergreifend Daten auszutauschen, deren binäre Darstellung auf den beteiligten Einheiten verschieden sein kann.¹⁶ RPC übernimmt automatisch die erforderlichen Konversionen mittels des "XDR"-Systems ("eXternal Data Representation"). Eine genaue Beschreibung des RPC-Mechanismus ist z.B. in [60] zu finden. Eine Anleitung zur Programmierung enthält z.B. [7].

Die Wahl eines für das Kontrollsystem adäquaten Verfahrens erfordert die Abschätzung der Menge und der Art der zu transportierenden Daten, um einen passenden Mechanismus zu implementieren. Relevant hierfür ist die erwartete Häufigkeitsverteilung der Datenpaketgrößen im Kontrollsystem: Da im ELSA-Kontrollsystem ca. 80% aller Parameter skalarwertig und nur relativ wenige Parameter vektorwertig bzw. matrixwertig sind, ergibt sich nach einer Vorab-Schätzung der Parametermenge im neuen System eine entsprechende Verteilung der Paketgrößen, wie Abbildung 2.8 zeigt:

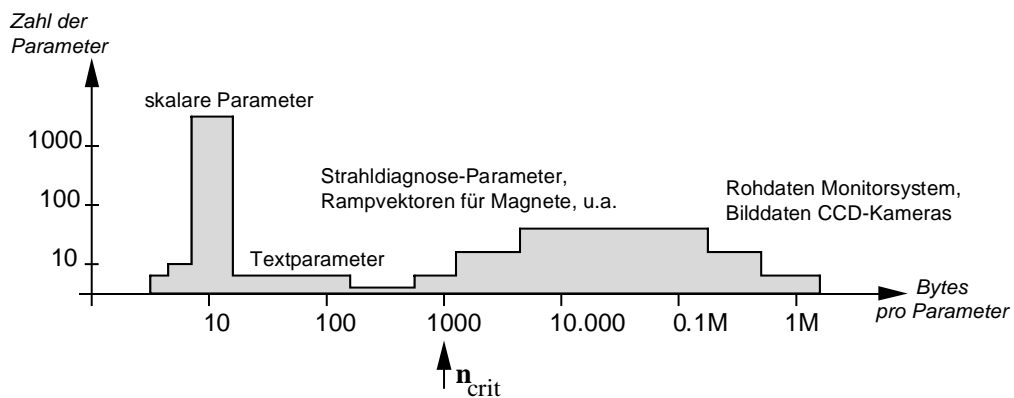


Abbildung 2.8: Erwartete Verteilung der Paketgrößen im Kontrollsystem

Diese Strukturierung der Verteilung motiviert den Einsatz von zwei verschiedenen Verfahren der Kommunikation im ELSA-Kontrollsystem.

1. Für alle Paketgrößen $n \leq n_{crit}$ wird das UDP-Protokoll eingesetzt. Zum Transport der Daten ist nur ein einzelnes Datenpaket erforderlich. Da die Sicherung des Transportes bei UDP aber nicht vorhanden ist, muß das ELSA-Kontrollsystem Verfahren der Transportschicht, d.h. die Implementierung eines eigenen Transportprotokolls, vorsehen.
2. Für alle Paketgrößen $n > n_{crit}$ wird der RPC-Mechanismus eingesetzt, konkret die heute als "de facto"-Standard etablierte Variante **ONC-RPC**.¹⁷ Für das Kontrollsystem besteht die Aufgabe in der Einbettung des RPC-Systems in die Aufrufe der Kommunikationsschicht, ohne daß der Anwendungsprogrammierer dies explizit sieht.

Die Effizienz dieses zweiteiligen Verfahrens ist entscheidend abhängig von n_{crit} . Dieser Wert muß so gewählt werden, daß der zusätzliche Aufwand durch RPC bei großen Datenmengen kaum ins Gewicht fällt und für kleine Datenmengen garantiert nur ein Paket übertragen wird, auch wenn mehrere vermittelnde Rechner beteiligt sind. Dies wird deshalb besonders betont, da beim Durchlaufen mehrerer Vermittlungsrechner ein ursprünglich zusammenhängendes Datenpaket unter gewissen Umständen in mehrere Teilpakete aufgespalten werden kann. Die Wahl von n_{crit} muß sich auch danach ausrichten, ob die zusätzliche Sicherung des UDP-Protokolls durch das Kontrollsystem mit vernünftigen Aufwand implementiert werden kann.

¹⁶Die byteweise Darstellung von Integer-Zahlen oder Gleitkomma-Zahlen ist ein solches Problem, aber auch die interne Speicherung von Verbunddaten in "Structures".

¹⁷Die **ONC**-Version von RPC (**ONC**: "Open Network Consortium") wurde unter der Führung der Firma **SUN** entwickelt. Das System ist sowohl für die Workstations des Kontrollebene als auch unter **VxWorks** verfügbar. Die Alternative zum RPC-Mechanismus hätte in der Entwicklung eines eigenen Protokolls auf der Basis von TCP bestanden; im Vergleich mit der Verwendung von **ONC-RPC** wäre aber ein erheblicher Implementierungsaufwand (inklusive des Pendant zum **ONC-RPC**-Codegenerator `rpcgen`) erforderlich gewesen, ohne daß eine wesentliche erhöhte Durchsatzleistung hätte erzielt werden können. Dies wurde durch eine Analyse des Quellcodes für die Version **ONC-RPC V4.0** festgestellt.

Eine genauere Betrachtung der Kontrollsystem-Parameter, der erwarteten Datenvolumina sowie des Routing-Verfahrens zwischen einzelnen Rechnern motivierte die Entscheidung für eine Größe von $n_{crit} = 1.2$ kByte. Fällt das zu transportierende Volumen unter diese Grenze, so wird das UDP-Verfahren eingesetzt, unterstützt durch zusätzliche Methoden der Transportsicherung:

- Der Empfang jedes Datenpaketes muß vom Adressaten explizit durch Rücksendung eines "Acknowledge"-Paketes quittiert werden, um anzuzeigen, daß ein erfolgreicher Transport stattfand. Bleibt dieses Quittungspaket aus, so wird nach Ablauf einer heuristisch anzupassenden Wartezeit das Paket erneut versendet. Dieser Vorgang wiederholt sich mehrfach – entweder führt dies zum Erfolg, oder die Operation wird als fehlerhaft gemeldet. Das Verfahren wird als "positives Retry-Acknowledge"-Verfahren bezeichnet.
- Jedes Datenpaket erhält eine Sequenznummer, die im Quittungspaket wiederum zurückgesendet werden muß. Die Sequenznummern können die richtige Reihenfolge der Datenpakete beim Empfänger sicherstellen, und gleichzeitig die sichere Zuordnung zu einlaufenden Quittungspaketen erlauben. Bei Fehlzusammenordnungen kommt das Retry-Acknowledge-Verfahren zum Tragen.

Kompliziertere Verfahren der Transportsicherung, wie z.B. die in TCP eingesetzte Schiebefenster-Technik [84], werden für UDP nicht eingesetzt, da Aufwand und Nutzen beim ELSA-Kontrollsystem in keinem vernünftigen Verhältnis stehen würden.

Die Kommunikationsschicht hat die Aufgabe, für jede einzelne Datenübertragung zwischen den beiden ausgewählten Verfahren zu entscheiden, die entsprechenden Aktionen durchzuführen und dem Benutzer die Ergebnisse über eine einheitliche, die interne Trennung verdeckende Schnittstelle zu präsentieren. Die Entscheidung für ein bestimmtes Verfahren wird jedesmal durch die Analyse der Art und der Menge der zu transportierenden Daten herbeigeführt und kann selbst bei einem einzelnen Parameter von Fall zu Fall variieren.

Kontrollsystemweite Kommunikation

Die wesentliche Funktionalität der Kommunikationsschicht wird durch zwei Arten von Kernprozessen realisiert. Diese beiden Prozeßtypen werden als "Kollektor" und "Distributor" etikettiert und haben die Aufgabe, eine rechnerlokale Interprozeßkommunikation über das Netzwerk derart zu vermitteln, daß eine rechnerübergreifende Operation so stattfinden kann, als würde sie auf einem einzelnen Rechner ausgeführt. Dabei kommen die in den vorangegangenen Abschnitten beschriebenen Verfahren zum Einsatz. Dieses grundlegende Muster illustriert Abbildung 2.9.

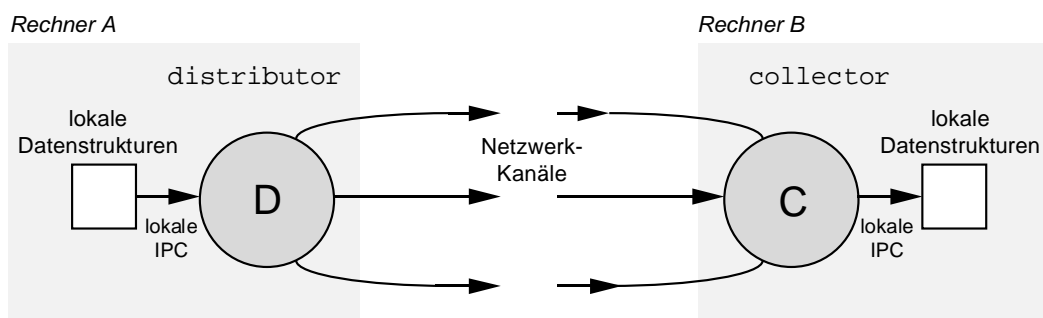


Abbildung 2.9: Die zwei Grundtypen der Kommunikationsprozesse

Bei einem Datentransfer bildet der Distributor die durch lokale Interprozeßkommunikation (siehe Abschnitt 2.5) erhaltenen Daten gemäß der definierten Adresse auf einen Kommunikationskanal des Netzwerkes ab und realisiert zusammen mit dem daran angeschlossenen Kollektor den sicheren Datentransport. Dieser übermittelt die empfangenen Daten via lokaler Kommunikation an eine Applikation oder wiederum an einen Distributor zwecks Weiterversendung. Durch diesen Mechanismus kann die Kommunikationsschicht alle Transportaufgaben im Kontrollsystem wahrnehmen. Die dadurch erzielte Kopplung skizziert Abbildung 2.10.

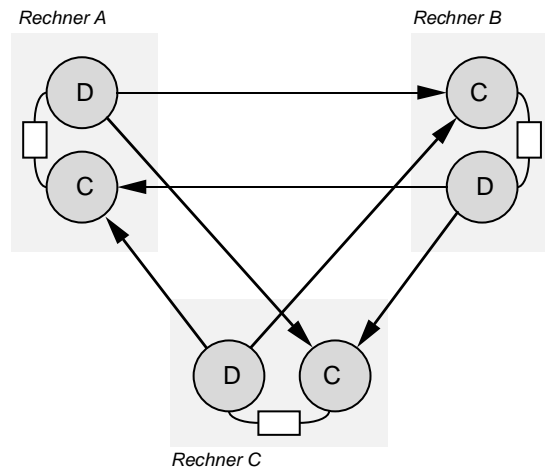


Abbildung 2.10: Prinzipielle Verkopplung der Kommunikationsprozesse

Diese Art der Verkopplung der einzelnen rechnerlokalen Kerne ist für eine Applikation im Kontrollsystem nicht explizit sichtbar. Von jedem Rechner ausgehend kann auf jeden Parameter auf einem beliebigen anderen Rechner lesend und schreibend zugegriffen werden. Zusätzlich tauscht das Kontrollsystem über die entstandene Kommunikationsstruktur alle benötigten Verwaltungsinformationen aus.

2.6 Verteiltes Datenbanksystem

Das Datenbanksystem dient zur Speicherung und Strukturierung aller Kontrollsystem-Daten derart, daß ein Zugriff von jedem Rechner aus transparent erfolgen kann. Es besteht aus zwei wesentlichen Teilen:

- Den rechnerlokalen Strukturen, in denen die eigentlichen Daten für Beschleunigerparameter sowie Verwaltungsinformationen als sogenannte "Ressourcen" dieser Parameter gespeichert werden.
- Einer Menge von Algorithmen (d.h. Zugriffsfunktionen) für lokale und rechnerübergreifende Operationen auf diesen Daten. Diese Algorithmen nutzen Mechanismen der Kommunikationsschicht.

Da auf jedem einzelnen Rechner die Kernprozesse bzw. Applikationen parallel auf alle Daten Zugriff haben sollen, wurde das Konzept des geteilten Speichers für die Implementierung der rechnerlokalen Datenbankteile ausgewählt. Die Synchronisierung paralleler Zugriffe erfolgt über eine Menge von Semaphoren, die alle parallelen Anfragen beim unmittelbaren Zugriff auf die Daten serialisieren und damit Zugriffskonflikte auflösen. Durch die Verwendung mehrerer voneinander unabhängiger Speichersegmente mit jeweils einer zugeordneten Gruppe von Semaphoren kann eine gute Granularität erreicht werden. Dadurch muß ein gleichzeitiger Zugriff auf verschiedene Segmente nicht von Semaphoren geschützt werden, was eine Erhöhung der Durchsatzrate mit sich bringt.

Die Aufteilung jeder rechnerlokalen Datenbank in separate Segmente erlaubt die modulare Konfiguration des Datenbanksystems; in der Startphase wird durch eine Untersuchung aller vorliegenden Definitionen die Liste der benötigten Segmente erstellt und diese Segmente zusammen mit allen notwendigen Ressourcen (Semaphorgruppen u.a.) erzeugt. Dadurch kann eine bessere Ausnutzung der verfügbaren Betriebssystemressourcen erzielt werden.

Grundsätzlich unterscheidet das Datenbanksystem zwischen statischen und dynamischen Informationen. Zu den statischen Informationen gehören eine Struktur zur gegenseitigen Abbildung von Parameternamen und vergebenen Schlüsseln. Diese Einheit ermöglicht die Suche nach Namen oder Schlüsseln mit einer sehr hohen Durchsatzrate. Zusätzlich wird eine Struktur zur Auflösung der Zuordnungsketten des Adressierungsschemas für jeden Parameter verwaltet. Durch Angabe eines Schlüssels oder Namens kann mit hoher Geschwindigkeit eine Zuordnungskette ("Route-Block") angefragt werden. Die Informationen werden ergänzt durch eine Struktur zur Beschreibung der Verwaltungsdefinition eines Parameters (Wertebereiche, Auflösung, etc.).

Die Daten werden in eine Teildatenbank eingebracht, die im folgenden auch als "RESOURCE-Datenbank" bezeichnet wird. Sie wird in jeden lokalen Kern integriert. Die Replikation der statischen Datenstrukturen

ist zur Erzielung einer möglichst hohen Durchsatzrate gerechtfertigt. Für den Transport einzelner Parameterdaten und Verwaltungsinformationen im verteilten System ist beispielsweise die schnelle Abfrage des Route-Blocks maßgebend für die Geschwindigkeit einer Setz- oder Leseoperation. Durch Replikation wird zusätzliche Netzwerkaktivität vermieden, die sonst bei Einsatz eines zentralen Datenbankrechners unvermeidlich wäre. Die Daten der **RESOURCE**-Datenbank sind selbstkonsistent, benötigen also keinen übergeordneten, allgemeineren Kontext zur Interpretation.

Die Gesamtmenge aller dynamischen Daten wird im Kontrollsystem in disjunkte Mengen aufgespalten; die entstandenen Teilmengen werden einzelnen Rechnern zugeordnet, um eine parallele Bearbeitung und damit eine höhere Gesamtleistung des Systems zu erzielen. Dies hat zur Konsequenz, daß auf einem Rechner eine Zugriffsoperation zunächst einen Fehlerzustand hervorrufen kann, wenn die entsprechenden Daten nicht auf dem betreffenden Rechner verfügbar sind. Zur Auflösung dieses sehr häufig auftauchenden Problems wird eine als **REMOTE**-Datenbank bezeichnete Einheit eingesetzt, welche neben der eigentlichen Datenspeicherung und Interpretation die wesentliche Komponente des dynamischen Teils darstellt. Damit ergibt sich insgesamt eine Zweigliederung:

- Die erste Komponente besteht in der Datenbank zur Speicherung sich dauernd ändernder aktueller Parameterwerte und Zustandsgrößen. Dieses System organisiert die Verwaltung der eigentlichen Meß- und Steuerdaten sowie deren Strukturierung und Transformation im Falle eines Zugriffs. Durch die Trennung von eigentlicher Datenspeicherung und Interpretation nur beim eigentlichen Zugriff kann eine hohe Durchsatzrate erzielt werden. Die Interpretation der Daten erfolgt auf der Basis der für den Parameter festgelegten Strukturdefinition.
- Die **REMOTE**-Datenbank verwaltet und koordiniert den Datentransport und die Datenhaltung von Parametern, die dem jeweiligen lokalen Rechnerkern unbekannt sind. Dieses System hat eine "Cache"-Funktion, d.h. bei Zugriff auf einen Parameter wird zunächst im Cache überprüft, ob dort das gesuchte Datum vorhanden ist. Fällt diese Überprüfung positiv aus, wird es verwendet, ansonsten wird eine Anfrage auf einem anderen Rechner gestartet. Falls das gewünschte Datum im Cache gefunden wird, kann dieser ein "Veto" erzeugen, wenn die Daten "veraltet" sind und eine Konsistenz mit dem auf einem anderen Rechner gespeicherten Inhalt nicht mehr garantiert ist. Auch in diesem Fall muß eine Anfrage bei einem anderen Rechner gestartet werden. Das Resultat dieser Anfrage ersetzt dann den im Cache gespeicherten Eintrag. Auf den Cache kann von mehreren Kernprozessen und Applikationen aus parallel zugegriffen werden.

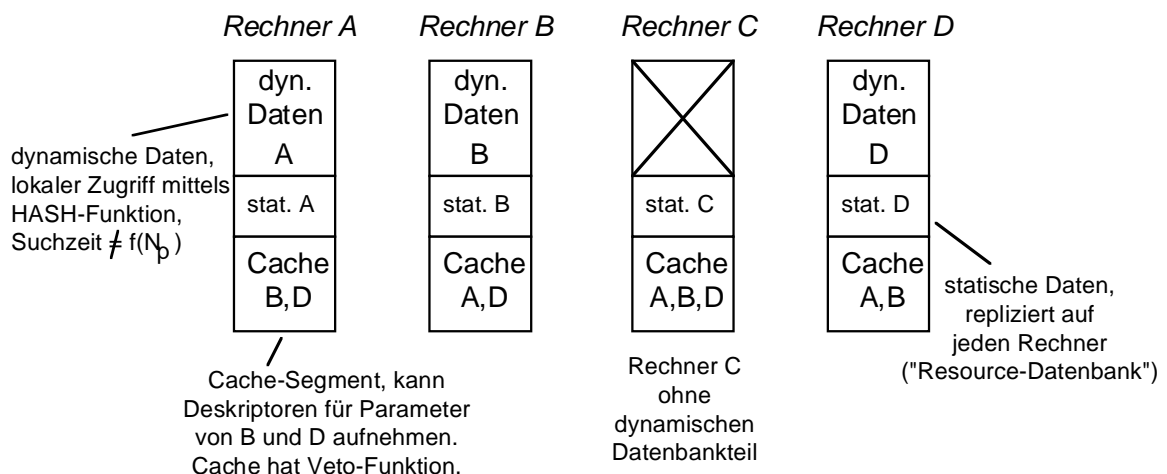


Abbildung 2.11: Prinzipielle Struktur des verteilten Datenbanksystems

Die beschriebene und in Abbildung 2.11 illustrierte Struktur des dynamischen Datenbankteils erfordert die Verwendung von Algorithmen, die der jeweiligen Problemstellung gut angepaßt sind. Im Falle der eigentlichen Datenspeicherung für lokale Daten kann die "a priori"-Zuordnung einer Teilparametermenge zu einem Rechner dazu verwendet werden, entsprechend schnell durchsuchbare Datenstrukturen aufzubauen, die sich im Laufe des Betriebs nicht mehr ändern. Diese Datenstrukturen sind unterteilt in einen festen Deskriptor

für die Verwaltung und einen Teil zur Aufnahme der Parameterdaten. Letzterer ist in der Größe variabel. Alle Deskriptoren sind über eine "Hash"-Funktion referenziert: Aus dem Parameterschlüssel können zwei Indizes generiert werden, die über zwei gekoppelte Tabellen auf den gesuchten Deskriptor zeigen. Dieses Verfahren ermöglicht sehr hohe Durchsatzraten; die Suchzeit ist unabhängig von der Zahl N_p der gespeicherten Parameter. Die Tabellen sind ebenfalls Bestandteil des Speichersegments und werden über einen Semaphor geschützt. Dadurch ist ein konfliktfreier, paralleler Zugriff mehrerer Applikation sichergestellt.

Der parallele Zugriff verschiedener Applikation ist bei der Programmierung des Cache-Systems ebenfalls durch die Verwendung eines "shared memory"-Segments und entsprechender Semaphore realisiert. Es besteht jedoch das prinzipielle Problem, daß während des Betriebs eine Umstrukturierung der Einträge des Caches sehr häufig erfolgt: Immer dann, wenn ein zuvor unbekannter Parameter bei einem anderen Rechner angefragt wird, muß ein neuer Eintrag im Cache erzeugt werden; falls kein Platz mehr vorhanden ist, muß ein anderer Eintrag ausgewählt werden, der dafür entfernt wird. Eine solche Änderung kann im Betrieb mit einer Rate auftreten, die näherungsweise der Rate des eigentlichen Datenaustauschs entspricht. Damit nun der Cache keine zu starke "Bremse" für den Durchsatz darstellt, wurde ein Algorithmus eingesetzt, der in vergleichbarer Zeit das Einfügen, Löschen und Referenzieren von Einträgen des Caches ermöglicht. Die zugehörige Datenstruktur wird als binärer Baum bezeichnet. Im vorliegenden Fall wird ein gewichtsbalancierter binärer Baum verwendet, der für alle Einträge eine annähernd optimale Suchzeit ergibt (für Implementierungsdetails siehe z.B. [16],[42],[33]). Es ergab sich jedoch das Problem, den Baum im "shared memory" so zu etablieren, daß er durch mehrere Applikationen parallel modifiziert werden kann. Dies erfordert die Verwendung einer relativen Addressierung im betroffenen Speichersegment. Da der Baum selbst wiederum kleinere Datenblöcke für die Verwaltung benötigt, wurde zunächst ein sogenannter Block-Manager mit relativer Addressierung entwickelt, der von mehreren Applikationen gleichzeitig benutzbar ist.¹⁸ Auf diesem Block-Manager aufbauend wurde dann der vollständig relozierbare, d.h. im Adressraum jedes Prozesses frei verschiebbare Baum konstruiert. Für jeden Eintrag des Baums wird eine Identifikation des erzeugenden Prozesses festgehalten, so daß eine gegenseitige Beeinflussung verschiedener Applikationen über den Baum verhindert wird. Der Block-Manager und die Algorithmen zur Konstruktion und Manipulation gewichtsbalancierter binärer Bäume in Segmenten des geteilten Speichers sind so allgemein ausgeführt, daß sie in vielen anderen Teilbereichen des Kontrollsystems ebenfalls eingesetzt werden. Auch die Software des Prozeßsystems verwendet entsprechende Konstruktionen.

Konfiguration der Datenbanken

Es bleibt das Problem der Definition der statischen Daten, die in der **RESOURCE**-Datenbank gespeichert werden sollen, sowie der Verteilung der Strukturen für die dynamischen Daten in disjunkte Mengen auf verschiedenen Rechnern. Dazu wurde eine Gruppe von Funktionen entworfen, die eine relativ einfache Strukturierung der Datenmenge erlaubt und eine einzige, für das gesamte System gültige Referenz erstellen kann. Die Gesamtheit der Definitionen wird nach erfolgter Analyse und Konsistenzprüfung in einer Datenbankdatei, bezeichnet als "**RESOURCE**"-Datei, abgelegt. Diese Datenbankdatei ist so strukturiert, daß darin beim Start des Kontrollsystems von jedem Rechner alle benötigten, jeweils lokal gültigen Strukturinformationen gefunden und für die automatische Konfiguration des lokalen Kontrollsystemkerns ausgewertet werden können. Nach erfolgter Auswertung werden Definitionen aus der Datenbankdatei gelesen und in die Datenstrukturen der betreffenden Speichersegmente eingebaut. Der lokale Kern ist danach arbeitsfähig und kann die Verbindung zu anderen Kernen aufnehmen.

Zur Definition aller erforderlichen Strukturen dient ein einfaches Eingabeschema. Die einzige Aufgabe besteht im Erstellen einer Textdatei (sog. "RDF"-Datei) mit entsprechenden blockorientierten Einträgen in einer an die Programmiersprache "C" angelehnten Syntax. Zum Generieren der **RESOURCE**-Datei wird ein Übersetzer (Compiler) verwendet, der eine oder mehrere RDF-Dateien liest, analysiert und daraus Modifikationen einer bereits vorliegenden Datei ableitet. Sind alle Definitionen konsistent, werden diese Modifikationen eingebaut und können beim nächsten Start des Kontrollsystems verwendet werden. Der Compiler selbst wurde mit den unter **UNIX** verfügbaren Programmgeneratoren "**lex**" und "**yacc**" entwickelt. **lex** ist ein Generator für einen lexikalischer Analysator zur Zerlegung eines Eingabetextes in einzelne Erkennungszeichen (Token), die anschließend an den Compiler-Generator **yacc** weitergeleitet werden. Dieser analysiert den eingehenden Strom der Token und bildet gemäß einer vorliegenden Syntaxdefinition ein Skelett für die

¹⁸Es handelt sich dabei um keine aktive Instanz, sondern um ein Modul, welches in den Kontext aller Prozesse eingebunden wird, die Zugriff auf die genannten Datenstrukturen benötigen.

Integration anwenderspezifischen Codes. Dieser anwenderspezifische Code verrichtet dann die eigentliche Arbeit für das Kontrollsystem. Zu seinen Aufgaben gehört im wesentlichen

- der Aufbau einer Symboltabelle für alle definierten Namen (Rechner, Prozessoren, usw.),
- das Einlesen und Strukturieren der eigentlichen Definitionen, sowie deren Konsistenzprüfung,
- die Schlüsselvergabe für definierte Parameter, und die Vergabe von Identifikatoren für Applikationen,
- die Ermittlung von Netzwerk-Adressen und Generierung der vom Kontrollsystem verwendeten Netzwerk-Karte,
- die Modifikation einer bereits bestehenden **RESOURCE**-Datenbankdatei.

Die Versorgung des Kontrollsystems mit den notwendigen Informationen ist in Abbildung 2.12 skizziert.

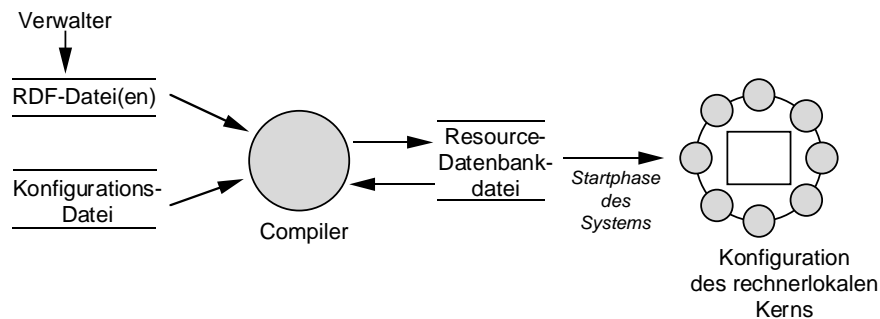


Abbildung 2.12: Erzeugung der Strukturinformation des Kontrollsystems

Die erzeugte **RESOURCE**-Datei stellt, ausgehend von allen **RDF**-Dateien, die einzige, konsistente und vollständige Referenz für die globalen Definitionen und die statische Struktur des verteilten Kontrollsystems dar. Falls eine Erweiterung des Systems um neue Rechner oder Prozessoren durchgeführt werden soll, muß man neben dem Anschluss und der Inbetriebnahme der betreffenden Hardware lediglich entsprechende Einträge in einer **RDF**-Datei vornehmen. Durch den Compiler wird alles übrige automatisch generiert. Dieses Konzept soll eine Wartbarkeit und Erweiterbarkeit des Kontrollsystems möglichst einfach machen.

2.7 Prozeßgerüst des lokalen Kontrollsystem-Kerns

Das Prozeßgerüst des lokalen Kontrollsystem-Kerns umfaßt alle Prozesse, die auf einem einzelnen Kontrollrechner ablaufen und Kernfunktionen wahrnehmen. In der Startphase des Systems werden alle lokalen Kerne abgeglichen, die lokalen Datenbankteile segmentweise geladen und die Kommunikationsschicht etabliert. Der dadurch aufgebaute virtuelle Kern bietet dann Ankopplungspunkte für Applikationen. Neben diesen Applikationen müssen sich auch alle Rechereinheiten des Prozeßsystems bei dem entstandenen virtuellen Kern anmelden und Informationen über ihre spezifischen Aufgaben abfragen, wie im Abschnitt über die Software des Prozeßsystems beschrieben.

Obwohl ein dauernder Datenaustausch zwischen Kernprozessen auf unterschiedlichen Rechnern stattfindet, kann zur Beschreibung des Prozeßgerüsts die Konfiguration eines einzelnen Rechners ausreichen, da alle Rechner eine identische Ausstattung mit Kernprozessen aufweisen. Im folgenden wird nun eine kurze Beschreibung der auf einem einzelnen Kontrollrechner aktiven Prozesse gegeben. Die erste Gruppe umfaßt alle Einheiten, die nur innerhalb der Kontrollebene arbeiten, bzw. deren Kommunikationspartner ebenfalls innerhalb dieses Bereiches liegen:

Der **cskernel**-Prozeß ist der erste Prozeß, der auf einem Kontrollrechner beim Starten des Systems aktiviert wird. Er liest aus der in der Definitionphase generierten **RESOURCE**-Datei die für den aktuellen Rechner geforderte Konfiguration der Datenbanken und verschiedener Verwaltungsmodule und erzeugt eine entsprechende Infrastruktur. Nach dieser Arbeit wird die Informationen aus der **RESOURCE**-Datei geladen, restrukturiert

und in den einzelnen Segmenten abgelegt. Durch Aufbau von Suchstrukturen wird der Zugriff auf die Daten ermöglicht. Nach Abschluß der Arbeiten wird die Freigabe der lokal erzeugten Infrastruktur für die externe Nutzung durch einen speziellen Mechanismus des **UNIX**-Betriebssystems ("Locks") allen anderen Kontrollrechnern angezeigt. Erst wenn alle beteiligten Rechner die Freigabe melden, kann das eigentliche Kontrollsystem starten.

Der **csbroker** stellt nach der Startphase des Systems die Konsistenz der replizierten **RESOURCE**-Datenbank her und tauscht dafür entsprechende Datenpakete mit anderen Kontrollrechnern aus. Dieser Prozeß läuft nur einmal in der Startphase des Systems, nachdem alle anderen Kernprozesse aktiviert sind. Bei einem bereits laufenden Kontrollsystem kann der Prozeß zum Austausch diverser Verwaltungsinformationen verwendet werden.

Der **csdistributor** empfängt Daten über die lokale Kommunikation und überträgt diese Daten über einen Kommunikationskanal des Netzwerkes. Eine spezielle Verwaltungseinheit paßt die Definition der einzelnen Kanäle, wie z.B. Zieladressen, während des Betriebs dauernd an. Dazu kann er über das Netzwerk mit Verwaltungsinformationen "gefüttert" werden. Der **cscollector** empfängt Daten über einen Kommunikationskanal des Netzwerkes und bildet die empfangenen Daten über das lokale Kommunikationssystem an einen Empfängerprozeß ab. Im wesentlichen versorgt er die lokalen Datenbanken, insbesondere den jeweiligen Parameter-Cache, mit Parameterinformationen, die über das Netzwerk ausgeliefert werden. Ein mit **cssyncserv** bezeichneter Prozeß stellt als **RPC**-Server alle Funktionen zum synchronen Austausch von Daten bereit, die von einem anderen Kommunikationsprozeß der Kontrollebene als Client gesendet oder angefordert werden, falls dieser den **RPC**-Mechanismus für den Datentransport verwendet.

Der **csnotify**-Prozeß empfängt seine Daten ereignisorientiert über das lokale Kommunikationssystem, bildet ein entsprechendes Paket und versendet dieses Paket über **UDP** auf einem Netzwerkkanal. Die Pakete können auf der Empfängerseite, z.B. bei einer Applikation, ein "Ereignis" auslösen. Durch dieses Ereignis wird der Empfängerprozeß über eine Parameteränderung im Kontrollsystem informiert. **csnotify** verwaltet während des Betriebs eine sich dynamisch ändernde Liste von Parametern sowie der dafür jeweils angemeldeten Empfängerprozesse und führt genau über die dorthin versendeten Ereignispakete Protokoll. Ein Empfängerprozeß kann mit **csnotify** über einen Netzwerkkanal kommunizieren und sich für einzelne Parameter oder Parametergruppen an- bzw. abmelden.

Ein als **cslogman** etikettierter Prozeß stellt einen systemweit nutzbaren Service zur Verarbeitung von Alarm- und Zustandsmeldungen zur Verfügung. Auflaufende Meldungen werden an beliebige Empfängerprozesse, z.B. zur Darstellung oder Auswertung, weitergeleitet. Ein Empfängerprozeß kann sich beim **cslogman** netzwerkweit anmelden und Meldungen anfordern.

Die Kommunikation mit nicht am **ELSA**-Kontrollsystem teilnehmenden Rechnern, wie etwa denen der Experimente-Datenerfassung, kann über den **csconnect**-Prozeß erfolgen. Dadurch können Experimente wichtige Informationen (z.B. die Extraktionsenergie) des Kontrollsystems abfragen oder andererseits Resultate der laufenden Datennahme, beispielsweise Zählraten, Tastverhältnis, Statusgrößen usw., an das Kontrollsystem melden, welches die empfangenen Daten dazu weiterverarbeiten kann.

Auf den Kontrollrechnern laufen aber auch Prozesse, die der Ankopplung und der Kommunikation mit dem Prozeßsystem dienen. Die Kommunikationspartner dieser Prozesse befinden sich in der Prozeßebene. Die Menge umfasst:

Der als **psbootserv** bezeichnete Prozeß beliefert als **RPC**-Server einen Prozessor des **VME**-Systems auf Anfrage mit allen Daten, die dieser zum Aufbau des lokalen Arbeitskontextes benötigt. Hierzu zählt die Ausstattung der Prozeßdatenbank mit Parametern, die Konfiguration der Kommunikation, Uhrzeit, uvm. Der Prozeß **pssyncserv** stellt als Server alle Zugriffsfunktionen für den **RPC**-Mechanismus zur Verfügung, wenn ausgehend von einem Client-Prozeß unter **VxWorks** Daten geschrieben oder gelesen werden sollen. Der **pslog**-Prozeß sammelt alle aus der Prozeßebene auflaufenden Meldungen und leitet sie an den bereits beschriebenen **cslogman** weiter.

Bedingt durch die Anbindung des Prozeßsystems müssen auch auf einem einzelnen **VME**-Rechner Kernprozesse unter dem Betriebssystem **VxWorks** aktiviert sein. Diese Prozesse nehmen Verbindung mit ihren Partnern (s.o.) der Kontrollebene auf: Der **pssync**-Prozeß stellt alle **RPC**-Funktionen zum Transport von Parameterdaten zur Verfügung. Er wird als Server-Prozeß für die Anfrage eines Kontrollrechner-Clients bereitgestellt. Der Kollektor **pscollect** empfängt neben **pssync** alle von der Kontrollebene kommenden Datenpakete und leitet die Daten an eine zugeordnete Service-Funktion weiter (siehe dazu den Abschnitt über die Software des Prozeßsystems). Die jeweils angesprungene Servicefunktion führt dann die eigentliche Setz- oder Leseoperation durch. Die Durchsatzleistungsmesser **psperf** und **fbperf** sind Prozesse, die periodisch das Durchsatzverhalten und die Zahl der über das Netzwerk oder eine Feldbusleitung versen-

deten und empfangenen Datenpakete ermitteln und die Ergebnisse als Kontrollsystem-Parameter an die Kontrollebene übermitteln. Dadurch kann die Netzwerk-Arbeit eines VME-Prozessors und die Aktivität der Feldbusleitungen beobachtet werden.

Die in den vorangegangenen Abschnitten beschriebenen Prozesse stellen das Grundgerüst des ELSA-Kontrollsystems dar. Keiner der Prozesse erfüllt eine beschleunigerspezifische Aufgabe, vielmehr besteht die Hauptarbeit in der Vermittlung von einzelnen Parameterdaten. Der Ablauf entsprechender Operationen und die dafür nötige, rechnerübergreifende Kooperation der Kernprozesse wird im nächsten Abschnitt beschrieben.

2.8 Parameter-Transaktionen im Kontrollsystem

Die gesicherte Übertragung eines Parameterwertes von einem Sender zu einem Empfänger im Kontrollsystem wird Transaktion genannt. Eine Transaktion kann auf einen Rechner beschränkt sein (bezeichnet als lokale Transaktion) oder mehrere Rechner und die Netzwerkverbindungen dazwischen einbeziehen (bezeichnet als rechnerübergreifende Transaktion). Beispiele für Transaktionen sind der Transport von Sollwertvorgaben von einem Kontrollrechner zu einem Feldbusprozessor, Meßwertübermittlung von einem VME-Prozessor zu einem Kontrollrechner, aber auch der Austausch von Datenbankinformationen zwischen zwei Kontrollrechnern sowie der Transport eines "Ereignisses" von einem Sender zu einem beliebigen Empfänger.

Im ELSA-Kontrollsystem gibt es nur zwei "aktive" Instanzen, die eine Transaktion ursächlich auslösen können. Die Kernprozesse des Systems vermitteln diese Transaktionen lediglich über die beteiligten Rechner hinweg und werden nur dann aktiv, wenn die Bearbeitung einer Transaktion dies kurzfristig erfordert. Die Rechenleistung des Gesamtsystems wird also nur punktuell beansprucht, während das System in Ruhephasen sehr wenig Ressourcen benötigt. Die zwei aktiven Instanzen sind auf der obersten Ebene ein Operateur, der – vermittelt über ein Applikationsprogramm – Parameterwerte lesen oder Sollwertvorgaben setzen möchte (z.B. zum Fädeln des Elektronenstrahls in einer Beamline), oder eine Applikation, die zur Bearbeitung von Routineaufgaben (Überwachung etc.) Werte liest und setzt, in der Regel nach expliziter Programmierung durch einen Anwender. Die andere Instanz besteht auf der untersten Ebene in einem Feldbusprozessor oder einem VME-Prozessor, der periodisch Meßdaten akquiriert und bei relevanten Änderungen an das Kontrollsystem übermittelt bzw. Zustandsgrößen oder Alarmmeldungen erzeugt und weitergibt.

Obwohl die oben aufgeführte Unterteilung zwei spezielle Aufgabenstellungen unterscheidet, sind alle Transaktionen im Kontrollsystem symmetrisch aufgebaut, d.h. alle Kommunikationspartner sind gleichberechtigt und können jeweils als Sender und Empfänger von Daten fungieren. Transaktionen können beispielsweise auch zur Übermittlung von Daten zwischen einzelnen Kontrollrechnern oder zwischen einzelnen VME-Prozessoren durchgeführt werden.

Nach dem Start des Kontrollsystems ist auf allen Rechnern das Gerüst der Kernprozesse etabliert und verkoppelt. Durch Kommunikation und Kooperation dieser Prozesse werden nun Parameterdaten, aber auch Verwaltungsinformationen, von einer Applikation zu einem Endgerät bzw. Meßwerte von einem Endgerät oder Subsystem in die Datenbanken oder zu einer Applikation übermittelt. Alle Transaktionen lassen sich grundsätzlich in drei Bereiche gliedern:

- a) "Elementare" Transaktionen, d.h. punktuelles Setzen oder Lesen von Parameterdaten durch eine Applikation, synchron zu ihrem Ausführungskontext.
- b) "Transiente" Transaktionen, d.h. Setzen oder Lesen von Parameterdaten ohne Speicherung in einer der Kontrollsystem- oder Prozeßsystem-Datenbanken. Alle Daten sind in diesem Fall nach Durchführung der Transaktion flüchtig. Auch dieser Transaktionstyp läuft synchron zum Ausführungskontext der Applikation ab.
- c) Ereignisorientierte Transaktionen, die immer dann angestoßen werden, wenn sich ein Parameterwert im Kontrollsystem ändert. Die Benachrichtigung kann sowohl synchron als auch asynchron zum Ausführungskontext erfolgen.

Je nach Bereich werden unterschiedliche Kernprozesse aktiv. Eine Applikation kann alle drei Transaktionstypen gemischt verwenden, muß aber beim Einsatz der ereignisorientierten Verfahren besondere Vorkehrungen treffen, um auf empfangene Ereignisse reagieren zu können. Diese Vorkehrungen werden im Applikations-Interface zur Verfügung gestellt und sind dem Anwendungsprogrammierer in der Regel verborgen. Die

drei Grundtypen werden im folgenden kurz beschrieben, ohne daß alle Sonderfälle, Einzelheiten oder die Fehlerbehandlung im Detail aufgeschlüsselt sind.

Elementare Transaktionen für rechnerlokale Parameter

Wird ein Parameter rechnerlokal aufgefunden, kann eine Transaktion immer auf den vorhandenen Eintrag im lokalen Teil der Datenbanken zurückgreifen. Eine elementare Transaktion besteht aus den folgenden Schritten (wie Abbildung 2.13 illustriert):

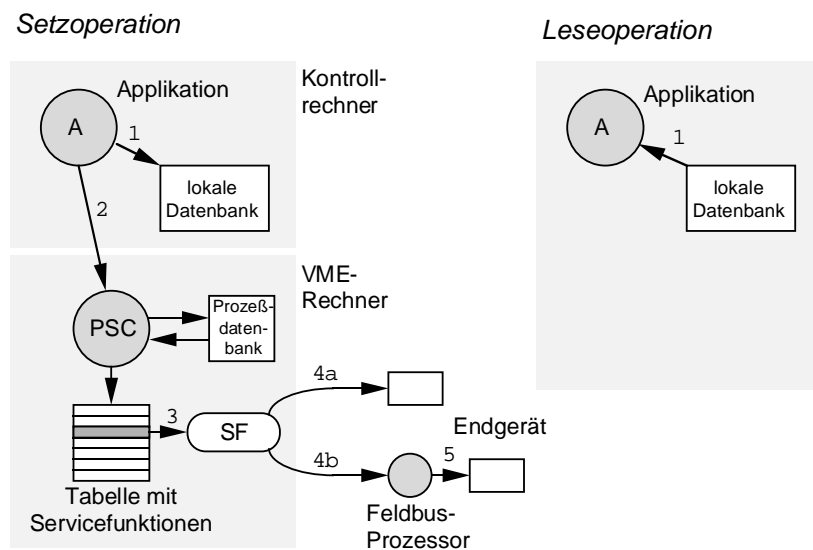


Abbildung 2.13: Elementare *rechnerlokale* Transaktion im Kontrollsystem

- Bei Setzoperationen durch eine Applikation (A) wird das Datum zunächst in der lokalen Datenbank abgelegt (1), danach wird die Zieladresse des verantwortlichen VME-Prozessors und des beteiligten `pscollect`-Prozesses (PSC) ermittelt und ein Datenpaket an diesen versendet (2). Der Empfänger `pscollect` dekodiert das Paket, trägt die Daten in die Prozeßdatenbank ein und ruft die dem Parameter zugewiesene Servicefunktion auf (3). Diese Funktion wiederum übermittelt die Daten via VME-Bus und zugeordneter Schnittstellen an das angeschlossene Endgerät oder Subsystem (4a), oder versendet wiederum ein neues Datenpaket über eine Feldbus-Leitung zu einem Feldbus-Prozessor (4b). Dieser Prozessor extrahiert die Daten aus dem Paket und appliziert sie über einen Digital-Analog-Wandler oder ein digitales Interface an das betreffende Endgerät (5).
- Bei Leseoperationen kann das Datum direkt der lokalen Datenbank entnommen werden. Da es sich um einen lokalen Zugriff handelt, können in diesem Fall sehr hohe Durchsatzraten erzielt werden.

Wird der Parameter auf einem anderen Kontrollrechner verwaltet, so muß eine Transaktion immer auf diesen Zielrechner vermittelt werden. Auf diesem Zielrechner kann dann wiederum eine lokale Transaktion als Teil der Operation ablaufen, wobei die Ergebnisse in geeigneter Form zurückgesendet werden (siehe Abbildung 2.14):

- Bei Setzoperationen wird ein Datenpaket an den Zielrechner (`cscollector`) versendet (1). Dieser führt dann eine lokale Transaktion durch (2–6, s.o.).
- Bei Leseoperationen wird zunächst der Datenbank-Cache untersucht (1). Ist das Datum hier gespeichert, und erzeugt der Cache kein Veto, so werden die vorgefundenen Werte übernommen. Wird kein Eintrag im Cache gefunden oder ist dieser veraltet (Veto-Bedingung), so wird ein Anforderungspaket an den betreffenden Zielrechner (`csdistributor` D) versendet (2). Dieser antwortet mit den Ergebnissdaten einer lokalen Transaktion (3), die dann verwendet werden können (4).

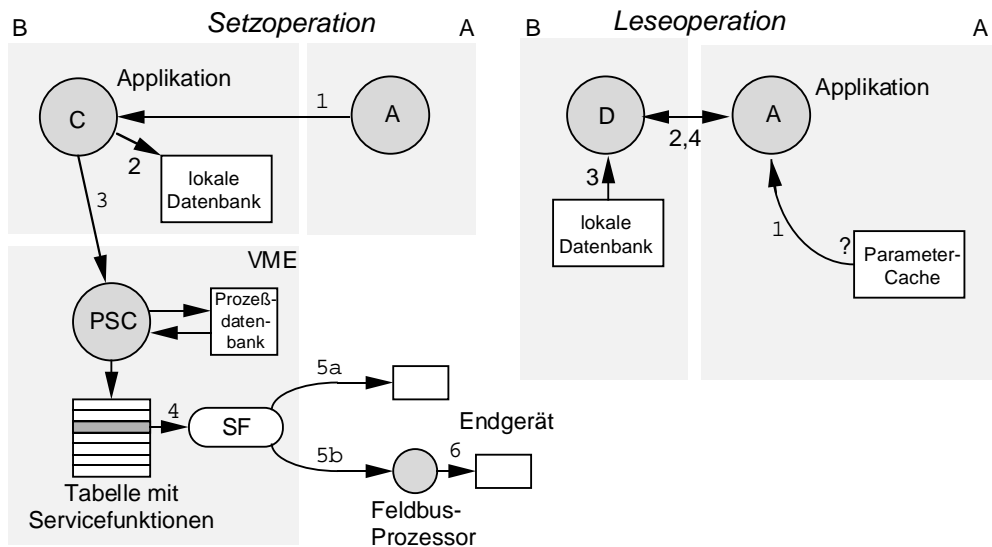


Abbildung 2.14: Elementare, *rechnerübergreifende* Transaktion im Kontrollsystem

Elementare Transaktionen werden ebenfalls durch die automatische Istwernerfassung und -verarbeitung im Kontrollsystem angestoßen. In diesem Fall ermittelt ein Feldbusprozessor oder ein VME-Prozessor über angeschlossene Analog-Digital-Wandler oder Interfaces einen Meßwert und versendet diesen Wert als Datenpaket zu dem Kontrollrechner, in dessen Datenbank der betreffende Parameter verwaltet wird. Dort wird das ankommende Paket dekodiert und der Dateninhalt in der Datenbank abgelegt. Dieses Verfahren gilt für alle Meßwerte im Kontrollsystem; die Rate, mit der Meßwerte gesendet werden, liegt je nach Endgerät oder Subsystem bei etwa 0.1 Hz bis 10 Hz. Durch den dauernden Datenstrom an auflaufenden Meßwerten repräsentiert das Datenbanksystem der Kontrollebene ein "Spiegelbild" des aktuellen Zustandes aller Endgeräte. Die Zuordnung der Ausleserate zu einzelnen Subsystemen oder Endgeräten richtet sich nach der physikalischen Bedeutung oder nach speziellen Eigenschaften des Endgerätes.

Transiente Transaktionen

Bei einer transienten Transaktion werden die lokalen Datenbanken oder Cache-Segmente nicht verwendet. Es wird vielmehr eine direkte Kopplung zwischen den zwei beteiligten Partnern aufgebaut; die Daten werden einmal übertragen und sind danach im Kontrollsystem nicht mehr gespeichert. Das Verfahren ist in Abbildung 2.15 skizziert und läuft wie folgt ab:

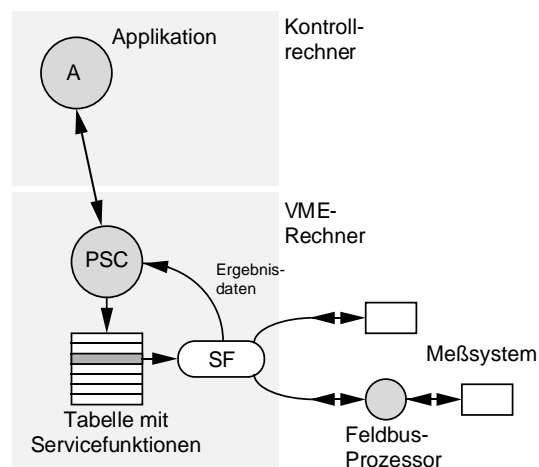


Abbildung 2.15: Transiente Transaktion im Kontrollsystem

- Bei einer Setzoperation wird das Datum von der Applikation direkt unter Umgehung aller Datenbanken an den entsprechenden Rechner übertragen, der seinerseits (im Falle eines **VME**-Prozessors) die Daten auf den Feldbus weitergibt oder direkt an das angeschlossene Subsystem überträgt.
- Bei einer Leseoperation wird ein Anforderungspaket versendet, die gewünschten Daten werden in einem Antwortpaket verpackt und zurückgesendet, ohne daß sie in einer Datenbank des Kontrollsystems zwischengespeichert werden.

In beiden Fällen liefern das Applikations-Interface und die Kommunikationsschicht des Kontrollsystem-Kerns die Infrastruktur zur Abwicklung des Datenaustauschs.

Transiente Transaktionen sind besonders für die Bearbeitung großer Rohdatenmengen implementiert worden. In diesem Fall sind die Daten meistens nur im Kontext der beteiligten Kommunikationspartner interpretierbar und benötigen keine Speicherung in einer Datenbank. Ein Beispiel ist die Anfrage der Ausgangsdaten eines schnellen Analog-Digital-Wandlers (sogenannte "Sampling-Einheit") zur Messung des Strahlagesignals in ELSA. Die Datenmenge umfaßt in der Regel 100 kByte und mehr und erfordert eine umfangreiche Nachbearbeitung (Filterung etc.), die nur im Kontext der Applikation durchgeführt werden kann. Eine dauernde Speicherung in der Kontrollsystem-Datenbank würde daher nur überflüssige Ressourcen binden; die Daten selbst sind, bedingt durch den Meßprozeß, transient.

Ereignisorientierte Transaktionen

Ereignisorientierte Transaktionen werden immer dann angestoßen, wenn sich eine Applikation für alle Zustandsänderungen eines Kontrollsystem-Parameters interessiert und diese unverzüglich mitgeteilt bekommen möchte. Zu diesem Zweck muß sie sich für eine Gruppe ausgewählter Parameter beim Kontrollsystem-Kern anmelden. Der Kern generiert dann ein "Ereignis", wenn sich ein Parameterwert geändert hat. Dieses Ereignis kann immer nur dort ausgelöst werden, wo die Daten des Parameters gespeichert sind: die Datenbank auf dem betreffenden Kontrollrechner führt bei jedem Eintrag eines Datums in die Datenbank entsprechende Vergleichsoperationen durch und meldet eine Änderung an den Prozeß, der das Datum geschrieben hat. Dieser Prozeß, bzw. der darunterliegende Kern, generiert das "Ereignis" und übergibt dieses an die Kommunikationsschicht, die es zu allen potentiellen Empfängern — auch auf anderen Rechnern — transportiert. Im Empfänger kann dieses Ereignis dann eine Aktion zur Behandlung des Parameters auslösen, wenn die Applikation dies wünscht. Ist die "Beobachtung" eines Parameterwertes nicht mehr erforderlich, kann sich die Applikation wieder abmelden.

Gemäß der obigen Beschreibung sind drei Varianten zu betrachten:

- Anmelden für eine Parameter-Gruppe
- Benachrichtigung bei Werte-Änderung eines Parameters der angemeldeten Gruppe
- Abmelden für eine Parameter-Gruppe

Das Anmelden einer Parameter-Gruppe geschieht durch die folgenden Aktionen:

1. Die Liste aller Parameter wird mit der Anmeldeanforderung an den lokalen **csnotify**-Prozeß gesendet. Der **csnotify**-Prozeß merkt sich die angemeldeten Parameter, die anfragende Applikation und den Kommunikationskanal, auf dem die Anfrage einlief.
2. Die Gruppe der Parameter wird im **csnotify** separiert in Teilgruppen, die entweder lokal sind oder die jeweils einem entfernten Kontrollrechner zugeordneten, disjunkten Parametermengen widerspiegeln.
3. Für alle nichtlokalen Parameter wird untersucht, ob bereits ein Deskriptor im lokalen Datenbank-Cache vorhanden ist. Falls ja, wird der Deskriptor mit einem Attribut versehen, welches die Beobachtung des aktuellen Parameters anzeigt. Falls kein Deskriptor gefunden wird, wird ein neuer Eintrag im Cache erzeugt. Alle lokalen Parameter werden an das lokale Synchronisationssystem der Kommunikationsschicht übergeben; diese beauftragt die lokale Datenbank, Parameteränderungen in Form eines "Ereignisses" an den **csnotify**-Prozeß zu melden.
4. Jede nichtlokale Parametergruppe wird in ein einzelnes oder mehrere direkt aufeinander folgende Datenpaket(e) verpackt und zum **csdistributor** auf allen angesprochenen entfernten Kontrollrechnern versendet.

5. Jeder **csdistributor** übergibt dort die empfangene Parametergruppe an das lokale Synchronisationssystem der Kommunikationsschicht.
6. Das Synchronisationssystem beauftragt die Datenbankschicht, Parameteränderungen zu überwachen und gegebenenfalls an den **csdistributor** zu melden.

Mehrfachanmeldungen eines Parameters durch eine Applikation werden bei diesem Verfahren unterstützt, ebenso Mehrfachanmeldungen eines Parameters durch verschiedene, voneinander unabhängige Applikationen.

Ist eine Parametergruppe angemeldet, kann die Applikation entweder in einen Warteschleifenmechanismus übergehen und auf einlaufende Benachrichtigungen für Wertänderungen warten, oder zunächst ihre "normale" Arbeit fortsetzen. In beiden Fällen muß sie zuvor eine Service-Routine angeben, die im ersten Fall synchron zum Bearbeitungsfluß bei jeder Parameteränderung angesprochen wird, oder im letzteren Fall asynchron den Fluß der Verarbeitung für jede Änderung unterbricht ("Interrupt"). Das Applikations-Interface des Kontrollsystem-Kerns wickelt alle hierzu notwendigen Operationen sowie die interne Sicherung und Synchronisation solchermaßen ab, daß sich die Applikation auf die eigentliche spezifische und vom Kontrollsystem unabhängige Arbeit konzentrieren kann, ohne daß das Benachrichtigungsverfahren explizit ausprogrammiert werden muß. Die Vermittlung eines "Ereignisses" für eine Wertänderung eines Parameters läuft wie folgt ab (siehe auch Abbildung 2.16):

1. Die lokale Datenbank ermittelt beim Eintrag eines Datums durch einen Prozeß, ob sich der Wert im Vergleich zum vorher dort gespeicherten Wert geändert hat. Ist einem solchen Fall wird dies an den schreibenden Prozeß gemeldet (z.B. einen **pscollector** PC) (1).
2. Das Synchronisationssystem formt aus der Meldung ein "Ereignis" und übermittelt dieses durch das lokale Kommunikationssystem an den **csdistributor** D (Fall 2A), wenn die zu benachrichtigende Applikation auf einem anderen Rechner lokalisiert ist, oder an den **csnotify** N (Fall 2B), falls die Applikation (A) auf dem selben Rechner wie der schreibende Prozeß abläuft. Hat die Applikation ein asynchrones Benachrichtigungsschema angefordert, so versendet das Synchronisationssystem das Ereignis im Fall B nicht an den **csnotify** N, sondern an die Applikation direkt. Diese wird dann in ihrem aktuellen Ausführungskontext unterbrochen und verzweigt in die Serviceroutine zur Behandlung des Ereignisses.

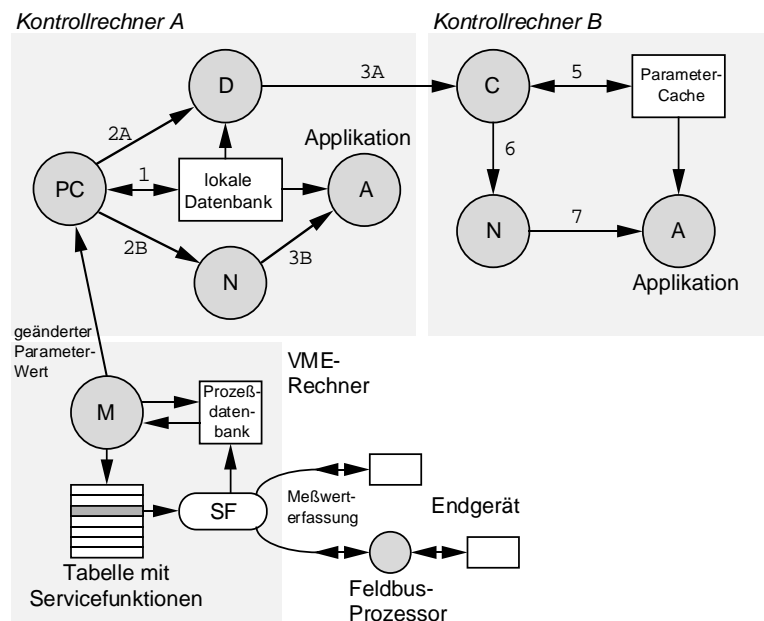


Abbildung 2.16: Ereignisorientierte Transaktion im Kontrollsystem

3. Im Fall 2A liest der **csdistributor** D das geänderte Datum aus der Datenbank und sendet ein Ereignispaket mitsamt der Daten an alle **cscollectoren** C der Rechner, auf denen zu benachrichtigende

Applikationen laufen (3A). Dort schreibt der `cscollector` C das Datum in den Cache (5), denn es existiert dort bereits ein Deskriptor. Das lokale Synchronisationssystem formt dafür wiederum ein Ereignis und übermittelt dieses an den jeweiligen `csnotify`-Prozeß N (6). `csnotify` formt ein Ereignispaket und versendet dieses Paket an die betroffene Applikation (7). Innerhalb der Applikation dekodiert das Applikationsinterface des Kontrollsystem-Kerns das Paket und löst die eigentliche Benachrichtigung aus. Hat die Applikation ein asynchrones Benachrichtigungsschema angefordert, so versendet das Synchronisationssystem das Ereignis nicht an den `csnotify` N, sondern an die Applikation direkt. Diese wird dann in ihrem aktuellen Ausführungskontext unterbrochen und verzweigt in die Serviceroutine zur Behandlung des Ereignisses.

4. Im Fall 2B formt `csnotify` N ein Ereignispaket und sendet dieses an alle zu benachrichtigenden Applikationen (3B); hier wird das Paket jeweils dekodiert und kann die eigentliche Benachrichtigung auslösen.

Durch dieses Verfahren erhält jede Applikation unabhängig vom Rechner, auf dem sie abläuft, und unabhängig von dem Rechner, auf welchem der Parameter gespeichert ist, eine Benachrichtigung für jede Wertänderung des Parameters der angemeldeten Gruppe. Durch die Tatsache, daß zu jedem Zeitpunkt nur eine gültige Referenz für den Wert eines Parameters existiert (die lokale Datenbank) sowie durch das oben beschriebene Transaktionschema wird die Reihenfolge aller Ereignisse beibehalten und die Konsistenz der Daten durch die partielle Replikation von Parameterdaten im Cache gesichert. Dadurch kann eine Applikation asynchronen oder synchronen Zugriff auf ein konsistentes Spiegelbild des aktuellen Beschleunigerzustandes erhalten.

Das Abmelden einer Parametergruppe durch eine Applikation durchläuft die folgenden Schritte:

1. Die Liste der Parameter wird mit einer Abmeldeanforderung an den lokalen `csnotify`-Prozeß gesendet. Dieser durchsucht seine Datenstrukturen nach den angegebenen Parametern und markiert sie entsprechend, falls keine weitere Applikation noch für diesen Parameter angemeldet ist.
2. Die Liste der Parameter wird wieder entsprechend der Datenverteilung im Kontrollsystem in Teilgruppen separiert. Der Datenbank-Cache wird untersucht, die Deskriptoren aller betreffenden Parameter werden ebenfalls markiert. Falls für einen Parameter keine Applikation mehr angemeldet ist, wird der Deskriptor aus dem Cache entfernt.
3. Jede Teilgruppe wird in einem Paket an den entsprechenden `csdistributor` versendet.
4. Jeder `csdistributor` meldet die empfangene Parametergruppe vom Synchronisationssystem der Kommunikationsschicht ab.
5. Das Synchronisationssystem beauftragt die Datenbankschicht, die Überwachung von Parameterwerten für die betroffenen Parameter auszusetzen.

Bei jeder Abmeldeoperation wird berücksichtigt, daß Mehrfachanmeldungen des Parameters aktiv sein können. Vor dem endgültigen Abmelden eines Parameters bei allen beteiligten Prozessen — und vor dem Entfernen eines Deskriptors aus dem Cache — wird jeweils überprüft, daß keine Applikation mehr interessiert bzw. keine erneute Anmeldeoperation aktiv ist.

2.9 Regeldatenbanken und verteilte "Experten"

Die beschleunigerspezifischen Konstruktionen sind entsprechend der in Abschnitt 2.3 auf Seite 29 beschriebenen Aufgabenhierarchie in die Ebene der Regelprozesse bzw. "Experten" gekapselt. Der Zugriff eines Experten auf jeden im Kontrollsystem gespeicherten Parameter kann durch einen der drei beschriebenen Transaktionsmechanismen erfolgen. Dadurch ergibt sich für die effiziente Bearbeitung eines kontrolltechnischen oder strahldiagnostischen Problems eine geeignete Schnittstelle für synchronen und asynchronen Datenaustausch mit hoher Bandbreite. Dies erleichtert die flexible Anpassung eines Experten an die ihm zugeordnete Aufgabenstellung.

Ein Experte bekommt im Kontrollsystem seine spezifischen Aufgaben in der Form sogenannter Regeln zugeteilt und kann daher auch als "Regelmaschine" gekennzeichnet werden. Diese Regeln beschreiben eine

Regelprozedur R sowie eine Eingabe- als auch Ausgabemenge an Kontrollsystem-Parametern P_{input} und P_{output} in der Art

$$\{P_{input}\} \xrightarrow{R} \{P_{output}\} .$$

Diese Schreibweise gibt an, daß eine Regelprozedur R eine Eingabemenge durch spezielle Berechnungen in eine Ausgabemenge überführt.

Ein sehr einfaches Beispiel für eine Regelprozedur ist bei ELSA die Abbildung des für die Sextupolmagnete applizierten Spulenstroms I_s in die effektive Sextupolstärke m_s bei einer Teilchenenergie E_0 :

$$\begin{aligned} \{P_{input}\} &= \{E_0[GeV], I_s[A]\} , \\ \{P_{output}\} &= \{m_s[m^{-3}]\} , \\ R_s &: m_s = 0.0502 \cdot \frac{I_s}{E_0} [m^{-3}] . \end{aligned}$$

Der betreffende Experte hat dann den Auftrag, bei jeder Meldung eines Parameterwertes E_0 oder I_s die Prozedur R_s aufzurufen, für E_0 und I_s den Parameterwert m_s zu berechnen und im Kontrollsystem abzu-legen.

Regelprozeduren müssen einem Experten in Form von Prozeduren mit einem einheitlichen Aufrufschema während des Definitionsprozesses zugeführt werden. Die Komplexität der Prozeduren ist dabei prinzipiell nicht beschränkt; die Möglichkeit reicht von einfachen Abbildungen, wie oben beschrieben, bis zu ein- oder zweidimensionalen Interpolationsaufgaben, vielfältigen logischen Verknüpfungen oder umfangreichen Fitberechnungen. Nicht alle Eingabeparameter einer Regel müssen auch sofort eine Bearbeitung der Regelprozedur R auslösen. Die meisten Regeln werden vielmehr nur über eine kleine Menge an Eingabeparametern angestoßen, benötigen aber für ihre Berechnungen zusätzlich andere Parameter, die erst bei Durchführung der Berechnung aus der Eingabemenge entnommen werden. Eine gewisse Klasse von Regeln enthält in der Eingabemenge nur einen "Trigger"-Parameter p^* und berechnet mehrere Ausgabeparameter in $\{P_{output}\}$:

$$\{p^*, p_{i1}, p_{i2}, p_{i3}, p_{i...}\} \xrightarrow{R} \{P_{output}\} .$$

Als Beispiel soll an dieser Stelle vorweggenommen werden, daß eine Regel zur Einstellung des Timingsystems "auf Knopfdruck" (bzw. durch den "Trigger"-Parameter) alle notwendigen Zeitvorgaben zur Realisierung eines bestimmten Betriebszustandes der Synchrotron-Extraktion berechnet. Hierzu werden nach erfolgtem "Trigger" die restlichen Werte (Injektionsschema, Harmonischenzahl u.a.) aus dem Eingabebereich gelesen, die Berechnung durchgeführt und die Ausgabeparameter geschrieben.

Ein wesentlicher Punkt besteht darin, daß Parameter des Eingabebereichs einer Regel R_i im Ausgangsbereich einer anderen Regel R_j liegen können, wobei auch $i = j$ erlaubt ist:

$$\{P_{input}(R_i)\} \subset \{P_{output}(R_j)\} .$$

Insgesamt entsteht durch die Menge aller definierter Regeln ein gerichteter Graph, der Zyklen aufweisen kann. Dieser Graph besteht aus allen Parametern, die in den Ein- und Ausgabemengen $\{P_{input}\}$ bzw. $\{P_{output}\}$ aller definierter Regeln liegen sowie allen Regelprozeduren R als Kanten des Graphen. Eine Repräsentation eines solchen Graphen gibt Abbildung 2.17 an.

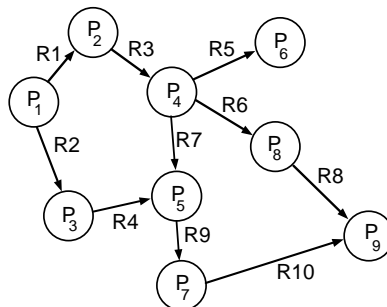


Abbildung 2.17: Gerichteter Graph der Regeln im Kontrollsystem

Alle in Regelprozeduren formulierbaren Aufgaben des Kontrollsystems werden durch einen solchen Graphen abgedeckt. Dies umfasst sämtliche beschleunigerphysikalischen Berechnungen sowie die wesentlichen Steueraufgaben für ELSA.

Regeldatenbanken

Natürlich könnte einem einzigen Experten die Bearbeitung aller Regeln, und damit der gesamte Graph, zugewiesen werden. Ein solcher Experte wäre dann im Programmcode sehr umfangreich und in der Hardware auf einen einzelnen Rechner beschränkt. Die Natur der Steuer- und Analyseaufgaben bei ELSA ist aber verteilt. Dies legt nahe, alle Regeln so in Teilmengen zu zerlegen, daß einzelne Experten parallel auf einem Rechner und insgesamt verteilt auf beliebige Rechner der Kontrollebene plaziert werden können. Die dadurch erreichte Parallelisierung der Berechnungen führt zu einer wesentlich erhöhten Verarbeitungsleistung des Gesamtsystems. Darüber hinaus werden spezifische Aufgabenbereiche in unterschiedliche Experten eingebracht, um eine eindeutige Schnittstelle und damit eine vereinfachte Programmierung und Wartung zu gewährleisten. So können z.B. alle Berechnungen von Zeitvorgaben in einen "Timingexperten", alle Magnetberechnungen in einen "Magnetexperten" eingebracht werden, usw.

Die Zuweisung einzelner Regeln zu einzelnen Experten, d.h. die Aufspaltung des Regelgraphen in mehrere, lose gekoppelte Teilgraphen, muß in der gegenwärtigen Ausbaustufe noch von Hand vorgenommen werden, da bei einer solchen Zuweisung eine Vielzahl von Randbedingungen beachtet werden muß, möchte man die Rechenlast möglichst gleichmäßig über alle Experten und Rechner ausbalancieren. Hierzu ist die Betrachtung des Datenvolumens, der erwarteten Transaktionsraten und der Komplexität einzelner Regelprozeduren notwendig, die erst nach einer ausgiebigen Betriebs- und Testphase sicher vorgenommen werden kann.

Zur Verteilung einzelner Regeln auf die Experten der verschiedenen Kontrollrechner etabliert das Kontrollsystem auf jedem beteiligten Rechner eine Regeldatenbank in einem "shared memory"-Segment. In diese Regeldatenbank wird dann derjenige Teilgraph abgespeichert, der die Regeln für alle rechnerlokalen Experten enthält. Die Repräsentierung des in der Datenbank abgelegten Teilgraphen wird dabei so gewählt, daß durch einen Experten möglichst schnell

- für jeden Parameter festgestellt werden kann, bei welchen Regeln derselbe im Eingabebereich liegt;
- für jede Regel die Menge aller Ein- bzw. Ausgabeparameter gefunden werden kann;
- für jeden Parameter die Gesamtmenge aller Eingabeparameter sämtlicher durch diesen Parameter angestoßener Regeln ermittelt werden kann.

Die Regeldatenbank implementiert zu diesem Zweck gewichtsbalancierte, binäre Bäume mit relativer Adressierung für die Regeln und Parameter. Die Endknoten der Bäume zeigen dabei wiederum auf geordnete Listen von Regeln bzw. von Parametern. Für jeden Eingabeparameter enthält der Parameterbaum eine Liste der beteiligten Regeln, für jede Regel führt der Regelbaum eine Liste der Parameter des Eingabebereiches. Durch Querverkettung der einzelnen Bäume können alle Suchoperationen mit einem Maximum an Geschwindigkeit ablaufen, ebenso der Prozeß des Sammelns aller Eingabeparameter sämtlicher Regeln, die bei Triggerung durch einen Parameter erfaßt werden müssen. Bei diesem Einsammeln muß die Parametermenge im Experten verdichtet werden, damit ein Parameter nur ein einziges Mal in der Eingabemenge auftaucht, obwohl mehrere, verschiedene Regeln ihn benötigen.

Für die Definition von Regeln wurde ein "Regel-Compiler" entworfen. Auch dieser Compiler bedient sich des lexikalischen Analysators `lex` und des Parser-Generators `yacc` zur Konstruktion eines Übersetzers, der eine einfach strukturierte Definition in eine für das Regelsystem verarbeitbare Form bringt. Dieser Compiler heißt `csrule`. Als Beispiel für die Definition einer sehr einfachen Regel soll hier wiederum die Berechnung der Sextupolstärke angeführt werden. Der nachfolgende Auszug aus der Regeldefinitionsdatei wird dabei durch `csrule` gelesen:

```
/*
  Regeldefinition zur Berechnung der Sextupolstaerke
  der F-Sextupole (SEXTF) des ELSA-Magnetings
  aus Energie und Magnetstrom, getriggert durch den
  Magnetstromparameter ELS_MAGNETE_SEXTF.STROM_AM.
  Alles wird dem Experten 'MAGNETS' auf dem Rechner
```



```

CONTROL2 zugeteilt.
*/
engine MAGNETS {
  host CONTROL2;
  rule FSEXTUPOLE {
    input {
      *ELS_MAGNETE_SEXTF.STROM_AM;    /* '*' heisst TRIGGER */
      ELS_MAGNETE_DIPOL.ENERGIE_AM;
    } /* end input set */
    output {
      ELS_MAGNETE_SEXTF.MF_AM;
    } /* end output set */
  } /* end rule */
} /* end engine */

```

Das `csrule`-Programm erzeugt aus dieser Definition zusammen mit allen anderen Regeldefinitionen den Regelgraphen und speichert diesen in einer Datei ab. Diese Datei wird in der Startphase des Kontrollsystems vom `csbroker`-Prozeß gelesen; für jeden Kontrollrechner wird dann der entsprechende Teilgraph abgespalten und in die Regeldatenbank gemäß dem beschriebenen Schema eingebaut. Danach wird die Regeldatenbank zur Benutzung durch die Experten freigegeben.

Generierung von Regemaschinen

Für die Implementierung der eigentlichen Regelprozeduren wurden zunächst zwei Ansätze gegeneinander abgewogen:

- Entwurf einer einfachen Skript-Sprache zur Berechnung von Parametern, und Programmierung eines entsprechenden Interpreters zur Ausführung der Skriptbefehle (analog zum `EPOS`-System, siehe [31], [67]). Der Interpreter würde im Kontext eines Experten ablaufen. Diese Methode ist sehr wartungsfreundlich und auch für ungeübte Benutzer einfach zu verwenden; die Skript-Befehle könnten sogar innerhalb der Regeldefinition, die von `csrule` gelesen wird, mit angegeben werden. Dadurch wird diese Definition selbstkonsistent, da sie nicht nur die Ein- und Ausgabeparameter enthält, sondern auch den Code der Regelprozedur selbst.
- Programmierung der Regelprozedur in der "C"-Sprache, in der auch das Kontrollsystem programmiert ist. Der C-Code muß dann in den Code des Experten integriert werden. Bei diesem Ansatz kann sicherlich der größtmögliche Durchsatz erzielt werden, da die Regel als optimierter Programmcode direkt vom Rechner ohne Umweg über einen Interpreter abgearbeitet wird. Die Regeldefinition ist dann aber nicht selbstkonsistent, da die Funktion selbst in einer externen Quellcodedatei vorgehalten werden muß.

Eine Analyse der bei ELSA durchzuführenden Berechnungen hat zur Beurteilung des Problems zwei wesentliche Resultate ergeben:

1. Die weitaus meisten Regelfunktionen sind nicht unkompliziert und erfordern relativ aufwendige Berechnungen (z.B. Interpolationen, Arbeitspunktermittlung, usw.). Die zu verwendenden Verfahren eignen sich nur sehr selten für die Bearbeitung durch einen Script-Interpreter.
2. Die meisten Berechnungen müssen so schnell durchgeführt werden, daß die Verarbeitungsleistung des Systems quasi-analoge Steuerungen zuläßt (z.B. manuelles Verfahren der Arbeitspunkte, oder Einstellung der Chromatizitätskorrektur) oder zumindestens die Durchsatzraten des Systems nicht unnötig ausbremst.

Aus diesen beiden Gründen wurde entschieden, die Regelfunktionen als C-Funktionen explizit zu programmieren. Zur Vereinfachung für den Programmierer wurde aber festgelegt, daß jede Regelfunktion ein einheitliches Aufrufschema besitzt, welches durch geeignete Maßnahmen verborgen bleiben kann. Durch die Bereitstellung von Unterprogrammen und "Makros" durch den Experten selbst wird eine Stufe der Abstraktion erreicht, die die Konzentration auf die eigentliche beschleunigerphysikalische Berechnung ermöglicht. Der Regelcompiler `csrule` erzeugt zur Realisierung dieses Konzepts aus der Regeldefinition neben dem in

der Regeldatei gespeicherten Graphen auch ein Expertenskelett¹⁹ aus C-Code, eine Datei mit Makros für die vereinfachte Programmierung der Regelprozeduren sowie entsprechende Dateien, die dem UNIX-System die automatische Generierung eines Expertenprogramms ermöglicht ("UNIX-makefiles"). Für jede Regelfunktion wird ein Skelett erzeugt, welches wiederum den vom Programmierer bereitgestellten Quelltext einer Funktion einliest und damit in den Quellcode des Expertenprogramms integriert. Das Verfahren wird durch Abbildung 2.18 illustriert:

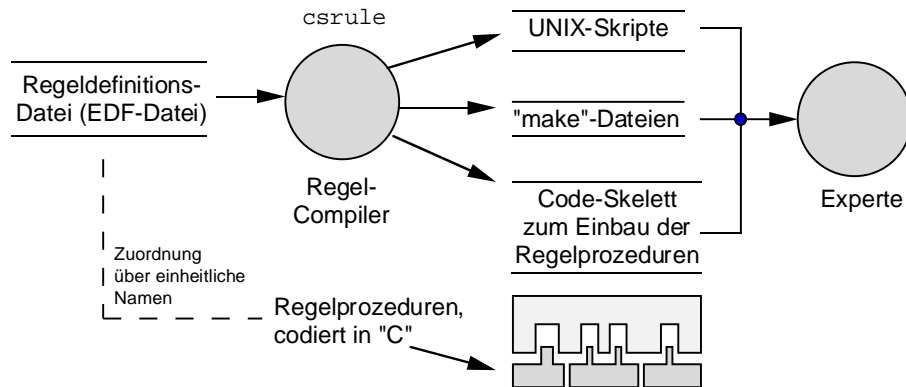


Abbildung 2.18: Automatische Konstruktion eines Kontrollsystem-Experten

Nach Aufruf der entsprechenden Kommandodateien erzeugt das Kontrollsystem selbstständig alle Expertenprogramme und verteilt sie auf die angegebenen Rechner. Dadurch erhält jeder Kontrollrechner seine spezifische Ausstattung mit Experten, die in der Startphase des Systems nach Etablierung des verteilten Kontrollsystem-Kerns automatisch aktiviert werden.

Aktivierung und Bearbeitung von Regeln

Sind alle Experten aktiviert, führt die Änderung eines Parameters, der im Eingangsbereich einer Regelprozedur liegt, zur Aktivierung des betroffenen Experten. Dieser Experte führt dann alle relevanten Regelprozeduren aus, übermittelt die Ergebnisse an das Kontrollsystem und wartet auf den nächsten Auftrag. In der Vorbereitungsphase führt ein Experte die folgenden Aktionen durch:

1. Der Experte meldet sich beim Kontrollsystem an und fordert eine Benachrichtigung für alle Parameteränderungen durch Angabe einer Servicefunktion.
2. Alle Regeln, die diesem Experten zugeteilt sind, werden aus der Regeldatenbank angefordert und bilden die Regelmenge $\{R\}$.
3. Für alle Regeln wird die verdichtete Liste aller Parameter angefordert, die im Eingabebereich mindestens einer Regel aus $\{R\}$ liegen. Dies ergibt die Eingabemenge $\{P_{input}\}$.
4. Alle Parameter aus $\{P_{input}\}$ werden für die synchrone Benachrichtigung an das Kontrollsystem gemeldet.
5. Jede Wertänderung eines Parameters $p^* \subset \{P_{input}\}$ führt dann zum Anstoß einer ereignisorientierten Transaktion, als deren Resultat der Experte eine entsprechende Benachrichtigung erhält.

Die Aktivierung von Regeln für einen Parameter $p^* \subset \{P_{input}\}$ und deren nachfolgende Berechnungen laufen danach wie folgt ab:

1. Der Experte ermittelt aus der Regeldatenbank die Menge alle Regeln $\{R_p\} \subset \{R\}$, die den Parameter p^* im Eingabebereich haben.

¹⁹Als "Skelett" wird ein Programmtext bezeichnet, der als solches übersetzt und ausgeführt werden kann, der aber keine konkrete Berechnung durchführt. An entsprechenden Stelle des Skeletts sind spezielle Konstruktionen für die Integration externer Programmtexte vorgesehen. Stellt man einen solchen externen Programmtext zur Verfügung, wird dadurch das Skelett mit Berechnungen, d.h. einer sinnvollen Aufgabe, versehen.

2. Für alle Regeln $\{R_p\}$ wird die verdichtete Liste aller Eingabeparameter $\{p_{input}\} \subset \{P_{input}\}$ aus der Regeldatenbank angefordert.
3. Für alle Parameter $\{p_{input}\}$ wird ein "Snapshot" des aktuellen Beschleuniger-Zustandes genommen, d.h. der Experte fordert die Werte aller Parameter aus $\{p_{input}\}$ an und bildet daraus einen zusammenhängenden Block. Beim Anfordern der Werte wird die Datenbank des Kontrollsystems für Schreiboperationen gesperrt. Dieses Verfahren stellt sicher, daß ein Snapshot möglichst diejenigen Parameterwerte enthält, die zum Zeitpunkt der Änderung von p^* gespeichert waren. Der erzeugte Block wird der Regelmenge $\{R_p\}$ zugeordnet.
4. Für jede einzelne Regel $R \subset \{R_p\}$ wird jetzt die zugeordnete Regelprozedur aufgerufen. Diese Regelprozedur bekommt den für diese Regel gebildeten "Snapshot" zugeordnet.
5. Die Regelprozedur führt die eigentlichen Berechnungen mit Eingabewerten aus dem "Snapshot" durch. Die Ergebnisse werden durch die Ausgabemenge der Regel an das Kontrollsystem übermittelt.
6. Falls die Regelprozedur einen Fehler verursacht, wird eine entsprechende Meldung generiert und an das Kontrollsystem gesendet.

Da der Regelgraph auch Zyklen enthalten kann, tritt oft der Fall auf, daß eine Regel sich selbst direkt oder über den Umweg anderer Regeln aktiviert und daher periodisch angestoßen wird. Die zyklische Verarbeitung einer Regel wird durch den Kontrollsystem-Kern immer dann terminiert, wenn ein berechneter Parameter der Ausgabemenge einer Regel zu keiner Wertänderung mehr führt, d.h. wenn für diesen Parameter ein stationärer Zustand erreicht ist.²⁰ In diesem Fall generiert die Datenbankschicht keine Meldung über eine Wertänderung, was zum Abbruch des Berechnungszyklus führt. Dieses Verfahren funktioniert deshalb, weil jedem Kontrollsystemparameter eine Auflösung ϵ zugeordnet ist. Eine Wertänderung wird nur dann gemeldet, wenn $|p_{neu} - p_{alt}| > \epsilon$ ist. Bei text- oder byteorientierten Parametern ist die Auflösung naturgemäß nicht definiert. Für diese Arten von Parametern muß bei der Regeldefinition eine Zyklenbildung im Graphen unbedingt vermieden werden. Der **csrule**-Übersetzer kann solche gefährlichen Konstruktionen (die zu nicht terminierenden Regelberechnungen führen würden) erkennen und eine Warnung ausgeben. Die Durchsuchung des gesamten Regelgraphen nach Zyklen ist aber relativ aufwendig und erfordert entsprechend Rechenzeit.

Trotz des beschriebenen Mechanismus zur Terminierung einer Kette von Regelberechnungen kann es natürlich vorkommen, daß die unterhalb des Kontrollsystems ablaufenden physikalischen Prozesse in Meßgrößen resultieren, die durch ständige Schwankungen ("Rauschen") immer wieder Berechnungen anstoßen. Existieren für solche Berechnungen Zyklen im Regelgraph, kann das Regelsystem instabil werden. Für alle relevanten Regeln werden daher zusätzliche Parameter eingeführt, die die Bearbeitung einer Regel je nach Wert an-, abschalten oder modifizieren können. Zusätzlich enthält die Regeldatenbank für jede Regelprozedur einen Satz von Attributen, die die Bearbeitung einer Regel gezielt beeinflussen. Durch An- oder Abschalten von Regeln können Zyklen aufgetrennt und dadurch die Gefahr instablen Verhaltens reduziert werden. Die letzte Sicherheit besteht auch hier allerdings nur in der sorgfältigen Planung des implementierten, kontrollsystemweit operierenden Regelnetzwerks unter der Maßgabe einer möglichst weitgehenden Vermeidung von Zyklen.

²⁰Ein alternativer Mechanismus könnte zyklische Regelpfade statt im Kern auf der Ebene der Experten terminieren. Dadurch würden die Experten aber mit unerwünschtem "Ballast" ausgestattet (im Sinne der möglichst schnellen Bearbeitung von Regelprozeduren). Da ein Mechanismus zur Diskriminierung von Zugriffen zwischen modifizierenden und nicht modifizierenden Schreiboperationen im Kern ohnehin benötigt wird, wurde die Verantwortung für den Abbruch zyklischer Berechnungen im Kernsystem belassen.

3. Grafische Benutzeroberfläche

Die Konstruktion einer grafischen Benutzeroberfläche für die Steuerung einer Beschleunigeranlage ist, bedingt durch die Vielzahl beteiligter Parameter und gewünschter Visualisierungsverfahren, erfahrungsgemäß ein komplexes Unternehmen. Die Erstellung der Oberfläche in akzeptabler Zeit erfordert daher geeignete Software-Werkzeuge, mit denen grafische Elemente generiert und flexibel zusammengefaßt bzw. arrangiert werden können, so daß ein konsistentes, modularisiertes und interaktiv bedienbares System entsteht, welches die Ansprüche aller beteiligten Nutzergruppen zufriedenstellend abdeckt.

Dieses Kapitel behandelt die Softwarehilfsmittel für die Erstellung der grafischen Benutzeroberfläche zur Bedienung der Beschleunigeranlagen. Nach der Vorstellung der allgemeinen Konzeption wird der Entwurf einzelner grafischer Komponenten durch speziell entwickelte Werkzeuge beschrieben. Die entworfenen Komponenten werden zu einer einheitlichen Oberfläche zusammengefaßt und bilden die Basis für die interaktive ELSA-Steuerung durch alle Nutzergruppen (Techniker, Operateure, Experimentatoren, Beschleunigerphysiker). Die konkrete Realisierung der Oberfläche für den ELSA-Betrieb wird im sechsten Kapitel erläutert.

3.1 Allgemeine Konzeption

Obwohl die grafische Benutzeroberfläche die wesentliche Schnittstelle zur manuellen Steuerung der Beschleunigeranlagen durch einen Operateur darstellt, ist sie aus der Sicht des verteilten Kontrollsystems lediglich eine "normale" Applikation, die sich an den virtuellen Kern des Systems anmeldet und an dessen verschiedenen Transaktionsmechanismen teilnimmt. Die Software der grafischen Oberfläche enthält dementsprechend keine speziell auf ELSA ausgerichtete Programmierung, sondern bedient sich der Standardkonstruktionen, die der Kontrollsystemkern allen Applikationen zur Verfügung stellt. Durch dieses Konzept können durchaus mehrere grafische Oberflächen (auch in unterschiedlichen Varianten) auf verschiedenen Rechnern gleichzeitig ablaufen, ohne sich gegenseitig zu beeinflussen; außerdem kann die Software der Oberfläche leicht an geänderte Bedingungen oder Anforderungen der Beschleunigerkontrolle angepaßt werden, ohne daß dies Auswirkungen auf das Kontrollsystem selbst hat.

Die Konzeption der Software basiert auf den mit dem alten ELSA-Kontrollsystem gewonnenen Erfahrungen (siehe dazu [95]) und den Ansätzen, die andere Beschleunigerkontrollsysteme der neueren Generation gewählt haben (vergl. z.B. [48],[58],[96]).

Die Steuerung der Anlage durch die interaktive Bedienung grafischer Elemente ("simulierte Potentiometer") hat sich für die meisten manuell durchführbaren Kontrollaufgaben als gut geeignet erwiesen. Die Zusammenfassung grafischer Elemente zu Gruppen erlaubt eine Gliederung aller Parameter in leicht überschaubare Teilmengen. Durch Verkettung einzelner Gruppen untereinander kann der Aufbau einer baumartigen Gliederung erfolgen, so daß ein Operateur mit wenigen Aktionen zu einer gewünschten Bildschirmdarstellung und darüber zu jedem gewünschten Parameter gelangt. Die folgenden Punkte wurden dementsprechend analog zum alten ELSA-Kontrollsystem implementiert:

- Ordnung der zu steuernden Parametermenge in Teilmengen und Zuordnung zu einzelnen, virtuellen Bildschirmen oder Fenstern (sog. "Menüs"), die den einzelnen ELSA-Komponenten oder Subsystemen in natürlicher Weise entsprechen.
- Einsatz zweier separater Programme für die eigentliche Beschleunigersteuerung sowie für den interaktiven Entwurf der grafischen Oberfläche, wobei der Entwurf der Oberfläche keinerlei Programmierarbeit erfordert.
- Nicht-flüchtige Speicherung der Struktur eines einzelnen Menüs in einem Metafile, der nur bei Bedarf geladen wird.

- Durchgängige Verwendung einer kleinen Menge universeller, untereinander beliebig kombinierbarer grafischer Elemente innerhalb eines Menüs.
- Einteilung der grafischen Elemente in statische Elemente und dynamische Elemente, die Parameteränderungen im Kontrollsystem auslösen können.
- Beliebige Aufrufmöglichkeit eines Menüs durch dynamische Elemente auf einem anderen Menü.

Die Farbgrafik-Workstations der Kontrollebene bilden die Hardware-Basis für die Implementierung der Oberfläche. Alle grafischen Darstellungen können hier mit 256 verschiedenen Farben bei einer Auflösung von $1248 \cdot 1024$ Bildpunkten generiert werden. Durch den Einsatz von **X Windows** [64] und den darunter verfügbaren Funktionen für rechnerübergreifende grafische Operationen wird eine Infrastruktur gebildet, die besonders für den Einsatz in einem vernetzten Workstation-System optimiert ist. Eine vereinfachte und effizientere Programmierung wird durch den Einsatz des **X Toolkit** [64] und der darauf teilweise aufsetzenden Software des **OSF/Motif**-Systems [59] ermöglicht. Dabei wird eine durchsatzorientierte Aufgabenteilung der einzelnen Komponenten angestrebt:

- Verwendung direkter Aufrufe von **X Window**-Funktionen (**Xlib**-Routinen) zur möglichst schnellen Abwicklung grafischer Operationen für statische und dynamische Elemente der Oberfläche. Alle Grafikoperationen müssen bei der interaktiven Manipulation dynamischer Elemente mit ausreichend hoher Aktualisierungsrate erfolgen, um ein subjektiv "quasi-analoges" Gefühl der Steuerung zu vermitteln und damit eine gute Benutzerakzeptanz zu erzielen.
- Verwendung des **X Toolkit** und von **OSF/Motif** zur bequemen Konstruktion der allgemeinen Infrastruktur des Systems, wie beispielsweise dem Anlegen einzelner Fenster oder der Auswahl von Zeichensätzen. Diese Infrastruktur muß in der Regel nur einmal aufgebaut werden und stellt daher keine hohen Anforderungen an die Durchsatzrate. Die Integration bereits vorgefertigter Software-Komponenten ("Motif-Widgets") verringert den Implementierungsaufwand beträchtlich.

Die Software der grafischen Oberfläche setzt entsprechend dieser Liste direkt auf **Motif**, dem **X Toolkit** und **X Windows** auf, wie Abbildung 3.1 zeigt:

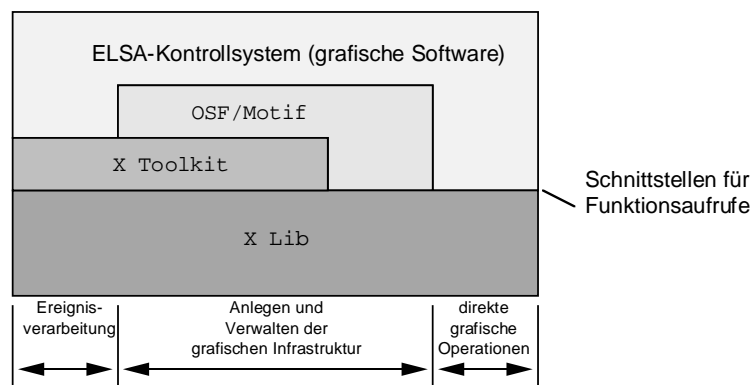


Abbildung 3.1: Aufbausichten der grafischen Software

Für die Entwicklung des Kontrollsystems für das SPEAR-Boostersynchrotron am SSRL (siehe dazu [96]) wurde ebenfalls der oben beschriebene Ansatz verwendet. Auch dieses System basiert auf den Erfahrungen mit dem alten ELSA-Kontrollsystem und ist für den Einsatz unter dem **X Window**-System ausgelegt. Anstelle von **Motif** wurde **DECWindows** eingesetzt, das auf dem dort verwendeten Zentralrechner (**VAXStation 3500**) läuft. Die bei ELSA implementierte Software ist eine Neuentwicklung auf der Basis der Erfahrungen, die mit dem SPEAR-System gemacht wurden. Dabei wurden teilweise Konzepte zur Farballokation, Zeichensatzverwaltung oder Widget-Verwaltung übernommen. Die wesentlichen Strukturen des Systems, die Definition einzelner Elemente, die Kommunikation mit dem Kontrollsystem und die Verwaltung von Parameterdaten dynamischer Elemente (z.B. Potentiometer-Objekte u.a.) sind aber speziell an das neue ELSA-Kontrollsystem sowie an geänderte Anforderungen der Bedienung angelehnt und stellen eine Weiterentwicklung der ursprünglich mit dem ersten ELSA-Kontrollsystem begonnenen Linie dar. Zwei konkrete Änderungspunkte sind hier exemplarisch aufgezählt:

- a) Die Referenzierung von Parametern innerhalb eines Menüs erfolgt nicht durch die vom Kontrollsystem intern vergebenen Schlüssel, sondern geschieht direkt über die Parameternamen, die die einzige allgemein gültige Bindung an die entsprechenden Elemente des Kontrollsystems herstellen. Dadurch wird die grafische Oberfläche unabhängig von den internen Datenstrukturen des Kontrollsystems; insbesondere muß kein bereits entwickeltes Menü bei einer neuen Schlüsselvergabe oder einer Modifikation des Kontrollsystems geändert werden.
- b) Die Speicherung der Struktur eines Menüs in einem Metafile wird nicht in einem Binärformat, sondern in einem leicht manipulierbaren Textformat (als "MDF-Format" bezeichnet) durchgeführt. Dies erlaubt die Erstellung oder Modifikation aller Menü-Dateien mit standardisierten Werkzeugen der Textverarbeitung. Vor der Interpretation und der Aktivierung der Grafik muß jeder Metafile "kompiliert" werden. Dadurch entsteht eine komprimierte Binärversion eines Menüs, die bei Bedarf sehr schnell geladen werden kann.

Zusammenfassend soll festgestellt werden, daß die grafische Oberfläche des neuen ELSA-Kontrollsystems die Erfahrungen der beiden Vorläufersysteme ELSA und SPEAR aufnimmt und in Richtung einer flexibleren und leistungsfähigeren Bedienung eines Teilchenbeschleunigers fortführt.

3.2 Werkzeuge zum Entwurf der Oberfläche

Der grafische Editor

Zum Entwurf eines Menüs, d.h. der Auswahl und Anordnung statischer und dynamischer Elemente und deren Zuweisung zu ELSA-Parametern, wird ein grafischer Editor eingesetzt. Dieser Editor **csmd** ("control system menu designer") kann Elemente erzeugen, einzeln oder in Gruppen auf einem Menü positionieren, bewegen und mit verschiedenen Attributen (Farben, Liniendicken usw.) versehen. Aktive Elemente können an einen oder mehrere Kontrollsystem-Parameter "gebunden" werden. Die meisten Elemente sind in verschiedenen Darstellungsvarianten verfügbar (z.B. drei verschiedene Arten von Zeigerinstrumenten) und sind dementsprechend an unterschiedliche Aufgaben adaptierbar. Ein wesentliches Merkmal des **csmd**-Editors ist die Möglichkeit zur Bildung einer Elementbibliothek. Hierin können einzelne oder Gruppen von statischen und dynamischen Elementen zu Bibliothekseinträgen zusammengefaßt werden. Je nach Bedarf kann ein solcher Eintrag in jedes andere Menü integriert werden, was die Entwicklungsgeschwindigkeit und den Komfort deutlich erhöht. So existieren Bibliothekseinträge für geographische Lagepläne, Miniaturzeichnungen diverser Magnete, Hochfrequenzresonatoren und viele andere ELSA-Komponenten, aus denen ein einzelnes Menü sehr schnell gebildet werden kann. Das Erscheinen des **csmd**-Programms äußert sich auf dem Bildschirm einer Workstation wie folgt (als Beispiel sind hier bereits mehrere Elemente angelegt worden):

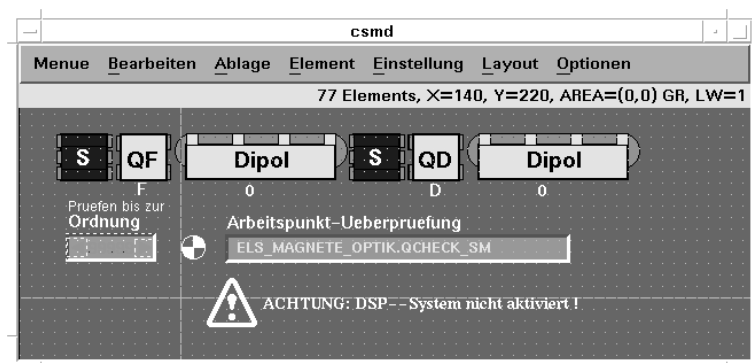


Abbildung 3.2: Erscheinungsbild des grafischen Editors **csmd**

Das Programm kann beim exakten Positionieren und Ausrichten von Elementen Hilfestellung durch das Anlegen diverser Gitter anbieten, die ein Raster für die Platzierung aller Elemente geben. Elemente können nachträglich in Position und auch Größe an diesem Raster ausgerichtet werden. **csmd** kann Textdateien

lesen und als Fließtext mit definierbarem Zeichensatz in ein Menü integrieren. Dadurch können beispielsweise Hilfstexte oder Dokumentationsdateien sehr schnell zum Bestandteil der grafischen Oberfläche gemacht werden. Dasselbe gilt auch für technische Zeichnungen; der Editor ist durch einen Konverter in die Lage versetzt, sog. **DXF**-Dateien (die von weitverbreiteten CAD-Programmen wie etwa **AUTOCAD** stammen können) zu importieren und in Elemente der Oberfläche umzuwandeln.¹ Das Menü zur Dosisleistungüberwachung für den Strahlenschutz an ELSA ist in Abbildung 3.3 unter Bearbeitung durch **csmd** zu sehen:

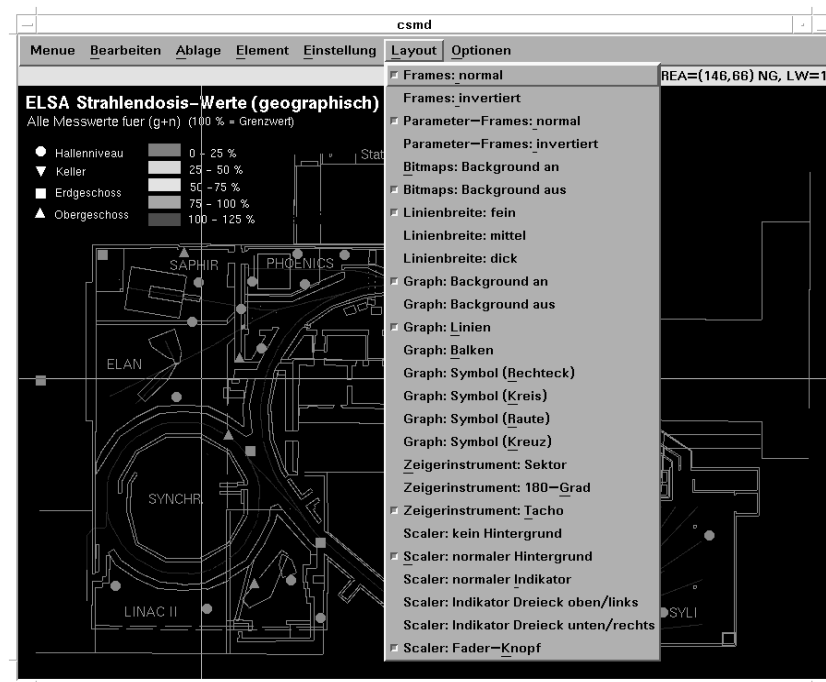


Abbildung 3.3: Konstruktion eines Strahlenschutz-Menüs in **csmd**

Zur Erstellung dieses Plans wurde eine **AUTOCAD**-Zeichnung in das **MDF**-Format konvertiert und nachträglich mit Darstellungselementen versehen, die einzelne Dosiswerte über verschiedene Symbole unterschiedlicher Farben einer definierten Skala anzeigen können.

Der Menügenerator

Der Editor **csmd** gibt einem Bediener die manuelle Freiheit, grafische Elemente in allen verfügbaren Varianten (Farben, Layout usw.) auszuwählen und per Maus und Tastatur so zu arrangieren, daß subjektiv ein für die Bedienung des Beschleunigers geeignetes Menü entsteht. Die durch **csmd** erzielte Flexibilität in der Menügestaltung muß aber ergänzt werden durch eine weitgehend automatisierte Menüerstellung:

- Bei insgesamt mehreren tausend Kontrollsystem-Parametern ist die ausschließlich manuelle Erstellung aller Menüs sehr zeitaufwendig. Zur optimalen Anpassung der Oberfläche an die Anforderungen des Beschleunigerbetriebs sollten zwar alle Menüs manuell gefertigt werden, für eine Inbetriebnahme- oder Testphase neuer Geräte oder Subsysteme besteht aber vielfach der Wunsch nach schneller Verfügbarkeit eines entsprechenden Standardmenüs mit einfacher Bedienung und vollständigem Zugriff auf alle relevanten Parameter.
- Die manuelle Entwicklung von Menüs erschwert die Einhaltung eines durchgängigen "Stils" (Aussehen des Menüs, Farbwahl, Zeichensatz, verwendete Symbolik u.a.). Dies ist besonders bei der Aufteilung der Entwicklungsarbeit auf mehrere Personen zu beachten.

¹ Ein weiterer Konverter kann die binären Menü-Dateien des alten ELSA-Kontrollsystems in das **MDF**-Format umwandeln.

- Der Wunsch nach ansprechenden Grafiken erfordert oft eine gut aufeinander angepaßte Kombination einer Vielzahl grafischer Einzelobjekte, so daß selbst für relativ einfache Steuerungsaufgaben sehr komplexe Menüs mit vielen Einzelementen entstehen.²

Zur Unterstützung der Menüentwicklung wurde aus diesen Gründen ein Menügenerator, bezeichnet als **csmgen**, entworfen. Dieser Generator erzeugt aus einer vorgegebenen Menge von Kontrollsystem-Parametern ein oder mehrere, optional auch untereinander verkettete Menüs mit einer einheitlichen Anordnung der Parameter und einer konsistenten Verwendung grafischer Elemente und deren Layout. Der Generator unterstützt alle Parametertypen und weist den einzelnen Parametern entsprechend angepaßte grafische Elemente (oder Mengen von Elementen) zu. So werden z.B. für vektorwertige Parameter automatisch Diagramme der Art $y = f(n), n = 1 \dots N$ erzeugt. Für Sollwertparameter werden entsprechende Meßwertparameter gesucht und beide in ein Element zusammengefaßt. Auf diese Weise entstehen beispielsweise simulierte Schaltknöpfe oder Potentiometer. Zwei generierte Menüs sind exemplarisch in Abbildung 3.4 zu sehen:

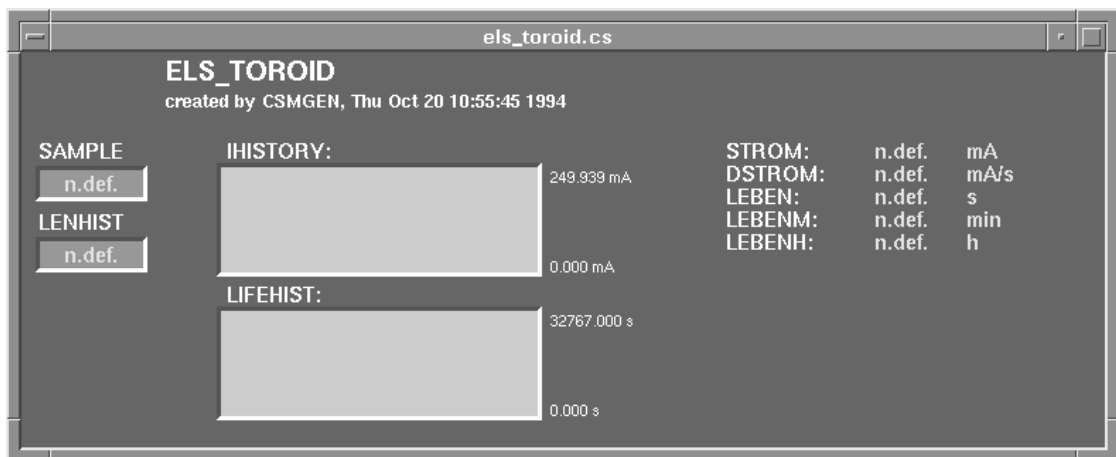
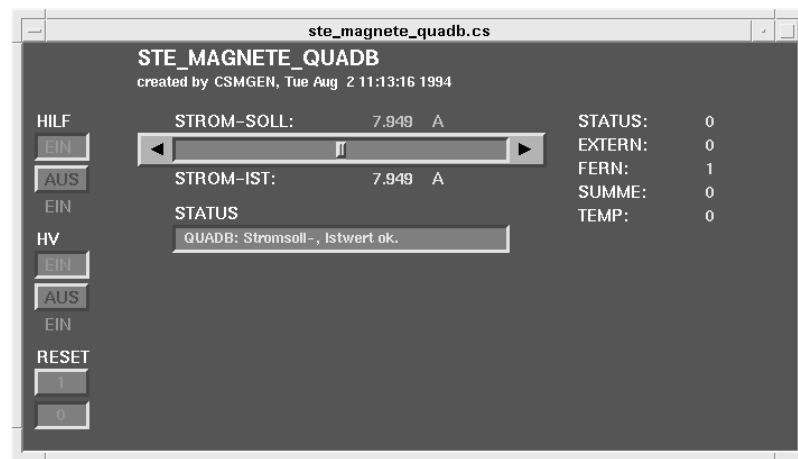


Abbildung 3.4: Beispiel für zwei durch **csmgen** erzeugte Menüs

Der Generator kann in einem speziellen Modus auch einen "Baum" hierarchisch untereinander verketteter Menüs erzeugen, welcher der Strukturierung aller Parameternamen des Kontrollsystems entspricht und Zugriff auf jeden Parameter erlaubt. **csmgen** analysiert hierzu den Namensraum aller definierten Parameter und erzeugt daraus eine Kette von Menüs, die am Ende des Baums wiederum auf automatisch generierte Menüs zeigen, welche der direkten Steuerung eines Gerätes oder Subsystems zugeordnet sind. Dies ist in Abbildung 3.5 exemplarisch dargestellt:

²Ein solches Menü kann beispielsweise für die Steuerung von einem Dutzend Parametern durchaus mehrere hundert grafische (in der Mehrzahl statische) Elemente beinhalten.

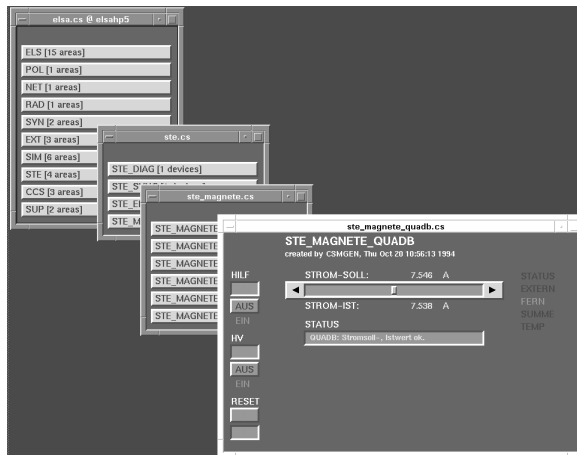


Abbildung 3.5: Beispiel für einen durch `csmgen` erzeugten Menübaum

`csmgen` hat eine gewisse Zahl verschiedener Einstellungsmöglichkeiten; die wichtigsten sind:

- Der Generator erzeugt entweder Menüs oder Einträge für die Elementbibliothek von `csmd`.
- `csmgen` kann wahlweise **MDF**-Dateien (die mit `csmd` nachbearbeitet werden können) oder bereits kompilierte Binärdateien erstellen.
- Für Zustandsparameter können normale Ausgabeelemente oder "interpretierende" Elemente generiert werden, die entsprechend den gemeldeten Parameterwerten unterschiedliche Symbole oder Texte aktivieren.
- In einer "Heuristik-Liste" können Textmuster eingegeben werden, bei deren Erkennung in einem Parameternamen Elemente generiert werden, die von der Standardzuordnung abweichen. Dadurch können z.B. alle Parameter mit dem Eintrag "RESET" im Namen durch ein besondere Elementvariante realisiert werden.
- Simulierte Potentiometer können in unterschiedlichen Größen erzeugt werden, die Geometrie eines generierten Menüs paßt sich automatisch an die verschiedenen Größen an.

Die Anordnung aller Elemente in einem Menü erfolgt in einer standardisierten Ordnung, aber immer so, daß der insgesamt eingenommene Platz dabei weitgehend minimiert wird.

3.3 Interaktion mit dem Operateur

Die mit `csmd` oder `csmgen` erzeugten Menüs werden durch das `csmenu`-Programm gelesen und interpretiert. Dabei wird für jeden Metafile ein Fenster erzeugt, welches die grafischen Elemente dieses Metafiles entsprechend der dort angegebenen Positionen und Farben anzeigt. Nach der Ausgabe aller statischen Elemente werden die dynamischen Elemente über die gespeicherten Parameternamen an das Kontrollsystem gebunden. Für dynamische Eingabeelemente wird die Interaktion des Operateurs mittels Maus und Tastatur überwacht und je nach angewähltem, d.h. durch "Mausklick" aktiviertem Element eine entsprechende Kontrollsystem-Operation angestoßen. So kann z.B. durch Verfahren einer Marke mit der Maus oder den Pfeiltasten einer Tastatur innerhalb eines simulierten Potentiometers ein Sollwert quasi-kontinuierlich geändert oder durch Drücken eines simulierten Knopfes ein Schaltvorgang ausgelöst werden. Das `csmenu`-Programm verwendet für alle aktiven Elemente die im zweiten Kapitel beschriebenen Transaktionsmechanismen. Insbesondere werden alle Eingaben eines Operateurs (Drücken von Schaltknöpfen, Fahren von Potentiometern) auf ereignisorientierte Transaktionen abgebildet. Falls eine Wertänderung eines Parameters auftritt, werden ebenfalls alle betreffenden dynamischen Elemente aktiviert und ändern gegebenenfalls ihr Aussehen. `csmenu` wird in allen Fällen nur dann aktiv, wenn konkreter Handlungsbedarf durch eine Eingabe oder eine Wertänderung besteht.

Durch Aufruf eines Menüs über ein bereits dargestelltes Menü werden zusätzliche Fenster erzeugt. Jedes der Fenster hat einen zugeordneten Metafile; kein Fenster ist gegenüber einem anderen Fenster privilegiert — z.B. durch eine zusätzliche Kommandoleiste o.a. — oder weicht von dessen Behandlung ab. Die Bedienung eines einzelnen Fensters (etwa das Verschieben auf dem Bildschirm, oder das Schließen bzw. Ikonisieren) ist durch die Funktionsweise des auf jeder Workstation ablaufenden **Motif**-Fensterverwalters (der "Window-Manager" **mwm**) festgelegt und standardisiert.

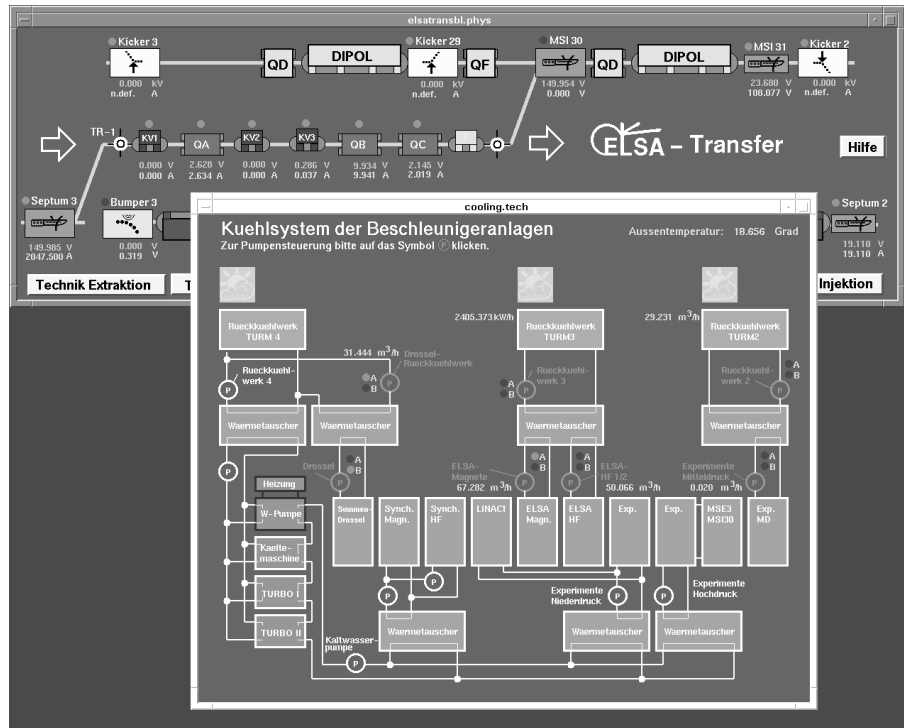


Abbildung 3.6: Beispiel für zwei **csmenu**-Fenster auf einer Workstation

Beendet man **csmenu**, so speichert das Programm den vollständigen und aktuellen Zustand aller Fenster ab. Wird das Menüsystem neu aufgerufen, so wird dieser Zustand komplett restauriert. Jeder gespeicherte Zustand ist dabei einem Benutzer und einem Rechner individuell zugeordnet; dadurch können verschiedene Operateure "persönliche" Konfiguration der Oberfläche gestalten, die beim Start sofort aktiv werden.

Das simulierte Potentiometer ist das wichtigste Eingabeelement für die quasi-kontinuierliche Wertänderung eines Parameters. Ein solches Potentiometer hat eine variable Größe und wird in der Regel aus mehreren Teilelementen aufgebaut, die entweder durch **csmd** manuell oder durch **csmgen** automatisch erzeugt und plaziert wurden. Bei der Entwicklung des Kontrollsystems hat sich der folgende konkrete Aufbau (siehe Abbildung 3.7) bewährt.



Abbildung 3.7: Beispiel für ein simuliertes Potentiometer

Es handelt sich um eine Kombination aus sieben verschiedenen statischen und dynamischen Elementen. In der Mitte des Potentiometers befindet sich der eigentliche Regler. Die Reglermarke ist ein beliebiges

grafisches Objekt³ und wird nur einmal von `csmenu` erzeugt. Das `X Window`-System stellt Funktionen zur Verfügung, mit denen einmal erzeugte Grafikobjekte sehr schnell kopiert, gelöscht oder verschoben werden können. Die entsprechenden Operationen werden fast ausschließlich durch die Hardware des Grafiksystems durchgeführt und erfordern daher relativ wenig Rechenleistung; als Konsequenz hat dies eine hohe Durchsatzrate zur Folge. Dieser Mechanismus wird durch `csmenu` für die Bewegung der Reglermarke in der Skala ausgenutzt. Die Skala ist umgeben von einem reliefartig herausgehobenen Feld, in das zu beiden Seiten jeweils ein Inkrement- und ein Dekrementgeber-Element eingelassen sind (schwarze Dreiecke). Mit diesen Elementen kann durch "Mausklick" der Wert des zugeordneten Parameters mit der feinsten möglichen Auflösung erhöht bzw. erniedrigt werden. Die Reglermarke wird durch die Maus oder die Pfeiltasten der Workstation-Tastatur bewegt.

Neben der Aktivierung eines dynamischen Elements bzw. eines Menüfensters durch Anklicken mit der Maus erlaubt `csmenu` auch den Abruf bzw. die Modifikation von Sekundärinformationen, die einem Element oder Fenster zugeordnet sind. Durch Anklicken eines Fensterhintergrundes wird beispielsweise eine Auswahlbox aktiviert, die dem Bediener die schnelle Selektion eines Menüs aus einer Liste aller bis dahin aktivierter Menüs anbietet. Auf Wunsch kann auch eine Liste sämtlicher überhaupt verfügbarer Menüs angeboten werden. Durch Auswahl eines Menüs aus der Liste kann das Menü, über welches die Aktivierung erfolgte, ergänzt oder aber ersetzt werden. Das Ersetzen eines Menüs durch ein anderes Menü kann auch durch Verwendung eines alternativen Mausknopfs bei der Aktivierung eines Fensters erfolgen. Die Menüersetzung soll eine größere Ergonomie in der Bedienung der Oberfläche erzielen, da auf dem Weg durch die Menüstruktur der Oberfläche alle nicht mehr benötigten Fenster bereits durch das Anwählen eines neuen Fensters eliminiert werden; auf diese Weise wird ein typisches Problem fensterorientierter Oberflächen vermieden: Die "Überfüllung" des Bildschirms mit einer großen Menge einander verdeckender und teilweise überlappender Fenster.

Das Aufblenden von Sekundärinformationen wird auch bei allen Eingabelementen unterstützt (siehe dazu Abbildung 3.8). Hierbei wird prinzipiell unterschieden zwischen simulierten Potentiometern und Schaltfeldern:

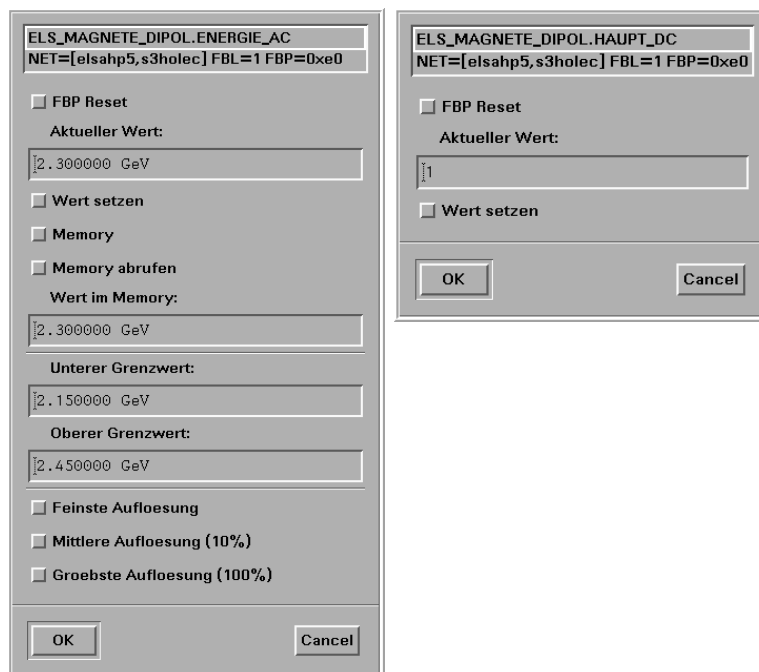


Abbildung 3.8: Verwaltungsbox für simuliertes Potentiometer und Schalter

- Bei Potentiometern wird eine Box aufgeblendet, die die Verwaltung eines einzelnen simulierten Reglers

³ Aus diesem Grund kann eine Vielzahl unterschiedlicher Regler implementiert werden. Das Kontrollsystem erzeugt in der vorliegenden Ausführung aber nur Strich-, Dreiecks- und die beschriebenen "Knopf"-Regelmarken in jeweils frei definierbaren Größen und Orientierungen.

ermöglicht. Im oberen Feld der Box wird der Name des Parameters sowie die angewählte Zuordnungskette für Netzwerkoperationen dargestellt. Falls ein Feldbusprozessor in die Steuerung involviert ist, kann dieser durch Druck der Taste "FBP Reset" neu gestartet werden. Das darunterliegende Feld enthält den aktuell gespeicherten Parameterwert. In dieses Feld kann mittels Tastatur ein neuer Wert eingegeben werden, der dann mit dem darunter befindlichen Knopf appliziert werden kann. Um zu verhindern, daß eine Einstellung verlorenght, kann ein Parameterwert durch Aktivieren der "Memory"-Taste gespeichert und bei Bedarf wieder abgerufen werden. Das zugehörige Memory-Feld zeigt den zuletzt gespeicherten Wert an. Alle gespeicherten Werte werden in einer einheitlichen, fensterübergreifenden Struktur gehalten und sind programmweit verfügbar. Beim Start des Programms werden die aktuellen Parameter-Einstellungen in die Memory-Felder vorgeladen.

Die Abstufung, mit der Wertänderungen auf einen Parameter appliziert werden können, richtet sich nach der definierten Auflösung des Potentiometers. Durch Eintippen von Werten in die Felder für eine untere und obere Schranke kann die Auflösung individuell definiert werden; zusätzlich sind drei Standardeinstellungen wählbar: die minimale Auflösung, eine Auflösung für ein symmetrisches Wertintervall von 10% um den aktuell eingestellten Wert, oder die maximale Auflösung, bei der das Intervall symmetrisch um den aktuellen Wert so eingestellt wird, daß in jeder Richtung exakt fünf Inkrement- bzw. Dekrement-Schritte mit der feinstmöglichen Abstufung angeboten werden.

- Bei simulierten Schaltknöpfen wird neben einer Darstellung des Parameternamens und der Netzwerk-Adressierung ein optionales Feld für den Restart eines Feldbusprozessors angeboten, gefolgt von einem Element zur Modifikation des aktuellen Parameterwertes mittels Tastatur (analog zum Potentiometer).

Die individuelle Konfigurierbarkeit von simulierten Potentiometern und die Möglichkeit der Speicherung von Parameterwerten in einem "Memory" soll eine vereinfachte Bedienung des Systems ermöglichen und zu einer fehlertoleranten Interaktion des Anwenders mit dem Kontrollsystem führen. Durch die Verwendung der Maus und/oder der Tastatur zur Steuerung von Parametern kann jeder Bediener den subjektiv besten Zugang finden. Die mit `csmenu` in der ersten Betriebsphase des Kontrollsystems gemachten Erfahrungen werden im sechsten Kapitel besprochen.

Programme zur Unterstützung der Oberfläche

Neben dem Menü-Interpreter `csmenu` werden noch andere interaktive Programme eingesetzt, die bei Bedarf durch dynamische Elemente eines Menüs aktiviert werden können:

- Das Programm `cspvsdb` dient zur Verwaltung von Betriebszustandsdateien, die für bestimmte ELSA-Einstellungen geladen bzw. gespeichert werden sollen. Eine Einstellung kann komplett oder nur in ausgewählten Teilbereichen gesichert oder geladen werden. Die Sicherung jedes Datensatzes erfolgt in einem reinen Textformat, so daß zur Manipulation (z.B. Suche nach einzelnen Parametern) standardisierte Werkzeuge zur Textverarbeitung eingesetzt werden können. Binärdaten (z.B. Bilder oder Rampvektoren zur Steuerung der Magnete) werden komprimiert in einer Zusatzdatei abgespeichert. Die eigentliche Datensatzdatei enthält dann nur einen Verweis auf einen entsprechenden Eintrag in der Zusatzdatei. Jede Datensatzdatei wird mit einem Kopf versehen, der die allgemeinen ELSA-Betriebsdaten (Energie, etc.) einer konkreten Konfiguration enthält. Dadurch können alle Datensätze nachträglich geordnet und klassifiziert werden. Beim Laden eines Datensatzes kann ein Arbeitsprotokoll ausgegeben werden. Durch Verschieben des Protokollfensters mit der Maus kann der Erfolg oder Mißerfolg beim Laden jedes einzelnen Parameters überprüft werden. Das grafische Erscheinungsbild von `cspvsdb` ist für den Fall einer Ladeoperation in Abbildung 3.9 illustriert.
- Das Programm `cspvsbrowse` dient zur Anzeige eines Datensatz-Inhalts. Nach Selektion einer entsprechenden Betriebszustandsdatei wird diese in einem Fenster der Oberfläche angezeigt. Danach kann dann im Datensatz "geblättert" und nach einzelnen Parametern gesucht werden.

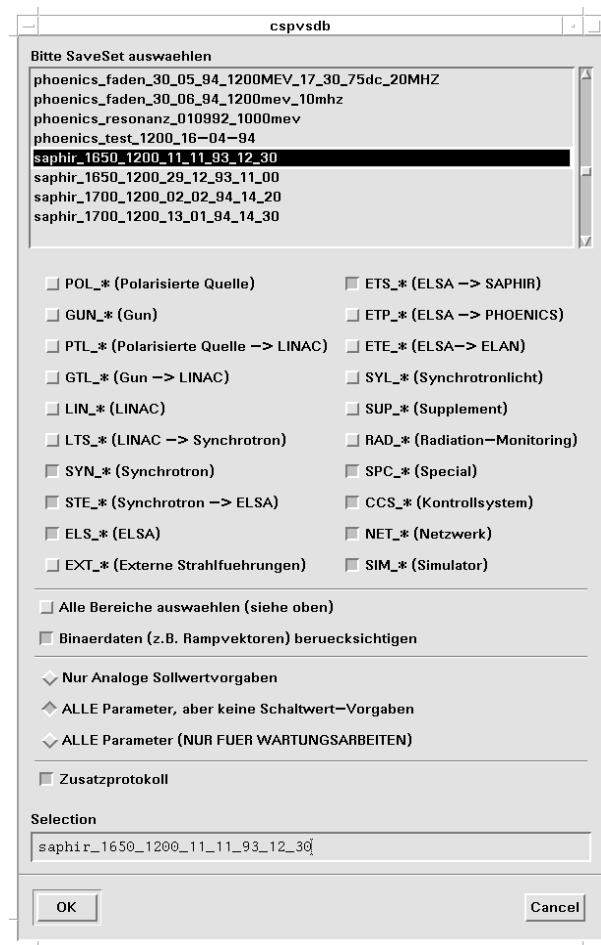


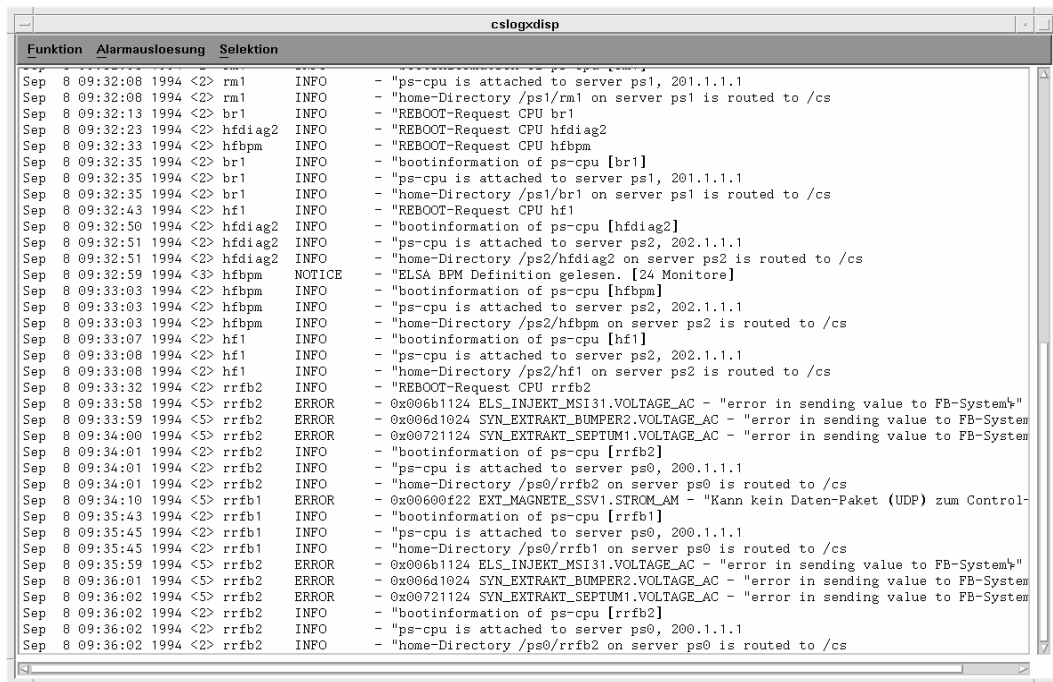
Abbildung 3.9: Ladeoperation mit dem Datensatz-Verwalter `cspvsdb`

Darstellung und Manipulation digitalisierter Bilder

Zur Darstellung und einfachen Manipulation von digitalisierten Bildern wurde ein spezielles Programm `csimg` entwickelt. Da das Kontrollsystem auch matrixwertige Daten verarbeiten kann, können digitalisierte Bilder als normale Parameter geführt werden. Bei der Übergabe eines Parameter-Namens an `csimg` kann die Software die im angegebenen Parameter gespeicherten Daten anfordern und mit verschiedenen Falschfarbendarstellungen, z.B. Graustufen oder in verschiedenen Farbtönen, auf dem Bildschirm eines Kontrollrechners anzeigen. Das Anfordern der Daten geschieht entweder durch direkten Befehl des Operateurs, oder durch eine ereignisorientierte Transaktion, analog zum `csmenu`-Programm. Im letzteren Fall wird das Bild immer dann aktualisiert, wenn sich die zugrundeliegenden Daten geändert haben und dies gemeldet wird. `csimg` wird über entsprechend konfigurierte dynamische Elemente der Oberfläche durch `csmenu` aufgerufen. `csimg` erlaubt einfache Manipulationen und die Vermessung eines angezeigten Bildes. Dazu gehört eine Vergrößerung bzw. Verkleinerung durch Interpolation, eine Aufhellung oder Abdunklung, die Invertierung und die Kontrastverstärkung durch ein unter dem Begriff "Histogrammausgleich" bekanntes Verfahren. Die Position von Bildpunkten kann interaktiv durch Anwählen mittels Maus bestimmt und nach Kalibrationsvorgaben geeignet skaliert werden, um beispielsweise bei der Messung von Strahlprofilen eine Interpretation des dargestellten Bildinhaltes in natürlichen Längeneinheiten (Millimeter o.a.) zu erlauben. Für den Ausdruck auf einem Laserdrucker, die Konvertierung in andere Grafikformate oder die Weiterverarbeitung mit spezieller Software zur digitalen Bildbearbeitung kann `csimg` dafür besonders geeignete Programme direkt aufrufen.

Anzeige von Alarmmeldungen

Der im Kontrollsystem-Kern operierende `cslogman`-Prozeß kann auf Anfrage alle auflaufenden Alarmmeldungen des Kontrollsystems an eine Applikation weiterleiten. Zur Darstellung der Meldungen auf der grafischen Oberfläche und auf normalen, textorientierten Terminals wurden die Programme `cslogxdisp` und `cslogdisp` entwickelt. Das Erscheinungsbild des `cslogxdisp`-Programms ist in Abbildung 3.10 zu sehen.



```
cslogxdisp
Funktion  Alarmausloesung  Selektion
Sep 8 09:32:08 1994 <2> rm1      INFO - "ps-cpu is attached to server ps1, 201.1.1.1
Sep 8 09:32:08 1994 <2> rm1      INFO - "home-Directory /ps1/rm1 on server ps1 is routed to /cs
Sep 8 09:32:13 1994 <2> br1      INFO - "REBOOT-Request CPU br1
Sep 8 09:32:23 1994 <2> hfdiag2  INFO - "REBOOT-Request CPU hfdiag2
Sep 8 09:32:33 1994 <2> hfbpm    INFO - "REBOOT-Request CPU hfbpm
Sep 8 09:32:35 1994 <2> br1      INFO - "bootinformation of ps-cpu [br1]
Sep 8 09:32:35 1994 <2> br1      INFO - "ps-cpu is attached to server ps1, 201.1.1.1
Sep 8 09:32:35 1994 <2> br1      INFO - "home-Directory /ps1/br1 on server ps1 is routed to /cs
Sep 8 09:32:43 1994 <2> hf1      INFO - "REBOOT-Request CPU hf1
Sep 8 09:32:50 1994 <2> hfdiag2  INFO - "bootinformation of ps-cpu [hfdiag2]
Sep 8 09:32:51 1994 <2> hfdiag2  INFO - "ps-cpu is attached to server ps2, 202.1.1.1
Sep 8 09:32:51 1994 <2> hfdiag2  INFO - "home-Directory /ps2/hfdiag2 on server ps2 is routed to /cs
Sep 8 09:32:59 1994 <3> hfbpm    NOTICE - "ELSA BPM Definition gelesen. [24 Monitore]
Sep 8 09:33:03 1994 <2> hfbpm    INFO - "bootinformation of ps-cpu [hfbpm]
Sep 8 09:33:03 1994 <2> hfbpm    INFO - "ps-cpu is attached to server ps2, 202.1.1.1
Sep 8 09:33:03 1994 <2> hfbpm    INFO - "home-Directory /ps2/hfbpm on server ps2 is routed to /cs
Sep 8 09:33:07 1994 <2> hf1      INFO - "bootinformation of ps-cpu [hf1]
Sep 8 09:33:08 1994 <2> hf1      INFO - "ps-cpu is attached to server ps2, 202.1.1.1
Sep 8 09:33:08 1994 <2> hf1      INFO - "home-Directory /ps2/hf1 on server ps2 is routed to /cs
Sep 8 09:33:32 1994 <2> rrfb2    INFO - "REBOOT-Request CPU rrfb2
Sep 8 09:33:58 1994 <5> rrfb2    ERROR - 0x006b1124 ELS_INJEKT_MSI31.VOLTAGE_AC - "error in sending value to FB-System"
Sep 8 09:33:59 1994 <5> rrfb2    ERROR - 0x006d1024 SYN_EXTRAKT BUMPER2.VOLTAGE_AC - "error in sending value to FB-System
Sep 8 09:34:00 1994 <5> rrfb2    ERROR - 0x00721124 SYN_EXTRAKT SEPTUM1.VOLTAGE_AC - "error in sending value to FB-System
Sep 8 09:34:01 1994 <2> rrfb2    INFO - "bootinformation of ps-cpu [rrfb2]
Sep 8 09:34:01 1994 <2> rrfb2    INFO - "ps-cpu is attached to server ps0, 200.1.1.1
Sep 8 09:34:01 1994 <2> rrfb2    INFO - "home-Directory /ps0/rrfb2 on server ps0 is routed to /cs
Sep 8 09:34:10 1994 <5> rrfb1    ERROR - 0x00600f22 EXT_MAGNETE_SSV1.STROM_AM - "Kann kein Daten-Paket (UDP) zum Control-
Sep 8 09:35:43 1994 <2> rrfb1    INFO - "bootinformation of ps-cpu [rrfb1]
Sep 8 09:35:45 1994 <2> rrfb1    INFO - "ps-cpu is attached to server ps0, 200.1.1.1
Sep 8 09:35:45 1994 <2> rrfb1    INFO - "home-Directory /ps0/rrfb1 on server ps0 is routed to /cs
Sep 8 09:35:59 1994 <5> rrfb2    ERROR - 0x006b1124 ELS_INJEKT_MSI31.VOLTAGE_AC - "error in sending value to FB-System"
Sep 8 09:36:01 1994 <5> rrfb2    ERROR - 0x006d1024 SYN_EXTRAKT BUMPER2.VOLTAGE_AC - "error in sending value to FB-System
Sep 8 09:36:02 1994 <5> rrfb2    ERROR - 0x00721124 SYN_EXTRAKT SEPTUM1.VOLTAGE_AC - "error in sending value to FB-System
Sep 8 09:36:02 1994 <2> rrfb2    INFO - "bootinformation of ps-cpu [rrfb2]
Sep 8 09:36:02 1994 <2> rrfb2    INFO - "ps-cpu is attached to server ps0, 200.1.1.1
Sep 8 09:36:02 1994 <2> rrfb2    INFO - "home-Directory /ps0/rrfb2 on server ps0 is routed to /cs
```

Abbildung 3.10: Klassifikation und Anzeige von Alarmmeldungen durch `cslogxdisp`

Beide Programme analysieren die Stufe der empfangenden Meldungen und stellen diese zusammen mit Datum und Uhrzeit formatiert dar. Durch bestimmte Befehle kann der Operateur einzelne Ebenen von der Darstellung ausblenden (z.B. alle Informationsmeldungen). Ebenso kann ein akustisches Signal an- oder abgeschaltet werden.

Die `X Window`-Variante `cslogxdisp` kann im Normalbetrieb durch Ikonisieren "versteckt" werden und benötigt dann keinen nennenswerten Platz auf einem Grafikbildschirm; im Alarmfall aktiviert sich das Fenster automatisch und blendet sich in den Vordergrund auf, so daß alle anderen Fenster überdeckt werden. Dadurch ist sichergestellt, daß keine Alarmmeldung der Aufmerksamkeit des Operateurs entgeht. Diese Funktion kann verschiedenen Alarmklassen zugeordnet oder auch ganz abgeschaltet werden.

4. Timingsystem

Dieses Kapitel behandelt den Aufbau sowie die Hard- und Software-Integration aller Komponenten, die für die zeitliche Ablaufsteuerung sämtlicher durch das Kontrollsystem angesteuerter Einheiten verantwortlich sind. Dieses Zeitsteuersystem wird im folgenden als "ELSA-Timingsystem" bezeichnet.¹ Hierzu wird zunächst — ausgehend von den Anforderungen des Nachbeschleunigungsbetriebs mit möglichst hohem makroskopischen Tastverhältnis — die allgemeine Definition eines Betriebszyklus der Beschleunigeranlagen und seiner einzelnen Phasen eingeführt. Die Aktivierung einer Phase und die korrekte Synchronisation aller Phasen untereinander wird durch den Zyklusgenerator realisiert. Der neu entwickelte Injektionsgenerator ist dabei für die Injektion und die Optimierung der ELSA-Füllstruktur verantwortlich. Eine Einheit zur flexiblen Erzeugung von Diagnosetriggerpulsen ergänzt den Zyklusgenerator und ist speziell auf die Ansteuerung der Strahldiagnosesysteme ausgerichtet. Alle Komponenten des Timingsystems werden über Kontrollsystem-Parameter angesprochen und sind über Regeln programmierbar. Sämtliche dafür notwendigen Berechnungen liegen im Verantwortungsbereich entsprechender "Experten".

4.1 Allgemeine Konzeption

Im alten Timingsystem war ein Betriebszyklus nur durch zwei direkt miteinander verkoppelte Triggerpulse einstellbar und entsprach im wesentlichen dem für den Stretchermodus zu realisierenden Ablaufschema. Die zwei Triggerpulse bestanden aus

1. einem aus dem B_{min} -Signal² abgeleiteten Triggerpuls ("Synchrotron-Trigger"), der — bedingt durch den netzsynchronen Verlauf des Magnetfeldes — mit einer Rate von 50 Hz generiert wird.
2. einem "ELSA-Trigger", der durch einfaches Untersetzen des "Synchrotron-Triggers" in einem Verhältnis N:M (N war die Zahl der Pulse, M die Zahl der "Pausen", d.h. ausgesetzter Pulse) eine grobe Einteilung der Zykluslänge in Vielfache von 20 msec gestattete.

Jeder der zwei Triggerpulse wurde entsprechend der Zahl der anzusteuernenden Endgeräte vervielfacht und durch unterschiedliche Verzögerungen an deren physikalisch motivierte Zeitpunktvorgaben angepaßt. Das System war so konfiguriert, daß die Extraktion aus ELSA mit jedem "ELSA-Trigger" gestartet wurde. Bereits hierdurch wird ersichtlich, daß das für den Nachbeschleunigungsbetrieb erforderliche Schema mit mehreren Injektionen, gefolgt von Nachbeschleunigung und der Extraktion, nicht mit vertretbarem Aufwand zu realisieren war.³

Zur Realisierung aller bislang praktizierten ELSA-Betriebsmodi und zur einfachen Erprobung und Einstellung neuer Betriebsschemata wird jetzt eine universelle Einteilung eines Betriebszyklus der Beschleunigeranlagen in "Phasen" eingeführt, wobei die Forderung nach konzeptioneller Entkopplung aller Phasen innerhalb eines Zyklus zu erfüllen war. Die durch das Timingsystem herzustellende Entkopplung aller Phasen führt

¹Der Anglizismus "Timingsystem" ist im Bereich des Beschleunigerbaus etabliert und beschreibt immer das System für die Zeitablaufsteuerung sämtlicher Beschleunigerkomponenten; in Ermangelung eines deutschen Äquivalentes wurde diese Bezeichnungsweise im vorliegenden Text übernommen.

²Das B_{min} -Signal wird durch einen sog. "Peaking-Strip"-Monitor in einem Magneten des Synchrotrons generiert.

³Durch geschickte Ausnutzung einer programmtechnischen Besonderheit in der Software der beteiligten Feldbusprozessoren konnte allerdings ein vereinfachter Rampbetrieb bereits vor der Inbetriebnahme des neuen Timing-Systems erprobt werden. Das Verfahren beruhte darauf, daß ein Prozessor unter bestimmten Umständen bei der Ausgabe einer Rampe eine Kette schnell aufeinanderfolgender Trigger mit Ausnahme des letzten Triggers ignorierte. Dadurch war die "Markierung" des letzten Injektionstriggers möglich, der dann sofort die Rampe startete. Eine getriggerte Extraktion war aber dann nicht mehr zu realisieren.

dann zu der gewünschten Entkopplung der Einzelabschnitte von Steuerkurven, die im Nachbeschleunigungsmodus generiert werden müssen. Dementsprechend können beispielsweise Steuerkurven für die Magneto-optik unabhängig von solchen Steuerkurven behandelt werden, die zur Durchführung der Extraktion aus ELSA bereitzustellen sind. Das Konzept der Entkopplung einzelner Phasen erlaubt auch die separate Behandlung der Injektion in ELSA, sowie die von allen Phasen unabhängige Bereitstellung universell verwendbarer Diagnostiktrigger, wie in der Aufgabenstellung gefordert.

Das Timingsystem kann konzeptionell in drei wesentliche Bereiche eingeteilt werden:

1. Das System zur Generierung aller Triggerpulse eines Betriebszyklus und seiner Phasen.
2. Das System zur Erzeugung der Injektionstrigger zum Transfer des Elektronenstrahls vom Synchrotron nach ELSA, gemäß dem in der Aufgabenstellung beschriebenen Schema.
3. Das System zur Erzeugung von Triggerpulsen für die Meßsysteme der Strahldiagnose.

Die Struktur eines Zyklus ist in Abbildung 4.1 skizziert und besteht aus den folgenden Phasen:

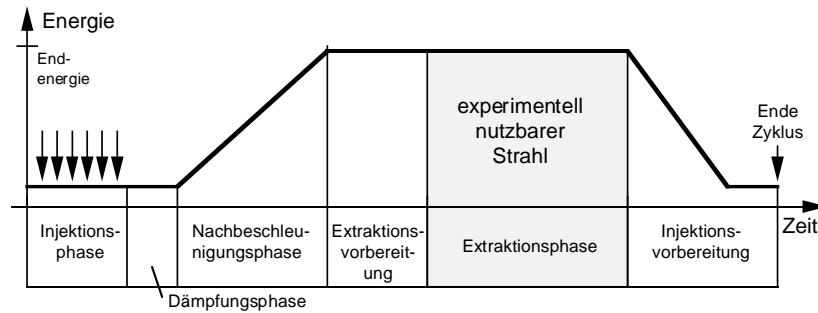


Abbildung 4.1: Die allgemeine Definition eines Betriebszyklus für ELSA

1. *Injektionsphase:*

In dieser Phase wird ELSA mit einer oder mehreren Injektionen (in einem Zeitraster von 20 Millisekunden) aus dem Synchrotron gefüllt. Die Länge der Injektionsphase beträgt mindestens $(N - 1) \cdot 20$ msec, wobei N die Anzahl der Injektionen bedeutet (siehe dazu Kapitel 1, S.10).

2. *Dämpfungsphase:*

Diese Phase wird eingeführt, um das Abdämpfen der transversalen Betatronschwingungen und der longitudinalen Synchrotronschwingungen des Elektronenstrahls zu erlauben.⁴ Die Dämpfungsphase wird noch vor der eigentlichen Nachbeschleunigung eingeführt, damit infolge der Diffusion eine bessere Durchmischung der Teilchen im Phasenraum erzielt wird und der Strahl ein insgesamt kleineres Phasenraumvolumen einnimmt; dies ergibt bessere Startbedingungen für die anschließende Nachbeschleunigung. Die Länge der Dämpfungsphase kann frei gewählt werden und kann unter Umständen auch wegfallen.

3. *Nachbeschleunigungsphase:*

In der Nachbeschleunigungsphase wird die Energie der Teilchen durch ein, verglichen mit der Umlaufzeit in ELSA, langsames Erhöhen des Dipolfeldes angehoben. Dabei muß die Magneto-optik von ELSA entsprechend der Steigerung des Dipolfeldes ebenfalls angepaßt werden. Die Länge der Nachbeschleunigungsphase richtet sich im wesentlichen nach der technisch limitierten maximalen Steigung $|\frac{dI}{dt}|$ der Dipol- und Quadrupolnetzgeräte.

⁴Da der Strahl nicht exakt auf Sollbahnposition eingeschossen werden kann, wird durch den Injektionsprozeß immer eine kohärente Betatronschwingung angeregt. Die Dämpfungszeiten liegen bei einer Energie von 1 GeV bei ca. 120 Millisekunden. Ähnliches gilt für die longitudinalen Schwingungen. Diese bestehen in einem kohärenten Schwingen der Elektronen sämtlicher Bunche um die Phase des stabilen Sollteilchens und werden durch Amplitude und Phasenlage des beschleunigenden Hochfrequenzfeldes beim Einschuß vorgegeben. Auch hier liegen die Dämpfungszeiten im Bereich von etwa 100 Millisekunden. Für eine genaue Beschreibung des Strahlverhaltens nach der Injektion in ELSA siehe [24].

4. *Extraktionsvorbereitung:*

Zur Vorbereitung der Extraktion muß ein Übergang von den Einstellungen der Nachbeschleunigungsphase zu den für die Extraktion ausgewählten optischen Parametern herbeigeführt werden. In dieser Phase werden z.B. die Extraktionssextupole für die langsame Resonanzextraktion auf einen genau definierten Wert gefahren; die verwendeten Netzgeräte können dies nur mit einer maximalen Steigung $\frac{dI}{dt}$ und legen damit eine Randbedingung für die minimale Länge dieser Phase fest.

5. *Extraktionsphase:*

In dieser Phase werden die optischen Eigenschaften von ELSA entsprechend dem gewählten Extraktionsschema so gesteuert, daß das Experiment einen Elektronenstrahl mit möglichst gutem mikroskopischem Tastverhältnis geliefert bekommt. Die Extraktionsphase soll wegen der angestrebten Optimierung des makroskopischen Tastverhältnisses so lang wie möglich sein (vergl. Kapitel 1).

6. *Injektionsvorbereitung:*

Bedingt durch die auf 50 Hz orientierte Auslegung einiger gepulster Netzgeräte der Synchrotron-Extraktion ist es erforderlich, diese Elemente bereits vor der ersten neuen Injektion in ELSA so zu triggern, daß die Ladekreise der beteiligten pulsformenden Netzwerke auf Sollspannung aufgeladen werden können. Anderenfalls wird diese Sollspannung erst nach 4–5 Triggerpulsen⁵ der nächsten Injektionsphase erreicht; der bei den entsprechenden Injektionen transferierte Strahl liegt meistens außerhalb der Orts- und Winkelakzeptanz von ELSA und geht daher größtenteils verloren. Für diese Phase kann die Zeit für das Herunterfahren der in der Nachbeschleunigungsphase zuvor angehobenen Magnetströme dienen. Auch die Länge dieser Phase richtet sich im wesentlichen nach dem erlaubten $|\frac{dI}{dt}|$ der Netzgeräte.

Diese Aufzählung umfaßt alle möglichen Phasen innerhalb eines Zyklus. Das Timingsystem gestattet auch das Weglassen einer oder mehrerer Phasen, außer der Injektionsphase. Dadurch können alle bekannten Betriebsmodi implementiert werden:

- Der Stretchermodus besteht nur aus der Injektionsphase, gefolgt von der Extraktions-Vorbereitung in 0.3 msec und der anschließenden Extraktionsphase mit einer Länge von 19.7 msec.
- Der Nachbeschleunigungsmodus umfaßt alle Phasen, eventuell vermindert um die Dämpfungsphase nach der letzten Injektion.
- Der Speicherringbetrieb besteht nur aus der Injektionsphase und einer Nachbeschleunigungsphase, gefolgt von einer Injektionsvorbereitung nach Ablauf der Speicherzeit.

Darüber hinaus können aber auch neue Betriebsarten erprobt werden, wie beispielsweise ein "gedämpfter Stretchermodus" bestehend aus einer Injektionsphase, der Dämpfphase und einer Extraktionsphase, die für ein gutes makroskopisches Tastverhältnis wesentlich länger ist als die Injektionsphase. Durch die Verwendung des abgedämpften Strahls für die Extraktion kann eventuell eine verbesserte Reproduzierbarkeit der Extraktionsbedingungen erzielt werden.

Zum Starten und Stoppen einer einzelnen Phase der Länge T innerhalb des Betriebszyklus verwendet das Timingsystem definierte Signale, die zu einem Zeitpunkt t erscheinen. Im folgenden wird ein solches Signal mit dem Symbol t gekennzeichnet und der Einfachheit halber "Triggerpuls" genannt. Um unnötigen Hardware-Aufwand (Verkabelung etc.) zu vermeiden, wurde versucht, das eingeführte Schema mit einer möglichst kleinen Zahl voneinander unabhängiger Triggerpulse zu realisieren. Dies ergab die folgende Implementierung (siehe auch Abbildung 4.2):

Alle Triggerpulse sind in ihren Zeitpunkten immer auf den Start des jeweiligen Gesamtzyklus bezogen. Der Zyklus-Trigger t_{cycl} definiert neben dem Start des Gesamtzyklus auch den Start der Injektionsphase; dadurch ist die Erzeugung eines separaten Triggers zum Start der Injektionsphase überflüssig. Der Injektions-Trigger t_{inj} taucht in der Injektionsphase mehrfach auf (entsprechend der eingestellten Zahl N von Injektionen); die Länge T_{inj} der Injektionsphase ist durch N und die gewünschte Länge τ_{damp} der direkt nachfolgenden Dämpfungsphase festgelegt: damit ergibt sich $T_{inj} = (N - 1) \cdot 20 \text{ msec} + \tau_{damp}$. Für die Dämpfungsphase wird kein eigener Triggerpuls verwendet, da deren Start durch $t = (N - 1) \cdot 20 \text{ msec}$ festgelegt ist. Die Länge τ_{damp} der eigentlichen Abdämpfphase muß durch den Zeitpunkt des nachfolgenden sog. Rampstart-Triggers t_{rstart} definiert werden. Der Rampstop-Trigger t_{rstop} gibt das Erreichen der Endenergie an und startet die

⁵Diese Angaben sind Erfahrungswerte, die bereits mit dem alten Kontrollsystem gewonnen wurden.

Vorbereitung der Teilchenextraktion, der Extraktionsstart–Trigger t_{estart} leitet die Extraktion ein. Als vorbereitender Triggerpuls für die nächste Injektionsphase wird der Extraktionsstop–Trigger t_{estop} verwendet. Das Timingsystem führt eine Zeitachse ein, auf der jeder Zyklusbeginn, und damit auch die erste Injektion in ELSA, immer mit $t_{cycl} := 0$ sec festgelegt ist. Die Länge T einer einzelnen Phase kann frei definiert werden. Die Addition der Längen T der vorangegangenen Phasen ergibt jeweils den Triggerzeitpunkt der nächsten Phase.

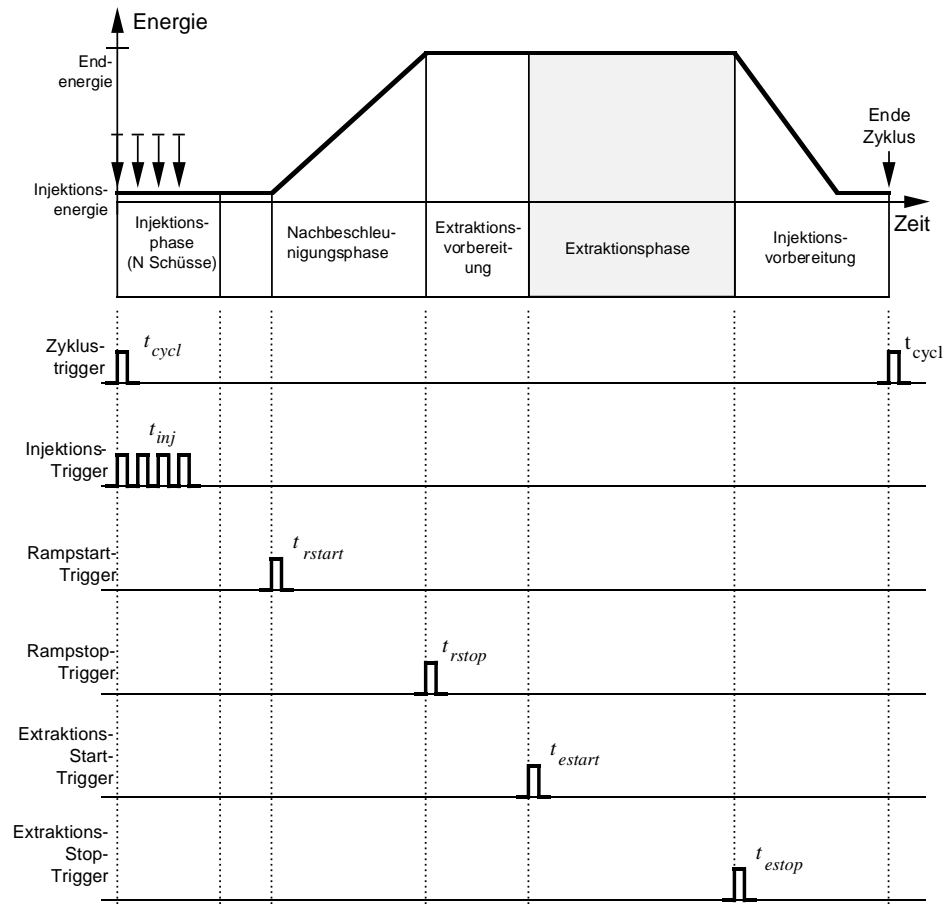


Abbildung 4.2: Die Signale des Timingsystems im Kontext eines einzelnen Betriebszyklus

Zur Verteilung aller Triggerpulse wurden Bündel von jeweils sechs bis acht Koaxialkabeln zu sämtlichen relevanten Komponenten verlegt. Die geographische Wahl der Endpunkte fiel dabei meistens mit den Endpunkten der verlegten Ethernet–Netzwerke zusammen, weil an deren Segmente die **VME**–Prozessoren und über diese wiederum die Feldbusleitungen angekoppelt sind. Da sowohl die **VME**–Einheiten als auch die Feldbus–Prozessoren mit Triggerpulsen versorgt werden müssen, sind dadurch die Endpunkte der Triggerleitungen weitgehend festgelegt. Die Einspeise– und Auskoppelpunkte des Timingsystems sind mit spezieller Elektronik (Pulsformer, Verstärker) bestückt, die eine galvanische Trennung zwischen den Kabelsignalen und den jeweiligen Endpunkten sicherstellen. Für alle Triggerpulse wurde die bei ELSA bereits früher eingesetzte Konvention eingehalten, daß sämtliche Signale **TTL**–Pegel aufweisen und eine Pulsbreite von $200\mu sec$ haben [95]. Alle Kabelbündel bilden zusammen mit den zugeordneten Pulsformern und Verstärkern das ELSA–Triggernetzwerk.

4.2 Zyklusgenerator

Die Erzeugung der einzelnen Triggerpulse für einen Betriebszyklus wird durch den Zyklusgenerator vorgenommen. Ein Blockdiagramm des Systems ist in Abbildung 4.3 angegeben.

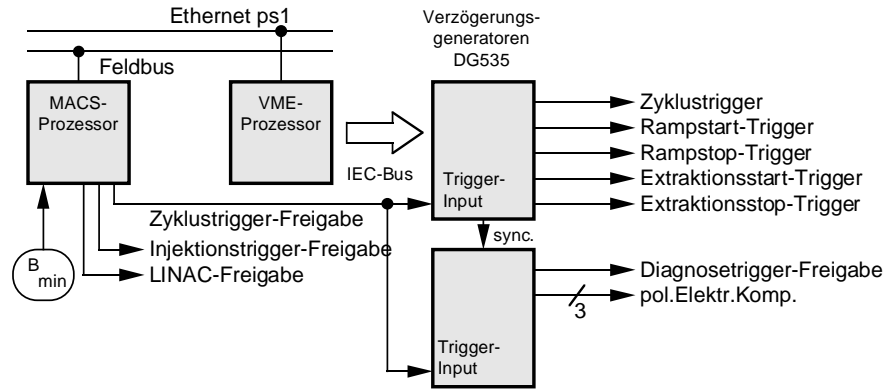


Abbildung 4.3: Schematischer Aufbau des Zyklusgenerators

Der Generator besteht aus den folgenden Hardware-Einheiten:

- Ein Triggeregenerator dient zur Erzeugung einer Kette von Signalen für die Aktivierung des Injektionsgenerators (Injektionsfreigabe) und einem Signal zur Generierung des eigentlichen Zyklus triggers (Zyklusfreigabe). Zusätzlich wird ein Freigabepuls für den Linearbeschleuniger erzeugt, dessen Länge das durch alle Vortrigger der Injektion definierte Zeitintervall abdeckt. Alle Trigger sind synchronisiert zum 50 Hz-Raster des Synchrotrons. Als Generator wird ein **MACS**-Prozessor eingesetzt, der das eingespeiste B_{min} -Signal in die drei beschriebenen Signale umsetzt. Dieser **MACS**-Prozessor wird über eine Feldbusleitung angesteuert.
- Zwei miteinander synchronisierte Verzögerungsgeneratoren,⁶ die beide mit dem Zyklusfreigabesignal des Triggeregenerators angestoßen werden. Jede der beiden Einheiten kann vier voneinander unabhängige, frei programmierbare Verzögerungswerte einstellen, nach deren Ablauf jeweils ein Triggerpuls ausgegeben wird. Es werden erzeugt:

t_{cycl} : Triggerpuls zum Start des Betriebszyklus. Dieser Triggerpuls wird direkt aus dem Eingangssignal abgeleitet (Verzögerungswert 0 sec), berücksichtigt aber Laufzeiteffekte in der Elektronik der Verzögerungsgeneratoren, die auch alle anderen Triggerpulse betreffen.

t_{rstart} : Rampstart-Trigger

t_{rstop} : Rampstop-Trigger

t_{estart} : Extraktionsstart-Trigger

t_{estop} : Extraktionsstop-Trigger

- Ein Signal zur Aktivierung des Diagnosegenerators (Diagnosefreigabe). Dieses System wird im Abschnitt 4.4 beschrieben.
- Drei frei definierbare Pulse, die später zur Steuerung von Korrektormagneten und/oder Quadrupolmagneten eingesetzt werden können, wie zum Nachbeschleunigungsbetrieb mit polarisierten Elektronen geplant.

Der Sollwert jeder Einzelverzögerung kann von weniger als 1 nsec bis zu 9999 Sekunden bei einer — für typische ELSA-Verzögerungswerte — mittleren Auflösung von ca. 1 nsec gewählt werden und ist über den IEC-Gerätebus extern programmierbar. Die Zeitauflösung und die Zeitstabilität hängt dabei vom maximalen eingestellten Verzögerungswert ab. Da bei den verwendeten Verzögerungsgeneratoren die

⁶Eingesetzt werden Einheiten DG535 der Firma "Stanford Research Systems". Jeweils ein Generator verwendet eine intern erzeugte Normalfrequenz, die zur Synchronisierung des zweiten Generators verwendet wird [23].

Länge jedes erzeugten Ausgangspulses von der maximalen Länge sämtlicher eingestellten Verzögerungswerte abhängt, werden Pulsformer eingesetzt, die eine einheitliche Pulslänge von $200 \mu\text{sec}$ herstellen. Über Leitungstreiber werden die erzeugten Triggerpulse an das ELSA-Triggernetzwerk übergeben. Die Verzögerungsgeneratoren sind über ein IEC-Interface an einen VME-Prozessor des ELSA-Prozeßsystems angeschlossen.

4.3 Injektionsgenerator

Der Injektionsgenerator erfüllt im ELSA-Timingsystem zwei Aufgaben:

1. Erzeugung einer Injektionstriggerkette zur Realisierung des in der Aufgabenstellung (siehe Kapitel 1, S.14) beschriebenen Injektionsschemas über mehrfache Injektionen von drei oder sieben Synchrotron-Füllungen.
2. Implementierung eines Systems zur Überwachung des in ELSA während der Injektionsphase akkumulierten Strahlstroms mit der Möglichkeit, die Injektion beim Erreichen eines vorgegebenen Maximalstroms abzubrechen.

Das Konzept zur Erzeugung des geforderten Injektionstriggers beruht auf folgenden Überlegungen: Durch Teilen des in ELSA verwendeten Hochfrequenzsignals (499.673 MHz) durch die Harmonischenzahl von ELSA ($h = 274$) kann eine Frequenz gewonnen werden, die exakt der Umlauffrequenz der Teilchen (ca. 1.823 MHz) entspricht. Hierdurch ist die zeitliche Markierung einer in ELSA injizierten Synchrotron-Füllung möglich, wenn die Injektion jeweils nur bei ganzzahligen Vielfachen dieser Umlauffrequenz erfolgt. Durch das fortlaufende Verzögern nachfolgender Injektionen um jeweils die Länge der zuvor injizierten Synchrotron-Füllung kann erreicht werden, daß eine injizierte Füllung in ELSA zeitlich direkt hinter einer bereits umlaufenden Füllung zu liegen kommt und sich nach drei oder sieben Injektionen⁷ (bzw. Vielfachen davon) eine gleichmäßige ELSA-Füllstruktur einstellt, wenn die Form der Synchrotron-Füllung als annähernd rechteckförmig angenommen werden kann. Das Konzept der sukzessiven Verzögerung bezüglich eines Umlaufs in ELSA ist in Abbildung 4.4 illustriert:

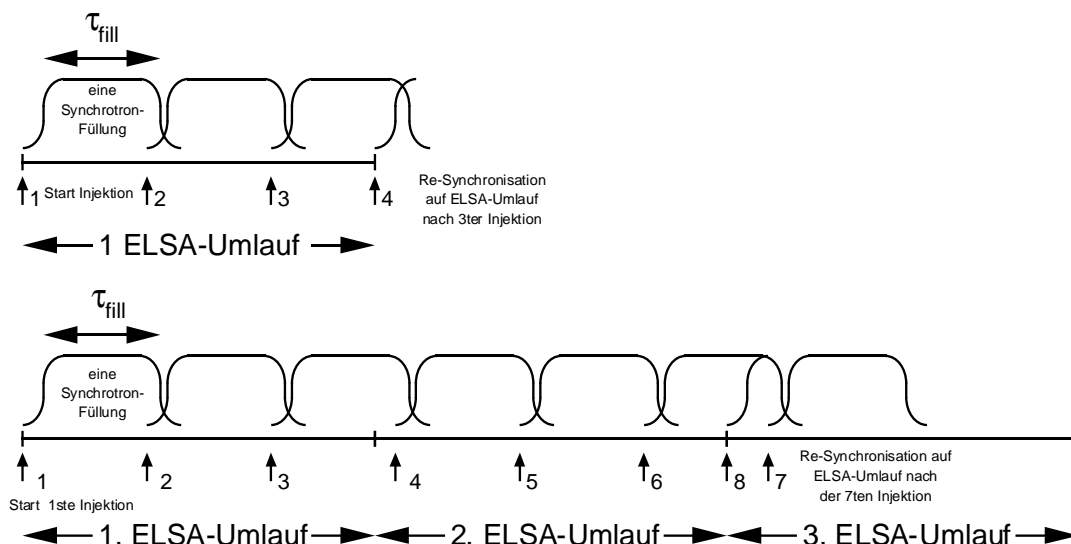


Abbildung 4.4: Injektion in ELSA über drei oder sieben Synchrotron-Zyklen

Damit dieses Verfahren zufriedenstellend funktioniert, muß der Zeitpunkt einzelner Injektionstriggerpulse mit einer reproduzierbaren Genauigkeit von etwa 5 nsec eingestellt werden können, möchte man eine Platzierungsgenauigkeit von etwa einem Prozent, bezogen auf die Ringlänge, erreichen ($T_{ELSA} = 548 \text{ nsec}$). Ein Versatzwert von 5 nsec entspricht für die injizierten Elektronen etwa 1.5 Metern Ortsdifferenz in ELSA. Die

⁷Die Zahl drei bzw. sieben ergibt sich aus dem Umlaufzeitverhältnis $\frac{T_{ELSA}}{T_{Synch}} \approx 7/3$.

geforderte Genauigkeit ist nach unten durch den technisch bedingten und nicht zu vermeidenden Zeitfehler in der Ansteuerung und dem Schaltverhalten der Leistungsschalter (Wasserstoff-Thyratrons) sämtlicher beteiligten Kickermagnete gegeben und kann im Mittel ebenfalls mit etwa 5 nsec abgeschätzt werden [91].

Der prinzipielle Aufbau des entwickelten Injektionsgenerators wird in Abbildung 4.5 skizziert.

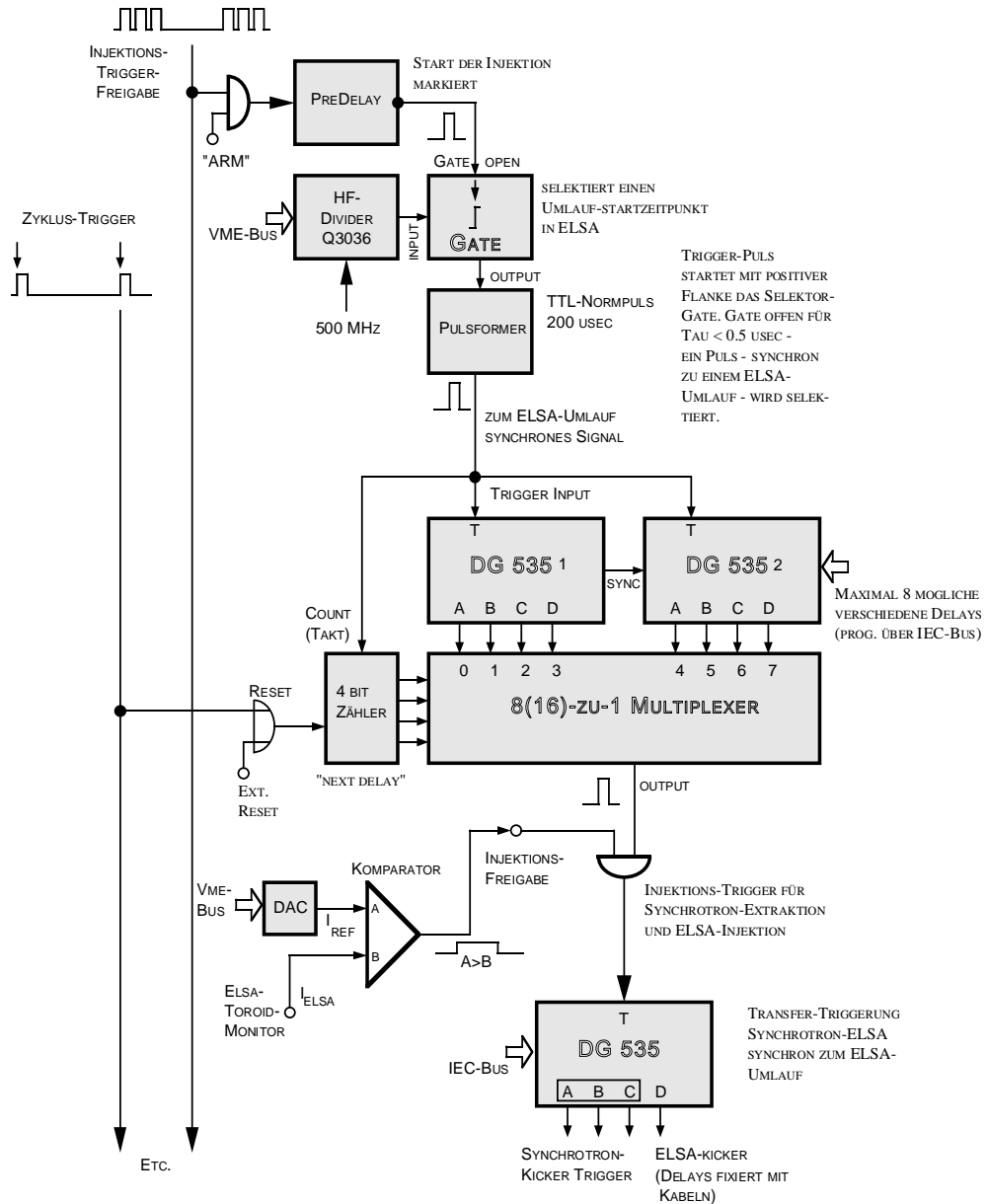


Abbildung 4.5: Aufbau des Injektionsgenerators für die hochfrequenzsynchronisierte Injektion in ELSA

Das zur Steuerung der Synchrotron- und ELSA-Hochfrequenzsysteme generierte HF-Signal (499.673 MHz) wird dem Muttergenerator der Anlage entnommen und auf einen programmierbaren Hochfrequenzteiler gegeben. Dieser teilt die Eingangsfrequenz durch die Harmonischenzahl von 274 und gibt das so erzeugte rechteckförmige Signal auf den Eingang einer Torschaltung ("Gate"). Die Torschaltung erhält ein Freigabesignal direkt durch den vom Zyklusgenerator bereitgestellten Injektionsfreigabepuls (hierbei kann noch eine zusätzliche Verzögerung ("Predelay") nachgeschaltet werden). Das Freigabesignal öffnet die Torschaltung derart, daß der nächste, innerhalb eines Umlaufzeitintervalls von 548 nsec einlaufende Puls aus dem Hochfrequenzteiler selektiert wird. Dieser Puls wird dann über einen Pulsformer parallel auf den Eingang zweier miteinander synchronisierter Verzögerungsgeneratoren DG535 gegeben. Jeder der Generatoren erzeugt vier

Triggersignale, die mit einzelnen, programmierbaren Verzögerungswerten versehen sind. Diese Signale werden auf die Eingänge einer Multiplexerschaltung geführt, die entsprechend der angelegten Selektoradresse eines der Signale für die Weiterverarbeitung auswählt. Die Selektoradresse wird durch einen 4-bit-Zähler erzeugt, der von den empfangenen Injektionsfreigabepulsen getaktet wird. Beim Erreichen eines programmierbaren Endwertes oder beim Start eines neuen Betriebszyklus wird der Zähler zurückgesetzt. Der durch den Multiplexer selektierte Triggerpuls gelangt auf eine Veto-Einheit, welche die endgültige Freigabe der Injektion bestimmt. Die Freigabe erfolgt nur dann, wenn der in ELSA umlaufende, gemessene Strahlstrom unterhalb einer definierten Schwelle (Maximalstrom) liegt. Diese Schwelle wird digital vorgegeben; ein Digital-Analog-Wandler erzeugt zusammen mit einem Komparator das Freigabesignal. Der Meßwert für den in ELSA gespeicherten Strom wird von einem Toroidmonitor mit schmalbandiger Signalverarbeitung ermittelt [6][88]. Beim Erreichen des Maximalstroms wird der Injektionsvorgang abgebrochen und gleichzeitig ein Triggerpuls erzeugt, der das Erreichen des Endwertes anzeigt.⁸ Jeder freigegebene Injektionspuls ist durch die Torschaltung auf die Umlauffrequenz in ELSA synchronisiert. Die Pulse werden auf einen weiteren Verzögerungsgenerator **DG535** geführt, der wiederum die Kicker magnetnetzgeräte der Synchrotron-Extraktion und der ELSA-Injektion direkt ansteuert. Durch dieses Verfahren kann ein Strahltransfer vom Synchrotron nach ELSA immer nur im festen Raster der ELSA-Umlauffrequenz, sukzessive verzögert um die programmierten Werte, durchgeführt werden.

Die in den beiden Verzögerungsgeneratoren einzustellenden Verzögerungswerte richten sich nach der Form und Länge der Synchrotron-Füllung und können über den **IEC**-Bus programmiert werden. Die Generatoren sind mit einem **VME**-Prozessor verbunden, der die notwendige Programmierung der Verzögerungswerte, der Signalpegel, Triggerflanken usw. vornimmt. Der Injektionsgenerator ist durch den Einsatz eines 16 Kanal-Multiplexers auf den Anschluß von maximal vier Verzögerungsgeneratoren ausgelegt.

Zur Programmierung eines Injektionsschemas mit N zeitlich zueinander versetzten Einschüssen in ELSA werden bei einer konkret angenommenen Länge τ_{fill} der injizierten Synchrotronfüllung die folgenden Setzungen durch den zugeordneten **VME**-Prozessor vorgenommen:

- Der HF-Teilungsfaktor wird auf die Harmonischenzahl von 274 gesetzt.
- Der Multiplexer wird für die N Verzögerungswerte τ_i programmiert, indem der Wert N in den Zählerbaustein geladen wird. Dadurch werden bei Durchlauf des Zählers die Selektoradressen 0 bis $N - 1$ des Multiplexers aktiviert.
- Die Werte der Einzelverzögerungen werden auf

$$\tau_i = (i - 1) \cdot \tau_{fill} \quad , \quad i = 1 \dots N$$

eingestellt und in die Verzögerungsgeneratoren via **IEC**-Bus geladen.

Werden nun durch den Zyklusgenerator $M \geq N$ Vortriggerpulse in den Injektionsgenerator eingespeist, so werden die einzelnen τ_i zyklisch von τ_1 bis τ_N durchlaufen: Nach Verarbeitung von jeweils N Pulsen wird der Zähler wieder auf 0 zurückgesetzt; dadurch ergibt sich insgesamt für den k -ten Injektionstrigger der Injektionsphase ein Verzögerungswert τ_k von

$$\tau_k = (k \odot N) \cdot \tau_{fill} \quad , \quad k = 1 \dots M \quad . \quad (4.12)$$

Hierbei bezeichnet " \odot " den Modulo-Operator.

Bis auf die verwendeten Verzögerungsgeneratoren wurden alle Bestandteile der Schaltung auf einem einzigen **VME**-Modul implementiert. Dabei konnten die meisten Einheiten (Vorverzögerung, Zähler, Multiplexer u.a.) in einem programmierbaren Logikchip (ein sogenannter "ASIC") untergebracht werden. Das entwickelte **VME**-Modul enthält neben diesem ASIC den programmierbaren Hochfrequenzteiler, den Digital-Analog-Wandler mit Komparator und die Logik zum Anschluß des **VME**-Busses. Alle Einstellungen des Generators (Vorverzögerung, Teilungsfaktor, Injektionsschema, Stromschwelle, etc.) sind über diesen Bus programmierbar. Das **VME**-Modul ist über die Software des Prozeßsystems mit entsprechenden Servicefunktionen auf eine Gruppe von Kontrollsystemparametern abgebildet. Dadurch ist der Injektionsgenerator von jedem Rechner des Kontrollsystems aus einstellbar.

⁸Dieser Triggerpuls kann z.B. für die Strahl diagnose oder eine schnelle Intensitätsmessung verwendet werden.

4.4 Diagnosegenerator

Die Aufgabenstellung der Strahldiagnose im neuen Kontrollsystem besteht im wesentlichen darin, während eines gesamten Betriebszyklus die Messung wichtiger beschleunigerphysikalischer Parameter weitgehend automatisch durchzuführen. Die hierzu notwendigen Analysen müssen dafür zu ausgewählten Zeitpunkten innerhalb des Zyklus ein- oder mehrfach aktiviert werden können. Die Aktivierung erfolgt dabei jeweils durch einen Diagnosetriggerpuls.

Zur Durchführung strahldiagnostischer Messungen ist es in vielen Fällen erforderlich, den in ELSA gespeicherten Elektronenstrahl zu einer kohärenten Lageschwingung anzuregen, diese Schwingung (die "Strahlantwort") mit dem ELSA-Monitorssystem aufzuzeichnen und geeignet zu untersuchen. Eine Anregung erfolgt üblicherweise mit einem speziell hierzu eingebauten schnellen Magneten, der auch als Diagnosekicker bezeichnet wird. In Ermangelung eines solchen Diagnosekickers bei ELSA wurde die Triggerstufe eines Injektionskickers so erweitert, daß neben den Triggerpulsen des Injektionsgenerators auch ein alternativer Puls eingespeist werden kann, der ebenfalls zum Zünden des Kickermagnetnetzgerätes führt. Da nach Ablauf der Injektionsphase die Kickermagnete in ELSA bis zum Ende des betreffenden Zyklus nicht mehr benötigt werden, kann der umgebaute Kicker als horizontaler Diagnosekicker für ELSA Verwendung finden.⁹ Eine spezielle Verriegelungsschaltung verhindert, daß der Zeitabstand zwischen einem Injektionstrigger und einem Diagnosetriggerpuls ein vorgeschriebenes Minimum unterschreitet und zu einer unerwünschten Durchzündung des Kickernetzgerätes führt.

Neben der Zündung des Diagnosekickers und der Aktivierung der Datenerfassung des Monitorystems kann der Diagnosetriggerpuls als universell verwendbarer Trigger zur Steuerung externer Meßinstrumente (Speicheroszilloskope u.a.) sowie zur Aktivierung bildverarbeitender Systeme (z.B. Kamera und Elektronik des ELSA-Synchrotronlichtmonitors) dienen. Ein durch den Zyklusgenerator erzeugter Freigabepuls wird dazu einem modifizierten Feldbusprozessor zugeführt, der so programmiert ist, daß dieser Freigabepuls die Ausgabe einer zuvor definierten Pulskette aktiviert. Diese Pulskette kann aus einer vorgegebenen Zahl einzelner Rechteckpulse mit individuell programmierbarer Pulslänge bestehen; die Abstände zwischen aufeinanderfolgenden Pulsen sind im Bereich von 0.1 msec bis zu mehreren zehn Sekunden mit einer Genauigkeit von $0.651 \mu\text{sec}$ definierbar. Die Konfiguration einer Kette einzelner Diagnosetrigger kann daher an einen eingestellten Betriebszyklus angepaßt werden; auch die Untersuchung der Übergangsbereiche zwischen einzelnen Phasen, etwa der Übergang von der Nachbeschleunigungs- zur Extraktionsphase, wird so detailliert möglich, da Diagnosepulse in das entsprechende Zeitintervall "dichter" gelegt werden können, wie Abbildung 4.6 illustriert:

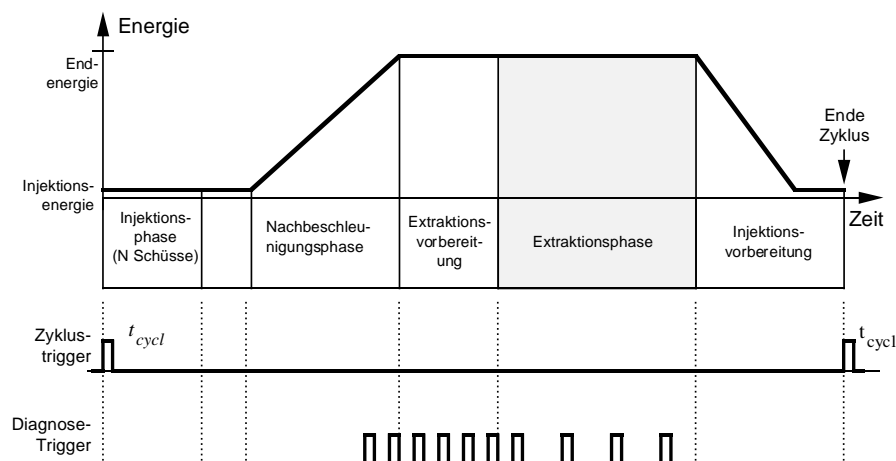


Abbildung 4.6: Diagnosetrigger zur Untersuchung des Übergangs Nachbeschleunigung \rightarrow Extraktion

⁹Ein Diagnosekicker zeichnet sich normalerweise dadurch aus, daß das ablenkende Feld während eines Maschinenumlaufs auf- und wieder abgebaut wird, wobei das realisierte Pulsplateau maximal lang ist. Hierdurch wird sichergestellt, daß alle Teilchen des Strahls einmal eine einmalige, definierte Anregung bekommen. Der verwendete ELSA-Injektionskicker baut sein Feld aber in etwa 450 nsec auf und hat ein Pulsplateau von etwa $1 \mu\text{sec}$. Dadurch kommt es zur Überlagerung einer oder mehrerer Anregungen verschiedener Bereiche des Teilchenstrahls. Eine Korrektur dieses Sachverhalts kann nur durch Einbau eines dedizierten Diagnosekickers erfolgen; dies ist für die Zukunft geplant.

Der Diagnosetrigger wird zusätzlich zu allen anderen Triggerpulsen in das Triggernetzwerk eingespeist und ist somit an allen Endstellen für Applikationen oder Meßaufbauten frei verfügbar.

4.5 Software

Software der Kontrollebene

Für den Zyklusgenerator, den Injektionsgenerator und den Diagnosegenerator wurden Kontrollsystemparameter definiert, die eine Programmierung sämtlicher Komponenten erlauben. Zusätzlich sind Parameter verfügbar, mit denen die Einstellung eines ganzen Betriebsmodus durch wenige Vorgaben auf einer abstrakteren Ebene durchgeführt werden kann. So existieren beispielsweise Parameter, die den Längen einzelner Phasen innerhalb des Maschinenzyklus zugeordnet sind, oder die die verschiedenen Konfigurationen des Injektionsgenerators ("3er"-Schema, "7er"-Schema etc.) widerspiegeln. Die Gesamtstruktur des Timingsystems ist in einem Menü der Kontrollsystem-Oberfläche (Abbildung 4.7) dokumentiert. Das Menü enthält neben den statischen Strukturen auch die meisten betriebsartabhängigen Parameterwerte und kann daher während des Maschinenbetriebs zur Verifikation eines konsistenten Gesamtzustandes herangezogen werden.

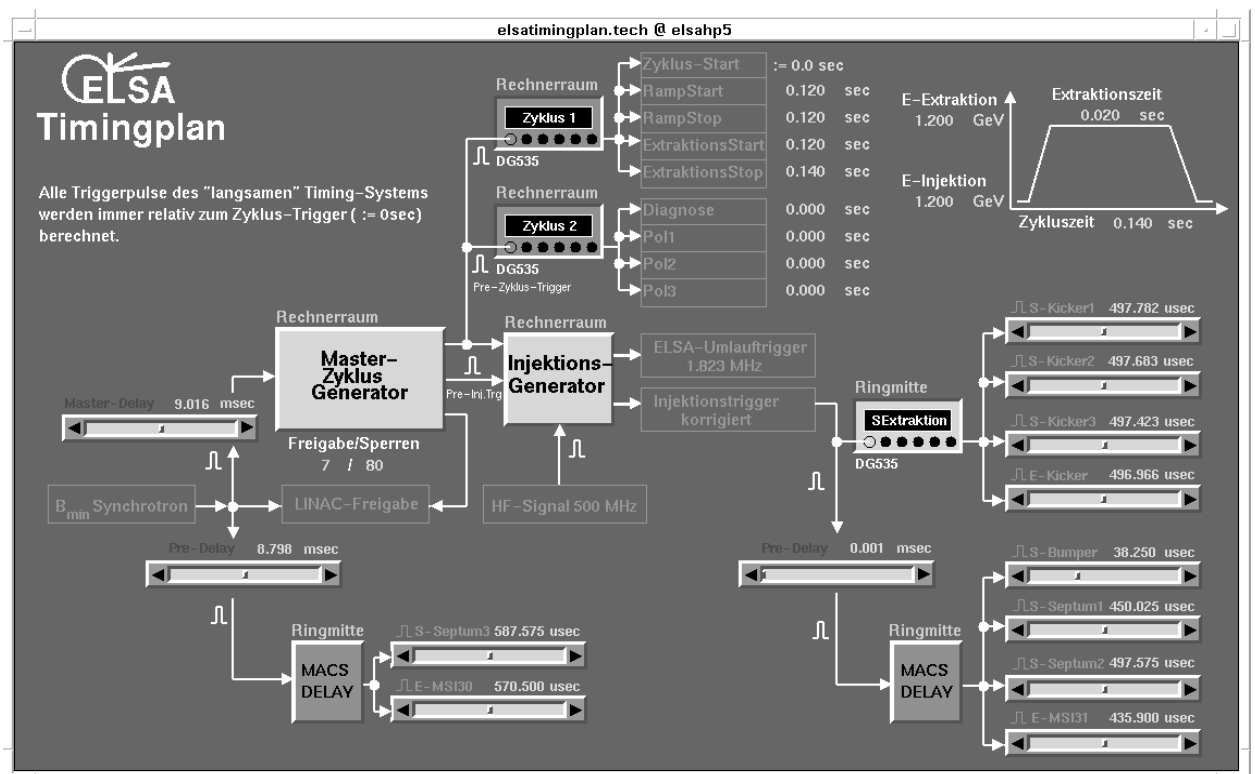


Abbildung 4.7: Hardware-Plan des Timingsystems als Menü der Benutzeroberfläche

Durch die Definition von Regeln (siehe Kapitel 2) werden aus allen Eingabeparametern die Steuergrößen zur Programmierung des Triggersystems abgeleitet (abhängig von relevanten ELSA-Einstellungen wie Injektions- und Endenergie, Betriebsmodus usw.). Die Menge aller hierfür vorgesehener Regeln wird von zwei "Experten" bearbeitet:

- Der **timing**-Experte ist für die Kontrolle des Injektionsgenerators und des Zyklusgenerators verantwortlich. Je nach gewähltem Betriebsmodus errechnet er automatisch alle benötigten Verzögerungswerte und Einstellungen für die VME- bzw. MACS-Prozessoren, die Verzögerungsgeneratoren und die Logik des Injektionsgenerators und lädt die Ergebnisse über das Kontrollsystem in die betreffenden Komponenten.

- Der **diaggen**-Experte berechnet, ausgehend von einem eingestellten Betriebsmodus, alle Daten zur Erzeugung einer Diagnosetrigger-Pulskette (gesteuert durch Parameter, die das System entweder aus anderen Betriebseinstellungen ableitet oder die der Operateur vorgibt). Die Daten werden an den Zyklusgenerator und den Diagnosegenerator übermittelt und werden mit dem Start eines Betriebszyklus durch den Zyklustrigger aktiv.

Alle Einstellungen können durch den **timing**-Experten zur Absicherung einer einmal gefundenen Konfiguration "eingefroren" werden, was versehentliche Änderungen durch manuelles Eingreifen eines Operateurs verhindert.

Die Einstellung des Triggersystems geschieht über entsprechende Menüs der Benutzeroberfläche. Als Beispiel ist hier das Menü zur Ablaufsteuerung des ELSA-Nachbeschleunigungsmodus (dem "Boostermodus") in Abbildung 4.8 zu sehen.

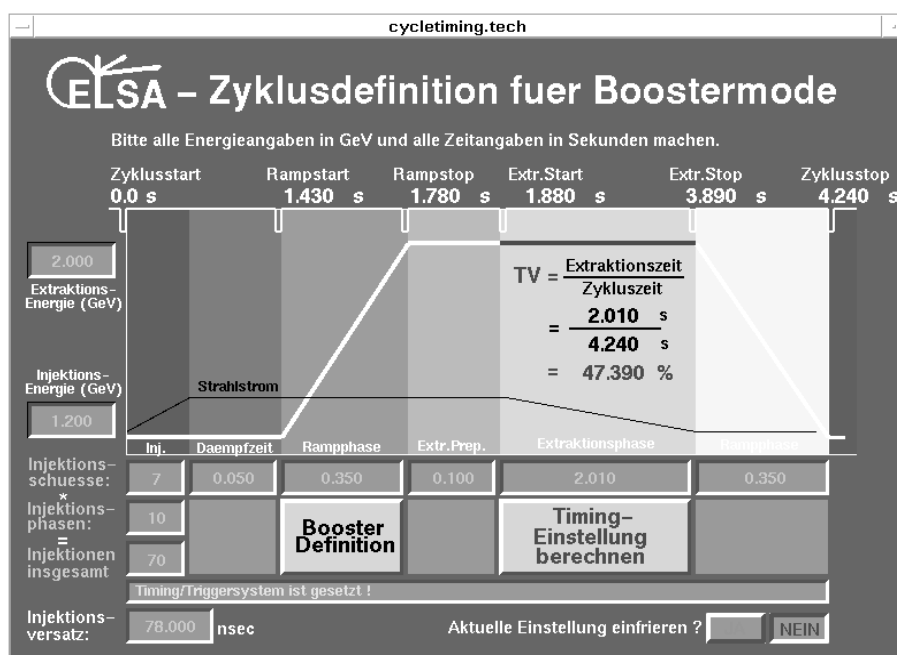


Abbildung 4.8: Menü für die Zyklusdefinition im Nachbeschleunigungsbetrieb

Zur Programmierung des Triggersystems für den Nachbeschleunigungsbetrieb muß ein Operateur lediglich die folgenden Vorgaben bereitstellen:

- *Injektionsschema* (m, N): Korrektur der Füllung in ELSA durch insgesamt ($m \cdot N$) Pulse, wobei N die Anzahl der in ELSA anzugliedernden Synchrotron-Füllungen bedeutet (im Beispiel: 7) und m die Anzahl der Wiederholungen dieses Schemas (im Beispiel: 10) ist.
- *Zeitintervalle*: Die den einzelnen Phasen eines Zyklus entsprechenden Intervallvorgaben. Soll ein Abschnitt weggelassen werden, kann dies durch Angabe eines Wertes von 0 sec erfolgen.
- *Zusatzinformationen*: Die Injektions- und Endenergie für die Nachbeschleunigung.

Alle Vorgaben werden untereinander auf Konsistenz überprüft, so daß Fehlbedienungen weitgehend ausgeschlossen werden. Durch Mausklick auf die Fläche "Timing-Einstellung berechnen" wird das Timingsystem für die Nachbeschleunigung programmiert und der Betriebszyklus gestartet.

Timing-Ereignisse im Kontrollsystem

Das Timingsystem stellt nicht nur Pulse für die direkte Ansteuerung der Endgeräte zur Verfügung, sondern gestattet auch den "Anschluß" von Applikationen in der Prozeß- und Kontrollebene. Dies ist besonders für

Aufgaben der Strahldiagnose wesentlich, damit sich die entsprechenden Rechenprogramme auf den Ablauf eines Betriebszyklus synchronisieren können.¹⁰

Das ELSA-Triggernetzwerk verteilt alle Triggerpulse geographisch zu den Endgeräten oder Rechereinheiten des Prozeß- bzw. Feldbussystems. Um einer beliebigen Applikation der Prozeßebene unter dem **VxWorks**-Betriebssystem Zugriff auf verschiedene Trigger zu gestatten, wird in den betroffenen **VME**-Crates ein Unterbrechungsgenerator eingesetzt. Dieser Generator besteht aus einem speziellen **VME**-Modul, welches mit Triggerpulsen belegt wird. Es wird so programmiert, daß jeder einlaufende Triggerpuls mit einer auswählbaren Flanke eine Unterbrechungsanforderung auf dem **VME**-Bus mit einer bestimmten Priorität auslöst. Diese Unterbrechung wird mit garantierter maximaler Reaktionszeit durch einen **VME**-Prozessor ausgewertet. Je nach Triggerpuls werden programmierbar verschiedene Unterbrechungsrouitinen angesprungen. Die entwickelte Software macht sich diese Unterbrechungsrouitinen zunutze, um wiederum Softwaresignale an angemeldete Benutzerprogramme weiterzugeben. Ein solches Programm kann sich für einen oder mehrere ELSA-Trigger "anmelden" und jeweils eine Aktionsliste mitgeben, die alle auszuführenden Tätigkeiten anstößt, falls ein entsprechendes Signal empfangen wird. Die Reaktionszeit des Systems auf ein solches sog. "Timing-Ereignis" wurde gemessen liegt im Bereich weniger Mikrosekunden.

Eine Gruppe von Kontrollsystemparametern ist den einzelnen Phasen innerhalb eines Betriebszyklus derart zugeordnet, daß eine fortlaufende Nummer in den entsprechenden Parameter eingetragen wird, sobald das Timingsystem den Starttrigger zur Aktivierung der jeweiligen Phase erzeugt. So wird beispielsweise ein "Extraktionsstart-Parameter" beschrieben, wenn der Triggerpuls zum Start der Extraktion erzeugt wird. Durch den Schreibzugriff auf den Parameter wird eine Transaktion im Kontrollsystem angestoßen; der Wert des Parameters wird an die Kontrollebene übermittelt und von dort wiederum bei Bedarf an die Einheiten der Prozeßebene weitergeleitet. Durch diesen Mechanismus sind alle Software-Komponenten des Kontrollsystems mit "Timing-Ereignissen" versorgt.¹¹ In der Kontrollebene können sich beliebige Applikationen an die Triggerparameter anmelden und benachrichtigt werden, wenn eine Wertänderung erkannt wird, entsprechend dem im zweiten Kapitel vorgestellten Prinzip ereignisorientierter Transaktionen. Der implementierte Mechanismus zur Verteilung der "Timing-Ereignisse" hat im Gegensatz zur **VME**-lokalen Lösung keine Echtzeiteigenschaften, da das verwendete Netzwerkmedium wegen des Ethernet-Protokolls kein deterministisches Verhalten, d.h. definierte maximale Reaktionszeiten, garantieren kann. Er kann aber insbesondere bei langen Zykluszeiten für eine grobe zeitliche Abstimmung von rechnerübergreifenden Aufgaben innerhalb der Kontroll- und Prozeßebene verwendet werden.

¹⁰Die Erfassung und numerische Bearbeitung von Strahllagedaten während der Injektion ist z.B. nur über den Injektionstrigger aktivierbar.

¹¹Unterschreitet der Zeitabstand zwischen zwei solchen Ereignissen ein definiertes Minimum, so wird der Transport der Ereignisse ausgesetzt, um das Kontrollsystem nicht zu sehr zu belasten. Im reinen Stretcherbetrieb werden ebenfalls keine solchen Ereignisse generiert.

5. Kontrolle, Simulation und Strahldiagnose für die Nachbeschleunigung in ELSA

In den vorangegangenen Kapiteln wurden die grundlegenden Hardware- und Software-Bestandteile des neuen ELSA-Kontrollsystems beschrieben, welche zur Realisierung sämtlicher Betriebsmoden miteinander kooperieren müssen. Um die an das neue Kontrollsystem gestellten Anforderungen zu erfüllen, müssen wesentliche Software-Komponenten mit beschleunigerphysikalischer "Intelligenz" ausgestattet werden. Hierzu gehören vor allem die für jede Betriebsphase erforderlichen magnetoptischen Berechnungen, die Methodik der Nachbeschleunigung in ELSA und die Modellierung sowie die Steuerung der Teilchenextraktion mit dem Ziel eines optimierten makroskopischen und mikroskopischen Tastverhältnisses. Entsprechend der in der Einleitung motivierten Aufgabenteilung ist der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit die Entwicklung von Methoden zur Realisierung und Verifikation der Nachbeschleunigung in ELSA.

Das folgende Kapitel beschreibt die Realisierung der Nachbeschleunigung und der zur Überwachung und Optimierung der Rampphase in ELSA benötigten Strahldiagnostik mit den Mitteln des neuen Kontrollsystems. Ausgehend von einer Beschreibung der Konzeption aller erforderlichen magnetoptischen Berechnungen werden die Verfahren zum Erzeugen der zeitvariablen Steuergößen für die Magnetoptik und das Hochfrequenzsystem erläutert. Eine empirische Überprüfung der Berechnungen kann im Betrieb durch spezielle Methoden der Strahldiagnostik erfolgen. Das zu diesem Zweck aufgebaute Echtzeit-Spektralanalysesystem wird in der zweiten Hälfte des Kapitels besprochen. Eine Beschreibung des Zusammenwirkens aller Komponenten bei der Einstellung des Nachbeschleunigungsbetriebs schließt das Kapitel ab.

5.1 Implementierung der magnetoptischen Berechnungen

5.1.1 Berechnungsverfahren und Eichtabellen

Eine wesentliche Aufgabe des neuen Kontrollsystems ist die Implementierung aller magnetoptischen Berechnungen, die beschleunigerphysikalische Größen (Energie, Arbeitspunkte, usw.) in daraus abgeleitete Steuergrößen (Ströme für Dipole und Quadrupole, usw.) umsetzen.

Berechnungen der Stromwerte für die Dipol-Magnete

Im Falle der Dipolmagnete ist die Berechnung des für eine Energie E_0 in ELSA einzustellenden Erregerstroms I für den gesamten Energiebereich bis 3.5 GeV gefordert. Dazu müssen bekannt sein:

1. *Energie-Eichung* $E(B)$:

Die aufgrund der Synchrotron-Beziehung $p_0 = eB\rho$ bei Berücksichtigung der nur stückweise definierten Dipolmagnetfelder in ELSA zu erfüllende Beziehung wird bei vorgegebener Sollenergie $E_0 = \frac{c}{\beta}p_0$ durch

$$\oint_s \frac{1}{\rho(s)} ds = \frac{ec}{E_0} \oint_s B(s) ds \quad (5.13)$$

vorgegeben ($\beta \approx 1$). Hierbei stellt ρ den Ablenkradius in den Dipolmagneten und $B(s)$ das Dipolmagnetfeld dar. Die Koordinate s läuft über den gesamten ELSA-Ringumfang. Das zur Einstellung einer Energie E_0 erforderliche ablenkende Magnetfeld B_0 läßt sich daraus abgeleitet für die konkrete ELSA-Optik bei gegebenen Feldlängen und Ablenkradien aller Dipolmagnete durch

$$B_0 [Tesla] = 0.300707 Tesla GeV^{-1} \cdot E_0 [GeV] \quad (5.14)$$

berechnen. Dieser Eichfaktor wurde, ausgehend von theoretischen Werten, in der ersten Inbetriebnahmephase von ELSA an das reale Verhalten der Maschine angepaßt und bereits im alten ELSA-Kontrollsystem verwendet.

2. Magnetfeld-Eichung $B(I)$:

Die Bestimmung der Abhängigkeit $B(I)$ für die ELSA-Dipole erfordert eine genaue Vermessung der Magnete für alle Ströme, die den Energiebereich bis 3.5 GeV abdecken. Da diese Prozedur relativ aufwendig ist, wird der im neuen Kontrollsystem eingeschlagene Lösungsweg in den folgenden Abschnitten genauer erläutert.

Für die Dipolmagnete gab es nur eine lineare Strom-Magnetfeld-Eichung bis zu einer äquivalenten Energie von etwa 2.4 GeV, ohne ausreichende Berücksichtigung von Sättigungseffekten [55].¹ Aus diesem Grunde wurde das Feld der Dipolmagnete neu ausgemessen, um eine verbesserte Eichung zu erhalten. Dazu wurde die Vakuumkammer in einem ausgewählten Magneten entfernt und eine NMR-Sonde so eingebracht, daß das Probenmaterial genau auf der Sollposition des Strahls plazierte war. Durch Vermessung des NMR-Resonanzsignals konnte für einen zuvor eingestellten Strom I_k das Ablenkkfeld B_k mit einem relativen Fehler von weniger als $\frac{\Delta B}{B} = 10^{-5}$ bestimmt werden. Vor jeder Messung wurde mehrfach ein Normierungszyklus durchlaufen, um Hystereseeffekte weitgehend auszuschließen und die Reproduzierbarkeit der Messung zu gewährleisten. Ein solcher Zyklus bestand in der Wiederholung von dreiecksförmigen Steuerkurven für den Strom, wobei der jeweils eingestellte Spitzenwert der Dreiecksfunktion, ausgehend vom technisch machbaren Maximalwert von ca. 3300 Ampere, von Kurve zu Kurve bis zum Wert von 0A abnahm. Ein solcher Normierungszyklus entspricht dem Durchfahren der Magnethysteresis im ersten Quadranten des $B(I)$ -Diagramms mit abnehmender Amplitude. Die Gesamtheit der N gewonnenen Meßwerttupel $\{B_k(I_k), k = 1 \dots N\}$ wurde zur Erstellung einer entsprechenden Eichkurve verwendet.²

Die Erzeugung einer geeigneten Eichfunktion $B(I)$ für die ELSA-Dipolmagnete muß sich an der technisch vorgegebenen Einstellgenauigkeit des Dipolstroms orientieren. Man fordert sinnvollerweise, daß die Genauigkeit der Eichkurve mindestens die Ansteuergenauigkeit des Dipolstroms widerspiegelt. Diese Genauigkeit ist durch die Auflösung des im Stromregelkreis verwendeten Digital-Analog-Wandlers (14 Bit) gegeben und beträgt

$$\frac{\Delta I}{I} \approx \frac{1}{2^{14} - 1} \approx 6.1 \cdot 10^{-5} . \quad (5.15)$$

Dies entspricht einem minimalen Magnetfeldschritt von $\Delta B \approx 6.6 \cdot 10^{-5}$ Tesla. Der maximal zulässige absolute Fehler $\Delta B^{(eich)}$ eines aus der Eichfunktion für ein gegebenes I gewonnenen Magnetfeldwertes B muß also nach oben begrenzt werden:

$$|\Delta B^{(eich)}(I)| \leq \epsilon_B := 6.6 \cdot 10^{-5} \text{ Tesla} . \quad (5.16)$$

Die Auswertung der NMR-Daten $B_k(I_k)$ wurde in der folgenden Weise durchgeführt:

1. Zunächst wurde der lineare Bereich der $B(I)$ -Funktion ermittelt. Dazu wurde ein linearer Fit für einen Menge von Meßpunkten $B_k(I_k)$ berechnet, wobei die Menge der Meßpunkte ausgehend vom kleinsten Stromwert $I_k^{(min)}$ in Richtung ansteigender Ströme immer mehr Tupel $B_k(I_k)$ umfaßte. Für jeden Fit wurde die Güte des Fits und maximale Abweichung der Meßwerte von der berechneten Geraden ermittelt. Die Abweichungen wurden mit ϵ_B verglichen: Für den Strombereich bis 2100 A lagen die Abweichungen immer unterhalb von ϵ_B , bei Endströmen von $I > 2100$ A konnte ein signifikantes Anwachsen der Abweichungen über ϵ_B hinaus beobachtet werden, begleitet durch eine rapide abnehmende Fitgüte. Dieses Verhalten läßt auf Sättigungseffekte im Magneten schliessen und macht eine getrennte Behandlung des Bereichs $I > 2100$ A notwendig.
2. Für den ermittelten Sättigungsbereich (s.o.) wurden verschiedene Polynomansätze zur Modellierung von $B(I)$ gefittet und die damit ermittelten Abweichungen von den Meßwerten untersucht. Es ergab sich, daß kein einfaches Polynom-Modell eine zufriedenstellende Beschreibung der Funktion $B(I)$ für $I > 2100$ A ermöglicht. Aus diesem Grund wurde eine Spline-Interpolation berechnet, die die Meßwerte exakt beschreibt. Anschließend wurde für alle $I < 2100$ A durch den linearen Fit und für

¹Der Bereich war deshalb auf 2.4 GeV eingeschränkt, weil zum Zeitpunkt der Eichmessung keine ausreichend hohen Ströme $I \geq 2600$ A erzeugt werden konnten, um das Verhalten $B(I_{dip})$ im Sättigungsbereich genau zu bestimmen.

²Die Messung und die Steuerung der Normierungszyklen wurden mit EPOS durchgeführt. Das dazu entwickelte Programm wickelt die gesamte Prozedur automatisch ab und gestattet die Analyse der gewonnenen Daten.

alle $I \geq 2100$ A durch die Spline-Interpolation mit ein gemeinsamer Datensatz erzeugt und durch erneute Interpolation mit vorgeschaltetem Ausgleichsverfahren³ in eine Eich-tabelle umgerechnet, die 3300 Stützpunkte (ein Magnetfeldwert pro Ampere) enthält. Dieses Verfahren wurde deshalb eingesetzt, weil durch die gleitende Wichtung der Übergangsbereich vom linearen Verhalten zur Sättigung ausreichend glatt modelliert werden kann; bei der Verwendung zweier separater Fit-funktionen ergab sich das Problem, stetige Anschlußbedingungen herzustellen, ohne die Güte der Fits schlechter werden zu lassen.

Für das Kontrollsystem wurde zur Auswertung der generierten Eich-tabelle ein Satz von Funktionen programmiert, der durch lineare Interpolation auf dem Raster $\Delta I = 1$ A eine Berechnung von Magnetfeldwerten für Ströme und umgekehrt realisiert. Diese Funktionen bilden zusammen mit der Energieeichung die Basis für die Einstellung der Maschinenenergie in allen Betriebsmodi. Die Verifikation der Eich-tabelle wurde durch eine Untersuchung der Residuen $\Delta B^{(eich)}$ vorgenommen, die sich bei Vorgabe der in der NMR-Messung eingestellten Stromwerte I_k und der dafür berechneten Magnetfeldwerte $B^{(eich)}(I_k)$ im Vergleich mit den gemessenen Magnetfeldwerten B_k ergaben:

$$\Delta B^{(eich)} = B^{(eich)}(I_k) - B_k(I_k) . \quad (5.17)$$

Das Ergebnis ist in Abbildung 5.1 graphisch aufgetragen, die Residuen liegen vom Betrag alle unterhalb der geforderten Genauigkeit von $\epsilon_B = 6.6 \cdot 10^{-5}$ Tesla.

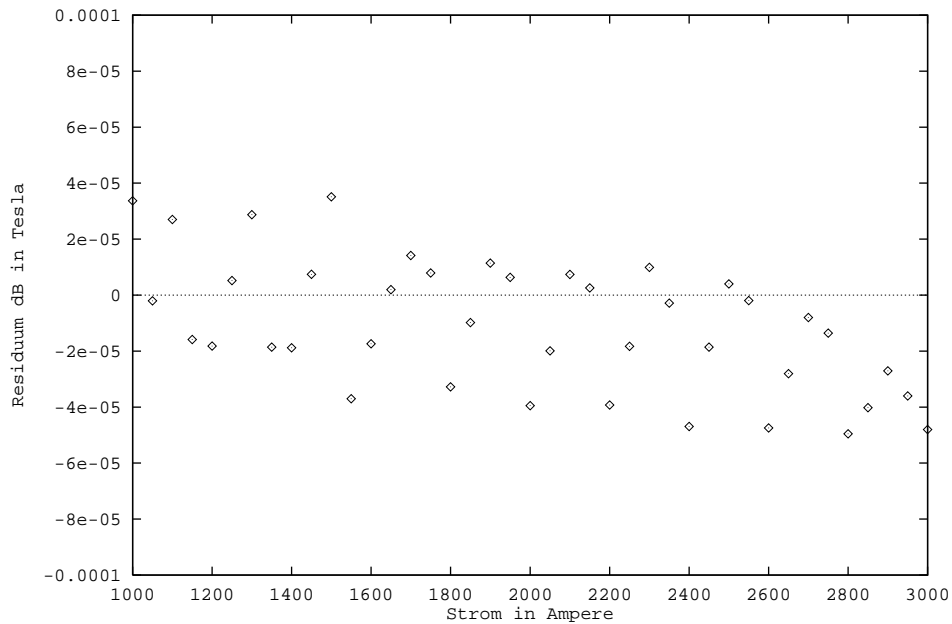


Abbildung 5.1: Residuen der Eichfunktion $B(I)$ für die ELSA-Dipole

³Bei dem verwendeten Ausgleichsverfahren wird jeder Wert B_k durch das gewichtete Mittel \bar{B}_k aller B_k -Werte eines "Datenfensters" gemäß

$$\bar{B}_k = \frac{\sum_{i=-m}^{i=+m} g_i B_{k+i}}{\sum_{i=-m}^{i=+m} g_i}, \quad k = 1 \dots N$$

ersetzt, wobei die Fensterbreite durch $2m + 1$, $m \ll N$ Punkte gegeben ist. Die Wichtungskoeffizienten g_i sind so gewählt, daß ein Wert B_{k+i} mit zunehmendem $|i|$ schwächeren Einfluß hat.

Berechnung von Fokussierungsstärken und Strömen für die Quadrupole

Die fokussierenden Eigenschaften des Magnetsystems werden durch den horizontalen und vertikalen Arbeitspunkt charakterisiert. Ausgehend von einem Arbeitspunktpaar (Q_x, Q_z) müssen die Fokussierungsstärken der beiden Quadrupolfamilien und daraus wiederum die zu applizierenden Stromwerte I_{QF}, I_{QD} für die Quadrupolmagnete ermittelt werden. Die Fokussierungsstärke k ist dabei vom Teilchenimpuls p_0 abhängig definiert als

$$k := \frac{e}{p_0} \frac{\partial B_z}{\partial x} = -\frac{e}{p_0} \frac{\partial B_x}{\partial z} \quad (5.18)$$

und läßt sich über die Magnetfeldgradienten $B' = \frac{\partial B_{z,x}}{\partial(x,z)}$ der Quadrupolmagnete wie folgt in die "natürlichen" ELSA-Einheiten umrechnen:

$$k_{F,D} [m^{-2}] = \kappa \frac{B'_{F,D} [Gm^{-1}]}{E_0 [GeV]}, \quad \kappa = 2.998 \cdot 10^{-3} GeV/G \cdot m. \quad (5.19)$$

Die von M. Zimmer im Rahmen einer Diplomarbeit ermittelten Eichfunktionen $B'_F(I_{QF})$ und $B'_D(I_{QD})$ (siehe [99]) werden im neuen Kontrollsystem für die Berechnung der Quadrupolströme aus gegebenen Fokussierungsstärken k verwendet. Diese Funktionen sind einfache lineare oder quadratische Ansätze und liegen getrennt für den linearen Bereich und den Sättigungsbereich für Ströme $I_{QF,QD} > 550 A$ vor:

$$0 A \leq I_{QF,QD} < 550 A \quad : \quad |B'_{F,D}| = a_1 + a_2 I_{QF,QD}, \quad (5.20)$$

$$550 A \leq I_{QF,QD} < 900 A \quad : \quad |B'_{F,D}| = b_1 + b_2 I_{QF,QD} + b_3 I_{QF,QD}^2. \quad (5.21)$$

Hierbei sind die korrekten Anschlußbedingungen bei $I_{QF,QD} = 550 A$ gewährleistet. Die Koeffizientensätze $\{a_k\}$ und $\{b_k\}$ sind im Kontrollsystem in einer Konfigurationsdatei gespeichert. Entsprechend programmierte Funktionen stellen mittels der Beziehung 5.19 die Abbildungen zwischen k und I her.

Zur Abbildung der Arbeitspunkte auf die dafür einzustellenden Fokussierungsstärken wird eine Funktion benötigt, die aus einem Arbeitspunktpaar (Q_x, Q_z) die Werte für k_F, k_D mit möglichst guter Auflösung bestimmt. Zur Implementierung dieser Abbildung werden im neuen Kontrollsystem zwei alternative Wege eingeschlagen:

1. Modellierung von k anhand der theoretischen ELSA-Optik:

Durch Simulationsrechnungen kann man für die konkret vorgegebene ELSA-Optik die Werte k_F und k_D für ein gegebenes Arbeitspunktpaar Q_x, Q_z berechnen. Dies wurde für ein Intervall $Q_{x,z} = [4.20, 4.98]$ mit einer Schrittweite von $\Delta Q_{x,z} = 0.02$ durchgeführt. Dadurch ergibt sich eine schachbrettartige Abdeckung des durch Q_x und Q_z definierten ELSA-Arbeitspunktbereiches. Für jedes Arbeitspunktpaar dieser Menge wurden die theoretischen Fokussierungsstärken ermittelt und als Funktion der Q -Werte abgespeichert. Dadurch ergeben sich zwei auf dem Arbeitspunktgitter $Q_x^{(i)}, Q_z^{(j)}$ definierte " k -Matrizen"

$$k_F^{(ij)} = k_F(Q_x^{(i)}, Q_z^{(j)}), \quad k_D^{(ij)} = k_D(Q_x^{(i)}, Q_z^{(j)}) \quad (5.22)$$

zur Bestimmung von k , die in einer Konfigurationsdatei des Kontrollsystems abgespeichert sind. Die Berechnung neuer Werte k_F, k_D erfolgt bei einem einzustellenden Arbeitspunktpaar durch bilineare Interpolation zwischen den Funktionswerten der k -Matrizen. Ein analoger Ansatz wurde bereits im alten Kontrollsystem implementiert.

2. Direkte Bestimmung von k und I aus einer Arbeitspunkt-"Karte":

Berechnet man mit dem oben beschriebenen Interpolationsverfahren für eine Menge von Arbeitspunktpaaren die Fokussierungsstärken der Quadrupolmagnete und erzeugt aus diesen wiederum die notwendigen Stromwerte über den linearen Ansatz 5.20, so läßt sich für die konkrete ELSA-Optik durch Analyse der so erzielten Werte I_{QF} und I_{QD} zeigen, daß die Funktionen

$$I_{QF} = I_F(Q_x, Q_z) \quad (5.23)$$

$$I_{QD} = I_D(Q_x, Q_z) \quad (5.24)$$

in einer durch ϵ_Q definierten Umgebung eines Punktes $(Q_x^{(0)}, Q_z^{(0)})$ hinreichend gut⁴ durch modifizierte

⁴Dieses Kriterium richtet sich nach der mit dem Kontrollsystem einstellbaren Stromauflösung der Quadrupolmagnete. Die Argumentation läuft analog der Abschätzung für die Dipolmagnete. Auch bei den Quadrupolnetzgeräten werden 14-Bit breite Wandler eingesetzt.

Ebenengleichungen

$$I_F = a_1 Q_x + a_2 Q_z + a_3 Q_x Q_z \quad (5.25)$$

$$I_D = b_1 Q_x + b_2 Q_z + b_3 Q_x Q_z \quad (5.26)$$

mit geeignet zu bestimmenden Koeffizienten $\{a_k\}$ bzw. $\{b_k\}$ angenähert werden können, falls ϵ_Q nicht zu groß gewählt ist. Die Umgebung schließt alle Arbeitspunktwerte ein, deren "Abstand" vom Punkt $\vec{Q}^{(0)} := (Q_x^{(0)}, Q_z^{(0)})$ kleiner als ϵ_Q ist. Der Abstand wird dabei für ein beliebiges Arbeitspunktpaar $\vec{Q} := (Q_x, Q_z)$ durch

$$|\vec{Q} - \vec{Q}^{(0)}| = \sqrt{(Q_x - Q_x^{(0)})^2 + (Q_z - Q_z^{(0)})^2} \quad (5.27)$$

definiert. Mißt man mit geeigneten Methoden der Strahldiagnose die Arbeitspunkte Q_x, Q_z in ELSA für eine eingestellte Stromkonfiguration I_{QF}, I_{QD} im linearen Bereich der Quadrupolmagnete und normiert man auf die eingestellte Energie, so kann man eine "Arbeitspunktkarte" erstellen, welche die Ausgangsbasis für die Steuerung der Quadrupolmagnete durch das Kontrollsystem bildet:

Für ein einzustellendes Arbeitspunktpaar $\vec{Q}_{soll} := (Q_x^{(soll)}, Q_z^{(soll)})$ werden alle Paare \vec{Q}_i aus der Karte selektiert, deren Abstand kleiner als ϵ_Q ist:

$$\vec{Q}_i : |\vec{Q}_i - \vec{Q}_{soll}| < \epsilon_Q \quad (5.28)$$

Durch diese Punkte wird eine Ebene nach Gl. 5.25 bzw. 5.26 gefittet, und die gesuchten Quadrupolströme aus der entsprechenden Ebenengleichung, gefolgt von einer Multiplikation mit der gewünschten ELSA-Energie, berechnet. Damit das Verfahren ausreichend genau funktioniert, muß der relevante Arbeitspunktbereich möglichst dicht mit gemessenen Wertepaaren Q_x, Q_z abgedeckt sein. Jede neue Messung eines Arbeitspunktpaares kann die Qualität der Karte weiter verbessern.

Die durch die Sättigung auftretenden nichtlinearen Effekte der Quadrupolmagnete muß man nachträglich durch Multiplikation der ermittelten Stromwerte mit einer Korrekturfunktion kompensieren. Diese Korrekturfunktion beschreibt die Abweichung des Quadrupolgradienten B' vom linearen Verhalten für Ströme oberhalb von 550 Ampere (siehe Gl. 5.21).

Beide Verfahren gestatten die Berechnung der Steuerströme für die Quadrupolmagnete, ausgehend von vorgegebenen Arbeitspunkten Q_x und Q_z bei einer definierten Energie E_0 .

Berechnungen für die ELSA-Sextupole

Für die bei ELSA eingesetzten Sextupolfamilien⁵ können für gegebene Sextupolstärken m_F, m_D, m_X die Ströme I_{SF}, I_{SD}, I_{SX} gemäß der Beziehung

$$I_{(SF,SD)} = \kappa m_{(F,D)} \cdot E_0, \quad \kappa = 0.0502^{-1} A \cdot m^{-3} / GeV \quad (5.29)$$

erzeugt werden [62]. In diese Beziehung geht bereits die Abbildung der Sextupolströme in die erzeugten Feldgradienten ein, die ebenfalls in [99] ermittelt wurden.

5.1.2 Konstruktion der Magnet-Experten

Das Kontrollsystem stellt Parameter für alle steuerbaren und beobachtbaren Größen des ELSA-Magnetsystems bereit. Die Parametermenge umfaßt dabei neben den direkten Steuergrößen auch alle davon abgeleiteten physikalischen Parameter sowie Einträge, die Berechnungsmethoden auswählen oder genauer spezifizieren (z.B. Wahl des Modells für die Arbeitspunktberechnungen). Alle magnetoptischen Berechnungen sind, aufbauend auf diesem Parametersatz, durch ein System untereinander verbundener Regeln implementiert worden. Sämtliche Regeln arbeiten skalar als auch vektoriell, d.h. alle Rechnungen können auf ein- oder mehrelementigen Eingangsdaten operieren und entsprechend ein- oder mehrelementige Ausgangsparameter haben. Der durch die Berechnungen definierte Regelgraph wurde zur Bearbeitung dem **emagnets**-Experten zugeordnet. Dieser Experte wurde mit den im zweiten Kapitel beschriebenen Werkzeugen konstruiert und erfüllt im wesentlichen die folgenden Aufgaben:

⁵Die ELSA-Nomenklatur beziffert die zur Korrektur der horizontalen (vertikalen) Chromatizität eingesetzten Magnete mit "SF" ("SD"), die Extraktionsextupole mit "SX".

- Berechnung von Dipolmagnetfeld und Strom aus äquivalenter Energie, ebenso alle anderen Kombinationen, z.B. Strom und dazu äquivalente Energie aus dem Magnetfeld.
- Berechnung von Quadrupol-Fokussierungsstärken für gegebene Arbeitspunkte, und daraus Berechnung der Feldgradienten und der erforderlichen Steuerströme, zusätzlich alle anderen sinnvollen Kombinationen.
- Berechnung von Sextupolströmen für gegebene Sextupolstärken, und umgekehrt.
- Auswahl und Konfiguration der Modelle für die Arbeitspunktberechnung: Matrizenbasierte Berechnung oder Wahl der Arbeitspunktkarte mit Stromfits. Bei letzterem kann z.B. die Größe der Suchumgebung ϵ_Q angegeben werden.
- Überprüfung von vorgegebenen Arbeitspunktwerten auf mögliche Resonanzen. Hierbei werden hypothetische Resonanzbedingungen bis zu einer frei definierbaren, physikalisch sinnvollen Maximalordnung überprüft.
- Iterative Regelung eines eingestellten Arbeitspunktes auf einen Sollwert.⁶
- Berücksichtigung linearer Transformationen für Arbeitspunkte und Sextupolstärken, um durch Korrekturfaktoren in der Magneteichung weitere Freiheitsgrade der Steuerung zu realisieren.

Alle Berechnungen werden sowohl für Meßwerte als auch für Sollwertvorgaben durchgeführt. Der Regelgraph für die magnetoptischen Berechnungen in ELSA enthält mehrere Zyklen, da alle Berechnungen in jeder Richtung durchgeführt werden können. So wird z.B. aus einer Fokussierungsstärke bei gegebener Energie ein Quadrupolstrom berechnet; andererseits wird beim Zugriff auf den Strom wiederum die Fokussierungsstärke neu bestimmt. Durch einen speziellen Parameter können aber die Zyklen aufgetrennt werden. Als Konsequenz ergibt sich für die Steuerung der Magneto-optik eine eindeutige Hierarchie. In dieser Hierarchie werden alle Rechnungen nur in einer Richtung, ausgehend von den höchstgestellten Definitionen, durchgeführt. Dies ist die zur Zeit gewählte Standardeinstellung im Kontrollsystem. Es gilt das in Abbildung 5.2 angegebene Schema:

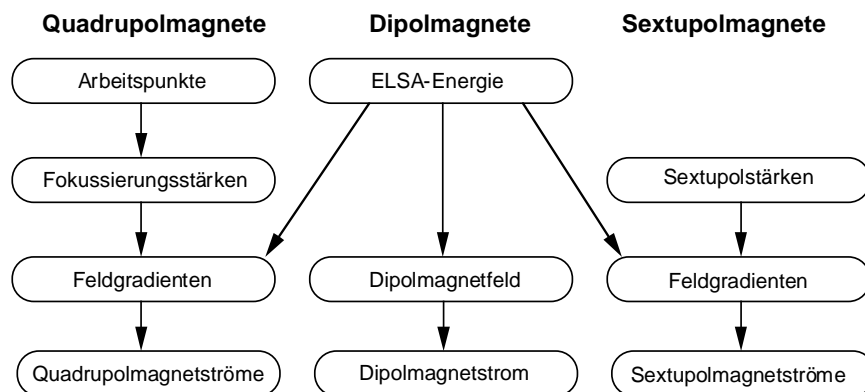


Abbildung 5.2: Hierarchie der magnetoptischen Berechnungen

Zur manuellen Steuerung der ELSA-Magneto-optik wurde das in Abbildung 5.3 dargestellte Menü entworfen. Dabei soll hervorgehoben werden, daß alle Operationen nur noch auf beschleunigerphysikalisch motivierten Größen basieren; Stromwerte sind zur besseren Verständlichkeit und zu Diagnosezwecken zusätzlich dargestellt.

⁶Die entsprechenden Regeln basieren auf Parametern, die durch die Strahldiagnose ermittelt werden können. Siehe dazu Abschnitt 5.5.

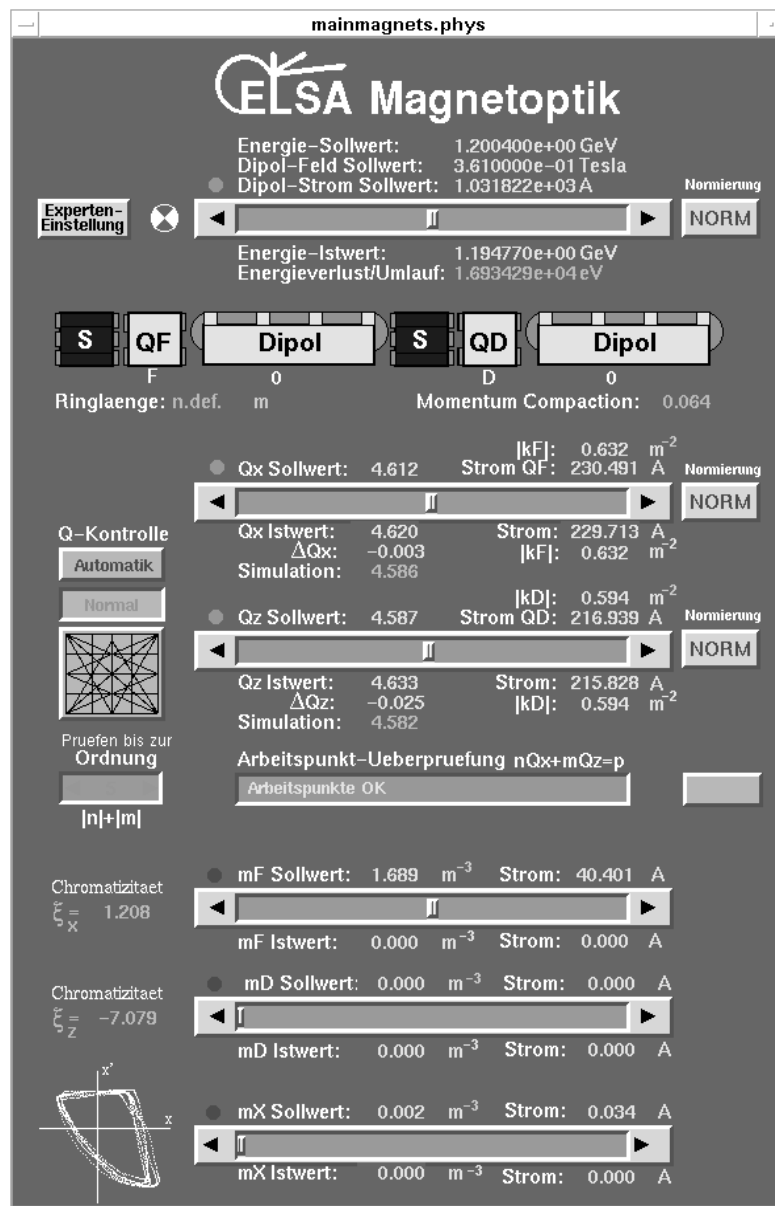


Abbildung 5.3: Menü zur Steuerung der ELSA-Magnetoptik

5.2 Simulation der linearen Maschinenoptik im Kontrollsystem

Die Betriebserfahrung mit ELSA hat gezeigt, daß die Einstellung komplexer Betriebsmodi, wie der Nachbeschleunigung mit anschließender Extraktion, ohne die Unterstützung durch Simulationswerkzeuge nicht mehr in angemessener Zeit durchführbar ist. Dies ist im wesentlichen durch die Tatsache begründet, daß mit dem Kontrollsystem eine Maschineneinstellung interaktiv nur bei Injektionsenergie optimiert werden kann, da hier durch eine hohe Wiederholrate des Einschusses in ELSA der Strahl "sofort" auf entsprechende Änderung optischer Parameter reagiert. Die Nachbeschleunigung erfordert jedoch im Vergleich dazu relativ lange Zykluszeiten, bei denen die Auswirkung einer Manipulation durch den Operateur nicht mehr instantan gesehen werden kann, weil sie erst im nächsten Zyklus aktiv wird. Bei Wiederholraten im Subhertzbereich ist die manuelle Optimierung der ELSA-Optik dann kaum noch möglich. Eine Simulation der wichtigsten ELSA-Parameter ist deshalb empfehlenswert und darüber hinaus speziell im Nachbeschleunigungsmodus auch zwingend notwendig, da hier die in der Extraktionsphase einzustellenden optischen Eigenschaften bereits bei der Definition aller Vorgaben anzugeben sind. Erst dadurch sind alle Berechnungen mit den

notwendigen Randwerten versorgt: Für die Extraktionsenergie ist das Verhalten der Maschine nicht, wie sonst im reinen Stretchermode, im voraus empirisch überprüfbar. Nur die Simulation kann beispielsweise die genauen Sextupolstärken für die Einstellung der Chromatizität während der Extraktion bei hoher Energie berechnen oder Angaben über die zeitliche Steuerung der Extraktionssextupole liefern.

Zur Ermittlung konsistenter Vorgaben kann der Simulator `xsim` zur Analyse der linearen und nichtlinearen Teilchendynamik in ELSA verwendet werden [93]. Die Software arbeitet unter der Fensteroberfläche einer Workstation und erlaubt dem bedienenden Physiker die interaktive Konfigurierung, Simulation und Optimierung der ELSA-Optik. Dies beinhaltet beispielsweise die Analyse des Phasenraums der transversalen und longitudinalen Bewegung, die Identifikation von Resonanzen oder die Verfolgung der Lage von Separatrizen bei der drittelzahligen Resonanzextraktion. Dem Anwender präsentiert sich eine synoptische Ansicht der Plazierung aller Elemente im ELSA-Ring, versehen mit der individuell konfigurierbaren Darstellung optischer Funktionen oder Maschinenparameter, wie Abbildung 5.4 illustriert.

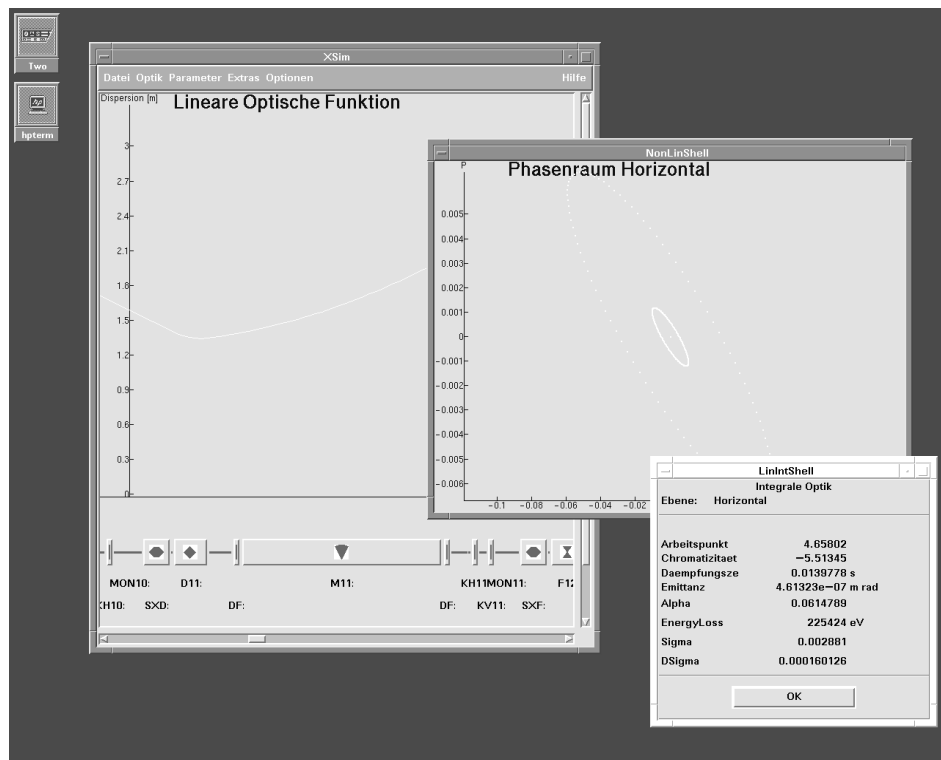


Abbildung 5.4: Erscheinungsbild des ELSA-Simulators `xsim`

Durch Anwahl von Elementen oder durch Mausklick auf dargestellte Funktionsgraphen können einzelne Einstellungen abgerufen und modifiziert werden. Der Simulator führt alle Berechnungen entweder für ein Teilchen oder für eine gegebene Teilchenverteilung durch. Ein wesentliches Funktionsmerkmal ist die Aufbereitung simulierter Daten solchermaßen, daß ein direkter Vergleich mit den Ergebnissen der in das Kontrollsystem eingebetteten Strahldiagnose möglich wird. Der Simulator berechnet beispielsweise für eine vorgegebene Monitorposition in ELSA die Spektren der transversalen Teilchenbewegung; diese Spektren können mit Daten des aufgebauten Echtzeit-Spektralanalysesystems (beschrieben in Abschnitt 5.6.1) verglichen werden. Eine andere Anwendung ist durch das von M. Picard aufgebaute Phasenraumrekonstruktions-System gegeben (siehe [67]); die hier ermittelten Trajektorien können ebenfalls mit den Ergebnisdaten des Simulators verglichen werden.

Jede Simulation basiert auf einem Satz von Eingangswerten zur Beschreibung eines ELSA-Zustandes. Damit während des Betriebs eine Einstellung analysiert und bei Bedarf optimiert werden kann, erhält die Software Zugriff auf alle im Kontrollsystem gespeicherten ELSA-Parameter. Das Simulator-Programm wird auf einem beliebigen Rechner der Kontrollebene gestartet und agiert als normale Applikation (wie z.B. auch die

grafische Oberfläche), kann also insbesondere an allen Transaktionsmechanismen teilnehmen. Eine optische Berechnung (z.B. der Gleichgewichtsbahn in ELSA) kann auf Wunsch immer dann angestoßen werden, wenn sich die relevanten Eingangsgrößen (z.B. Fokussierungsstärken der Quadrupole) ändern. Hat man mit Hilfe des Programms eine verbesserte Einstellung bestimmter Steuergrößen gefunden, so können die neuen Werte "auf Knopfdruck" appliziert werden. Diese enge Verbindung von Kontrolle und Simulation liefert besonders für die Erprobung neuer Betriebsmoden das gewünschte Instrumentarium.

Um das Kontrollsystem mit der vom Simulator unabhängigen Möglichkeit auszustatten, bei Bedarf selbstständig wichtige optische Parameter einer ELSA-Einstellung zu berechnen⁷ und für beliebige Anwendungen verfügbar zu machen, wurde eine Untermenge der Simulator-Software durch J. Wenzel als Codebibliothek zur Verfügung gestellt. Auf diesen Code aufsetzend wurden zwei Experten konstruiert. Die beiden Experten zugeordneten Regeln verknüpfen Kontrollsystem-Parameter durch Aufruf der entsprechenden Simulationsprozeduren. Zwei Aufgabenbereiche sind definiert:

- Der **simlin**-Experte liest die relevanten aktuellen Maschineneinstellungen wie z.B. Fokussierungs- und Sextupolstärken und berechnet daraus alle wesentlichen Parameter der linearen Optik. Dazu gehören Arbeitspunkte, Chromatizitäten und Dämpfungsintegrale, sowie die optischen Funktionen. Alle Ergebnisdaten werden in Kontrollsystemparametern abgelegt und sind auf der grafischen Oberfläche an entsprechenden Stellen integriert; so erscheinen die Chromatizitätswerte ξ_x und ξ_z beispielsweise auf dem Magnetoptik-Menü. Jede Kontrollsystem-Applikation hat Zugriff auf die berechneten optischen Parameter.
- Der **elsamodel**-Experte liest seine Vorgaben aus einem eigenständigen Parametersatz. Dieser Parametersatz umfaßt alle zur Beschreibung einer fiktiven, linearen ELSA-Optik notwendigen Angaben und hat keine Verbindung mit den durch das Kontrollsystem eingestellten Werten der ELSA-Steuerung. Hierdurch wird die modellhafte Berechnung einer beliebigen linearen Optik, bei gegebenem ELSA-Magnetsystem, möglich. Der **elsamodel**-Experte kann daher einfach zur Überprüfung von Einstellungen oder Hypothesen herangezogen werden, ohne den laufenden ELSA-Betrieb zu tangieren.

Beide Experten sollen in Zukunft durch Berechnungen, aufbauend auf entsprechenden Konstrukten der Codebibliothek, zur nichtlinearen Teilchenbewegung in ELSA erweitert werden.

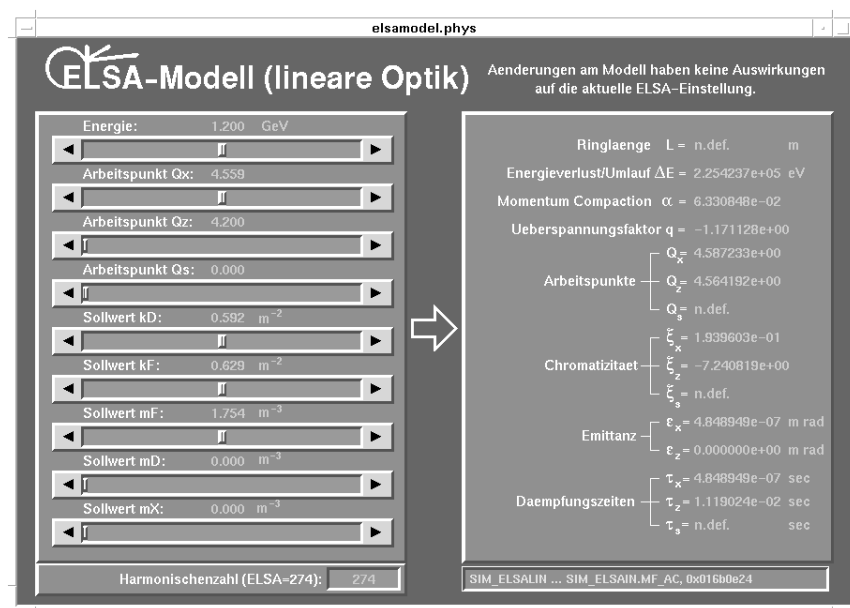


Abbildung 5.5: Menü zur Bedienung des **elsamodel**-Experten

⁷Die optischen Parameter können in Experten verwendet werden, die abhängig davon bestimmte Regeln auswerten. So kann der **emagnets**-Experte direkten Zugriff auf die Chromatizitätswerte in ELSA bekommen, um selbstständig eine zumindest theoretische Korrektur der Chromatizität "per Knopfdruck" durchzuführen.

Das zur Bedienung des ELSA-Modells entworfene Grundmenü ist in Abbildung 5.5 zu sehen. Durch Einstellung der Vorgaben im linken Block wird die Ausgangsmenge definiert; die Ergebniswerte des berechneten linearen Modells sind im rechten Block sichtbar. Die Vorgabe von Arbeitspunkten wird durch den **emagnets**-Experten gemäß des gewählten Berechnungsmodells in die Fokussierungsstärken der Quadrupolmagnete umgesetzt; diese Fokussierungsstärken werden vom **elsamodel**-Experten wiederum zur Bestimmung der Arbeitspunkte herangezogen. Auf diese Weise entsteht besonders bei der Verwendung empirisch ermittelter Arbeitspunktkarten die direkte Vergleichsmöglichkeit zwischen realer und theoretischer ELSA-Optik.

5.3 Steuerungskonzept für die Nachbeschleunigung in ELSA

Die Nachbeschleunigung findet in der durch das Timingsystem definierten Rampphase eines Zyklus statt; die Energieerhöhung kann nur durch das elektrische Wechselfeld der Hochfrequenzresonatoren erzeugt werden. Bei Vorgabe einer ausreichend hohen Beschleunigungsspannung U_{max} mit einem zeitlichen Verlauf der dadurch gegebenen Resonatorspannung

$$U(t) = U_{max} \sin(\omega_{HF}t), \quad \omega_{HF} = 2\pi \cdot 500 \text{ MHz} \quad (5.30)$$

bleibt die longitudinale Teilchenbewegung auch dann stabil, wenn das ablenkende Dipolmagnetfeld $B(t)$ im Vergleich zur Umlaufzeit der Teilchen langsam ansteigt.⁸ Durch die Änderung des Sollimpulses, d.h. des Magnetfeldes, wandert die Phasenlage eines Elektrons relativ zum beschleunigenden Hochfrequenzfeld derart, daß bei jedem Umlauf ein geänderter, zur angehobenen Energie "passender" Wert $U(t)$ in den Hohlraumresonatoren angetroffen wird. Um den in ELSA gespeicherten Strahl auf eine höhere Energie zu bringen reicht es also "im Prinzip" aus, das ablenkende Dipolmagnetfeld entsprechend des gewünschten Energiehubes ansteigen zu lassen.

Zur Verdeutlichung des bei der Nachbeschleunigung ablaufenden Mechanismus muß zunächst die Sollphase des Elektrons in ELSA definiert werden: Die Sollphase ϕ_s eines Elektrons der Energie E_0 ist die Phasenlage in Bezug auf $U(t)$, bei welcher der durch die Abstrahlung von Synchrotronlicht, bei gegebenen Ablenkradius ρ der Dipolmagnete, hervorgerufene Energieverlust ΔE pro Umlauf

$$\Delta E = C_\gamma \left(\frac{E_0^4}{\rho} \right), \quad C_\gamma \approx 8.85 \cdot 10^{-5} \text{ mGeV}^{-3} \quad (5.31)$$

gerade durch die Resonatorspannung $U(t)$ mit

$$\Delta E = eU_{max} \sin(\phi_s) \quad (5.32)$$

kompensiert wird. Der Bereich aller Phasenabweichungen $\Delta\phi$ um ϕ_s , in dem die Teilchenbewegung stabil bleibt, wird phasenstabiler Bereich genannt. Bei hochrelativistischen Teilchen⁹ ($\frac{1}{\gamma^2} \approx 0$) muß die Sollphase für eine stabile Schwingung im Bereich von

$$\frac{\pi}{2} < \phi_s < \frac{3}{2}\pi \quad (5.33)$$

liegen. Da die in ELSA umlaufenden Elektronen hochrelativistisch sind, ist die Geschwindigkeitsänderung vernachlässigbar; ein Elektron mit einer Energie $eU(t) = E_0 + \Delta E > E_0$ erfährt aber ein schwächer ablenkendes Dipolmagnetfeld. Dadurch läuft es auf einer "Dipensionsbahn" im Ring weiter außen und legt, verglichen mit dem Sollteilchen bei $E = E_0$, einen längeren Weg zurück. Dadurch kommt es zu einem gegenüber dem Sollteilchen späteren Eintritt in den Resonator und damit wegen kleinerer Spannung $U(t)$ zu einer geringeren Beschleunigung als der des Sollteilchens. Dies wiederum führt zu einer Verringerung der Energieabweichung ΔE . Es entwickelt sich die sog. Synchrotronschwingung als Schwingung um die Sollphase ϕ_s . Beobachtet man die Ankunftszeit $\tau(t)$ eines Teilchens an einer festen Position im Ring, so ergibt sich für kleine Abweichungen von der Sollphase eine zeitliche Modulation $\tau + \Delta\tau(t)$ der Art

$$\Delta\tau(t) = \tau_{max} \cos(\Omega_s t) . \quad (5.34)$$

⁸Hierdurch kann die Energieerhöhung der Teilchen in adiabatischer Näherung betrachtet werden. Diese ist dadurch definiert, daß die Zeitkonstanten der Parameteränderung, d.h. des Dipolmagnetfeldes, wesentlich größer sind als die Umlaufzeiten der Teilchen im longitudinalen Phasenraum.

⁹Elektronen sind bereits ab einer Energie von ca. 2 MeV hochrelativistisch.

Die dadurch definierte Synchrotronfrequenz Ω_s ist gegeben als

$$\Omega_s = \frac{2\pi}{T_0} \sqrt{\frac{N_c e U_{max} \alpha h \cos(\phi_s)}{2\pi E_0}} . \quad (5.35)$$

Hierbei ist T_0 die Umlaufszeit des Teilchens, N_c die Anzahl der eingesetzten Resonatoren, α der "momentum compaction factor" und $h = \omega_{HF}/\omega_0$ die ELSA-Harmonischenzahl. Der "momentum compaction factor" gibt die relative Umlaufszeitänderung für eine gegebene relative Impulsabweichung $\Delta p/p_0$ eines hochrelativistischen Teilchens ($\frac{1}{\gamma^2} \approx 0$) an:

$$\frac{\Delta T}{T} = \alpha \frac{\Delta p}{p_0} = \alpha \frac{\Delta E}{E_0}, \quad \alpha_{ELSA} \approx 0.06 . \quad (5.36)$$

Man definiert den "Synchrotron-Arbeitspunkt" durch Angabe von Ω_s in Bezug auf die Umlauffrequenz $\omega_0 = \frac{2\pi}{T_0}$ in ELSA:

$$Q_s := \frac{\Omega_s}{\omega_0} . \quad (5.37)$$

Wird nun das ablenkende Magnetfeld $B(t)$ in der Rampphase langsam erhöht, so verschiebt sich innerhalb des phasenstabilen Bereichs die Sollphase ϕ_s in Richtung höherer Werte von $U(t)$: Da die Teilchen durch die stärkere Ablenkung der Dipole eine kürzere Strecke bis zum Wiedereintritt in den Resonator zurücklegen müssen, gelangen sie zu einem früheren Zeitpunkt in den Resonator und erhalten daher durch ein größeres $U(t)$ einen größeren Energiehub ΔE , anschließend steigt durch diese Erhöhung der Energie der Energieverlust pro Umlauf, so daß gemäß 5.32 eine andere Phasenlage für dessen Kompensation entsteht.

Kontrolle der longitudinalen Bewegung

Der sich zu jedem Zeitpunkt der Nachbeschleunigung einstellende Synchrotronarbeitspunkt $Q_s(t)$ kann über die Beziehung 5.35 durch zeitliche Änderung der Spitzenspannung U_{max} kontrolliert werden, wobei eine Stabilisierung des Wertes während des Rampvorganges gewünscht ist. Reicht die verfügbare Hochfrequenzleistung zur Erzeugung eines dafür passenden Wertes von U_{max} nicht bis zu einer gegebenen Endenergie aus, nimmt man bei konstanter Hochfrequenzamplitude eine Änderung des Synchrotron-Arbeitspunktes Q_s während der Nachbeschleunigung gemäß der Proportionalitätsbeziehung

$$Q_s(t) \sim \sqrt{\frac{\cos(\phi_s(t))}{E_0(t)}} \quad (5.38)$$

in Kauf. Für eine Abschätzung des qualitativen Verlaufs von Q_s kann die Beziehung (5.38) weiter genähert werden durch

$$Q_s(t) \sim \sqrt{\frac{1}{E_0(t)}} , \quad (5.39)$$

da das Wandern von $\cos \phi_s$ gegenüber der Energieerhöhung nur einen kleinen Effekt macht [98].

Kontrolle der transversalen Bewegung

Damit bei einer Erhöhung der Teilchenenergie auch die transversale Bewegung stabil bleibt, müssen die Fokussierungsstärken der Quadrupolmagnete gleich bleiben, die Quadrupolströme also entsprechend des Energiehubes angepaßt werden. Dadurch werden die transversalen Arbeitspunkte Q_x und Q_z konstant gehalten. Falls die Arbeitspunkte während des Rampvorganges wandern, kann es zum Kreuzen von Betatron-Resonanzen kommen, was einen Strahlverlust nach sich ziehen kann. Die Resonanzbedingung kann in allgemeiner Form wie folgt angegeben werden:

$$n_x Q_x + n_z Q_z = l, \quad n_x, n_z, l \in Z . \quad (5.40)$$

In der Praxis kann man sich bei der Resonanzordnung $|n_x| + |n_z|$ allerdings auf die etwas weniger einschränkende Bedingung

$$n_x Q_x + n_z Q_z = l, \quad n_x, n_z, l \in Z, \quad |n_x| + |n_z| \leq 5 \quad (5.41)$$

zurückziehen, da die Stärke einer Resonanz (und damit das Risiko des Strahlverlusts) mit höherer Ordnung schnell abnimmt.¹⁰ Die Einschränkung $|n_x| + |n_z| \leq 5$ charakterisiert demnach relativ gut stärkere Resonanzen, die unbedingt vermieden werden müssen.

Appliziert man nun absichtlich keine exakte Anpassung der Fokussierungsstärken an die Energie, so kann man Verläufe $Q(t)$ kontrollieren, für die lediglich die oben genannte Resonanzbedingung vermieden werden muß. Diese legt der Steuerung der Arbeitspunkte beim Rampen gewissen Grenzen auf. In der Regel möchte man allerdings eine möglichst gute Konstanz von Q_x und Q_z beim Nachbeschleunigen sicherstellen. Die Lage von Q_x und Q_z kann im Resonanzdiagramm angegeben werden, welches auf intuitive Weise die Beurteilung eines Arbeitspunktverlaufs $Q(t)$ erlaubt. In Abbildung 5.6 ist ein Diagramm für $|n_x| + |n_z| \leq 3$ skizziert; das eingezeichnete Arbeitspunktpaar entspricht einer theoretisch stabilen Konstellation für die Nachbeschleunigung in ELSA. Selbst bei deutlichen Abweichungen vom Sollpunkt wird ein stabiler Bereich nicht verlassen, was durch den Kreis angedeutet werden soll.

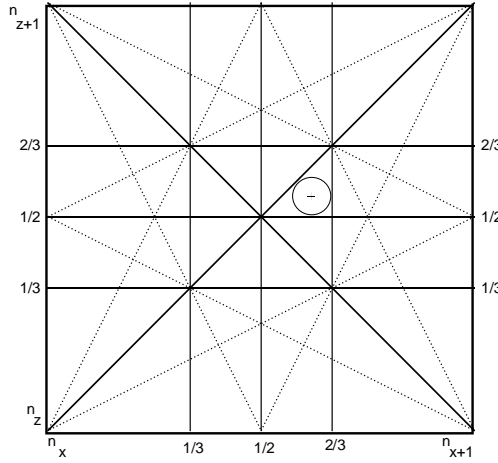


Abbildung 5.6: Resonanzdiagramm für $Q_{x,z}$ bei $|n_x| + |n_z| \leq 3$

Durch bestimmte Mechanismen — z.B. durch eine nichtverschwindende Dispersionsfunktion in den Hohlraumresonatoren oder durch die Phasenmodulation der Teilchenbewegung bei einer durch Sextupolfelder induzierten Resonanz (siehe z.B. [93]) — können Kopplungen zwischen transversaler und longitudinaler Schwingung entstehen und sogenannte Synchro-Betatron-Resonanzen anregen:

$$n_x Q_x + n_z Q_z + n_s Q_s = l, \quad n_x, n_z, n_s, l \in Z. \quad (5.42)$$

Auch hier gilt wieder für die Praxis, daß in der Regel eine Beschränkung auf $|n_x| + |n_z| + |n_s| \leq 5$ ausreicht. Eine genaue Analyse der bei Synchro-Betatron-Kopplungen in ELSA zu erwartenden Effekte ist in [61] und in [93] zu finden; in einigen besonderen Fällen konnten Synchro-Betatron-Resonanzen bei ELSA mit hoher Wahrscheinlichkeit im Extraktionsprozeß identifiziert werden [62].

Vermeidung von Strahlverlusten durch Korrektur der Chromatizität

Beim Nachbeschleunigen kann es trotz Stabilisierung von Q_s und Wahl sicherer transversaler Arbeitspunkte zu Strahlverlusten kommen, die im wesentlichen durch die Chromatizität des Ringes hervorgerufen werden. Die Chromatizität gibt an, welche Fokussierung Teilchen erfahren, die einen vom Sollimpuls p_0 abweichenden Impuls $p = p_0 + \Delta p$ besitzen. Die Chromatizität ist für die horizontale und vertikale Bewegung definiert

¹⁰Im allgemeinen gilt, daß die Kopplung der beiden Schwingungsebenen nicht a priori gegeben ist, sondern beispielsweise durch Feld- und Aufstellfehler der Dipole bzw. Quadrupole erzeugt werden kann. Das Auftauchen von Koppelresonanzen und die daraus resultierende Gefährdung des Strahls kann deshalb theoretisch schlecht prognostiziert werden. Wenn Sextupolmagnete in der Magneto-optik aktiv sind, treten durch deren Felder allerdings immer Koppelresonanzen $|n_x| + |n_z| = 3$ auf.

über

$$\Delta Q_{x,z} = \xi_{x,z} \frac{\Delta p}{p_0} .^{11} \quad (5.43)$$

Falls die Arbeitspunkte $Q_{x,z}$ beim Nachbeschleunigen nahe einer stärkeren Resonanz liegen, können Teilchen mit einer ausreichend hohen Impulsabweichung Δp wegen der durch die Chromatizität hervorgerufenen Arbeitspunktverschiebung in die Resonanz laufen und verlorengehen. Bei Magneto-optiken mit negativer Chromatizität — dies ist fast immer der Fall — kann darüber hinaus auch eine als "Head-Tail-Effekt" bezeichnete Instabilität angeregt werden, die ebenfalls zum teilweisen Ausfall des Strahls führen kann. Eine Beschreibung dieses Effektes ist z.B. in [30] zu finden. Aus den genannten Gründen ist die Korrektur der Chromatizität bei ELSA besonders für den Nachbeschleunigungsbetrieb wichtig. Die Korrektur kann mit den im ELSA-Ring eingebauten Sextupolen durchgeführt werden, wobei jeweils eine Familie (SF,SD) für die Korrektur von ξ_x bzw. ξ_z dient.

Steuerungskonzept

Das Steuerungskonzept der Nachbeschleunigung in ELSA läßt sich zusammenfassend durch die folgenden Punkte festschreiben:

- Das Kontrollsystem muß den gewünschten Funktionsverlauf $E(t)$ generieren und die entsprechenden Berechnungen für den zeitvariablen Steuerstrom der Dipolmagnete durchführen. Der von J. Wenzel entwickelte Simulator kann die Teilchendynamik auch während einer Energierampe simulieren und daher zur Optimierung der Kurvenform $E(t)$ herangezogen werden.
- Die Steuerfunktion für die Einstellung des horizontalen und vertikalen Arbeitspunktes $Q_{x,z}$ muß diese — ausgehend vom Injektionsarbeitspunkt — während des Rampens in einem stabilen Bereich halten und Q_x nach Erreichen der Endenergie soweit an die Extraktionsresonanz $Q_x^{(res)}$ heranfahren, daß die Resonanz mit den schnellen Extraktionsquadrupolmagneten erreicht werden kann. Da diese nur einen energieabhängigen, begrenzten Arbeitspunkthub im Bereich von ca. 0.01 (bei 3 GeV) bis ca. 0.02 (bei 2 GeV) erzeugen können [31], muß Q_x mindestens bis auf diese Entfernung an $Q_x^{(res)}$ gelegt werden. Q_z sollte während der Rampphase in einem stabilen Bereich liegen und danach auf einen für die Extraktion geeigneten Wert eingestellt werden. Auch hier kann die Unterstützung durch den ELSA-Simulator ein wertvolles Hilfsmittel sein.
- Die Sextupolstärken müssen je nach Betriebseinstellung oder Erfahrung für die Korrektur der horizontalen und/oder vertikalen Chromatizität während des Energiehubs eingestellt werden. Die dazu einzustellenden Sextupolstärken m_F, m_D können beispielsweise über den `elsamodel`-Experten ermittelt werden.
- Die Hochfrequenzresonatoren müssen mit der für die Energieerhöhung geforderten Leistung angesteuert werden; die Ansteuerung kann dabei zeitvariabel erfolgen (mit möglicher Kontrolle des Synchrotronarbeitspunktes) oder konstant sein. In jedem Fall muß ein ausreichend großer stabiler Bereich der longitudinalen Bewegung bis einschließlich der Endenergie bestehen.
- Die den einzelnen Aufgaben zugeordneten Steuerkurven müssen so weit wie möglich voneinander entkoppelt sein, damit Änderungen der magnetooptischen Eigenschaften bzw. der Resonatorspitzenspannung $U_{max}(t)$ weitgehend unabhängig voneinander durchgeführt werden können. Die Entkopplung wird primär durch das bereits vorgestellte Phasenkonzept des Timingsystems erzielt und muß entsprechend bei den Algorithmen zur Steuerkurvenberechnung berücksichtigt werden.

¹¹ Diese Definition der Chromatizität ist die in der Literatur übliche Definition von ξ . Alternativ dazu wird oft auch die sog. relative Chromatizität ξ über $\Delta Q/Q = \xi \Delta p/p$ eingeführt.

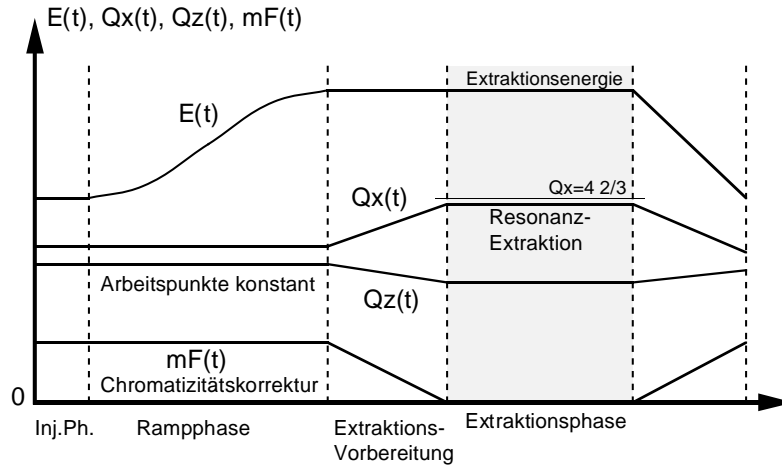


Abbildung 5.7: Beispiel für $E(t)$, $Q_x(t)$, $Q_z(t)$ und $m_F(t)$ im Nachbeschleunigungsmodus

Ein realistischer Beispielsatz für vier Funktionen E , Q_x , Q_z und m_F bei einer fiktiven hochfrequenzbasierten Extraktion (vergl. Kapitel 1, S.15) aus ELSA ist exemplarisch in Abbildung 5.7 skizziert. Bei diesem Extraktionsverfahren darf die Chromatizität während der Extraktion nicht kompensiert werden, aus diesem Grund werden die Sextupole nach Erreichen der Endenergie abgesenkt. Durch die Quadrupole wird der ELSA-Arbeitspunkt Q_x dicht unter die Extraktionsresonanz gefahren, während Q_z etwas verringert wird. Die einzelnen Phasen der Nachbeschleunigung werden entsprechend der im vierten Kapitel beschriebenen Arbeitsweise des Timingsystems angestoßen.

5.4 Realisierung der Nachbeschleunigung mit dem Kontrollsystem

Die Nachbeschleunigung erfordert in praxi die Generierung zeitvariablen Strömen $I(t)$ für die einzelnen Magnetfamilien in ELSA sowie die Vorgabe einer Amplitude für die beschleunigende Hochfrequenzspannung, entsprechend dem vorgestellten Steuerungskonzept. Diese Vorgabe geschieht durch das Kontrollsystem als digitalisierte Steuerkurve, d.h. in diskretisierter Form $I_i[t_i]$, die wiederum über einen Digital-Analog-Wandler eine analoge Referenzgröße für den Regelkreis des angesprochenen Netzgerätes bildet. Der Wandler wird sukzessiv zu jedem Zeitpunkt t_i mit dem Datenwort I_i geladen und erzeugt so eine entsprechende Kurve $I(t)$.¹² Das Hochfrequenzsystem wird in der Amplitude a nach dem gleichen Prinzip durch eine diskretisierte Vorgabefunktionen $a_i[t_i]$ gesteuert. Das Kontrollsystem muß für alle beteiligten Komponenten die diskreten Funktionswerte und die Zeitpunkte t_i ausgehend von beschleunigerphysikalisch motivierten Vorgaben (siehe Abschnitt 5.3) berechnen und an die Endgeräte übermitteln. Das zeitabhängige Steuern der Magnetooptik und des Hochfrequenzsystems zum Zwecke der Nachbeschleunigung wird normalerweise mit dem Begriff "Tracking" versehen. Zwei Aufgabenbereiche werden unterschieden:

1. Berechnung der Vektoren¹³ für die Dipol-, Quadrupol- und Sexupolmagnete von ELSA und zeitliche Synchronisierung aller Vorgaben derart, daß die Sollwerte $E(t)$ und $Q_{x,z}(t)$ sowie die Sextupolstärken $m_{F,D}(t)$ eingehalten werden bzw. für die Arbeitspunkte in einem stabilen Bereich liegen. Diese Aufgabe wird als *Magnet-Tracking* bezeichnet.

Bei allen Vorgaben ist es wichtig, daß eine Änderung des Sollwertes für jede Magnetfamilie zum gleichen Zeitpunkt erfolgt, damit kurzzeitige Abweichungen, etwa zwischen Dipolmagnetfeld und Fokussierungstärke, vermieden werden können. Ein solcher Fall kann bei unterschiedlichen Zeitbasen der Magnetsteuerkurven auftreten.

¹² Bandbreitenbeschränkungen im Regelkreis der angesteuerten Geräte, die sich als Tiefpaßverhalten zwischen Steuergröße und Ausgangsstrom äußern, seien an dieser Stelle vernachlässigt. In der Praxis muß die Zeitauflösung zwischen zwei Amplitudenwerten sowie die dabei gegebene Amplitudendifferenz jeweils sinnvoll auf die (bekannte) Bandbreite des Netzgerätes angepaßt werden.

¹³ Ein Satz diskretisierter Werte (z.B. die Menge aller $I_i, i = 1 \dots N$) wird im folgenden als Zahlenvektor der Länge N interpretiert.

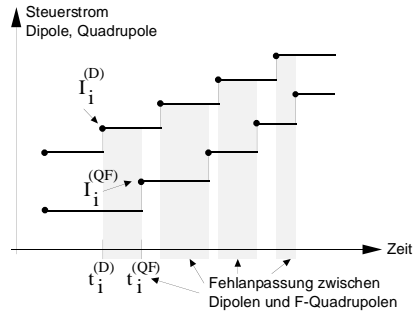


Abbildung 5.8: Fehlanpassung von Dipol- und Quadrupolstrom beim Magnet-Tracking

Wenn beispielsweise (siehe Abbildung 5.8) der Dipol-Strom zur Zeit $t_i^{(D)}$ auf einen neuen Wert $I_i^{(D)}$ eingestellt wird, der dazu passende Quadrupolstrom $I_i^{(QF)}$ aber erst zum Zeitpunkt $t_i^{(QF)} \neq t_i^{(D)}$ appliziert wird, ergibt sich für eine Dauer von $|t_i^{(QF)} - t_i^{(D)}|$ eine Fehlanpassung der Magnetoptik. Liegt die Länge dieses Zeitintervalls wesentlich über der Umlaufzeit T_0 in ELSA, so können Arbeitspunktverschiebungen in Q_x resultieren, die nahe an einer Resonanz kommen und die Strahlstabilität gefährden. Als Konsequenz ergibt sich die Forderung nach einer gemeinsamen Tracking-Zeitbasis $\{t_i\}$ für alle Magnete. Die Form der Steuerkurve für die Magnete muß so gewählt werden, daß die maximale Steigung $|\frac{\Delta I}{\Delta t}|$ der Vorgabefunktion $I(t)$ unterhalb der technisch limitierten Grenze des angesteuerten Netzgerätes liegt. Insbesondere bedeutet dies für den Energieverlauf in der Nachbeschleunigungsphase, daß der maximal mit ELSA erreichbare Energieanstieg $\frac{dE}{dt}$ durch die bei gegebener Induktivität des Dipolkreises L_{dip} maximal mögliche Steuerspannung des Netzgerätes U_{dip} gegeben ist. Für die diskretisierte Vorgabefunktion $I_i[t_i]$ bedeutet dies die Einschränkung

$$\frac{\Delta E}{\Delta t} \sim \frac{I_i - I_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} < \frac{U_{dip}^{(max)}}{L_{dip}} . \quad (5.44)$$

Da bei ELSA die Ansteuerung des Dipolkreises in zwei verschiedenen Betriebsarten erfolgt, muß das Kontrollsystem für eine gegebene Kurve $I_i[t_i]$ zusätzlich eine zweiwertige zeitabhängige Steuerfunktion zur Auswahl einer Betriebsart erzeugen.¹⁴ Überschreitet die Steigung $\Delta I/\Delta t$ das durch 5.44 gegebene Limit, so kann durch Hinzuschalten eines separaten Hochspannungs-Netzgerätes innerhalb von wenigen Millisekunden ein zehnfach höheres $U_{dip}^{(max)}$ und damit auch ein entsprechend höheres $\Delta E/\Delta t$ erzielt werden. Die zu erzeugende Steuerkurve enthält also Anweisungen zur Auswahl des entsprechend einzustellenden $U_{dip}^{(max)}$, wobei im konkreten Fall die Umschaltung jeweils mehrere Millisekunden vor dem Erreichen der Steigung $\Delta I/\Delta t$ erfolgen muß.

2. Berechnung der Vorgabefunktion für die Maximalamplitude der Hochfrequenzspannung $U_{max}(t)$ in den verwendeten Hohlraumresonatoren zur Stabilisierung des Arbeitspunktes der Synchrotronoschwingung. Diese Aufgabe wird mit dem Begriff *HF-Tracking* bezeichnet. Zum korrekten Tracking der Hochfrequenzamplitude bei ELSA müssen folgende Effekte berücksichtigt werden:

- Die Hochfrequenzamplitude $U_{max}(t)$ muß, ausgehend von einem ausreichend großen Startwert, so angehoben werden, daß der Energiegewinn ΔE eines Teilchens pro Umlauf der Erhöhung des Magnetfeldes $\Delta B(t)$ entspricht und dadurch die Synchronitätsbedingung $p_0(t) = eB(t)\rho$ eingehalten wird. Der dazu erforderliche Energiegewinn ist gegeben durch

$$\Delta E_{\dot{B}} = ec\rho\Delta B = ec\rho\dot{B} \cdot T_0 \sim \frac{dB}{dt} , \quad (5.45)$$

wobei ρ den Biegeradius der Dipolmagnete in ELSA darstellt.

¹⁴Die zwei Betriebsarten des Dipol-Netzgerätes realisieren zwei mögliche Maximalspannungen $U_{dip}^{(max)}$. Vergleiche dazu Kapitel 1, S.11.

- Der durch die erhöhte Energie angewachsene Energieverlust eines Teilchens durch die Synchrotronstrahlung ist durch 5.31 gegeben und muß durch entsprechendes Nachfahren von $U_{max}(t)$ kompensiert werden.

Diese Auflistung motiviert den universellen Ansatz für die energieabhängige Steuerung der Hochfrequenz-Spitzenspannung $U_{max}(t)$ durch das Kontrollsystem gemäß

$$a(t) := U_{max}(t) = c_0 + c_1 \frac{dB}{dt}(t) + c_2 B^4(t) \quad (5.46)$$

mit geeignet zu bestimmenden positiven Koeffizienten $c_{0,1,2}$.

Es muß an dieser Stelle besonders erwähnt werden, daß die Tracking-Zeitbasis $\{t_i\}$ nicht notwendigerweise aus äquidistanten Schritten $\Delta t = (t_i - t_{i-1})$ besteht. Das Muster der Zeitwertvorgaben ist vielmehr an die konkrete Form der errechneten Steuerfunktionen angepaßt, damit für alle Bereiche eine möglichst gute Zeit- und Amplitudenauflösung bei gleichzeitiger Beschränkung der maximalen Wertezahl N pro Vektor erreicht werden kann.

5.4.1 Tracking der Magnete und der Hochfrequenz-Amplitude

Berechnung der Tracking-Zeitbasis

Der genaue Verlauf von Energie und Arbeitspunkten im Nachbeschleunigungsmodus muß durch Angabe der entsprechenden Kurven durch einen Operateur festgelegt werden. Die Vorgabefunktionen $E(t^{(E)})$, $Q_x(t^{(Q_x)})$ sowie $Q_z(t^{(Q_z)})$ sind dem Kontrollsystem dabei in diskretisierter Form, z.B. in einer Datei, die durch ein Programm zur Tabellierung frei definierbarer Kurvenformen erzeugt wurde, zu übermitteln. Die Diskretisierung umfaßt die Amplituden E , Q_x und Q_z sowie die drei nicht notwendig identischen Zeitbasen $t^{(E)}$, $t^{(Q_x)}$ und $t^{(Q_z)}$. Die jeweils definierten Zeitpunktwerte t_i müssen auf den Beginn eines Maschinenzklus bezogen sein, der den Startwert jeder Zeitachse auf $t_1 := 0 \text{ sec}$ festlegt.

Um eine gemeinsame Zeitbasis für das Tracking der Dipole, Quadrupole und Sextupole zu finden und darauf aufbauend die Steuerfunktionen zu generieren, wird das folgenden Verfahren eingesetzt:

Da jede Vorgabefunktion mit einer individuellen Zeitbasis ausgestattet sein kann, muß zunächst eine gemeinsame Zeitbasis hergestellt werden. Die neue Basis muß mit möglichst guter Auflösung den Amplitudenverlauf aller Funktionen gemeinsam beschreiben. Dies hat die Konsequenz, daß die Zeitpunktwerte der Basis überall dort, wo starke relative Änderungen der Vorgabefunktionen sichtbar sind, entsprechend dichter gelegt werden müssen. So kann beispielsweise der Arbeitspunktverlauf $Q_x(t)$ mit einer Knickstelle definiert sein (siehe z.B. Abb. 5.7, S.90). Die Modellierung erfordert in diesem Bereich eine sehr viel bessere Zeitauflösung als für die nur langsam veränderlichen Teile. Die Forderung nach einer gemeinsamen Zeitbasis bedeutet dann, daß auch der Energieverlauf $E(t)$ und auch $Q_z(t)$ an den entsprechenden Stellen feiner aufgelöst berechnet werden müssen. Der Algorithmus läuft konkret wie folgt ab:

1. Alle Vorgabefunktionen werden durch lineare Interpolation äquidistant diskretisiert, so daß die erreichte Zeitauflösung $\Delta t = t_i - t_{i-1}$ der minimalen Zeitschrittweite entspricht, mit der Amplitudenwerte auf die Digital-Analog-Wandler der Netzgerätsteuerung appliziert werden können.¹⁵ Dabei wird für alle Funktionen eine Zeitbasis mit konstanter Zeitschrittweite Δt erzeugt.
2. Für jede so erzeugte diskrete Funktion werden die Steigungswerte zwischen zwei Stützstellen in der jetzt allgemeinen Zeitbasis $\{t_i\}$ berechnet und relativ zueinander normiert. Anschließend werden alle Steigungswerte in ein Histogramm eingetragen, welches 11 Bins enthält. Das erste Bin enthält alle Intervalle mit einem Steigungswert von 0%, die restlichen 10 Bins entsprechen Werten, die Abstufungen der Steigung in 10%-Schritten von 0% bis 100% definieren.
3. Die einzelnen Abschnitte Δt werden so in Segmente zusammengefaßt, daß aufeinanderfolgende Abschnitte, die alle in einem Histogramm-Bin liegen, kombiniert werden. Einem solchen Abschnitt wird

¹⁵Das Kontrollsystem verwendet für die Generierung der Steuerkurven aller Magnete und der Hochfrequenz eine einheitliche Konvention. Diese Konvention legt die minimale Zeit- als auch Amplitudenauflösung für die Ansteuerung aller beteiligten Digital-Analog-Wandler fest, was die Berechnung sämtlicher Magnetfeldsteuerkurven durch einen universellen Algorithmus erlaubt.

dann eine mittlere Steigung ("Klasse") zugeordnet, die durch den entsprechenden Histogramm-Eintrag definiert wird. Auf diese Weise entsteht eine Kette von Segmenten unterschiedlicher Steigungsklassen. Jeder Klasse ist in einer Tabelle eine bestimmte Zeitaufösung zugeordnet. Bei der nachfolgenden Berechnung der Zeitbasis wird dann je nach Segment der dort vorgefundene Wert verwendet. Insgesamt entsteht so eine gemeinsame Aufteilung der Zeitachse in variabel lange Zeitschritte Δt_i , welche der Kurvenform aller Vorgaben optimal angepaßt ist.

4. Die so ermittelte Zeitbasis wird als Grundlage einer Interpolationsrechnung verwendet, welche für die neuen Zeitwerte die Amplituden der verschiedenen Vorgabefunktionen ermittelt. Dabei wird ein Spline-Verfahren eingesetzt, welches keine Stetigkeit der zweiten Ableitung fordert und deshalb nicht die bekannten Nachteile klassischer Spline-Verfahren zeigt.¹⁶

Durch diesen Algorithmus ist ein Satz diskretisierter Funktionen für die Energie und die Arbeitspunktverläufe entstanden, der mit einer gemeinsamen Zeitbasis das Tracking-Problem für die Magnete in ELSA löst.

Berechnung der Hochfrequenz-Ansteuerung

Aus den Zeitpunktwerten $\{t_i\}$ der Tracking-Zeitbasis für das Magnetsystem ist durch das unter in Abschnitt 5.46, S.92 beschriebene Verfahren die angepaßte Zeitbasis für die Ansteuerung der Hochfrequenzamplitude berechenbar:

Die Werte für $\frac{dB}{dt}$ sowie B^4 werden den Ergebnisdaten der Berechnung des Dipolmagnetfeldes entnommen. Insbesondere ist die Tracking-Zeitbasis $\{t_i\}$ für die Bestimmung von $\frac{dB}{dt}(t)$ relevant. Die Bestimmung von $\frac{dB}{dt}$ sowie B^4 muß dabei in der Mitte des Intervalls $[t_{i-1}, t_i]$ dieser Zeitbasis erfolgen. Es ergibt sich daher die diskretisierte Form der neuen HF-Zeitbasis und der Amplituden-Steuerfunktion durch die beiden Vektoren

$$t_1^{(HF)} := 0 \text{ sec} , \quad (5.47)$$

$$a_1[t_1^{(HF)}] = c_0 , \quad (5.48)$$

$$t_i^{(HF)} := \frac{1}{2}(t_{i-1} + t_i), \quad i = 2 \dots N , \quad (5.49)$$

$$a_i[t_i^{(HF)}] = c_0 + c_1 \frac{B_i - B_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} + c_2 \left(\frac{B_i + B_{i-1}}{2} \right)^4 , \quad i = 2 \dots N . \quad (5.50)$$

Die konkrete Steuerung der Hochfrequenz-Spitzenspannung $U_{max}(t)$ geschieht durch die Vorgabe eines zur Ansteuerleistung P_{HF} der verwendeten Resonatoren proportionalen Leistungswertes $P_V(t)$. Bei bekannter Shunt-Impedanz R_S und Proportionalitätskonstante κ_{HF} ist dann die Spitzenpannung U_{max} in einem Resonator in guter Näherung gegeben als

$$U_{max}(t) = \sqrt{R_S \kappa_{HF} P_V(t)} . \quad (5.51)$$

Die für das HF-System aufgebaute Amplitudenregelung bildet entsprechend diesem Gesetz eine angelegte Steuerspannung $U_{ref}(t) \sim P_V(t)$ in die Spitzenpannung $U_{max}(t)$ ab und regelt Schwankungen aus. Aus diesem Grund kann die Steuerfunktion $a_i[t_i^{(HF)}]$ als proportionale Steuergröße für die einzustellende Spitzenpannung im Resonator interpretiert werden.

5.4.2 EPOS-Operatoren für Magnet- und HF-Tracking

Die zur Realisierung des Nachbeschleunigungsmodus erforderlichen Tracking-Berechnungen wurden zunächst als EPOS-Operatoren implementiert. Die Funktionsweise des EPOS-Systems ist in [31],[67] eingehend beschrieben; das System ist in seinem Funktionsumfang einfach durch "Einhängen" neuer Operatoren erweiterbar.¹⁷

¹⁶In der Literatur ist dieses Verfahren unter dem Namen "Akima-Interpolation" bekannt. Die "klassische" Methode der Interpolation mit kubischen Splines (Polynomstücken) neigt bei starken Amplitudensprüngen zu Unter- oder Überschwängern, da auch die zweite Ableitung stetig gehalten wird. Für die Berechnung der Energie- und Arbeitspunktkurven ist der Verzicht auf diese Forderung aber nicht kritisch.

¹⁷EPOS wurde, ausgehend von der unter VMS entwickelten Software, innerhalb von etwa 2 Wochen auf die UNIX-Workstations portiert. Dabei konnten ca. 95% des entwickelten C-Codes (ca. 50000 Zeilen) ungeändert übernommen werden; lediglich VMS-spezifische Teile (Ein- und Ausgabe-routinen, Ausnahmebehandlung u.a.) mußten angepaßt werden.

Die Entscheidung, die Berechnungen zunächst in **EPOS** zu implementieren, beruht auf der Erfahrung, daß dort neue Verfahren und Algorithmen leicht zu testen und zu modifizieren sind, da die Software relativ umfangreiche Werkzeuge zur Simulation und Erzeugung von Testdaten enthält (z.B. Kurvengenerator, Signalsimulator u.a.). Unterstützt durch Grafikfunktionen, Interpolationsverfahren und Fitroutinen konnten damit zunächst "baukastenorientiert" alle Teilrechnungen ausgearbeitet und schließlich zu einem Gesamtsystem kombiniert werden. Insgesamt fand bereits vor der Inbetriebnahme des neuen Kontrollsystems eine Verifikation sämtlicher Trackingrechnungen statt. Dabei waren auch die neuen magnetoptischen Berechnungsverfahren berücksichtigt. Es wurden folgende Operatoren entwickelt:

1. Der **rampgen**-Operator erzeugt voneinander entkoppelte, modellbasierte Vorgabefunktionen $E(t)$ und $Q_x(t)$ bzw. $Q_z(t)$ für die einzelnen Phasen eines ELSA-Zyklus. Bei den Arbeitspunktvorgaben kann z.B. das Anfahren des Extraktionsarbeitspunktes in der Vorbereitungsphase zur Extraktion definiert werden.
Für die Erzeugung von Vorgabefunktionen ist die Verwendung von **rampgen** nicht verbindlich vorgeschrieben; statt dessen kann z.B. auch der **EPOS**-Funktionsgenerator **funcgen** eingesetzt werden. Der **funcgen**-Operator tabelliert analytisch vorgegebene Funktionen und legt die Ergebniswerte in geeigneten **EPOS**-Variablen ab. Damit können Sollwertkurven für die Nachbeschleunigung mit ausreichender Flexibilität erzeugt werden.
2. Hat man die Vorgaben $E(t), Q_x(t), Q_z(t)$ generiert, werden die Daten an den **ramptrack**-Operator übergeben. Dessen Software rechnet dann die gemeinsame Tracking-Zeitbasis aus und interpoliert alle Vorgabefunktionen in der neuen Zeitbasis. Die Zeitaufösung läßt sich, wie an anderer Stelle beschrieben, über eine Tabelle konfigurieren, die verschiedenen Steigungswerten verschiedene Stützstellenabstände zuweist.
3. Ausgehend von den erzeugten Dipol-Stromwerten kann der **holecbs**-Operator die zweiwertige Steuerfunktion zur An/Abschaltung des Zusatznetzgerätes für die Dipol-Stromversorgung ermitteln.
4. Mittels des Operators **rampwrite** können alle berechneten Steuervektoren durch das Kontrollsystem unter Berücksichtigung der neuen Zeitbasis appliziert werden. Dabei werden die Energie- und Arbeitspunktwerte durch den Magnetexperten **emagnets** in die entsprechenden Stromwerte überführt. Möchte man die durch den Experten berechneten Stromvektoren in **EPOS** lesen, so kann das Kommando **rampread** eingesetzt werden.
5. Das Tracking der Hochfrequenz kann nachträglich, basierend auf der mit **ramptrack** berechneten Zeitbasis und den durch den Magnetexperten **emagnets** erzeugten Dipolmagnetfeldwerten, mit dem **rftrack**-Operator erfolgen. Er gibt die zeitdiskretisierte Steuerfunktion zur Ansteuerung der HF-Amplitude zur Weiterverarbeitung durch **rampwrite** aus. Durch Angabe des Strahlstroms in ELSA mittels der **/beamcurrent**-Option können sogenannte "Beamloading"-Effekte berücksichtigt werden, wenn die entsprechenden Eichgrößen durch Messung bekannt sind.¹⁸

Alle Operatoren sind so konstruiert, daß sämtliche Einstellungen über Optionen bzw. Argumente der **EPOS**-Befehlszeile konfigurierbar sind. An die Vorgabefunktionen werden durch **ramptrack** keine wesentlichen Bedingungen gestellt, sie können z.B. durch ein interaktiv arbeitendes "Zeichenprogramm" auf der Oberfläche einer Workstation erstellt worden sein und einen (in sinnvollen Wertebereichen) beliebigen Verlauf aufweisen [9]. Daher eignet sich **EPOS** insbesondere für Tracking-Rechnungen mit teilweise vorgegebenen Energie- und Arbeitspunktverläufen. Hierzu wurde ein **EPOS**-Programm **makeramp** als Testumgebung entwickelt. Das Erscheinungsbild des Programms auf dem Bildschirm einer Workstation ist für eine konkrete Tracking-Rechnung in Abbildung 5.9 zu sehen.

¹⁸Der "Beamloading"-Effekt bezeichnet den Sachverhalt, daß der umlaufende Elektronenstrom in den Hochfrequenzresonatoren eine Spannung mit zeitlich veränderlicher Phase induziert. Dadurch wird die Sollphase geändert als auch die für den Strahl sichtbare Spitzenspannung in den Resonatoren reduziert. Dies führt zu einer Einschränkung des phasenstabilen Bereichs der longitudinalen Bewegung.

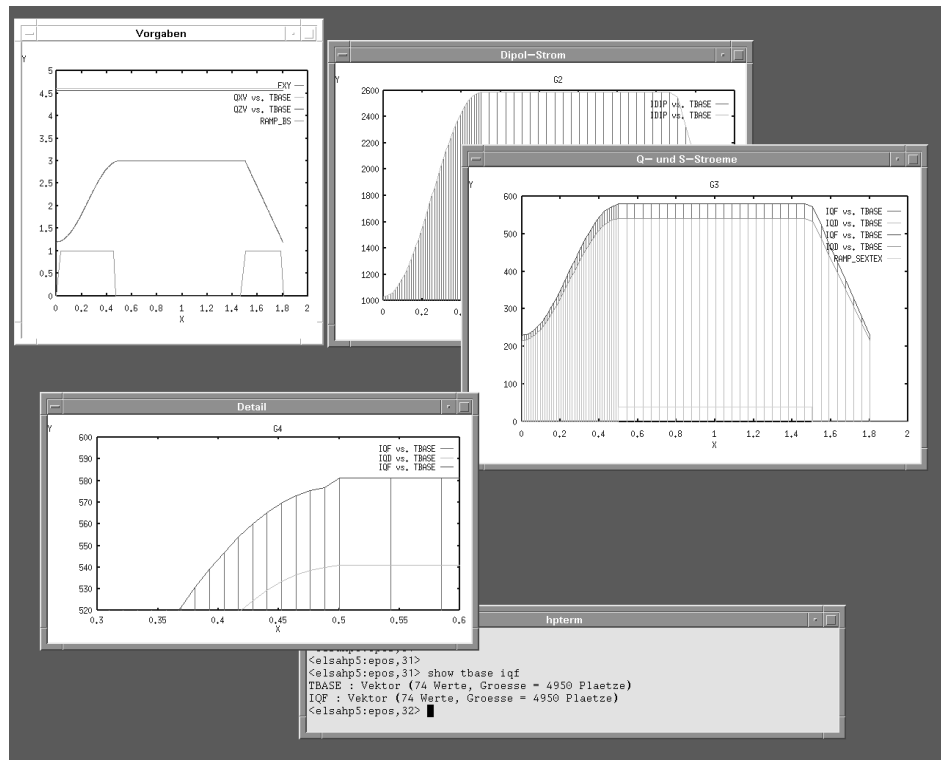


Abbildung 5.9: Tests der Tracking-Berechnungen in EPOS

5.4.3 Konstruktion des Booster-Experten

Im Zuge der Entwicklung der Tracking-Software konnten einzelne Teile bereits unter dem alten ELSA-Kontrollsystem getestet werden. Der ursprünglich zu diesem Zweck eingesetzte `boostermode`-Operator in EPOS enthielt stark vereinfachte Mechanismen zur schnellen Erzeugung von Steuervektoren für die Dipol- und Quadrupolmagnete. Durch Tests mit diesem Operator konnte festgestellt werden, daß

- die Kapselung aller Berechnungen in ein zusammenhängendes Software-Konstrukt die Bedienbarkeit von ELSA und die Generierung von Nachbeschleunigungsrampen stark vereinfacht und zu einer guten Benutzerakzeptanz führt;
- eine Grundmenge von wenigen parametrisierten Kurvenformen für $E(t)$ zunächst für alle Tests ausreichend ist, im Gegensatz zu einer in EPOS implementierten, möglichst universellen Realisierung;
- die Berechnung der Tracking-Zeitbasis durch die feste Zuordnung von jeweils konstanten Zeitschrittweiten für die Bereiche Nachbeschleunigung, Extraktionsvorbereitung und Extraktion stark vereinfacht werden kann, wenn die Bereiche stärkerer Änderungen der Vorgabefunktionen bereits vorab bekannt sind;
- der manuell durchzuführende Abgleich der Trackingrechnungen mit den durch die optischen Einstellungen der Injektionsphase gegebenen Parameterdaten ein Problem bildet, welches oft zu Fehlbedienungen und dadurch zum Strahlverlust während der Nachbeschleunigung, d.h. zum Verlust des Gesamtzyklus, führt.

Um für den Routinebetrieb von ELSA im Nachbeschleunigungsmodus ein robustes, einfach zu bedienendes System zu schaffen, wurde unter Berücksichtigung der oben beschriebenen Erfahrungen beschlossen, alle für das Tracking verantwortlichen Berechnungen in einen Satz zusammenhängender Regeln zu gruppieren und einem dedizierten Experten zuzuordnen. Der so konstruierte `elsaboost`-Experte basiert auf entsprechenden Parametern zur Steuerung der ELSA-Magneto-optik. Die Berechnung des Magnet- und HF-Trackings für einen beliebigen Satz von Vorgabefunktionen unter Beibehaltung aller möglichen konfigurierbaren Details

wurde aber weiterhin bei den speziell entwickelten **EPOS**-Operatoren belassen. In diesem Sinn bildet der Funktionsumfang von **elsaboost** eine Untermenge der in **EPOS** bereitgestellten Verfahren.

Die Einstellung des Nachbeschleunigungsbetriebs reduziert sich bei Verwendung des **elsaboost**-Experten auf die Konfiguration der Magneto-optik für die Endenergie und das Aktivieren weniger Schaltfelder. Das entsprechende Menü ist in Abbildung 5.10 zu sehen.

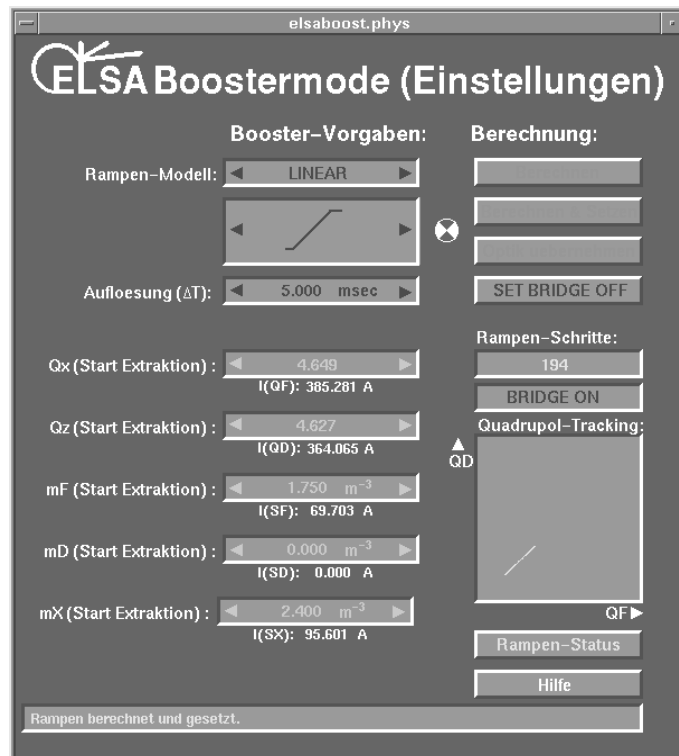


Abbildung 5.10: Bedienung des **elsaboost**-Experten

Zur Durchführung aller Berechnungen und Aktivierung aller Magnetrampen sind die folgenden Schritte durchzuführen:

1. Durch Druck auf die Schaltfläche "**Optik uebernehmen**" übernimmt der Experte alle aktuell definierten magneto-optischen Einstellungen der Injektionsphase. Hierdurch sind die Startwerte der Vorgabefunktionen $E(T)$, $Q_x(t)$ und $Q_z(t)$ sowie $m_F(t)$, $m_D(t)$ und $m_X(t)$ vorgegeben.
2. Durch Beschreibung der Magneto-optik für die Extraktionsenergie werden die Arbeitspunkte und Sextupolstärken definiert, die in der Extraktionsvorbereitungsphase angesteuert werden sollen.
3. Das Rampmodell für $E(t)$ wird durch Auswahl aus einer Liste vorgegebener Modelle gewählt.
4. Die bei der Nachbeschleunigung zu wählende Zeitauflösung der Steuerfunktionen kann durch Eingabe des Wertes in das entsprechende Feld gesetzt werden; dieser Wert dient der Tracking-Software aber nur als Richtwert — Modifikationen werden insbesondere zur Optimierung des Trackings an den Übergabepunkten Injektion/Rampe und nach dem Erreichen der Endenergie vorgenommen.
5. Durch Aktivierung der Schaltfläche "**Berechnen u. Setzen**" werden alle Rechnungen durchgeführt, die Steuervektoren geladen und der Nachbeschleunigungszyklus gestartet.

Stellt **elsaboost** eine inkonsistente Definition fest oder treten während der Berechnung Fehler auf, so meldet der Experte dies über Textmeldungen in einem entsprechend dafür vorgesehenen Ausgabefeld des Menüs.

5.4.4 Arbiträre Funktionsgeneratoren zur Ramperzeugung

Die entweder durch **EPOS** oder durch **elsaboost** berechneten Steuergrößen für Magnete und Hochfrequenz werden in den Datenbanken des Kontrollsystems abgelegt. Über elementare Transaktionen werden die einzelnen Datenvektoren in die Prozeßebene transportiert. Die **VME**-Rechner der Prozeßebene übernehmen die Daten in die lokalen Prozeßdatenbanken. Die Zuordnung eines Datenvektors zu einem Endgerät ist im Kontrollsystem systemweit über Parameter definiert und wird durch den betroffenen **VME**-Prozessor über eine Tabelle von Servicefunktionen abgefragt. Die entsprechende Servicefunktion leitet dann die Daten (zwei Datenvektoren für die Zeitbasis $\{t_i\}$ und die Steuerwerte $\{I_i\}$ bzw. $\{a_i\}$) an einen arbiträren Funktionsgenerator weiter. Auf Befehl startet ein solcher Funktionsgenerator dann mit der sukzessiven Ausgabe der Datenwerte auf einen Digital-Analog-Wandler zu diskreten Zeitpunkten. Um ein korrektes Tracking sicherzustellen, müssen alle Funktionsgeneratoren den Startbefehl gleichzeitig erhalten und mit minimalem Verzug bei garantierter Antwortzeit auf den Befehl reagieren. Der "Befehl" erfolgt bei **ELSA** über einen entsprechenden Puls des Timingsystems; im Falle der Nachbeschleunigung wird die Datenausgabe mit dem Rampstart-Trigger t_{rstart} aktiviert.

Im neuen **ELSA**-Kontrollsystem werden zwei Typen von Funktionsgeneratoren eingesetzt:

- **VME**-basierte Generatoren:

Eine **VME**-CPU lädt einen Wertvektor I_i oder a_i über den **VME**-Bus en bloc in ein spezielles **VME**-Modul.¹⁹ Dieses Modul besteht aus einem lokalen Speicher mit einer Kapazität von 128*1024 Worten einer Breite von 16 Bit, einem Taktgenerator mit Adresszähleranordnung und einem Digital-Analog-Wandler (16 Bit). Durch Programmierung des Taktgenerators wird eine konstante Ausgabeschrittweite Δt eingestellt, mit der nacheinander einzelne Datenworte auf den Wandler gelegt werden. Die Worte werden entsprechend der hochzählenden Adressen aus dem lokalen Speicher des Moduls entnommen. Die minimale Ausgabeschrittweite beträgt 5 μ sec, die maximale Schrittweite 4.3 msec, was eine maximale Ramplänge von ca. 9.4 min bei $\Delta t = 4.3$ msec und ca. 655 msec bei $\Delta t = 5\mu$ sec ergibt. Der Befehl zum Start der Datenausgabe muß über den **VME**-Bus durch Schreiben einer Kennzahl in ein modul-lokales Register erteilt werden. Da alle Daten während der Ausgabe aus dem lokalen Modulspeicher entnommen werden, ist die **VME**-CPU nach Abschluß des Lade- und Programmiervorganges nicht mehr belastet.

Zur Steuerung des Funktionsgenerators wurde eine Software-Bibliothek unter dem **VxWorks**-System entwickelt. Die Einschränkung auf eine konstante Ausgabeschrittweite und die Notwendigkeit der Erzeugung eines speziellen Startbefehls erforderten dabei die Implementierung folgender Funktionen:

- Zur Umrechnung des an die **VME**-CPU übertragenen Zeitvektors $\{t_i\}$ in die äquidistante Schrittweite des Generators wurden mehrere Interpolationsverfahren implementiert. Jedes der Verfahren operiert auf den Eingabedaten mit variablen t_i und erzeugt daraus einen Datenvektor, der Werte auf äquidistanten Stützstellen enthält. Die Interpolation erfolgt dabei immer exakt auf dem durch die minimale Auflösung von 5 μ sec gegebenen Zeitraster des Generators. Als Interpolationsmodelle stehen Treppenstufenfunktion, lineare Interpolation, Akima-Splines und Ausgleichssplines zur Verfügung. Durch Anwendung der Interpolation kann in vielen Fällen das in die Prozeßebene zu übertragende Datenvolumen deutlich reduziert werden (Datenreduktion). So ist z.B. bei Vorgabe einer ohnehin stückweise linear definierten Steuerfunktion nur noch die Übermittlung weniger Stützstellen erforderlich.
- Durch Ausnutzung der Echtzeitfunktionen, die für die Software des Prozeßsystems entwickelt wurden, kann der Generator gestartet und gestoppt werden: Bei Empfang des Rampstart-Triggers t_{rstart} wird ein Interrupt erzeugt, in dessen Behandlungsroutine über den **VME**-Bus das entsprechende Befehlswort in den Generator geschrieben wird; bei Empfang des Rampstop-Triggers t_{rstop} wird über eine andere Funktion ein entsprechender Stop-Befehl appliziert. Die Latenzzeit zwischen der signifikanten Triggerflanke des einlaufenden Start/Stop-Pulses und der Ausgabe des Befehls an den Generator wurde gemessen und beträgt etwa 15 ± 1 μ sec bei Verwendung einer **MC68030**-CPU mit 25 MHz Taktfrequenz. Für extrem kurze Steuerkurven muß diese Latenzzeit explizit berücksichtigt werden.

¹⁹Da im Kontrollsystem möglichst nur standardisierte Komponenten verwendet werden sollen, wurde die Konstruktion eines **VME**-Funktionsgenerators mit eigenen Mitteln verworfen und statt dessen ein kommerziell verfügbarer Modultyp eingesetzt. Es handelt sich um den Funktionsgenerator **VDA16** der Firma **JANZ AG**, welcher zwecks Bereitstellung einer maximalen Speicherkapazität für einen Kanal herstellenseitig modifiziert wurde.

Das Funktionsprinzip der **VME**-Generatoren im neuen **ELSA**-Kontrollsystem ist in Abbildung 5.11 skizziert.

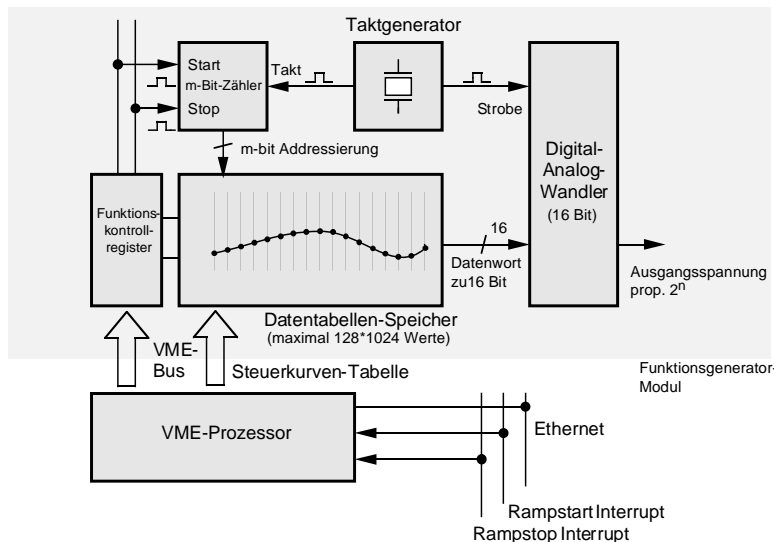


Abbildung 5.11: Arbeitsprinzip eines **VME**-basierten Funktionsgenerators im **ELSA**-Kontrollsystem

Die Software wurde so ausgelegt, daß ein **VME**-Prozessor mehrere Funktionsgeneratoren simultan programmieren und mit Start- und Stop-Befehlen bedienen kann. Auf diese Weise ist das System einfach erweiterbar.

- **Feldbusprozessor**-basierte (**MACS**-)Generatoren:
 Ein **MACS**-Prozessor ist mit spezieller Software zur schnellen Ausgabe von Digitalwerten über einen Optokoppler ausgestattet [95]; ein nachgeschalteter Wandler wird Wert für Wert über den Optokoppler geladen. Alle Einzelwerte werden aus dem Speicher des Feldbusprozessors abgerufen. Der Start der Datenausgabe erfolgt per Unterbrechungsanforderung beim Empfang des **ELSA**-Triggersignals t_{rstart} . Der Prozessor muß zuvor mit einem Zeitvektor t_i und dem zugehörigen Datenvektor I_i oder a_i "gefüttert" werden.

Die Software des **MACS**-Prozessors basiert auf dem bereits im alten Kontrollsystem entwickelten Applikationscode zur Steuerung der **ELSA**-Hauptmagnetnetzgeräte. Zwei wesentliche Änderungen wurden vorgenommen, um die Anforderungen des Nachbeschleunigungsbetriebs besser abzudecken:

- Die Länge der bearbeitbaren Datenvektoren wurde durch Optimierung der Software von 1500 auf 5000 Worte mit einer Breite von 16 Bit erhöht.
- Während der Ausgabe einzelner Datenwerte auf den DAC werden zwischenzeitlich Statuspakete generiert und an den übergeordneten **VME**-Prozessor gesendet. Jedes Statuspaket enthält den zuletzt auf den DAC geschriebenen Wert des Steuervektors. Der **VME**-Rechner leitet die Werte als normale Parameter an die Kontrollebene weiter; hier kann durch die Überprüfung der gemeldeten Werte der aktuelle Sollverlauf einer Magnetrampe verifiziert werden.

Die Ausgabezeit zwischen zwei Datenworten ist variabel in einem Bereich von ca. 100 μ sec bis ca. 42 msec mit einer Genauigkeit von 0.651 μ sec einstellbar, die entsprechenden Werte müssen dazu im Zeitvektor t_i angegeben werden. Die maximal einstellbare Gesamtlänge eines generierten Kurvenverlaufs beträgt dementsprechend ca. 3 $\frac{1}{2}$ Minuten.

Die Zuordnung einzelner Generatortypen zu einzelnen Endgeräten ist bei **ELSA** wie folgt getroffen:

- a) Die Dipol-, Quadrupol- und Sextupolmagnete werden durch **MACS**-Prozessoren angesteuert.²⁰ Alle

²⁰Diese Zuordnung wurde getroffen, da eine Zeitauflösung von ca. 100 μ sec für die Ansteuerung der Magnetnetzgeräte ausreicht und eine Verfeinerung auf 5 μ sec wegen gegebener Bandbreitenbeschränkung keine besseren Ergebnisse erzielen würde; zusätzlich würde der vollständige Ersatz der **MACS**-Prozessoren durch **VME**-Generatoren ein erhebliches Investitionsvolumen darstellen, was in Anbetracht der erzielbaren Verbesserungen nicht akzeptabel erschien.

Prozessoren befinden sich in einem Überrahmen mit gemeinsamer Triggerversorgung und können so gemeinsam die Datenausgabe aktivieren. Da jeder Prozessor eine eigene, quartzstabilisierte Takterzeugung besitzt, kann es beim Ausgeben von langen Datenvektoren zu einem zeitlichen Auseinanderlaufen der Steuerwerte kommen, welches Ungenauigkeiten in das Magnettracking einführt: Schätzt man den Frequenzunterschied zweier Quarze auf Δf , so ergibt sich bei N Zeitbasiswerten ein akkumulierter Zeitbasisfehler ΔT von

$$\Delta T = \frac{N}{f_0} \frac{\Delta f}{f_0 + \Delta f} .$$

Für die Taktfrequenz der Prozessoren von 6.44 MHz und einer spezifizierten Genauigkeit von $\Delta f/f_0 \approx 10^{-4}$ ergibt dies bei 1000 Zeitbasiswerten einen Schlupf von $\Delta T \leq 1 \mu\text{sec}$. Dies entspricht nur ca. 2 Teilchenumläufen in ELSA; die innerhalb dieser Zeit auftretenden Fehlanpassungen des Magnet-Trackings (vergl. Abb. 5.8, S.91) können daher als unkritisch bewertet werden. Durch Versorgung aller Prozessoren mit einem gemeinsamen Referenztakt kann der Schlupf ΔT vollständig eliminiert werden. Dies erfordert allerdings nicht unerhebliche Modifikationen der Elektronik und wurde deshalb nicht durchgeführt.

Der MACS-Überrahmen ist über eine separate Feldbusleitung an einen Kommunikationscontroller der Prozezebene angeschlossen, wie im zweiten Kapitel beim Aufbau der Hardware beschrieben wurde. Damit kann die Bandbreite der HDLC-Leitung von 1.25 MBit/sec zum Transport aller Steuervektoren optimal ausgenutzt werden.

- b) Die Hochfrequenzamplitude wird über einen VME-Generator gesteuert. Da die Impulsantwort des HF-Systems bei Amplitudenänderung eine Änderung der Amplitude in ca. 20 μsec erlaubt, und die Erprobung neuer, hochfrequenzbasierter Extraktionsmethoden bei ELSA eine möglichst flexible und hochaufgelöste Steuerung erfordert, liegt diese Zuordnung nahe. Ähnliche Anforderungen werden auch für die Steuerung der schnellen Extraktionsquadrupole bei ELSA gestellt; aus diesem Grund sind VME-Generatoren auch dort im Einsatz und lösen die früher eingesetzten MACS-Prozessoren ab. Die Steuerung der Extraktion im neuen ELSA-Kontrollsystem ist detailliert in [68] beschrieben.

5.5 Zeitaufgelöste Strahldiagnostik für den Nachbeschleunigungsbetrieb

Leider kann die genaue Vorgabe aller Steuergößen nicht garantieren, daß es nicht zu Strahlverlusten in der Nachbeschleunigungsphase kommt. Dies beruht im wesentlichen auf der Tatsache, daß nicht alle Effekte durch das Kontrollsystem berücksichtigt werden können. Mehrere Problemkreise müssen in diesem Zusammenhang Beachtung finden:

- Fertigungsungenauigkeiten sowie Aufstellfehler der Magnete und die begrenzte Stromauflösung bzw. Regelgenauigkeit der eingesetzten Netzgeräte führen zu Fehlanpassungen der erzeugten Magnetfelder. Hiervon sind insbesondere die transversalen Arbeitspunkte betroffen, denn eine fehlerbedingte Änderung der Fokussierungsstärke um einen Wert $\Delta k(s)$ an einer Position s führt bei kleinen Werten von Δk näherungsweise zu einer Arbeitspunktverschiebung ΔQ von

$$\Delta Q = -\frac{1}{4\pi} \oint \beta(s) \Delta k(s) ds . \quad (5.52)$$

- Trotz der Erstellung von durch Messungen ermittelten Eich Tabellen bzw. -funktionen kann es im Sättigungsbereich der Magnete zu Abweichungen der Magnetfelder von den einzustellenden Größen kommen, da die zugrundeliegenden physikalischen Phänomene in der Regel sehr komplex und im Rahmen des Kontrollsystems nicht adäquat zu modellieren sind. Dies ist besonders bei der Nachbeschleunigung zu hohen Endenergien relevant, wobei die Vorgeschichte der Magnetisierung auf das Verhalten der Magnete wesentlichen Einfluß hat. Auch hier können Arbeitspunktverschiebungen gemäß 5.52 auftreten.
- Die zeitabhängige Erhöhung der Magnetfelder (insbesondere des Dipolfeldes) kann oberhalb einer gewissen Steigung $\frac{\Delta E}{\Delta t}$ zu komplizierten dynamischen Effekten führen. Hierzu zählt beispielsweise die Anregung von Wirbelströmen in der elektrisch leitenden Kammerwand des Vakuumsystems, und die dadurch bedingte kurzfristige Entstehung von inhomogenen Magnetfeldern, die auf den Strahl über die Änderung der optischen Randbedingungen destabilisierend einwirken können.

- Strahlstromabhängige Effekte sind ebenfalls bedeutsam: Durch die Akkumulation des Stroms in ELSA kann beispielsweise eine kohärente Verschiebung $\Delta Q^{(coh)}$ der transversalen Arbeitspunkte verursacht werden, da das durch den Strom erzeugte elektromagnetische Feld über die leitende Kammerwand auf den Strahl zurückwirken kann und eine transversal fokussierende oder defokussierende Wirkung Δk ausübt [69],[90]. Die Verschiebung des Arbeitspunktes ist dann wiederum über 5.52 gegeben und ist im wesentlichen proportional zum Strahlstrom I und umgekehrt proportional zur Teilchenenergie gemäß

$$\Delta Q_{x,z}^{(coh)} \sim \frac{I \bar{\beta}(s)}{E_0}, \quad (5.53)$$

mit einem mittleren Wert der Betafunktion von $\bar{\beta}(s)$ über die gesamte Ringlänge. Dieser Effekt ist insbesondere für das Rampen hoher akkumulierter Ströme zu beachten.²¹

- Falls die Hochfrequenzleistung nicht zur Stabilisierung von Q_s ausreicht, ändert sich der Synchrotronarbeitspunkt während der Nachbeschleunigung (nach 5.39, S.87). Dadurch können Synchro-Betatron-Koppelresonanzen gekreuzt werden, die zum teilweisen Strahlverlust führen.

Im allgemeinen können die Effekte zusammenfassend durch eine einfache Ergänzung der Resonanzbedingung dargestellt werden, die unbedingt vermieden werden muß:

$$n_x (Q_x + \Delta Q_x(t)) + n_z (Q_z + \Delta Q_z(t)) + n_s (Q_s + \Delta Q_s(t)) = l, \quad n_x, n_z, n_s, l \in Z. \quad (5.54)$$

Hierbei sind $Q_{x,z}$ und Q_s die eingestellten und als konstant angenommenen Sollwertvorgaben und die ΔQ -Werte die Auswirkungen der oben angesprochenen Effekte.

Da die Auswirkungen aller beteiligten Effekte durch das Kontrollsystem mangels Kenntnis nicht korrigiert werden können, bleibt nur die Möglichkeit, die magnetoptischen Eigenschaften von ELSA während des Nachbeschleunigungs durch geeignete strahldiagnostische Messungen zu überprüfen und die Einhaltung der wichtigsten Vorgaben zu verifizieren. Ausgehend von den Ergebnissen der vorgenommenen Messungen können dann entweder die Sollvorgaben gezielt geändert oder aber Korrekturen aktiviert werden. Die dazu notwendigen Methoden der zeitaufgelösten Strahldiagnose werden im folgenden Teil des Kapitels behandelt.

5.5.1 Allgemeines Konzept

Das Ziel der Strahldiagnostik für den Nachbeschleunigungsbetrieb ist im wesentlichen die möglichst gut aufgelöste Bestimmung der transversalen Arbeitspunkte Q_x und Q_z sowie des Synchrotron-Arbeitspunktes Q_s über den gesamten Zyklusbereich. Besonders wichtig ist hier die Messung der Größen während der eigentlichen Rampphase; dadurch können sowohl das verwendete magnetoptische Berechnungsmodell als auch das Tracking überprüft und im Bedarfsfall durch Berücksichtigung gemessener Abweichungen korrigiert werden.

Basis der Messungen ist die δ -Puls-Anregung des Elektronenstrahls durch einen Diagnosekicker. Dadurch wird der in ELSA befindliche Elektronenstrahl zu einer kohärenten, transversalen Betatronschwingung um die Sollbahn angeregt. Eine Pulsanregung mit einem idealen δ -Puls ist unter signaltheoretischen Gesichtspunkten äquivalent zur Anregung der transversalen Teilchenbewegung mit weissem Rauschen, da im Puls alle Frequenzanteile enthalten sind. Der Strahl antwortet simultan in allen Frequenzbereichen, in denen Schwingungen angeregt werden können. Bei der Anregung durch einen Diagnosekicker kann kein idealer δ -Puls appliziert werden; dadurch wird der Frequenzbereich der Anregung eingeschränkt. Ist die Pulsdauer ausreichend kurz, d.h. in der Größenordnung der Umlaufzeit in ELSA, so kann allerdings in guter Näherung

²¹ Der zugrundeliegende Effekt besteht im wesentlichen darin, daß durch den Teilchenstrahl elektromagnetische Felder angeregt werden, die bei den gegebenen geometrischen und elektrischen Randbedingungen durchaus eine mit $T_0/h \approx 548/274$ nsec vergleichbare Abklingzeit oder bei resonanzartigen Strukturen (zusätzliche, verstimmte Resonatoren, oder z.B. quaderförmige Vakuumtanks für Septa- oder Kickermagnete) sogar relativ lange Lebensdauer aufweisen ("wakefields"). Dadurch kann der Strahl über sein Feld von Umlauf zu Umlauf auf sich selbst rückwirken. Diese rückkoppelnden Effekte sind bei der Entstehung longitudinaler und transversaler Instabilitäten bedeutsam. In [69] ist insbesondere die zu erwartende Arbeitspunktverschiebung für einen gebunchten Strahl in einer Vakuumkammer elliptischen Querschnitts abgeleitet (dies entspricht in guter Näherung den Bedingungen bei ELSA). In die entwickelte Beziehung geht dabei wesentlich die transversale Kammerimpedanz $Z_{tr}(\omega)$ ein, welche die elektromagnetischen Randbedingungen der konkreten Vakuumkammergeometrie und Materialeigenschaften widerspiegelt und daher indirekt ein Maß für die Stärke der elektromagnetischen Rückwirkung des Teilchenstrahls auf die transversale Bewegung darstellt. Weitere Erklärungen sind z.B. in [97] zu finden.

von einer ausreichend gleichförmigen Anregung ausgegangen werden. Durch Aufzeichnung der transversalen Lage des Strahls in ELSA durch einen Positionsmonitor und nachträgliche Frequenzanalyse dieses Zeitsignals können die kohärenten Anteile extrahiert und einzelnen Komponenten der Teilchenbewegung zugeordnet werden. Das Verfahren ermöglicht durch Identifikation und Vermessung der dominanten Frequenzkomponenten des Spektrums die Messung von Q_x , Q_z und Q_s . Dabei ist aber die erzielbare Auflösung von der Zeitspanne abhängig, in welchem die Schwingung beobachtbar ist:

Die Elektronen einer durch die "Kickanregung" im transversalen Phasenraum sprungartig versetzten Verteilung der Anfangskordinaten besitzen in einer realen, mit Feldkomponenten höherer Ordnung behafteten Magnetoptik infolge unterschiedlicher Emittanzen auch geringfügig voneinander abweichende Betatron-Frequenzen (siehe z.B. die Ableitung in [24] oder [93]). Dadurch laufen die Phasen der Einzelschwingungen auseinander und es kommt zur sogenannten "Filamentierung" im Phasenraum. Da der bei ELSA verwendete Monitortyp elektromagnetisch an den Strahl koppelt, ist er nur auf die Position des Ladungsschwerpunktes der Teilchenverteilung empfindlich. Das Filamentieren äußert sich in diesem Fall dahingehend, daß der Ladungsschwerpunkt sich zu immer kleineren Abweichungen von der Gleichgewichtsbahn bewegt und das kohärente Lagesignal langsam verschwindet, also "gedämpft" erscheint. Bei ELSA-Bedingungen liegen typische Kohärenzdauern im Bereich mehrerer hundert μsec , was die Beobachtungsdauer und damit die Frequenzauflösung limitiert. Diese begrenzte Beobachtungsdauer macht eine Aufzeichnung des Lagesignals für den Beobachtungszeitraum notwendig; erst nachträglich kann die Frequenzanalyse des Signals stattfinden. Die Aufzeichnung geschieht durch einen Transientenrecorder, der die Lagesignale digitalisiert und in geeigneter Form in einem Speicher ablegt. Die nachfolgende Analyse verwendet dann die Daten aus diesem Speicher, wobei die maximal rekonstruierbare Frequenzkomponente f_{max} durch die Wandlerfrequenz f_{sample} nach

$$f_{max} = \frac{1}{2} f_{sample} \quad (5.55)$$

gegeben ist (Nyquist-Beziehung).

Ein alternativer Weg zur Messung der Strahldaten kann statt im Zeitbereich analog im Frequenzbereich stattfinden, da die Beschreibung des Strahlverhaltens in beiden Betrachtungsarten physikalisch äquivalent ist. Bei der Beobachtung im Frequenzbereich wird ein "Stripline-Kicker" mit einer kontinuierlich durchgestimmten Frequenz angesteuert und dadurch der Elektronenstrahl mit genau dieser Frequenz zu Schwingungen angeregt. Gleichzeitig mißt ein Analysator zu dieser Frequenz die spektrale Leistungsdichte, indem ein abstimmbares, schmalbandiges Bandpaßfilter mit einer zur Anregungsfrequenz passenden Mittenfrequenz die entsprechenden Frequenzkomponenten aus dem Lagesignal selektiert.²²

Meistens sind Frequenzgenerator und Analysator in einem Gerät integriert. Das Verfahren erlaubt die kontinuierliche Messung der Strahlantwort auf die applizierte Anregung; dadurch ist die Frequenzauflösung Δf wegen der allgemeingültigen Beziehung $\Delta f \geq \frac{1}{\Delta t}$ bei einer angenommenen Beobachtungsdauer Δt im Prinzip nicht limitiert, wählt man nur Δt ausreichend groß. Voraussetzung für jede Messung ist dann natürlich die Speicherung eines Elektronenstrahls mit über diesen Zeitraum näherungsweise gleichbleibenden Eigenschaften. Die Beziehung zwischen Analysezeit t_{min} und analysiertem Frequenzintervall $|f_1 - f_2|$ bei gegebener 3dB-Auflösungsbandbreite B des Bandpaßfilters läßt sich durch die Beziehung

$$t_{min} \geq a \cdot \frac{|f_1 - f_2|}{B^2} \quad (5.56)$$

abschätzen [29], wobei a eine positive Konstante darstellt. Dieses Verhalten liegt im wesentlichen darin begründet, daß das abstimmbare Bandpaßfilter für eine neu eingestellte Mittenfrequenz eine bestimmte minimale Einschwingzeit benötigt. Da für eine hohe Frequenzauflösung eine kleine Filterbandbreite erforderlich ist, wachsen daher die dafür erforderlichen Meßzeiten überproportional an. Eine Abhilfe kann durch die Verwendung einer Filterbank mit einer großen Zahl paralleler Bandpaßfilter geschaffen werden. Eine Beurteilung beider Methoden für die Frequenzanalyse eines Strahllagesignals ist in [8] zu finden.

Bei ELSA sind bisher beide Verfahren erfolgreich eingesetzt worden. Bei der ersten Methode wurden Lagesignale des Monitorsystems digitalisiert und anschließend durch eine diskrete Fouriertransformation unter EPOS in ein Frequenzspektrum umgerechnet (siehe [31]).

Die zweite Methode verwendet einen 100-Watt Leistungsverstärker in einem Frequenzbereich von 1 kHz bis 5 MHz und einen analogen Frequenzanalysator.²³ Durch die hohe Eingangsempfindlichkeit dieses Gerätes

²²Die Funktionsweise eines Stripline-Kickers ist beispielsweise in [80] beschrieben.

²³Es wird ein Gerät der Firma Rhode&Schwartz eingesetzt (FSA).

können bereits für kleine Anregungsleistungen ausreichend gute Signal-Rauschabstände erzielt werden, was die Vermessung der Arbeitspunkte auch unter erschwerten Bedingungen, z.B. bei sehr kleinen Strahlströmen, möglich macht. Um eine ausreichende Genauigkeit in der Messung zu erzielen, muß allerdings eine Meßzeit von $t_{min} \geq 500 \text{ msec}$ eingestellt werden.

Die Aufgabe der Arbeitspunktverfolgung während der eigentlichen Nachbeschleunigung erfordert die Wiederholung einer Einzelmessung in kurzen Zeitabständen, damit ein möglichst genaues Bild des Strahlverhaltens auf der Rampe erzielt werden kann. Die dabei erreichte Zeitauflösung ist nicht nur für die Rekonstruktion der Arbeitspunktverläufe relevant, sondern gestattet auch die genauere Berechnung von Tracking-Korrekturen bei observierten Abweichungen von den Sollwertvorgaben. Insbesondere motivieren die beim Rampen erwarteten dynamischen Effekte (siehe Abschnitt 5.5) eine möglichst hohe Zeitauflösung, damit auch transiente Phänomene oder sich schnell ändernde optische Bedingungen signifikant nachgewiesen werden können. Die Genauigkeit der eingesetzten Analyseverfahren muß darüber hinaus den Nachweis sehr kleiner Arbeitspunktverschiebungen (mindestens im Bereich $\Delta Q \approx 10^{-3}$) erlauben, um in der Vorbereitungsphase der Extraktion die Arbeitspunkte von ELSA hinreichend nahe an die Extraktionsresonanz legen zu können. Erst danach kann das Extraktionssystem eine weitere Feinsteuerung der ELSA-Optik vornehmen.

Die oben beschriebenen Punkte motivieren die Entscheidung, die Methode der Pulsanregung durch einen Kicker, gefolgt durch eine Frequenzanalyse des digitalisierten Lagesignals als Lösungsansatz des Diagnoseproblems zu wählen. Die frequenzraumbasierte Methode mit kontinuierlicher Anregung kann zwar die geforderte Genauigkeit erzielen, dies aber nur mit relativ langen Beobachtungszeiten, was in Anbetracht der gewünschten Zeitauflösung beim Rampen nicht akzeptabel erscheint. Darüber hinaus sind die Meßdaten des verfügbaren Spektralanalysators nur relativ langsam durch das Kontrollsystem auslesbar, was die Wiederholrate der Messungen weiter einschränkt. Die Geschwindigkeit ist dabei nicht durch das Kontrollsystem, sondern durch den internen Aufbau des Meßgerätes limitiert. Tests des Verfahrens haben gezeigt, daß eine maximale Wiederholrate von etwas mehr als einem Hertz realisierbar ist. Vergleicht man diese mit den bei ELSA möglichen Rampzeiten von deutlich weniger als einer Sekunde, so ist offensichtlich keine vernünftige Abdeckung der Rampphase gegeben.

Die Wiederholrate der Messungen ist auch bei der Methode mit Kickeranregung entscheidend für die Qualität der Diagnostik während des Rampbetriebs. Möchte man kleine Zeitintervalle zwischen zwei Messungen realisieren, so ist mindestens die Datenerfassung der Positionswerte in diesem Zeitraum obligatorisch. Es reicht also für die zeitaufgelöste Strahldiagnose im Nachbeschleunigungsbetrieb im Prinzip aus, für jede Pulsanregung des Diagnosekickers das kohärente Lagesignal durch einen Analog-Digital-Wandler zu digitalisieren und als Block für eine spätere Analyse abzuspeichern. Dieses Konzept der Datennahme wird in Abbildung 5.12 für eine Rampphase in ELSA skizziert.

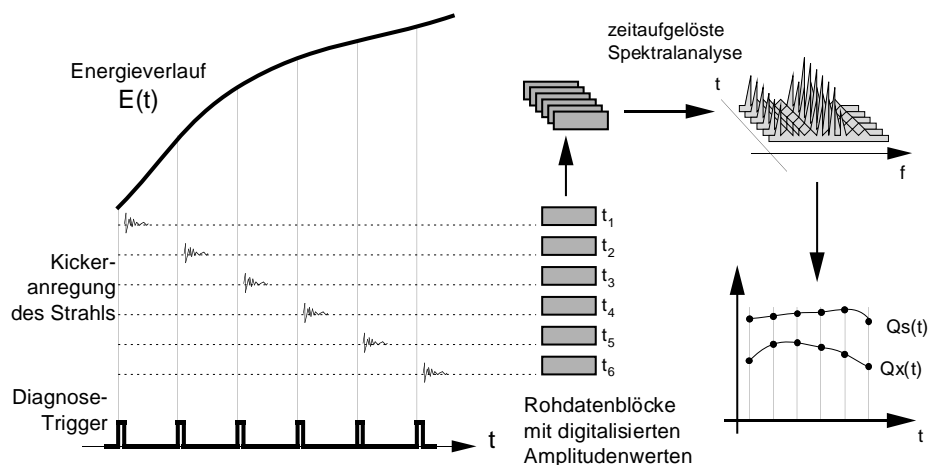


Abbildung 5.12: Rohdatenerfassung für die zeitaufgelöste Strahldiagnose im Rampbetrieb

Der Zeitaufwand für die Digitalisierung und Abspeicherung limitiert die erreichbare Wiederholrate. Bei Verwendung schneller Wandlerelektronik und optimierter Algorithmen des Datentransports liegen Wieder-

holraten von 50 Hz durchaus im Bereich des Möglichen. Die im neuen ELSA-Kontrollsystem implementierte Hard- und Software zur Strahlidiagnose arbeitet nach diesem Grundprinzip.

5.5.2 Einbindung des ELSA-Monitorsystems

Grundlage für jede Messung eines Strahlagesignals von ELSA ist die Konfiguration, Programmierung und Kalibration des ELSA-Monitorsystems. Dessen Aufbau ist detailliert in [77],[53] beschrieben und soll an dieser Stelle nicht rekapituliert werden; für das neue Kontrollsystem ist die Ansteuerung aller Komponenten über eine dedizierte Feldbusleitung und einen zugeordneten VME-Prozessor (MC68030/40 MHz) realisiert, welche bereits im zweiten Kapitel auf Seite 25 vorgestellt wurden. Dieses Konzept ermöglicht eine maximale Durchsatzrate für den Datentransport, da die volle Bandbreite einer HDLC-Leitung ausgenutzt wird. Der VME-Prozessor kommuniziert mit den Feldbusprozessoren über Datenpakete und steuert dadurch im wesentlichen

- die Kaskade zuschaltbarer HF-Verstärker, die Umschaltung auf das Kalibrationssignal zur Einstellung des Synchrondetektors sowie die Auswahl der Meßebe;ne;
- die Verstärkungswerte und Offsetspannungen des NF-Teils;
- Kalibrationsroutinen, die lokal auf dem Feldbusprozessor ablaufen und den NF-Teil und die Phasenschieber des synchronen Detektors (HF-Teil) zur Erzielung eines maximalen Signalpegels abgleichen.

Die Software der Feldbusprozessoren wurde so modifiziert, daß auch nach lokaler Kalibration die neu eingestellten Werte an den VME-Prozessor zurückgemeldet werden; so hat dieser eine konsistente Sicht des Systemzustandes. Für alle Konfigurationsgrößen des Monitorystems wurden Kontrollsystem-Parameter definiert, die einen transparenten Zugriff einer beliebigen Applikation auf alle Einstellungen erlauben. Die Menge der in ELSA eingebauten Monitore ist in zwei Gruppen eingeteilt, wobei die Zuordnung eines Monitors zu einer der beiden Gruppen dynamisch geändert werden kann:

- a) Monitore zur Bestimmung der Gleichgewichtsbahn in ELSA. Diese Monitore nehmen am standardisierten Kalibrationsverfahren teil und erhalten regelmäßig den Befehl zur Lagemessung.
- b) Monitore zur allgemeinen Verwendung durch andere Strahlidiagnosesysteme. Die entsprechenden Monitore werden durch eine Applikation über Parameter unabhängig von der ersten Gruppe programmiert und überwacht. Diese Gruppe wird für die zeitaufgelöste Strahlidiagnostik während eines ELSA-Zyklus eingesetzt.²⁴

Zum lokalen Betrieb des Monitorystems wurde eine Software unter **VxWorks** entwickelt, die beide Monitorgruppen verwaltet und Überschneidungen ausschließt. Durch die hohe Rechenleistung des zugeordneten VME-Prozessors war es möglich, komfortable Einstell- und Kalibrationsprogramme bereits in der Prozeßebe;ne des Kontrollsystems ablaufen zu lassen. Die Auswertung der Kalibrationsdaten des HF- und NF-Teils der Verstärkerelektronik konnte ebenfalls in der Prozeßebe;ne konzentriert werden. Daneben wurde die von J. Wenzel im Rahmen einer Diplomarbeit [92] entwickelten Eichfunktionen zur Umrechnung der gemessenen Lagesignale in Ortsangaben (Abweichungen von der Sollbahn in Millimetern) einbezogen. Erteilt man dem System den Befehl zur Messung der Gleichgewichtsbahn, organisiert die VME-CPU alle dazu erforderlichen Arbeitsschritte und stellt die Ergebnisse in vektorwertigen Parametern zur Verfügung. Zusätzlich werden die jeweils zehn zuletzt gemessenen Lagevektoren in einer Tabelle vorgehalten und können bei Bedarf abgerufen werden, auch Differenzdaten zweier gespeicherter Messungen; die Menge aller Vektoren ist weiterhin auf einen matrixwertigen Parameter des Kontrollsystems abgebildet. Dieses Konzept versorgt Applikationen mit Lagewerten, deren Strukturierung auf die zu bearbeitende Problemstellung angepaßt ist. Ist die Analyse der Rohdaten eines oder aller Analog-Digital-Wandler erforderlich, so können die entsprechenden Datenblöcke über transiente Parameter abgerufen werden. Insgesamt stellt das Monitorystem ein eigenständiges Subsystem dar, welches mit der Kontrollebe;ne über normale Parameter-Transaktionen kooperiert und einen erheblichen Teil der Datenanalyse bereits im Prozeßsystem vornimmt (Datenvorverarbeitung und -reduktion). Durch die Zuordnung separater Rechenleistung im VME-System können Erweiterungen von Hardware und Software in Zukunft leicht erfolgen.

²⁴Die der zeitaufgelösten Strahlidiagnostik zugeteilten Monitore können im Fall einer Messung und Korrektur der Gleichgewichtsbahn zwecks Erhöhung der Korrekturqualität der ersten Gruppe zur Verfügung gestellt werden.

5.5.3 Spektralanalyse der transversalen Teilchenbewegung in ELSA

Modell des durch einen Monitor gemessenen Lagesignals

Grundlage für die Implementierung der zeitaufgelösten Arbeitspunktmessungen ist ein Modell für das Lagesignal, welches an einer festen Stelle im ELSA-Ring eingebauter Positionsmonitor mißt. Die wesentlichen Schritte in der Entwicklung des Modells werden im folgenden erläutert; eine umfassende Behandlung des Themas ist z.B. in [75] und detaillierter in [81] sowie in [93] zu finden.

Da die elektromagnetisch ankoppelnden ELSA-Monitore nur auf den Ladungsschwerpunkt eines Teilchenensembles sensitiv sind, reicht prinzipiell die Modellbildung für ein einzelnes geladenes, hochrelativistisches Teilchen in ELSA aus. Das Lagesignal $s(t)$ setzt sich dann über

$$s(t) = \lambda(t) \cdot x(t) \quad (5.57)$$

zusammen, wobei $\lambda(t)$ die lineare Ladungsdichte und $x(t)$ die Betatronschwingung x_β um eine Gleichgewichtsbahn $x_{c.o.}$ darstellt:

$$x(t) = x_{c.o.} + x_\beta(t) . \quad (5.58)$$

Die lineare Ladungsdichte kann modelliert werden durch eine mit Lichtgeschwindigkeit c umlaufende Punktladung der Ladung e , die periodisch mit der Umlaufzeit T_0 am Monitor vorbeifliegt:²⁵

$$\lambda(t) = \frac{e}{c} \sum_{k=-\infty}^{k=+\infty} \delta(t - kT_0 - \tau(t)) . \quad (5.59)$$

Der Term $\tau(t)$ beschreibt dabei die durch die Synchrotronschwingung hervorgerufene Frequenzmodulation

$$\tau(t) = \tau_{max} \cos(\Omega_s t + \psi_0) \quad (5.60)$$

mit der Synchrotronfrequenz Ω_s und einer willkürlich angenommenen Startphase ψ_0 . Der zweite Teil der Beziehung 5.57 wird durch die Lageschwingung vorgegeben, die sich aus der pseudoharmonischen Betatronbewegung eines Teilchens der Emittanz ϵ , beobachtet an einer festen Ringposition s mit der Betafunktion $\beta(s)$, ergibt:

$$x_\beta(t) = \sqrt{\epsilon\beta(s)} \cos(\mu(t) + \phi_0) . \quad (5.61)$$

Der Term ϕ_0 stellt die willkürlich angenommene Startphase der Betatronschwingung dar.

Zur weiteren Beschreibung wird zunächst die lineare Ladungsdichte in eine andere Darstellung überführt. Da sich der δ -Impulszug als Summierung von harmonischen Exponentialfunktionen gemäß

$$\frac{e}{c} \sum_{k=-\infty}^{k=+\infty} \delta(t - kT_0) = \frac{e}{cT_0} \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} e^{in\omega_0 t} \quad (5.62)$$

darstellen läßt, ergibt sich mit der Zusammenfassung $u(t) := t - \tau(t)$ die Beziehung

$$\lambda(t) = \frac{e}{cT_0} \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} e^{in\omega_0 u(t)} \quad (5.63)$$

$$= \frac{e}{cT_0} \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} e^{in\omega_0 t} e^{-in\omega_0 \tau_{max} \cos(\Omega_s t + \psi_0)} . \quad (5.64)$$

Man kann durch $a := -n\omega_0 \tau_{max}$ und $b := \Omega_s t + \psi_0$ die Identität

$$e^{-ia \cos(b)} = \sum_{m=-\infty}^{m=+\infty} (i)^m J_m(a) e^{imb} \quad (5.65)$$

²⁵Das durch die Ladung mitbewegte elektrische Feld ist aufgrund der Lorentz-Kontraktion im Laborsystem für ein hochrelativistisches Elektron sehr gut durch eine δ -Funktion gegeben. Die lineare Ladungsdichte ist über $\oint_s \lambda(s) ds = -e$ normiert.

ausnutzen und erhält schließlich den Ausdruck für die lineare Ladungsdichte der im Ring umlaufenden Punktladung, die ihre Umlauffrequenz periodisch mit der Synchrotronfrequenz ändert:

$$\lambda(t) = \frac{e}{cT_0} \sum_{n,m=-\infty}^{n,m=+\infty} (-i)^m J_m(n\omega_0\tau_{max}) e^{i[n\omega_0+m\Omega_s]t+m\psi_0} . \quad (5.66)$$

Da bei nichtverschwindender Chromatizität ξ die Betatronfrequenz eines Teilchens über die Energieänderung mit der Synchrotronfrequenz Ω_s moduliert ist, muß für die weitere Analyse zunächst eine Beschreibung des Phasenvorschubs $\mu(t)$ in der Beziehung 5.61 gefunden werden. Da sich die Phasenänderung der Betatronschwingung gerade mit der Betatronfrequenz vollzieht, kann man zunächst die Auswirkung der Impulsabweichung dp eines hochrelativistischen Teilchens mit dem Sollimpuls p_0 auf den Arbeitspunkt über die Beziehungen

$$\frac{dQ}{Q} = \hat{\xi} \frac{dp}{p_0} \Rightarrow \frac{dQ}{dp} = \hat{\xi} \frac{Q}{p_0} \quad (5.67)$$

$$\frac{d\omega}{\omega_0} = -\alpha \frac{dp}{p_0} \Rightarrow \frac{d\omega}{dp} = -\alpha \frac{\omega_0}{p_0} \quad (5.68)$$

darstellen ($\hat{\xi}$ ist die relative Chromatizität): Die vom Impuls $p = p_0 + dp$ abhängige Betatronfrequenz $\omega_\beta = \omega_0 + d\omega$ (d.h. die zeitliche Änderung des Phasenvorschubs $\dot{\mu}$) läßt sich in erster Ordnung entwickeln als

$$\dot{\mu}_\beta = \omega_\beta = \omega(p)Q(p) = \left[\omega(p_0) + \left(\frac{d\omega}{dp} \right)_{p_0} dp \right] \left[Q(p_0) + \left(\frac{dQ}{dp} \right)_{p_0} dp \right] \quad (5.69)$$

$$= \left[\omega_0 - \alpha \omega_0 \frac{dp}{p_0} \right] \left[Q_0 + \hat{\xi} Q_0 \frac{dp}{p_0} \right] \quad (5.70)$$

$$= \omega_0 \left[1 - \alpha \frac{dp}{p_0} \right] Q_0 \left[1 + \hat{\xi} \frac{dp}{p_0} \right] . \quad (5.71)$$

Die periodische Änderung des Teilchenimpulses kann über die Umlaufzeitmodulation τ ausgedrückt werden:

$$\alpha \frac{dp}{p_0} = \frac{d\tau}{dt} . \quad (5.72)$$

Bei Einsetzen in 5.71 entsteht die Beziehung

$$\dot{\mu}_\beta = \omega_0 Q_0 \left[1 - \frac{d\tau}{dt} \right] \left[1 + \frac{\hat{\xi}}{\alpha} \frac{d\tau}{dt} \right] . \quad (5.73)$$

In erster Ordnung kann man diesen Ausdruck nähern und erhält die Modulation der Änderung des Phasenvorschubs als

$$\dot{\mu}_\beta \approx \omega_0 Q_0 \left(1 - \frac{d\tau}{dt} \left(1 - \frac{\hat{\xi}}{\alpha} \right) \right) . \quad (5.74)$$

Eine Integration über dt liefert schließlich mit der Abkürzung

$$\omega_\xi := \frac{\hat{\xi}}{\alpha} \omega_0 Q_0 \quad (5.75)$$

den gesuchten Ausdruck für $\mu(t)$:

$$\mu(t) = Q_0 \omega_0 t + (\omega_\xi - Q_0 \omega_0) \underbrace{\tau_{max} \cos(\Omega_s t + \psi_0)}_{\tau(t)} . \quad (5.76)$$

Setzt man diesen Term in die Beziehung 5.61 ein und multipliziert dies nach 5.57 mit der durch 5.66 gegebenen linearen Ladungsdichte, so erhält man unter erneuter Ausnutzung der Identität 5.65 die Darstellung des Monitorsignals im Zeitraum:

$$s(t) = \frac{x_{c.o.} e}{cT_0} \sum_{l,m=-\infty}^{l,m=+\infty} (-i)^m J_m(l\omega_0\tau_s) e^{i\omega_{lm}t+m\psi_0} + \frac{1}{2} \frac{e \sqrt{\epsilon\beta(s)}}{cT_0} \sum_{n,m=-\infty}^{n,m=+\infty} (-i)^m J_m(\tau_{max} [(n+Q_0)\omega_0 - \omega_\xi]) e^{i(\omega_{nm}t+m\psi_0)}$$

mit den diskreten Frequenzen

$$\omega_{lm} = l\omega_0 + m\Omega_s \quad (5.77)$$

$$\omega_{nm} = (n + Q_0)\omega_0 + m\Omega_s \quad (5.78)$$

Das Signal besteht also aus rein harmonischen Komponenten, die im Frequenzraum scharfe Linien bilden:

- Harmonische der Umlauffrequenz $l \cdot \omega_0 = l \cdot \frac{2\pi}{T_0}$, resultierend aus einem nichtverschwindenden Wert für $x_{c.o.}$;
- Satellitenfrequenzen der Synchrotronschwingung (im folgenden Synchrotron-Satelliten genannt) als Seitenbänder um die Umlaufharmonischen mit dem Abstand $\pm\Omega_s, \pm 2\Omega_s, \dots$;
- Betatron-Linien als symmetrische Seitenbänder um jede Umlaufharmonische, resultierend aus der pseudoharmonischen Bewegung $x_\beta(t)$, wobei der Abstand eines Seitenbandes gegeben ist durch die Betatron-Frequenz $\pm\omega_\beta = \pm Q\omega_0$;
- Synchrotron-Satelliten als Seitenbänder um Betatron-Seitenbänder, ebenfalls mit dem Abstand $\pm\Omega_s, \pm 2\Omega_s, \dots$.

Die Höhe der Synchrotron-Satelliten wird durch die Besselfunktionen J_m gegeben. Durch die Abhängigkeit des Arbeitspunktes von der periodischen Energieänderung mit Ω_s wird die Hüllkurve der Satellitenamplitude um die Frequenz ω_ξ verschoben.

Zusätzlich angehoben werden die Synchrotron-Satelliten der Umlaufharmonischen dann, wenn der Monitor an einer Ringposition mit nichtverschwindender Dispersionsfunktion D sitzt. In diesem Fall wird nämlich wegen

$$x_D(t) = D \frac{dp}{p_0}(t) = \frac{D}{\alpha} \frac{d\tau}{dt}(t) \sim D \sin(\Omega_s t + \phi) \quad (5.79)$$

die mit Ω_s periodische Energieänderung in eine entsprechende Änderung der Teilchenposition umgesetzt. Diese addiert sich zur x -Position des Teilchens, so daß die Beziehung 5.58 auch geschrieben werden kann als

$$x(t) = x_{c.o.} + x_D(t) + x_\beta(t) \quad (5.80)$$

Betrachtet man die einer realen Messung zugänglichen positiven Frequenzen, so erhält man für eine umlaufende Punktladung das in Abbildung 5.13 skizzierte Spektrum:

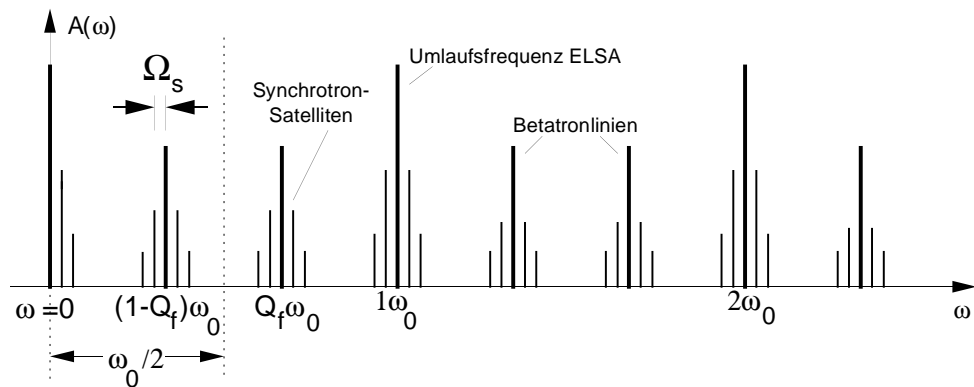


Abbildung 5.13: Schematisches Strahlagespektrum für eine umlaufende Punktladung in ELSA

Bestimmung der Arbeitspunkte aus dem Spektrum

Die Bestimmung des transversalen und longitudinalen Arbeitspunktes kann offensichtlich simultan aus einem einzelnen gemessenen Lagesignal erfolgen. Durch Vermessung der diskreten Frequenzlinien

$$(n + Q)\omega_0 + m\Omega_s \quad (5.81)$$

läßt sich Ω_s als Abstand der Synchrotron-Satelliten einer Betatron-Linie und der Nachkommateil des Arbeitspunktes Q aus der Frequenz einer Betatron-Linie bestimmen. Der ganzzahlige Teil des Arbeitspunktes ist nicht rekonstruierbar, da bei der Aufteilung $Q := Q_{int} + Q_{frac}$ der ganzzahlige Teil Q_{int} in der Summe 5.77 zu einer einfachen Indexverschiebung $n' := n + Q_{int}$ führt und somit die Darstellung nicht ändert.²⁶ Bei Betrachtung von 5.81 erkennt man, daß im Prinzip die Ermittlung des Frequenzspektrums bis zur halben Umlauffrequenz in ELSA für eine Bestimmung der Arbeitspunkte ausreicht:

- Der Nachkommateil Q_{frac} des Arbeitspunktes kann immer aus dem der Frequenz $f = 0$ Hz nächstliegenden Betatron-Seitenband gemessen werden; dabei ist zusätzlich die Information notwendig, ob $Q_{frac} > 0.5$ oder $Q_{frac} < 0.5$ gilt. Nimmt man beispielsweise ein $Q = 4.6$ an, so liegt im Bereich $0 \text{ Hz} < \omega < \omega_0/2$ die Betatronlinie für $n = -5$ bei der Position $\omega = 0.4 \omega_0$.
- Die Synchrotronfrequenz Ω_s (und über $Q_s = \Omega_s/\omega_0$ der Synchrotronarbeitspunkt) kann entweder aus den Satelliten der Harmonischen für $l = 0$ (Seitenband zu $f = 0$) gewonnen werden, oder aus den Satelliten des für die transversale Arbeitspunktmessung selektierten Betatronlinie (s.o.).

Die Aufgabe der Bestimmung der Arbeitspunkte $Q_{x,z}$ bzw. Q_s reduziert sich damit auf die Aufgabe der Berechnung des Frequenzspektrums eines gemessenen Lagesignals in ELSA und der Identifikation der relevanten Spektrallinien. Als Voraussetzung ist die Abtastung des Lagesignals infolge des Sampling-Theorems mit mindestens der Umlauffrequenz in ELSA notwendig.

Die Annahme einer umlaufenden Punktladung kann beim Übergang zum realen ELSA-Strahl durch folgende Überlegungen ergänzt werden, die auf das vorgestellte Meßprinzip zur Bestimmung der Arbeitspunkte aber keinen wesentlichen Einfluß haben:

- In der Realität liegt eine von einer Punktladung abweichende Teilchenverteilung vor: Die einzelnen Teilchen eines Bunches überlagern ihre elektromagnetischen Felder in linearer Superposition — der Monitor sieht daher nur eine entsprechend der Bunchform "verschmierte" Feldverteilung vorüberziehen. Das Frequenzspektrum ergibt sich dann als Multiplikation der Fouriertransformierten der umlaufenden Punktladung, multipliziert mit der Fouriertransformierten der Bunchform. Im Zeitraum entspricht dies der Faltung zwischen dem Impulszug der linearen Ladungsdichte $\lambda(t)$ und der angenommenen Bunchform $b(t)$, die bei ELSA in guter Näherung als gaussförmig beschrieben werden kann. Der bei einem Bunch (mit N Teilchen der Ladung e) in ELSA umlaufende Strom kann bei diesem Ansatz durch

$$I_b(t) = \frac{eN}{\sqrt{2\pi}\sigma_\tau} \sum_{m=-\infty}^{m=+\infty} e^{-\frac{(t-mT_0)^2}{2\sigma_\tau^2}} \quad (5.82)$$

modelliert werden. Hierbei beschreibt σ_τ die mittlere Bunchlänge, projiziert auf die Zeitachse. Da die Transformierte der gaussförmigen Bunchform $b(t)$ wiederum gaussförmig ist, verringert sich die Amplitude der Spektrallinien mit steigender Frequenz immer mehr: Die Fourierdarstellung von $I_b(t)$ beschreibt diesen Effekt der Amplitudenabnahme der Umlaufharmonischen:

$$I_b(t) = \frac{eN}{T_0} \sum_{n=1}^{n=\infty} \left(\frac{2eN}{T_0} \right) e^{-\frac{\omega_n^2 \sigma_\tau^2}{2}} \cos(\omega_n t) . \quad (5.83)$$

Für die Arbeitspunktmessung ist aber nur die Lage der Frequenzlinien interessant. Die oben genannten Beziehungen ermöglichen allerdings die Messung der mittleren Bunchlänge σ_τ durch Messung der Amplitudenhüllkurve der Umlaufharmonischen [47].

- Bei ELSA ist der Ring mit 274 Bunchen bevölkert, die den durch die Hochfrequenzbeschleunigung entstandenen, mit Teilchen gefüllten "Buckets" entsprechen. Dadurch wird das Spektrum der Umlaufharmonischen mit Betatron-Seitenbändern und Synchrotron-Satelliten um die jeweiligen Harmonischen der HF-Frequenz (500 MHz) gruppiert. Die Umlaufharmonischen in ELSA stellen sich daher als Seitenbänder der 500 MHz-Harmonischen dar. Da das Monitorsystem zur Rekonstruktion des Lagesignals das so entstandene Signal demoduliert und vom 500 MHz-Träger trennt, braucht das in 5.77 beschriebene Modell auch bei Berücksichtigung des Multi-Bunch-Betriebs in ELSA für die Bestimmung der Arbeitspunkte nicht modifiziert zu werden.

²⁶Physikalisch entspricht dies natürlich der Tatsache, daß eine Frequenz $\omega_\beta = Q\omega_0 > \omega_0$ nicht rekonstruiert werden kann, wenn sie nur mit der Rate ω_0 abgetastet wird; gerade dies geschieht durch einen ELSA-Monitor, der einmal pro Umlauf einen Lagewert ermittelt. Die in 5.77 gegebene Beziehung erlaubt allerdings die Bestimmung des ganzzahligen Anteils von Q_0 , wenn man die Höhe der gemessenen Synchrotron-Satelliten ermittelt und auf das Argument der Besselfunktion J_m zurückrechnet.

- Da nicht alle Bunche in ELSA exakt gleich mit Teilchen angefüllt sind, prägt sich der Höhe einzelner Umlaufharmonischer im Spektrum eine spezifische Hüllkurve auf. Die Hüllkurve ist dabei durch die Fouriertransformierte der longitudinalen Ringfüllung $I_{fill}(t)$ in ELSA gegeben und führt in der Regel zu einer komplizierten Amplitudenstruktur des Spektrums. Da für die Bestimmung der Arbeitspunkte nur die Lage, nicht aber die Höhe der Frequenzlinien relevant ist, kann auch hier auf eine Modifikation von 5.77 verzichtet werden.
- Natürlich schwingen nicht alle Teilchen in der Maschine mit der exakt gleichen Betatronfrequenz. Bedingt durch eine statistische Anfangsverteilung der Impulsabweichung dp/p_0 kommt es im Frequenzspektrum zu einer Verbreiterung der Komponenten für Umlauffrequenz, Betatron-Seitenbänder und Synchrotron-Satelliten sowie der entsprechenden Harmonischen; eine vormals "scharfe" Frequenzlinie wird zum "Peak" mit bestimmter Breite. Das Zentrum des Peaks steht dann bei einer symmetrischen Verteilung für $dp/p_0 = 0$, die Frequenzbreite der Verteilung ist nach [30] gegeben durch

$$\Delta(n + Q)\omega_0 = (Q_0\xi - n\alpha)\frac{dp}{p_0}\omega_0 . \quad (5.84)$$

Ausgehend von dem entwickelten Modell des Lagespektrums werden in den folgenden Abschnitten die Verfahren zur Berechnung und Analyse der Frequenzspektren vorgestellt; da für das Kontrollsystem alle Daten in diskretisierter Form vorliegen müssen, sind spezielle Methoden der digitalen Signalverarbeitung zu implementieren.

5.5.4 Fourieranalyse mit Fenstertransformationen

Die vom Monitorssystem gemessenen Lagedaten (N Werte für ein kohärentes Lagesignal) liegen in zeitdiskretisierter Form vor:

$$s(t) \rightarrow s_k(t_k) = s(k \cdot \Delta t), \quad \Delta t = f_{sample}^{-1}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1 . \quad (5.85)$$

Die Berechnung des Frequenzspektrums kann dann unter der Annahme einer ein- oder mehrfachen Periodizität des Eingangssignals im Beobachtungszeitraum durch eine diskrete Fouriertransformation

$$\{S_n\} = DFT(s_k) := \sum_{k=0}^{k=N-1} s_k e^{-2\pi i k n / N}, \quad 0 \leq n \leq N-1 \quad (5.86)$$

erfolgen, mit der einem berechneten S_n zugeordneten diskreten Frequenz

$$f_n = \frac{n}{N} f_{sample} = \frac{n}{N \Delta t}, \quad 0 \leq n \leq N-1 , \quad (5.87)$$

wobei aufgrund des Sampling-Theorems die Hälfte der erzeugten Punkte f_n den Bereich von $f = 0$ Hz bis zur Nyquist-Frequenz $f_{nyquist} = f_{sample}/2$ abdeckt. Alle Frequenzen des Ausgangssignals $s(t)$, die über der Nyquist-Frequenz lagen, werden durch den Abtastprozeß nach 5.85 in den Frequenzbereich $0 \leq f \leq f_{nyquist}$ abgebildet ("Aliasing"). Um diesen Effekt so weit wie möglich zu unterdrücken, muß das Signal $s(t)$ bereits vor der Digitalisierung durch einen analogen Tiefpaßfilter bandbreitenbegrenzt werden. Da analoge Filter mit einer rechteckigen Übertragungsfunktion nicht realisiert werden können, muß der Tiefpaß eine Grenzfrequenz besitzen, die bei $f = f_{nyquist}$ eine ausreichende Sperrdämpfung aufweist.

Die konkrete Berechnung der DFT erfolgt durch die Vorschrift

$$Re[S_n] = \sum_{k=0}^{k=N-1} (Re[s_k] \cos \frac{2\pi n k}{N} + Im[s_k] \sin \frac{2\pi n k}{N}) , \quad (5.88)$$

$$Im[S_n] = - \sum_{k=0}^{k=N-1} (Re[s_k] \sin \frac{2\pi n k}{N} - Im[s_k] \cos \frac{2\pi n k}{N}) . \quad (5.89)$$

Die spektrale Leistungsdichte²⁷ des Signals für die Frequenzkomponente f_n ergibt sich daraus als

$$P_n = \frac{1}{N} |S_n|^2 = \frac{1}{N} (Re[S_n]^2 + Im[S_n]^2), \quad 0 \leq n \leq N-1 . \quad (5.90)$$

²⁷Die Größe $\frac{1}{N} |S_n|^2$ wird oft auch als Periodogramm des Eingangssignals bezeichnet. Die im Eingangssignal insgesamt enthaltene Leistung beträgt $P = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{n=N-1} P_n$.

Die Berechnung der DFT nach 5.88 ist im allgemeinen zu zeitaufwendig, da der Algorithmus eine Rechenzeit proportional zu N^2 aufweist und bereits für relativ wenige Abtastpunkte s_k eine erhebliche Rechnerbelastung darstellen würde. Der von Cooley und Tukey entwickelte "Butterfly"-Algorithmus ("fast fourier transform" FFT) nutzt interne Symmetriebeziehungen in 5.86 aus und erzielt auf diese Weise ein Rechenzeitverhalten $\sim N \log_2 N$ [14]. Der weitere Vorteil der FFT besteht in der Reduktion der numerische Rundungsfehler, die wegen eingesparter Rechenoperationen um einen Faktor $(\log_2 N)/N$ herabgesetzt sind. Der FFT-Algorithmus ist detailliert in [13] beschrieben.

Die mit der FFT erzielbare Frequenzauflösung ist durch die endliche Beobachtungszeit $\tau = N \cdot \Delta t$ prinzipiell wegen der Beziehung $\Delta f \geq \tau^{-1}$ limitiert. Für eine quantitative Analyse modelliert man den endlichen Datenzug der $\{s_k\}$ durch eine zeitlich unbegrenzt vorliegende Funktion $\hat{s}(t)$, multipliziert mit der sog. Fensterfunktion $w(t)$, die nur auf einem Intervall $[0, \tau]$ von Null verschiedene Werte hat. Der endliche Meßprozeß ist durch das Rechteckfenster $w_R(t)$ gegeben als

$$s_k \leftarrow s(t) = w_R(t)\hat{s}(t), \quad w_R(t) = \begin{cases} 0 & : t < 0 \\ 1 & : 0 \leq t \leq \tau \\ 0 & : t > \tau \end{cases}, \quad t = k\Delta t. \quad (5.91)$$

Im Frequenzraum ist die Multiplikation äquivalent zur Faltung der Fouriertransformierten $S(\omega)$ des Originalsignals $\hat{s}(t)$ mit der Transformierten der Fensterfunktion $W(\omega)$ nach

$$S_w(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(f)W(\omega - f)df, \quad (5.92)$$

und führt zu der unter dem Namen "Spectral Leakage" bekannten Verschmierung des in $\hat{s}(t)$ enthaltenen Frequenzspektrums. Die Transformierte des Rechteckfensters w_R ist der sog. "Dirichlet-Kern"

$$W(\omega) = e^{i\frac{\omega\Delta t}{2}} \frac{\sin(\frac{N}{2}\omega\Delta t)}{\frac{1}{2}\omega\Delta t} \quad (5.93)$$

mit der spektralen Leistungsdichte $P_W(\omega) = |W(\omega)|^2$. Die Breite $\Delta\omega$ des Zentralbereiches von $P_W(\omega)$ gibt das Frequenzintervall an, in dessen Breite das Fenster analog zu einem Bandpaßfilter dieser Breite Signalanteile akkumuliert und der Mittenfrequenz zuordnet. Die Breite dieses Akkumulationsbereiches wird als Rauschbandbreite des Fensters gekennzeichnet ("equivalent noise bandwidth" ENBW). Die Rauschbandbreite kann für eine gegebene Fensterfunktion $w(t)$ mit der Beziehung

$$ENBW(w) = \frac{\sum_{n=0}^{n=N-1} w^2(n\Delta t)}{\left(\sum_{n=0}^{n=N-1} w(n\Delta t)\right)^2} \quad (5.94)$$

berechnet werden [38] und ist auf die Frequenzauflösung der diskreten Fouriertransformation $f_{s\text{amplitude}}/N$ bezogen: im Falle des Rechteckfensters ergibt sich eine Rauschbandbreite $ENBW(w_R) = 1$. Insbesondere sind alle Rauschbandbreiten für eine vom Rechteckfenster abweichende Transformation immer größer als 1.

Durch die Verschmierung werden Frequenzlinien niedriger Höhe, die nahe einer höheren Linie liegen, durch die Transformierte der Fensterfunktion überdeckt. Hat die Transformierte $W(\omega)$ hohe Seitenbänder, ist die Verschmierung stark, bei niedrigen Seitenbändern entsprechend schwächer ausgeprägt. Beim Rechteckfenster w_R liegen die dem Zentralbereich direkt benachbarten Seitenbänder von $W_R(\omega)$ ca. 13 dB unterhalb der Höhe des zentralen Peaks. Tauchen also in $\hat{s}(t)$ dicht neben einer Frequenzlinie weitere Linien auf, so sind diese nur signifikant nachweisbar, wenn sie weniger als ca. 13 dB unterhalb der Hauptkomponente liegen.

Die Angabe einer durch die FFT erzielten Frequenzauflösung ist nach den oben ausgeführten Wirkungen des involvierten Fensters nicht mehr allgemeingültig durch $f_{s\text{amplitude}}/N$ gegeben, sondern ist bei gegebener Rauschbandbreite und N aufgezeichneten Signalwerten s_k durch

$$\Delta f = (ENBW) \cdot \frac{f_{s\text{amplitude}}}{N} \quad (5.95)$$

berechenbar.²⁸

Die genaue Kenntnis von $W_R(\omega)$ erlaubt die Verbesserung der Frequenzauflösung der FFT durch Interpolation der diskreten Spektralwerte P_n über den Verlauf von $W_R(\omega)$. Bezeichnen die beiden Tupel $(n-1, P_{n-1})$ und (n, P_n) die beiden Frequenzbins der FFT mit der höchsten Leistungsdichte, so ist die korrigierte Frequenz f_{corr} gegeben durch

$$f_{corr} = \frac{f_{sample}}{N} \left(n - 1 + \frac{P_n}{P_{n-1} + P_n} \right) \quad (5.96)$$

und die korrigierte Leistungsdichte P_{corr} als

$$P_{corr}(f_{corr}) = P_n \frac{\pi(n-n')}{\sin(n-n')}, \quad n' = n + \frac{P_n}{P_{n-1} + P_n}. \quad (5.97)$$

Eine genaue Beschreibung dieses als "Spectral-Leakage-Korrektur" bezeichneten Verfahrens ist in [31],[4] zu finden, ergänzt um eine Diskussion der damit erzielbaren Verbesserungen sowie der Fälle, in denen eine Interpolation nicht sinnvoll ist. Da für die Messung eines Arbeitspunktes die relative Genauigkeit der Messung direkt durch die relative Genauigkeit der Frequenzmessung gegeben ist, wird bei der Berechnung der Spektren immer das Rechteckfenster eingesetzt.

In bestimmten Fällen ist der Einsatz einer alternativen Fenstertransformation wünschenswert. Dies ist immer dann der Fall, wenn Spektrallinien dicht neben benachbarten, stärkeren Linien erwartet werden. In diesem Fall kann durch Wahl eines geeigneten Fensters $w(t)$ eine höhere Seitenbandunterdrückung erzielt werden, als es bei Verwendung des Rechteckfensters möglich wäre. Bei der für ELSA gegebenen Aufgabenstellung der Messung des Synchrotron-Arbeitspunktes Q_s aus dem Frequenzabstand $\Omega_s/2\pi$ einer Synchrotron-Satellitenlinie ist dies oft erforderlich, da die Höhe der Synchrotron-Satelliten oftmals deutlich mehr als 10 dB unterhalb des jeweiligen Trägers (Umlaufharmonische oder Betatronlinie) liegt. Eine Fouriertransformation mit Rechteckfenster verschmiert die Linien derart, daß eine genaue Vermessung von Q_s nicht mehr möglich ist. In diesem Fall ist die Verschlechterung der Frequenzauflösung durch eine Rauschbandbreite $ENBW > 1$ noch akzeptabel, wenn dafür die Satelliten gerade noch identifiziert werden können. Gesucht ist in diesem Fall eine Transformation mit hoher Seitenbandunterdrückung und möglichst kleiner Rauschbandbreite.

Allen sinnvoll einsetzbaren Transformationen ist gemeinsam, daß sie durch glatte, positive Funktionen mit einer auf einen schmalen Frequenzbereich konzentrierten Fouriertransformierten gebildet werden. Der Funktionsverlauf von $w(t)$ ist dabei immer so beschaffen, daß ein weicher Übergang von $w(0) = 0$ bis zur Mitte $w(N/2 - 1) = 1$ erzielt wird, ohne das Originalsignal durch zu kleine Werte von $w(n)$, $n \leq N/2 - 1$ zu stark abzuschwächen.²⁹

Die heute verwendeten Fenstertransformationen lassen sich in drei Klassen einteilen (für eine genaue Analyse der meisten heute gebräuchlichen Fenster siehe z.B. [38]):

- "Klassische" Transformationen:

Die Funktion $w(t)$ (in diskretisierter Form $w(n)$) ist durch einen einfachen Ausdruck gegeben. Als Beispiel sei das "Parzen"-Fenster aufgeführt:

$$w(n) = 1.0 - \left| \frac{n}{N/2} \right|^2, \quad 0 \leq |n| \leq \frac{N}{2}. \quad (5.98)$$

Dieses Fenster hat eine Seitenbandunterdrückung von 21 dB bei einer Rauschbandbreite von 1.2 und einer 6 dB-Bandbreite von 1.59.

²⁸Die Frequenzauflösung ist gegeben durch den minimalen Abstand Δf zweier gleichhoher, noch unterscheidbarer Spektrallinien nach der vorgenommenen Transformation; die Linien können nur dann separiert werden, wenn sich zwischen den beiden entsprechenden Frequenzbins noch mindestens eine Komponente mit geringerer Höhe zeigt. Ist dies nicht der Fall, kann ohne Vorkenntnis des Originalsignals keine Unterscheidung zwischen einer oder zwei Frequenzkomponenten getroffen werden. Aus diesem Grund ist für eine hohe Frequenzauflösung immer eine möglichst kleine Rauschbandbreite erforderlich. Nach 5.94 ist damit das Rechteckfenster das dafür am besten geeignete Fenster. Verwendet man eine andere Transformation, so ist für die Separation zweier gleich starker, benachbarter Linien die 6 dB-Bandbreite der Fouriertransformierten der Fensterfunktion maßgeblich. Die Angabe des 3 dB-Wertes ist für diese Betrachtung nicht ausreichend, da die Addition der Fouriertransformierten des Fensters bei zwei gleichstarken Peaks in der Mitte zwischen beiden Linien einen Wert ergibt, der gleich der Höhe beider Transformierten entspricht: Die beiden Linien können nicht unterschieden werden.

²⁹Nur bei einem gaussförmigen Fenster sind sowohl $w(t)$ als auch $W(\omega)$ glatt und konzentriert. Optimal wäre also die Verwendung einer gaussförmigen Transformation. In der Realität ist aber durch die endliche Zahl N der gemessenen Werte das Abschneiden der Gausskurve an den Rändern notwendig; die entstandene Transformation besteht damit im Frequenzraum aus der Faltung der Transformierten $W_{gauss}(\omega)$ mit dem Dirichlet-Kern, was wiederum zu suboptimalem Verhalten führt.

- Numerisch optimierte Transformationen:

Dabei wird eine Fensterfunktion bei Vorgabe von Randwerten für Seitenbandunterdrückung und Rauschbandbreite für eine Zahl verschiedener Modelle optimiert. Hierzu gehören z.B. die Blackman–Harris–Fenster. Durch Anpassungsrechnungen nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate kann für einen allgemeinen Ansatz

$$w(n) = a_0 - a_1 \cos\left(\frac{2\pi}{N}n\right) + a_2 \cos\left(\frac{2\pi}{N}2n\right) - a_3 \cos\left(\frac{2\pi}{N}3n\right) \quad (5.99)$$

der Koeffizientensatz $\{a_i\}$ für optimale Seitenbandunterdrückung und Rauschbandbreite ermittelt werden. So kann man z.B. ein Fenster mit 92 dB Unterdrückung bei einer Rauschbandbreite von 2 erhalten, oder 61 dB bei einer Rauschbandbreite von 1.61 (bei einer 6 dB–Bandbreite von 2.72 bzw. 2.19).

- Spezialfenster für besondere Anwendungen: Diese Fenster sind nur anhand ihrer Fouriertransformierten $W(\omega)$ im Frequenzraum definiert und müssen zur Anwendung erst in den Zeitraum rücktransformiert werden. Hierzu gehört z.B. das Dolph–Chebyshev–Fenster.

Zur konkreten Durchführung der Transformation multipliziert man in der Beziehung 5.86 die gemessenen Lagewerte s_k mit der Fensterfunktion $w(k)$ gemäß

$$\{S_n^{(w)}\} = DFT^{(w)}(s_k) := \sum_{k=0}^{k=N-1} w(k)s_k e^{-2\pi i k n/N}, \quad 0 \leq n \leq N-1, \quad (5.100)$$

was durch Modifikation der Meßwerte $s_k \leftarrow s_k \cdot w(k)$ einfach vor Berechnung der FFT möglich ist.

Zur Demonstration des Verfahrens wurde durch den EPOS–Signalsimulator³⁰ ein Spannungssignal erzeugt, welches durch Superposition einer Trägerfrequenz f_0 von 615 kHz und zweier um den Faktor 500 (ca. 54 dB) abgeschwächten umliegender Seitenbänder im Frequenzabstand Δf von 18 kHz gebildet wird.³¹ Das Signal wird fiktiv mit 2 MHz abgetastet. Dabei ist weder eine Dämpfung noch eine Amplitudenquantisierung angenommen. Abbildung 5.14 zeigt links das Resultat einer Fouriertransformation mit Rechteckfenster, im rechten Bild das Ergebnis nach der Transformation mit einem Blackman–Harris–Fenster. Aufgetragen ist für eine Frequenz von $f = 0$ Hz bis $f = 1$ MHz der Wert $10 \cdot \log_{10}|P_n|$ der diskreten Fouriertransformation.

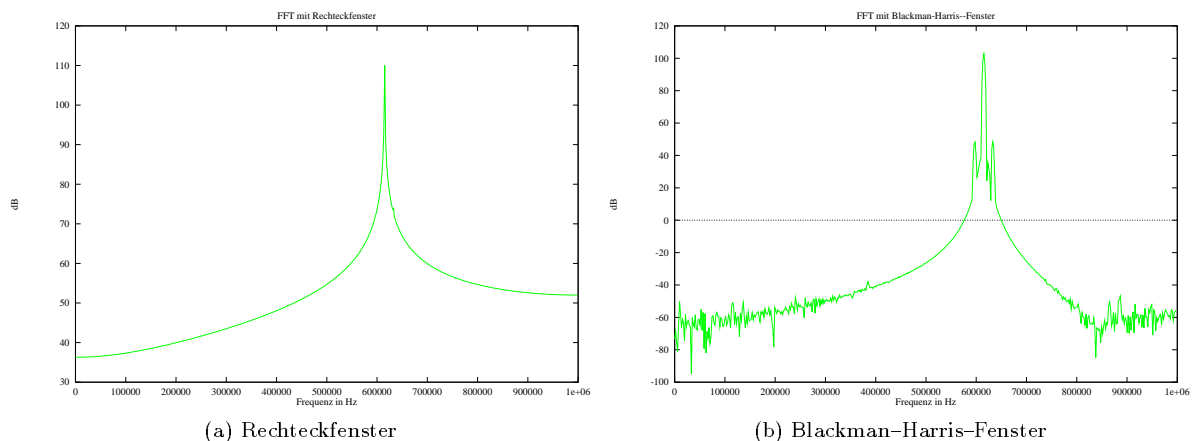


Abbildung 5.14: Vergleich von Rechteck- und Blackman–Harris–Fenster

³⁰Der Signalsimulator `signalsim` wurde in Hinsicht auf die zeitaufgelöste Strahldiagnostik wesentlich erweitert. Die Software kann segmentierte Signale aus harmonischen Komponenten (gegeben durch Frequenz, Amplitude und Phasenlage) aufbauen und mit periodischen Pulsketten aus Sägezahn, Rechteck, Dreieck oder Dirac–Pulsen kombinieren. Allen Frequenzkomponenten kann eine individuelle Dämpfung sowie eine Amplitudenmodulation zugeordnet werden; das Erzeugen stochastischer Signale wird durch einen Rauschgenerator und das ”Würfeln” zeitverteilter δ –Pulse unterstützt. Die zeitdiskrete Abtastung wird ebenso simuliert wie eine ”n Bit”–Amplitudenquantisierung bei unterschiedlicher Ausnutzung des Wandlerbereichs.

³¹Die Wahl dieser Werte entspricht durchaus realistischen ELSA–Bedingungen bei Verwendung des 50 kW–Senders und einer Teilchenenergie von 1.6 GeV. Der erzielte Überspannungsfaktor ist dann relativ klein, was in einer geringen Synchrotronfrequenz von etwa 20 kHz resultiert. In der Simulation wurde kein Rauschen appliziert, ebenso sind alle Dämpfungen ausgeschaltet; eine Amplitudenquantisierung wurde ebenfalls deaktiviert.

Die Trennung der beiden Satelliten vom Träger bei 615 kHz ist bei Verwendung des Blackman–Harris-Fensters offensichtlich. Eine "normale" Fouriertransformation kann dagegen die Satelliten nicht aus dem Untergrund des Dirichlet-Kerns isolieren, da dessen Seitenbandunterdrückung mit 13 dB deutlich oberhalb der Satellitenunterdrückung von ca. 54 dB liegt.³² Sehr gut ist auch die durch die größere Rauschbandbreite des Blackman–Harris-Fensters vergrößerte Peakbreite der Trägerfrequenz zu sehen; die Frequenzauflösung ist im rechten Bild schlechter als bei Verwendung des Rechteckfensters.

Mit der vorgestellten Technik einer von der Rechteckfunktion abweichenden Fenstertransformation in der Spektralberechnung kann somit das Problem der Messung des Synchrotron-Arbeitspunktes Q_s auch bei schlecht konditionierten Lagesignalen angegangen werden. Die Wahl der jeweils bestgeeigneten Transformation muß allerdings von Fall zu Fall empirisch ermittelt werden.

5.5.5 Parametrische Modelle zur Spektralberechnung

Unter bestimmten Voraussetzungen kann eine Fouriertransformation keine ausreichende Identifikation und Frequenzbestimmung von Spektrallinien mehr erlauben. Dies ist immer dann der Fall, wenn das observierte Strahllagesignal eine so kleine Kohärenzdauer hat, daß die Frequenzauflösung der Transformation ungenügend ist. In diesem Fall hilft auch keine Fenstertransformation, da alle vom Rechteckfenster abweichenden Transformationen Rauschbandbreiten größer 1 haben und dadurch die Frequenzauflösung weiter verschlechtern würden. Es kann auch unter bestimmten Umständen vorkommen, daß die Amplituden der einzelnen Schwingungskomponenten des Lagesignals zu klein sind. Das resultierende Signal-Rausch-Verhältnis ist dann so gering, daß eine Identifikation und Vermessung der Frequenzlinien nicht mehr vernünftig durchführbar ist. Durch Resonanzen oder Instabilitäten bedingt, kann der Strahl in ELSA bereits nach kurzer Zeit ausfallen. In diesem Fall ist das beobachtbare Lagesignal nur sehr kurz und mit einer komplexeren Amplitudenstruktur behaftet. Auch die Annahme, daß das Signal im Beobachtungszeitraum eine oder mehrere Periodizitäten zeigt, trifft in diesem Fall nicht unbedingt zu — eine diskrete Fourieranalyse, die genau diese Annahme macht, ist daher in solchen Fällen nicht sinnvoll. Da die diskrete Fourieranalyse keine weiteren Annahmen über das Lagesignal impliziert, kann ohne Vorwissen über das Eingangssignal keine Lösung des oben beschriebenen Problems erfolgen. Wenn andererseits ein "a priori"-Wissen über das Lagesignal aus ELSA etabliert ist, können alternative Methoden der Spektralanalyse verwendet werden; eine bestimmte Klasse solcher Verfahren wird im folgenden beschrieben.

Das Lagesignal aus ELSA besteht nach 5.77 aus einer Reihe diskreter, harmonischer Frequenzanteile ohne darunterliegende Breitbandstruktur des Lagespektrums. Für den konkreten Meßaufbau reduziert sich die Menge der observablen Frequenzlinien auf das Frequenzintervall von $f = 0$ Hz bis zur halben Umlauffrequenz in ELSA. In diesem Intervall liegen ein Betatron-Seitenband und eine (theoretisch) unendliche Zahl von Synchrotron-Satelliten. Durch die chromatische Verschiebung der Satellitenamplitude haben aber nur eine kleine Zahl von Frequenzlinien eine nennenswerte Höhe.

Aus der Systemtheorie diskreter Signale (siehe z.B. [87], [72]) ist bekannt, daß sich ein Signal, bestehend aus mehreren harmonischen Komponenten, durch ein sog. LTI-System (LTI: "Linear Time Invariant") modellieren läßt. Ein solches System bildet allgemein ein diskretes Eingangssignal $x(n)$ (im konkreten Fall das den Strahl anregende Signal) in ein Ausgangssignal $y(n)$ (entsprechend der gemessenen Strahllage) mit der Abbildungsfunktion H ab:

$$y(n) = H[x(n)] . \quad (5.101)$$

Da jede diskrete Eingangsfolge $x(n)$ als Faltungssumme mit δ -Funktionen gemäß

$$x(n) = \sum_{k=-\infty}^{k=+\infty} x(k)\delta(n-k) \quad (5.102)$$

darstellbar ist, läßt sich ein LTI-System über die der Abbildung H zugeordnete Impulsantwortfunktion $h(n)$ modellieren. Diese wird unter Ausnutzung der Linearität definiert durch

$$y(n) = H \left[\sum_{k=-\infty}^{k=+\infty} x(k)\delta(n-k) \right] = \sum_{k=-\infty}^{k=+\infty} x(k)H[\delta(n-k)] = \sum_{k=-\infty}^{k=+\infty} x(k)h(n-k) \quad (5.103)$$

³²Bei genauer Betrachtung des linken Bildes erkennt man auf der rechten Flanke des Trägerpeaks eine kleine Überhöhung, die als Indiz für eine unterdrückte Spektrallinie gewertet werden kann.

und ist dementsprechend eine Funktion der $x(n)$ und der vergangenen $y(n)$. Im allgemeinen läßt sich zeigen, daß ein beliebiges LTI-System durch die Rekursionsbeziehung

$$y(n) = - \sum_{k=0}^{k=p} a_k y(n-k) + \sum_{k=0}^{k=q} b_k x(n-k) \quad (5.104)$$

darstellbar ist. Hierbei gehen die Eingangswerte $x(n)$ gewichtet mit den Koeffizienten b_k sowie die Funktionswerte $y(n)$ selbst rekursiv in die Berechnung ein.³³

Die Analyse von LTI-Systemen wird in der Regel in der komplexen Ebene durchgeführt. Die dazu eingesetzte z -Transformation³⁴

$$x(n) \rightarrow X(z) = \sum_{k=-\infty}^{k=+\infty} x(k) z^{-k} ,$$

$$y(n) \rightarrow Y(z) = \sum_{k=-\infty}^{k=+\infty} y(k) z^{-k}$$

liefert bei Anwendung auf Gl. 5.104 die komplexwertige Systemfunktion $H(z)$ als

$$H(z) = \frac{\sum_{k=0}^q b_k z^{-k}}{1 + \sum_{k=1}^p a_k z^{-k}} = \frac{Y(z)}{X(z)} . \quad (5.105)$$

Die Nullstellen- und Polstruktur der Systemfunktion bestimmen das Verhalten eines LTI-Systems vollständig. Insbesondere läßt sich jedes aus der Überlagerung komplexer Exponentialfunktionen gebildete Signal

$$y(n) = \sum_{k=1}^p c_k e^{i\omega_k n} \quad (5.106)$$

durch den linearen Prony-Prediktor

$$y(n) = \sum_{k=1}^p a_k y(n-k) \quad (5.107)$$

rekursiv darstellen,³⁵ wobei p die Anzahl der harmonischen Komponenten angibt. Diese Prediktor-Beziehung ist offensichtlich ein Sonderfall der in 5.104 allgemein definierten Rekursionsbeziehung eines LTI-Systems. Das ELSA-Signal 5.77 läßt sich analog darstellen als lineare Überlagerung diskreter harmonischer Schwingungen und ist daher durch ein LTI-System mit $q = 0$ modellierbar: die Koeffizienten des Prediktors sind nach 5.105 die Koeffizienten des Nennerpolynoms der Systemfunktion $H(z)$. Dieser Sachverhalt erlaubt die Entwicklung eines alternativen Verfahrens für die Spektralanalyse des Lagesignals, da die Frequenzantwort eines Systems durch das Verhalten der Systemfunktion auf dem Einheitskreis $|z| = 1$ beschrieben ist:

$$H_{ELSA}(\omega) \sim \frac{1}{1 + \sum_{k=1}^p a_k e^{-i\omega k}} . \quad (5.108)$$

Das Frequenzspektrum des Ausgangssignals $y(n)$ kann durch

$$Y(\omega) = H(\omega) X(\omega) \quad (5.109)$$

³³Oftmals wird dem ersten Summand das Attribut "IIR" ("Infinite Impulse Response") und dem zweiten Teil das Attribut "FIR" ("Finite Impulse Response") zugeordnet, um das Verhalten der Impulsantwort des Systems zu charakterisieren. IIR-Systeme sind demnach rekursive Systeme, bei denen durch "Aufschaukeln" des Signals durchaus unendliche Signalamplituden entstehen können.

³⁴Die z -Transformation entspricht bei diskreten Systemen der für die Analyse analoger Systeme üblicherweise eingesetzten Laplace-Transformation. Für eine Gegenüberstellung siehe z.B. [65] oder [87].

³⁵Der Prediktor ist eine rekursive Darstellung, die bereits 1795 von de Prony zur Beschreibung von harmonischen Funktionen vorgeschlagen wurde [73].

dargestellt werden, wobei $H(\omega)$ "Übertragungsfunktion" genannt wird. Ein Pol in der Übertragungsfunktion entspricht daher einer scharfen Frequenzlinie im Spektrum $Y(\omega)$ des Signals $y(n)$. Deutlich wird hier, daß ein LTI-System insbesondere keine Frequenzkomponenten in einem Ausgangssignal $y(n)$ erzeugen kann, die nicht in einem Eingangssignal $x(n)$ bereits vorhanden waren.³⁶

Die Aufgabe besteht nun darin, ein der Lageschwingung des ELSA-Strahls angepaßtes Systemmodell zu finden und dessen Frequenzverhalten zu untersuchen. Die Ermittlung der Funktion $H(z)$ für ein zunächst unbekanntes System wird Systemidentifikation genannt. Nach den oben besprochenen Eigenschaften von LTI-Systemen ist es wesentlich, daß zur Systemidentifikation eine Anregung des unbekanntes Systems erfolgt, die alle möglichen Eigenfrequenzen stimulieren kann. Physikalisch ist dies bei der Strahldiagnose in guter Näherung durch das zu einer Pulsanregung des Diagnosekickers näherungsweise äquivalente weisse Rauschen realisiert. Für das ELSA-System wird daher der folgende Ansatz gewählt:

Der Strahl erzeugt ein Monitorsignal $s(n)$ als Ausgabegröße eines gleichförmig durch weisses Rauschen $w(n)$ angeregten LTI-Systems nach der Rekursionsbeziehung

$$s(n) = - \sum_{k=0}^{k=p} a_k s(n-k) + \underbrace{\sum_{k=0}^{k=q} b_k w(n-k)}_{\text{"Rauschterm"}} . \quad (5.110)$$

Multipliziert man beide Seiten mit $s(n+m)$ und bildet den statistischen Erwartungswert (linearer Mittelwert über den Index n), so erhält man

$$\gamma_{ss}(m) = - \sum_{k=1}^p a_k \gamma_{ss}(m-k) + \sum_{k=0}^q b_k \gamma_{ws}(m-k) , \quad (5.111)$$

wobei γ_{ws} die Kreuz- und γ_{ss} die Autokorrelation der Signale $w(n)$ und $s(n)$ darstellt.³⁷ Hieraus ergeben sich, wie z.B. [72] zeigt, für $q = 0$ mit der konstanten Rauschleistungsdichte σ_w^2 des Eingangsrauschens $w(n)$ die Autokorrelationswerte

$$\gamma_{ss}(m) = \left\{ \begin{array}{ll} - \sum_{k=1}^p a_k \gamma_{ss}(m-k) & : m > 0 \\ - \sum_{k=1}^p a_k \gamma_{ss}(m-k) + \sigma_w^2 & : m = 0 \\ \gamma_{ss}(-m) & : m < 0 \end{array} \right\} . \quad (5.112)$$

Diese auch als "Yule-Walker"-Gleichungen bekannten Beziehungen lassen sich in ein Gleichungssystem umschreiben:

$$\begin{pmatrix} \gamma_{ss}(0) & \gamma_{ss}(-1) & \dots & \gamma_{ss}(-p) \\ \gamma_{ss}(1) & \gamma_{ss}(0) & \dots & \gamma_{ss}(-p+1) \\ \vdots & & & \vdots \\ \gamma_{ss}(p) & \gamma_{ss}(p-1) & \dots & \gamma_{ss}(0) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_w^2 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} \quad (5.113)$$

Das über dieses Gleichungssystem identifizierbare Systemmodell wird auch als AR(p)-Modell bezeichnet.³⁸ Ein Problem bei der Systemidentifikation besteht in der unzureichenden Kenntnis der Autokorrelation γ_{ss} des zu untersuchenden Signals. Da die Matricelemente γ_{ss} für eine endliche Meßreihe $s(n)$, $n = 0 \dots N-1$ nicht bekannt sind, ist die Systemidentifikation eigentlich nicht durchführbar. Um trotzdem eine näherungsweise Identifikation durchzuführen, muß ein Schätzwert r_{ss} für die Autokorrelation eingesetzt werden. Die beste Näherung der wahren Autokorrelation γ_{ss} ist für eine endliche Datenfolge durch

$$\gamma_{ss} \approx r_{ss}(m) = \frac{1}{N-|m|} \sum_{n=0}^{N-|m|-1} s(n)s(n+m), \quad |m| = 0 \dots N-1 \quad (5.114)$$

³⁶Die Analyse diskreter linearer Systeme in der komplexen Ebene kann als die Verallgemeinerung der diskreten Fourieranalyse von $z = e^{i\omega}$ auf $|z| \neq 1$ interpretiert werden.

³⁷Die Autokorrelation ist allgemein definiert als der Erwartungswert $\gamma_{ss}(m) = E[s(k)s(m+k)]$, d.h. als $\gamma_{ss}(m) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} s(k)s(k+m)$. Für die Kreuzkorrelation gilt entsprechend $\gamma_{sw}(m) = E[s(k)w(m+k)]$.

³⁸Diese Namensgebung stammt von dem in der Literatur oft verwendeten Begriff des "AutoRegressiven" Modells. Im Gegensatz dazu wird ein Modell mit $p = 0$ und $q \geq 1$ MA(q)-Modell ("Moving Average") genannt; das allgemeinste Modell wird mit ARMA(q,p) bezeichnet.

gegeben [72][82]. Bei dieser Schätzung werden die Autokorrelationswerte geeignet gewichtet, indem auf die Zahl der von Null verschiedenen Produkte normiert wird. Durch die Verwendung einer geschätzten Autokorrelationsfunktion r_{ss} wird eine Extrapolation der nur für einen endlichen Datenzug bekannten Meßwerte $s(n)$ über den Beobachtungszeitraum durchgeführt. Dadurch ist das parametrische Modell in der Frequenzauflösung faktisch nicht durch die Beobachtungszeit $N \cdot \Delta t$ beschränkt.

Hat man bei geschätzten Autokorrelationswerten $r_{ss} \approx \gamma_{ss}$ durch die Lösung des Gleichungssystems die Polkoeffizienten gefunden, ist das System näherungsweise identifiziert, und man kann die Übertragungsfunktion $H(z)$ für $z = e^{i\omega}$ in die spektrale Leistungsdichte umrechnen ("Spektralschätzung"). Diese ist für ein AR(p)-Modell gegeben durch

$$P(\omega) = \frac{\sigma_w^2}{\left| 1 + \sum_{k=1}^p a_k e^{-i\omega k} \right|^2}, \quad (5.115)$$

$$\sigma_w^2 = \gamma_{ss}(0) \prod_{k=1}^p (1 - |a_k|^2). \quad (5.116)$$

Die Koeffizientenmatrix kann durch geeignete numerische Verfahren effizient diagonalisiert werden. Ein besonders effektiver Algorithmus ist die Levinson-Durbin-Rekursion [82]. Ein von Burg 1968 entwickelter Algorithmus verwendet die Levinson-Durbin-Rekursion bei gleichzeitiger, iterativer Berechnung der Autokorrelationswerte der Koeffizientenmatrix (siehe z.B. [72]) und liefert eine numerisch stabile und schnelle Berechnungsmethode. Zur Identifikation von Frequenzlinien muß der Verlauf von $P(\omega)$ für ein Frequenzintervall $\omega_1 \leq \omega \leq \omega_2$ untersucht werden, wobei ω_2 nach oben durch die Nyquist-Frequenz der Abtastung des Signals beschränkt ist.

Durch die notwendige Schätzung der Autokorrelation kann das AR(p)-Modell in der Regel nicht ein System mit \hat{p} harmonischen Komponenten durch eine Systemfunktion mit einem Nennerpolynom \hat{p} -ter Ordnung realisieren. Die Polzahl p des Modells wird \hat{p} normalerweise deutlich übersteigen. Je mehr Pole in der Systemfunktion auftauchen, desto besser können breitere Strukturen des Frequenzspektrums modelliert werden. Für die Modellierung von Systemen mit höherem Rauschpegel oder bei einer physikalisch bedingten Verbreiterung von Spektrallinien steigt durch höhere Polzahl der numerische Aufwand entsprechend an. Die Ermittlung der optimalen Polzahl muß bei gegebenen Signalen eines solchen "verrauschten" Systems empirisch ermittelt werden. Wählt man die Polzahl zu hoch, erzeugt das Verfahren eine Übertragungsfunktion mit Artefakten, d.h. künstlich erzeugten harmonischen Komponenten, die in der Regel jedoch nur schwach über den Rauschuntergrund reichen. Bei der Untersuchung schwacher Frequenzlinien ist daher auf die gute Anpassung der Modellordnung besonders zu achten.

Die in Abbildung 5.15 aufgeführten Diagramme sind Ergebnisse von Software-Simulationen. Mit dem EPOS-Signalsimulator wurden diskrete Signale $s(n)$ erzeugt und mit Fouriermethoden und AR(p)-Modellen untersucht. Zur Berechnung des AR-Modells wird der in [27] angegebene Code für den Burg-Algorithmus verwendet. Das simulierte (und hier nicht dargestellte) Signal bestand aus drei harmonischen Komponenten: eine Trägerfrequenz von 615 kHz, umgeben von zwei Satelliten im Abstand von je 80 kHz, die in der Amplitude um den Faktor 20 gegenüber dem Träger abgeschwächt wurden. Das Signal wurde auf einen fiktiven 12-Bit breiten Digital-Analog-Wandler gegeben. Die Trägerfrequenzamplitude wurde exponentiell gedämpft mit $e^{-t/\tau}$, $\tau = 150 \mu\text{sec}$, so daß nach etwa 300 μsec keine wesentlich über dem Rauschuntergrund liegende 615 kHz-Amplitude vorlag.³⁹ Das erste Diagramm (Fall 1) zeigt die Ergebnisse der FFT und eines AR(9)-Modells nach der Berechnung des Leistungsdichtespektrums. Deutlich wird das wesentlich verbesserte Signal-Rausch-Verhältnis des AR-Modells sowie dessen Fähigkeit, "scharfe" Frequenzlinien darzustellen. Die Fouriertransformation kann dies wegen Leakage-Effekten und vor allem der Dämpfung des Eingangssignals nicht annähernd erreichen.

Das zweite Diagramm (Fall 2) zeigt die Ergebnisse für eine Gesamtdämpfung des Eingangssignals mit $\tau = 30 \mu\text{sec}$. Dadurch wird eine sehr kurze Kohärenzdauer simuliert, die Trägerfrequenzamplitude (individuell gedämpft mit $150 \mu\text{sec}$) ist bereits nach wenigen Mikrosekunden stark abgeschwächt. Durch das schnelle Abklingen der Schwingung kann die Fouriermethode nur ein sehr breites Spektrum liefern, in welchem die Satelliten fast nicht mehr identifiziert werden können.

³⁹Ein derartiges Signal entspricht durchaus realistischen ELSA-Verhältnissen bei 2.2 GeV und Verwendung des 250 kW-Senders. Die 615 kHz-Komponente entspricht einem Betatron-Seitenband.

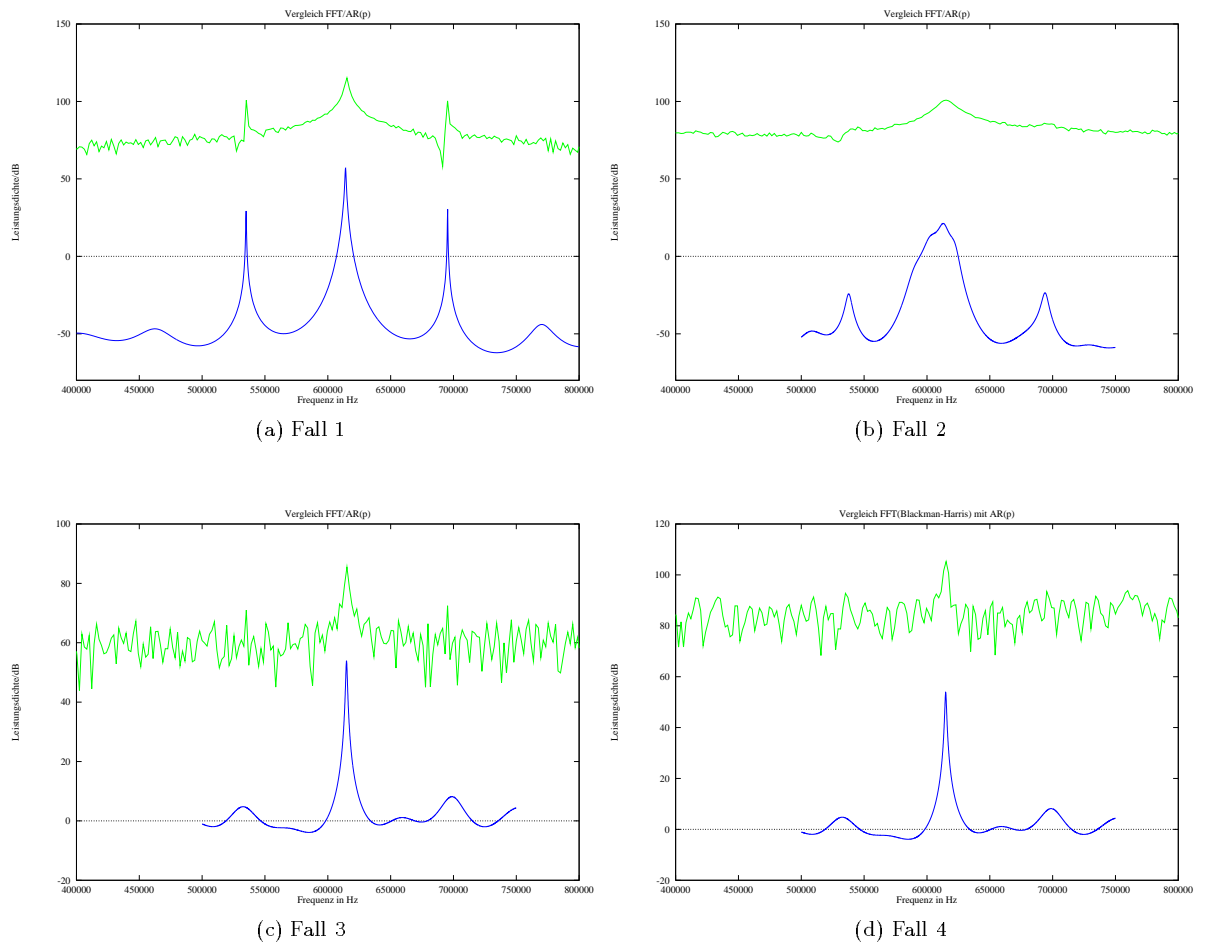


Abbildung 5.15: Vergleich von Fouriertransformation (oben) und AR(p)-Modell (unten)

Das verwendete AR(35)-Modell isoliert die Satelliten zufriedenstellend und kann auch die Trägerfrequenz gut ermitteln, allerdings zeigt sich die Schwierigkeit, Breitbandstrukturen, resultierend aus der starken Dämpfung, mit einer vorgegebenen Polzahl zu modellieren. Der Zentralpeak ist offensichtlich aus mehreren, dicht beieinanderliegenden Polen der Übertragungsfunktion aufgebaut worden. Im dritten Bild (Fall 3) wurde die starke Dämpfung wieder zurückgenommen, dafür aber ein Rauschpegel von 50% der Maximalamplitude simuliert. Das parametrische Modell wurde mit 35 Polen gerechnet und kann ebenso wie die Fouriertransformation die Satelliten isolieren, zeigt aber für die Trägerfrequenz ein wesentliches verbessertes Signal-Rausch-Verhältnis bei besserer Frequenzauflösung.

Im letzten Diagramm (4) wurde die Fouriertransformation mit einem vorgeschaltetem Blackman-Harris-Fenster gerechnet. Deutlich wird die dadurch verschlechterte Frequenzauflösung. Die Satelliten können kaum noch identifiziert werden. Dies liegt im wesentlichen daran, daß Fenstertransformationen numerisch empfindlich auf starkes Grundrauschen reagieren; in diesem Fall ist das Verhältnis aus mittlerer Rauschamplitude und Amplitude der Satelliten zehn zu eins.

Die Ergebnisse der Simulation legen den Schluß nahe, daß bei sehr kurzen Kohärenzdauern oder starkem Rauschen die Verwendung parametrischer Modelle eine deutliche Verbesserung der Signalanalyse erlaubt. Beachtet werden muß aber in jedem Fall, daß die Modellierung breitbandiger Frequenzanteile mit ausschließlich polbasierten Modellen schwierig ist.

Die Schätzung spektraler Anteile ("spectral estimation") ist Gegenstand vieler detaillierter Untersuchungen. Insbesondere ergeben sich theoretische Abschätzungen für die zu wählende Polzahl p des Modells, sowie Untersuchungen der erreichbaren Frequenzauflösung und des Stabilitätsverhaltens unterschiedlicher Systeme für gegebene Schätzfunktionen der Autokorrelation. Da in dieser Arbeit keine Analyse der systemtheoreti-

schen Konzepte diskreter Spektralmodelle durchgeführt werden kann,⁴⁰ sei auf die entsprechende Literatur verwiesen (siehe z.B. [72], [82], [56], [74]).

5.6 Aufbau des Meßsystems für die zeitaufgelöste Diagnostik

Das Meßsystem zur zeitaufgelösten Spektralanalyse während eines ELSA-Zyklus wurde unter Berücksichtigung der nachstehenden Anforderungen konzipiert:

- Zeitabtastung ("Sampling") des Lagesignals mit einer Frequenz, die minimal die Umlauffrequenz in ELSA (1.823 MHz) beträgt. Dies ermöglicht die Rekonstruktion der Arbeitspunkte aus dem Spektrum.
- Bestmögliche Reduktion des Quantisierungsrauschens in der Datenwandlung zur Erzielung eines guten Signal-Rauschabstandes (SNR). Dies kann durch Einsatz von Analog-Digital-Wandlern mit hoher Bitbreite sichergestellt werden. Die Größe eines Digitalisierungsschrittes Δs bei der Wandlung der Lagesignalamplituden $s(t) \rightarrow s_k(t)$ ist mit einer Maximalamplitude s_{max} und n Bit Wandlerbreite durch

$$\Delta s = \frac{s_{max}}{2^n - 1} \quad (5.117)$$

gegeben, wenn der Wertebereich $0 \dots 2^n - 1$ durch das Eingangssignal vollständig abgedeckt werden kann. Das durch diese Amplitudenquantisierung hervorgerufene sog. Quantisierungsrauschen ist durch eine konstante Rauschleistungsdichte charakterisiert und durch

$$SNR [dB] = 20 \cdot \log\left(\frac{s_{eff}}{\Delta s}\right) \approx 6.02 \cdot n + 1.76 \quad (5.118)$$

berechenbar, wobei $s_{eff} = s_{max}/\sqrt{2}$ der Effektivwert des Eingangssignals ist. Um einen hohen SNR-Wert zu erzielen, wurde der Einsatz von 12 Bit-Wandlern beschlossen.⁴¹ Dies führt zu einem Rauschabstand von ca. 74 dB, im Gegensatz zu den sonst bei ELSA im Monitorsystem eingesetzten 8 Bit-Wandlern mit einem SNR-Wert von ca. 50 dB. Durch die Verbesserung des SNR-Wertes können insbesondere Fenstertransformationen mit höheren Rauschbandbreiten eingesetzt werden, da die in der Fensterbandbreite akkumulierte Rauschleistung kleiner ist.⁴²

- Erzielung einer möglichst hohen Wiederholrate der Rohdatenerfassung; der minimal geforderte Abstand zwischen zwei Messungen muß im Bereich von wenigen zehn Millisekunden liegen, damit auch bei Rampzeiten von 200 msec eine akzeptable Zeitauflösung bei der Arbeitspunktverfolgung realisiert werden kann.
- Automatische Berechnung der Frequenzspektren nach erfolgter Rohdatenerfassung, Identifikation und Vermessung der Betatron-Peaks und Synchrotron-Satelliten, sowie automatische Verfolgung der entsprechenden Frequenzlinien über alle aufeinanderfolgenden Einzelmessungen eines ELSA-Zyklus.
- Einsatz von Fouriertransformationen mit Spectral-Leakage-Korrektur zur Verbesserung der Frequenzauflösung, sowie Verwendung von Fenstertransformationen zur Identifikation von Spektrallinien bei schlecht konditionierten Eingangssignalen.

⁴⁰ Ausgehend von der Autokorrelationsmatrix wurden sehr effiziente Verfahren entwickelt, die zunächst durch geeignete Methoden, wie z.B. durch eine SVD-Zerlegung, eine Autokorrelationsmatrix mit minimalem Rang erzeugen und darauf aufbauend die Frequenzbestimmung auf ein Eigenwertproblem zurückführen. Dadurch entfällt die Aufgabe der feinaufgelösten Berechnung der Funktion $P(\omega)$, und die Frequenzauflösung kann gesteigert werden. Alle Verfahren sind besonders geeignet für die Identifikation harmonischer Komponenten in Rauschen (das Problem wird in der Literatur als "the harmonic retrieval problem" genannt). Beispiel für ein solches Verfahren ist die 1973 von Pisarenko entwickelte "harmonic decomposition"-Methode der Autokorrelationsmatrix (siehe z.B. [72]).

⁴¹ Heute sind zwar auch Wandler höherer Bitzahl mit Konversionsraten im MHz-Bereich kommerziell erhältlich; das Preis/Leistungsverhältnis dieser Einheiten wäre aber der Aufgabenstellung nicht angemessen gewesen.

⁴² Die durch die höhere Bitzahl erreichte Auflösung erhöht auch die Anzahl der effektiven Bits in der Datennahme. Die Zahl effektiver Bits (ENOB) wird durch

$$ENOB = \frac{1}{6.02} \left((SNR) - 1.76 + 20 \log\left(\frac{\Delta U}{\Delta A}\right) \right)$$

gegeben, wobei ΔU den vollen Wandlerbereich und ΔA den durch die Eingangsamplitude abgedeckten Bereich (in der Regel kleiner als ΔU) angibt. Je kleiner also die Amplitude des Eingangssignals im Vergleich zum Wandlerbereich ist, desto kleiner ist die Zahl effektiver Bits, und desto schlechter kann das Eingangssignal rekonstruiert werden. Die Optimierung der Zahl effektiver Bits erfordert also die entsprechende Einstellung der Signalverstärkung im Datenerfassungssystem.

- Einsatz von parametrischen Modellen der Art AR(p) zur Spektralschätzung, falls die Kohärenzdauer des Lagesignals bei einer FFT zu einer unzureichenden Frequenzauflösung führt oder infolge eines zu schlechten SNR-Wertes mit Fouriermethoden keine ausreichende Signalrekonstruktion mehr möglich ist.
- Entwicklung von universell einsetzbaren EPOS-Operatoren, die als "Werkzeugkasten" für alle Aufgaben der digitalen Spektralanalyse dienen und im Bedarfsfall eine detaillierte offline-Untersuchung aufgezeichneter Lagesignale erlauben. Das "Werkzeugkasten"-Konzept von EPOS hat sich in der Vergangenheit sehr gut bewährt.
- Abbildung der Meßergebnisse (Arbeitspunktverläufe u.a.) auf entsprechende Kontrollsystemparameter, so daß eine vollständige Integration des Meßsystems in die Kontrolle erreicht wird; die gemessenen Funktionen $Q_{x,z}(t)$ bzw. $Q_s(t)$ stehen damit allen anderen Applikation auf der Kontrollebene zur Verfügung, können auf der grafischen Oberfläche angezeigt und durch dedizierte Experten weiterverarbeitet werden.

5.6.1 Echtzeitverarbeitung mit digitalem Signalprozessor

Die Fortschritte in der Rechnertechnologie haben heute die Entwicklung von Prozessoren möglich gemacht, die in ihrer Architektur, dem Befehlssatz und der Verarbeitungsleistung besonders an zeitkritische Aufgabenstellungen der digitalen Signalverarbeitung angepaßt sind. Diese als digitale Signalprozessoren bezeichneten Chips (DSPs) erreichen bereits bei moderaten Taktfrequenzen im Bereich weniger zehn MHz eine Gleitkommaleistung von bis zu 50 MFLOPS (Millionen Floating-Point-Operationen Pro Sekunde). Durch die Implementierung schneller Hardware für parallele Gleitkomma-Arithmetik, die Unterstützung des Rechenwerks mit Hardware-Multiplizierern und die Implementierung spezieller Adressierungsmodi lassen sich typische Elementarberechnungen digitaler Signalverarbeitungsalgorithmen auf den Befehlssatz des Prozessors optimal abbilden. So ist beispielsweise die Implementierung eines FIR-Filters mit der gegebenen Impulsantwort $h(n)$, $n = 0 \dots N - 1$ für ein diskretes Eingangssignal $x(n)$ gemäß

$$y(n) = \sum_{k=0}^{k=N-1} x(N-k)h(k) \quad (5.119)$$

als Faltungssumme sehr effizient, da die meisten Signalprozessoren einen Befehl zur parallelen Multiplikation und Addition (geeignet für zwei Terme $x(N-k)h(k)$ und $x(N-k-1)h(k+1)$) kombiniert mit einer zyklischen Adressierung des Speicherbereichs (zum Durchlaufen der Faltungssumme) besitzen. Pro Taktzyklus kann damit ein Produkt als Summand zu einem bereits vorliegenden Ergebnis $y(n)$ addiert werden; die Gesamtzeit für eine Faltung mit N Werten $h(n)$ ist näherungsweise durch die Zeit $N \cdot \tau_{cycl}$ gegeben, wobei τ_{cycl} mit dem Kehrwert der Taktfrequenz abgeschätzt werden kann.

Beim Entwurf moderner Signalprozessoren werden in der Regel die spezifischen Anforderungen schneller Fouriertransformationen besonders berücksichtigt⁴³ und Befehle implementiert, die lokale Operationen des FFT-Algorithmus (bzw. der verwendeten Variante) effizient unterstützen. Hierzu zählen vor allem fünf Merkmale:

1. Der Einsatz von Gleitkommaarithmetik erlaubt im Vergleich zur Ganzzahl- oder Fixpunktarithmetik einen großen Dynamikbereich und kann daher während einer FFT-Berechnung eventuell auftretende große Zwischenergebnisse ausreichend genau darstellen.
2. Durch die geeignete Realisierung spezieller Speicheradressierungs-Schemata können interne Symmetriebeziehungen des FFT-Algorithmus durch die Hardware des Prozessors besonders effizient ausgenutzt werden.
3. Die mehrfache Wiederholung einer Kette bestimmter Berechnungsanweisungen (z.B. Multiplikation mit harmonischen Exponentiellen $e^{i\omega t}$) wird durch spezielle Hardware-Befehle in parameterisierter Form ausgeführt, ohne daß explizite Schleifen zu programmieren sind.

⁴³Mit schnellen Fouriertransformationen lassen sich viele Probleme der Signalverarbeitung (Korrelationen, Filter, u.a.) besonders effizient implementieren.

4. Die Ausgabereihenfolge der diskreten Frequenzwerte f_n ist bei einer FFT in einer komplizierten Form realisiert (sog. "bit-reversed-Speicherung") und wird durch ein spezielles Adressierungsmuster durch den Prozessor in Hardware so umindiziert, daß die kanonische Anordnung der Frequenzwerte $f_0 < f_1 < f_2 < \dots < f_{N-1}$ im Ausgangsspeicher der FFT vorliegt.
5. Durch Einbau von Speicher im Signalprozessor selbst können FFTs mit moderaten Punktzahlen (etwa 1024 Amplitudenwerten s_k) chiplokal ablaufen, ohne daß ein externer, langsamerer Speicher referenziert werden muß.

Diese Bemerkungen verdeutlichen, daß zwischen dem konkreten Aufbau und Befehlssatz eines Signalprozessors und den zu implementierenden Algorithmen der Signalverarbeitung eine sehr enge Verzahnung besteht. Aus diesem Grund versieht jeder Prozessorhersteller einen DSP mit einem Gerüst an bereits optimierter Software, damit die Hardware des Chips effizient angesteuert wird. Erst das Zusammenspiel von Software und Chip-Architektur macht, ähnlich wie bei RISC-Prozessoren, die hohen Leistungswerte möglich.

Die durch die DSP-Technologie verfügbare Leistung motivierte die Entscheidung, das Diagnosesystem für die Arbeitspunktmessung bei ELSA auf der Basis eines digitalen Signalprozessors aufzubauen. Ausgewählt wurde dazu der Gleitkomma-DSP TMS320C30 von Texas Instruments (Taktfrequenz 33 MHz).⁴⁴ Ein solcher Prozessor kann eine 1024-Punkt komplexwertige FFT in ca. 2.5 msec berechnen [86]. Dabei ist allerdings nur die eigentliche Transformation der Lagewerte eingeschlossen; die Berechnung der Leistungsdichte nach 5.90 muß nachträglich erfolgen. Trotzdem liegt die mit einem solchen System erzielbare Verarbeitungsbandbreite so hoch, daß die in der Aufgabenstellung geforderten kurzen Wiederholzeiten realisiert werden können.

Die Forderung nach Integration des Meßsystems in die VME-Struktur der Prozeßebene motivierte die Wahl eines kommerziell erhältlichen VME-Moduls,⁴⁵ welches neben dem Signalprozessor TMS320C30 einen schnellen Analog-Digitalwandler (AD) mit einer Breite von 12 Bit, einen 8 kByte großen Meßwertspeicher und 0.5 MByte großen, vom DSP und über den VME-Bus ansprechbaren dynamischen Speicher ("dual ported RAM") enthält. Die Wandlerfrequenz ist bis zu einem Maximalwert von 2 MHz programmierbar und reicht daher für die Arbeitspunktmessung an ELSA aus. Ein Blockschaltbild des Moduls ist in Abbildung 5.16 zu sehen.

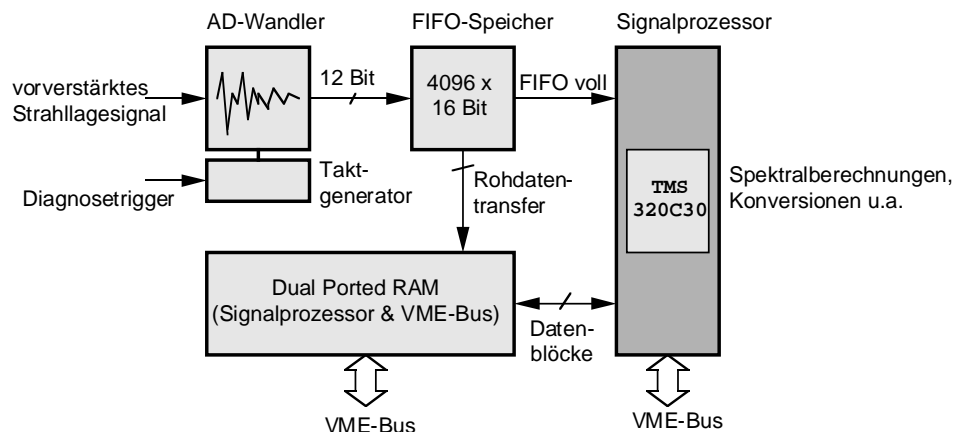


Abbildung 5.16: Blockschaltbild des DSP-Moduls mit Analog-Digital-Wandler

Durch Empfang eines entsprechenden Diagnosetriggerpulses startet die Datennahme der AD-Sektion. Mit der programmierten Wandlerfrequenz f_{sample} wird das Eingangssignal (im Bereich von 0–2 V) mit 12 Bit

⁴⁴Der TMS320C30 besitzt eine modifizierte Harvard-Architektur. Eine solche Architektur ist im wesentlichen dadurch ausgezeichnet, daß getrennte Busstrukturen für Instruktionen, Daten und Steuerbefehle verwendet werden, im Gegensatz zu "normalen" Prozessoren, die in der Regel Instruktionen und Daten über einen gemeinsamen Bus austauschen. Durch das Konzept der geteilten Busse wird die Verarbeitungsleistung deutlich erhöht, zusätzlich wird das parallele Abarbeiten von Instruktionen durch "pipelining" verbessert.

⁴⁵Es handelt sich um das von der Firma "Datel GmbH" angebotene Modul DVME630F2. Die genauen Leistungsdaten des Moduls sind [20] zu entnehmen.

digitalisiert und blockweise in einem FIFO-Speicher ("First-In/First-Out") abgelegt. Die Logik des FIFO-Speichers meldet den Datentransfer an den DSP; dieser liest die Daten und führt die gewünschten Berechnungen durch. Währenddessen wird der FIFO mit neuen Abtastwerten gefüllt. Nach Abschluß der Berechnungen überträgt der DSP die Daten in den Speicher und meldet über den VME-Bus, daß ein Ergebnisspektrum abholbereit ist.

Durch dieses Verarbeitungskonzept eignet sich das Modul besonders als dedizierter "Koprozessor" für eine normale VME-CPU. Die CPU kann die Spektren über den Bus aus dem Speicher entnehmen und weiterverarbeiten. Die notwendige Bedingung für eine Verarbeitung ohne Datenverlust ist allerdings, daß die Auslesegeschwindigkeit der CPU mindestens so hoch ist wie die Verarbeitungsgeschwindigkeit des DSP-Moduls. Zum Aufbau des Meßsystems wurden das DSP-Modul, eine VME-CPU vom Typ CPU-30 und ein Interrupt-Generatormodul in einen ansonsten unbestückten VME-Überrahmen eingebaut, um die maximale VME-Busbandbreite von ca. 40 MByte/sec auszunutzen. Der Aufbau der Hardware ist in Abbildung 5.17 skizziert.

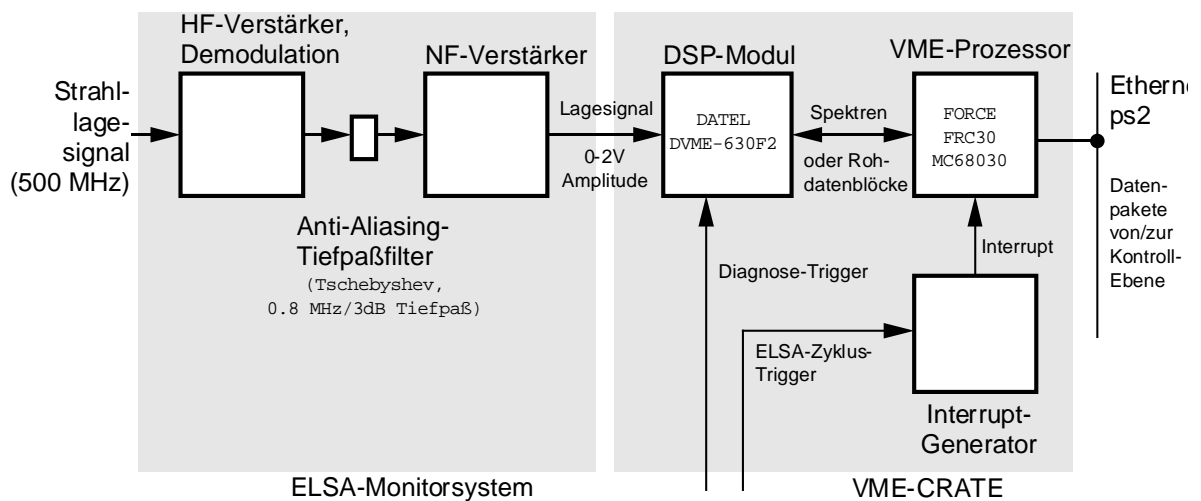


Abbildung 5.17: Hardware-Struktur des aufgebauten Meßsystems mit DSP

Der Interrupt-Generator ist mit dem Zyklustrigger des ELSA-Timingsystems belegt und gestattet so die Synchronisierung aller Meßabläufe auf einen Maschinenzyklus. Der Diagnosetrigger ist auf den Triggereingang des DSP-Moduls geführt und startet die blockweise Datenerfassung. Die über die VME-CPU weiterverarbeiteten Daten werden als Kontrollsystemparameter über das Prozeßnetzsegment ps2 an die Kontrollebene übermittelt.

Das einem ELSA-Monitor entnommene und auf einen Pegel von 0-2 V verstärkte Lagesignal wird auf den Wandlereingang der AD-Sektion gegeben. Zur weitgehenden Eliminierung von Aliasing-Effekten wurde dabei ein steilflankiges Tschebyscheff-Filter als Tiefpaß mit einer 3 dB-Grenzfrequenz von 0.8 MHz in den Signalweg eingeschleift; die bei der Nyquist-Frequenz von 1 MHz erzielte Sperrdämpfung liegt bei etwa 40 dB. Die Konfiguration des dem Meßsystem zugeordneten ELSA-Monitors erfolgt über die bereits in Abschnitt 5.5.2 beschriebenen Mechanismen.

Software für den DSP

Das DSP-Modul ist herstellerseitig mit einer Software-Bibliothek optimierter Signalverarbeitungsalgorithmen ausgestattet. Diese Algorithmen umfassen Speicherblockverwaltung, FIR- und IIR-Filter sowie Matrixoperationen und FFTs. Die Software-Bibliothek liegt im Binärformat vor und muß beim Start des Signalprozessors in den Modulspeicher geladen werden. Die Einsprungadressen der einzelnen Funktionen sind dabei über eine Indextabelle dekodiert, die jeder Funktion eine eindeutige Nummer zuordnet. Durch Generierung einer Liste solcher Funktionsnummern können definierte Aufrufreihenfolgen angestoßen werden.

Dieses Konzept eines "Mini-Interpreters" ermöglicht eine relativ flexible Konstruktion anwendungsspezifischer Signalverarbeitungsroutinen, aufgebaut aus den einzelnen Funktionen.

Die Liste der Funktionsnummern zur Bearbeitung einer bestimmten Aufgabe wird "Application Function Block" (AFB) genannt. Ein AFB muß ebenfalls in den Modulspeicher geladen werden. Durch einen Startbefehl angestoßen, dereferenziert der Signalprozessor über die Indextabelle eine angewählte Funktion und verzweigt in den entsprechenden Code. Nach Durchlaufen der Liste kann die Ausführung des AFBs wiederholt werden. Zur Kontrollflußsteuerung innerhalb eines AFBs stehen Konstrukte zur Verfügung, die einfache Schleifen möglich machen. Alle modulspezifischen Funktionen (etwa die Wandlerrate der AD-Sektion) können ebenfalls über AFB-Funktionen programmiert werden. Das Laden der Kernbibliothek und einzelner AFBs muß vorher über den VME-Bus erfolgen. Die Kommunikation mit dem DSP-Modul zur Programmierung einzelner Modulkomponenten und zur Abwicklung und Synchronisierung des Datenverkehrs muß ebenfalls über einen Speicherbereich zwischen VME-CPU und DSP-Modul durchgeführt werden. Dabei liegen einzelne Status- bzw. Kommandoregister auf gesonderten Adressen; durch Lese- bzw. Schreibzugriffe von/auf diesen Adressen erfolgt die Steuerung der Signalprozessor-Software.

Das oben beschriebene Konzept des Mini-Interpreters und der Kommunikation über den VME-Bus machte die Entwicklung eines Software-Paketes für die VME-CPU unter **VxWorks** erforderlich. Ausgehend von der Dokumentation der verfügbaren AFB-Funktionen wurden alle Aufgaben (Laden der Kernbibliothek und einzelner AFBs, Start/Stop eines AFBs etc.) in entsprechende Routinen gekapselt. Eine darauf aufsetzende Schicht stellt die Verbindung zum Kern der Prozeßsystem-Software her und ermöglicht die einfache Programmierung des DSP-Moduls über das Kontrollsystem, erweitert um Funktionsmerkmale der Echtzeitsoftware, die zur Synchronisierung auf ELSA-Triggersignale dient. Das System wurde ergänzt um ein Übersetzungsprogramm, welches auf einer Workstation der Kontrollebene abläuft und ausgehend von einer AFB-Spezifikation im Textformat eine binäre AFB-Datei erzeugt, die in das DSP-Modul geladen werden kann.

Zur Behandlung der eigentlichen Meßaufgaben wurden drei AFBs entwickelt, von denen jeder im Mittel etwa 20 einzelne Funktionen aufruft:

- a) Ein **sigmon**-AFB dient zur Erfassung, Konversion und Bereitstellung gemessener Rohdaten, ohne daß eine Spektralberechnung oder Filterung involviert ist.
- b) Ein **specmon**-AFB dient zur Rohdatenerfassung mit anschließender Berechnung des Leistungsdichtespektrums durch eine FFT ohne zusätzliche Fenstertransformation.
- c) Ein **specmon.win**-AFB arbeitet wie der **specmon**-AFB, verwendet aber eine Blackman-Harris-Fenstertransformation zur besseren Identifikation schwacher Satellitenpeaks.

Zwischen den einzelnen AFBs kann im Betrieb einfach umgeschaltet werden; dies erfordert allerdings einen Neustart der DSP-Steuersoftware, da zu einem Zeitpunkt immer nur ein AFB geladen sein kann. Zur Erklärung der Funktionsweise der Spektralberechnungen soll nun der interne Kontrollfluß des **specmon**-AFBs unter der Regie des Signalprozessors beschrieben werden:

1. Erfassung eines Rohdatenblocks mit 2 MHz und 12 Bit Wandlerbreite, wobei die Anzahl der Werte die erwartete Kohärenzdauer des ELSA-Lagesignals abdeckt. Es wurde ein Wert von 1024 Abtaststellen s_k gewählt; die maximal verwertbare Kohärenzdauer ist dann 512 μsec .
2. Konversion der digitalisierten und im Ganzzahlformat vorliegenden Lagewerte s_k in das interne Gleitkommaformat⁴⁶ des Signalprozessors.
3. Berechnung einer FFT; diese liefert 512 komplexe Ausgangswerte für einen Frequenzbereich von $f_0 = 0$ Hz bis $f_{512-1} = 1$ MHz.
4. Berechnung des Leistungsdichtespektrums gemäß der Beziehung (5.90), und Konversion der so erhaltenen Werte in das Gleitkommaformat der VME-CPU.
5. Transport eines Spektrums aus dem DSP-Speicher über den VME-Bus in den Speicher der VME-CPU.

Damit diese Schritte mit größtmöglicher Rate wiederholt werden können, wurden die folgenden Vorkehrungen getroffen:

⁴⁶Der TMS320C30-Prozessor verwendet intern ein für die Hardware-Architektur optimiertes Gleitkommaformat, welches vom sonst üblichen IEEE-Standard abweicht. Zur Weiterverarbeitung ist daher in jedem Fall eine Konversion erforderlich.

- Der FIFO-Speicher auf dem DSP-Modul wird so programmiert, daß bereits beim Füllen mit der Hälfte der Rohdatenwerte ein Signal an den Signalprozessor geschickt wird. Dieser ist durch die Vorbereitungszeit von $256 \mu\text{sec}$ in der Lage, nach abgeschlossener Füllung des FIFO die Daten dann ohne Zeitverzug zu übernehmen.
- Die Berechnung der bei der FFT auftretenden trigonometrischen Terme $e^{2\pi i k n / N}$ (siehe Gl. 5.86) wird durch Einsatz einer "Lookup-Tabelle" mit tabellierten Werten der harmonischen Exponentiellen bei vorab bekannter Datenzahl N wesentlich beschleunigt.
- Alle Berechnungen operieren mit doppelten Speicherplatzbereichen, zwischen denen von Meßzyklus zu Meßzyklus hin- und hergeschaltet wird. Durch dieses "double-buffering"-Konzept kann beispielsweise ein Speicherblock mit Rohdaten gefüllt werden, während gleichzeitig die VME-CPU ein Ergebnisspektrum aus einem anderen Speicherblock ausliest. Nach Übertragung der Daten steht dann dieser Block zum Füllen mit neuen Rohdaten bereit, während der Signalprozessor wiederum den ersten Block für seine Berechnungen verwendet. Dieses Konzept wird für alle Speicherblöcke und alle Operationen (Konversionen, Leistungsdichteberechnung) verwendet; auf diese Weise wird eine echte Parallelarbeit zwischen AD/FIFO, DSP und VME-CPU ermöglicht.
- Die Bearbeitungspriorität der VME-Software wird während der Exekution eines AFBs und dem Datentransfer eines Spektrums auf den höchstmöglichen Wert gesetzt. Durch die Echtzeiteigenschaften des VxWorks-Systems wird garantiert, daß in dieser Zeitspanne kein anderer Prozeß den VME-Bus belegt. Dies führt zu einer Maximierung der effektiven Datentransferbandbreite.
- Durch Vorpräparation (Zeigerzuweisung und Initialisierung) von dedizierten Blöcken im Speicher der VME-CPU können die Ergebnisdaten des DSPs sehr schnell weiterverarbeitet werden.

Dieses Konzept realisiert eine sog. Verarbeitungspipeline (siehe Abbildung 5.18), da zu jeder Zeit Datenblöcke mit Resultaten der einzelnen Berechnungsstufen das System durchlaufen.

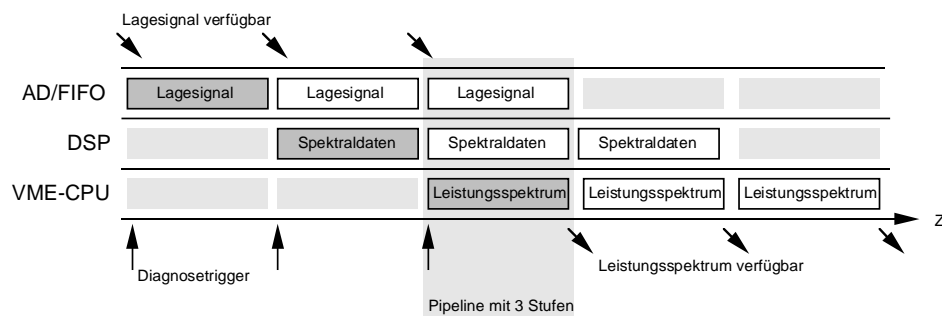


Abbildung 5.18: Pipeline-Verarbeitung für die Spektralanalyse

Das Pipeline-Konzept ermöglicht durch die Parallelisierung der Aufgaben eine im Vergleich zur sequentiellen Bearbeitung erhöhte Durchsatzleistung und wird heute bei vielen System der Signal- und Datenverarbeitung genutzt. Wesentliches Merkmal ist aber immer die notwendige Bedingung, daß der letztendliche Empfänger der Daten eine Verarbeitungsrate besitzt, die über der Erzeugungsrate der Eingangsgrößen liegt oder zumindest gleich ist. Das Echtzeitverhalten des Systems wurde mit unterschiedlichen Triggerraten getestet. Der Diagnosetrigger wurde dazu durch einen universellen Triggeregenerator simuliert. Dabei ergab sich bei der oben beschriebenen Konfiguration des **specmon**-AFBs eine maximale Durchsatzrate von ca.

100 Spektren pro Sekunde (512 Werte pro Spektrum für $0 \text{ Hz} \leq f \leq 1 \text{ MHz}$),

womit eine ausreichend hohe Wiederholrate der Spektralanalyse für die zeitaufgelöste Diagnostik an ELSA erzielt wird. Bei einer angenommenen halbierten Triggerrate von 50 Hz im normalen ELSA-Betrieb ist damit die Echtzeitreaktion des Systems garantiert. Die ohne Spectral-Leakage-Korrektur erzielte theoretische Frequenzauflösung ist dann $1000/512 \text{ kHz} \approx 1.95 \text{ kHz}$. Die Datenübertragungsrate beträgt ca. 200 kByte/sec.

Software für die VME-CPU

Jedes einzelne über den VME-Bus gelesene Spektrum wird vom VME-Prozessor in einem dedizierten Speicherblock abgelegt; maximal können 512 Spektren verarbeitet werden.⁴⁷ Anschließend wird jedes Spektrum um seine Gleichspannungskomponente bereinigt und auf einen bestimmten Wert normiert. Die Normierung wird dabei so gewählt, daß ein monofrequentes, harmonisches Eingangssignal maximaler Amplitude von 2 V einen Leistungsdichtewert von 1 ergibt.⁴⁸

Aus allen gespeicherten Spektren kann ein Mittelwertspektrum gebildet werden. Die Mittelwertbildung reduziert den Rauschleistungspegel aus der Elektronik, dem Quantisierungsrauschen und dem "Rauschen" durch die Rundungsfehler der Fouriertransformation und Normierung um den Wert \sqrt{M} , wobei M die Zahl der aufgenommenen Spektren angibt. Die Mittelwertbildung ist allerdings nur dann sinnvoll, wenn die Strahlbedingungen über den gesamten Meßzeitraum konstant waren, also z.B. in der Injektionsphase. Für die zeitaufgelöste Verfolgung von Arbeitspunkten während der Nachbeschleunigung ist die Mittelwertbildung infolgedessen nicht geeignet.

Nachdem alle Spektren normiert sind, werden für jedes Spektrum die folgenden Operationen durchgeführt:

1. In einem frei definierbaren Frequenzbereich wird die höchste Spektrallinie gesucht und ihre Frequenz bestimmt. Durch Einbeziehung der beiden umliegenden Frequenzbins kann bei einem (überprüften) ausreichend hohem Abstand vom Rauschuntergrund eine Spectral-Leakage-Korrektur erfolgen. Abweichend davon kann die Mittenfrequenz des gefundenen Peaks durch gewichtete Mittelung berechnet werden. Die gefundene und korrigierte Frequenzkomponente wird als das Betatron-Seitband f_β identifiziert, welches der Frequenz $f = 0$ am nächsten liegt.
2. In einem definierbaren symmetrischen Fangintervall Δf wird bei kleineren und größeren Frequenzen um f_β nach Satellitenfrequenzen gesucht. Treten symmetrische Satelliten mit ausreichend hohem SNR-Wert auf, so werden diese als Synchrotron-Satelliten identifiziert. Die Frequenzwerte können ebenfalls korrigiert werden. Als Synchrotronfrequenz wird dann der Mittelwert des Abstandes der beiden interpolierten Satellitenfrequenzen von f_β berechnet.
3. Aus den beiden Frequenzwerten werden dann der Nachkommateil des transversalen Arbeitspunktes gemäß

$$Q_{frac}^{(1)} = \frac{f_\beta}{f_0}, \quad Q_{frac}^{(2)} = 1 - \frac{f_\beta}{f_0} \quad (5.120)$$

berechnet und der Synchrotron-Arbeitspunkt durch

$$Q_s = \frac{f_{sync}}{f_0} \quad (5.121)$$

ermittelt (f_0 ist in beiden Fällen die ELSA-Umlauffrequenz). Die Entscheidung, ob $Q_{frac}^{(1)}$ oder $Q_{frac}^{(2)}$ als korrekter Nachkommateil des transversalen Arbeitspunktes gilt, muß nachträglich durch Vergleich mit der eingestellten ELSA-Optik erfolgen.

Der Verlauf der einzelnen Arbeitspunktwerte wird in vektorwertige Parameter eingetragen und nach erfolgter Datenanalyse über die Prozeßsystem-Software an die Kontrollebenen übermittelt. Hier stehen dann die Meßergebnisse in allgemein verwertbarer Form für weitere Untersuchungen zur Verfügung. Für alle Rohdatenspektren wurden darüber hinaus transiente Parameter definiert, die Zugriff auf die vom DSP-System gelieferten Daten geben. Bei der Anforderung von Daten synchronisiert die Software alle Operationen mit der augenblicklich ablaufenden Datennahme und -analyse über einen Semaphor. Dadurch kommt es nicht zu Zugriffskonflikten zwischen Signalprozessorsystem und einer Applikation der Kontrollebene, die Rohdaten aus der Prozeßebene anfordert. Die mit einer einzelnen transienten Transaktion in diesem Fall übertragbaren Daten umfassen ein Volumen von maximal einem Megabyte, wenn alle 512 Spektren simultan angefordert

⁴⁷ Diese Zahl ist durch den Speicherausbau des VME-Prozessors gegeben. Eine Erweiterung des Speichervolumens ermöglicht die Verarbeitung von mehr als 512 Spektren, wurde aber nicht realisiert.

⁴⁸ Das eingesetzte Verfahren soll nicht auf eine bestimmte Leistungsdichte normieren, sondern lediglich die Weiterverarbeitung erleichtern und vor allem die durch die Gleitkommadarstellung des Leistungsdichtespektrums realisierbare Genauigkeit bei der nachfolgenden Analyse verbessern.

werden. Bei einer solchen Anforderung kann auch über einen matrixwertigen Parameter verfügt werden. In diesem Parameter ist eine Matrix logarithmierter Leistungsdichtewerte P_{ij} gespeichert:

$$\mathbf{M}_S = (\log_{10} P_{ij}) = \begin{pmatrix} \log_{10} P_{11} & \log_{10} P_{12} & \dots \\ \log_{10} P_{21} & \log_{10} P_{22} & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix}, \quad 1 \leq i \leq M, \quad 1 \leq j \leq \frac{N}{2}.$$

Die Logarithmierung wurde zum Zweck der Reduzierung des Dynamikumfanges der Leistungsdichte durchgeführt. Die Zeilen (Index i) der Matrix entsprechen dabei den einzelnen Spektren (maximal M Stück), der Index j beschreibt einen diskreten Frequenzwert pro Spektrum (bei N Lagewerten hat jedes Spektrum genau $N/2$ Frequenzwerte). Jedes Matricelement $\log_{10} P_{ij}$ ist auf ein Werteintervall einer Breite von 8 Bit umgerechnet. Dieses Konzept erlaubt die Interpretation der Leistungsdichtespektren als digitalisiertes Bild mit maximal $2^8 = 256$ verschiedenen Farben. Jedem der Leistungsdichtewerte kann ein Farbwert zugeordnet werden. Stellt man die Matrix als Falschfarbaufnahme dar, so kann man beispielsweise höheren Leistungsdichtewerten einen höheren Schwärzungsgrad zuordnen: Auf diese Weise kann das spektrale Verhalten der Teilchenschwingung in ELSA über einen gesamten Meßzyklus sehr intuitiv dargestellt werden. Ein Beispiel für eine solche Bilddarstellung aufeinanderfolgender Spektren ist in Abbildung 5.19 zu sehen.

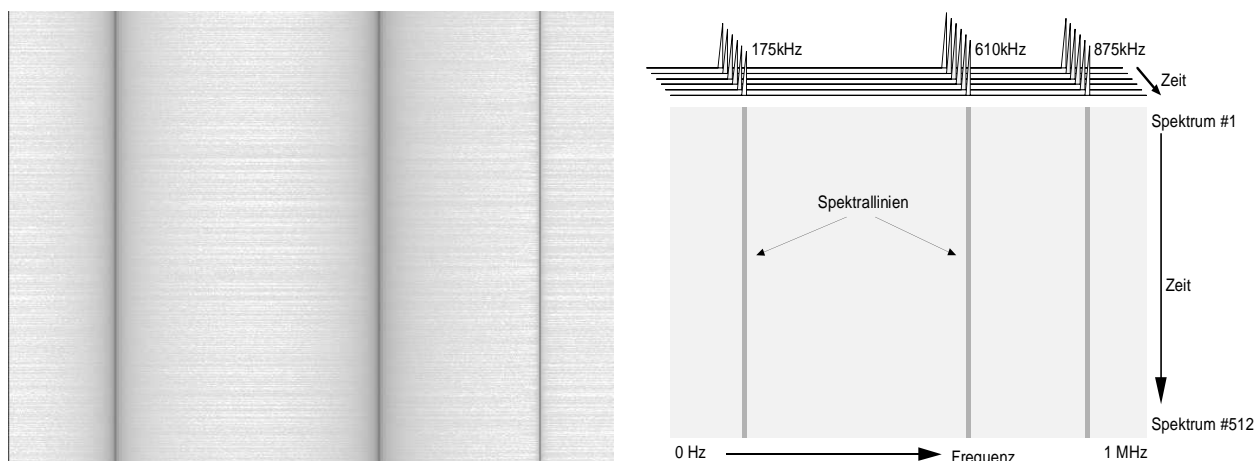


Abbildung 5.19: Interpretation von Leistungsdichtematrizen in Falschfarbdarstellung

Das dargestellte Bild enthält 512 Spektren mit jeweils 512 Frequenzwerten von $f = 0$ Hz bis $f = 1$ MHz. Das Ausgangssignal wurde durch Superposition dreier harmonischer Schwingungen (175 kHz, 610 kHz, 875 kHz) aufgebaut und durch den EPOS-Signalsimulator generiert. Da die drei Frequenzen nicht variiert wurden, resultieren Geraden, die das Bild von oben (erstes Spektrum) nach unten durchziehen. Die Schwärzung am linken Bildrand entspricht der starken Anhebung des DC-Anteils über einen Wert $P = 0$ hinaus, da das simulierte Signal mit einem nichtverschwindenden Gleichspannungspegel versehen war.

Das Signalprozessorsystem und die beschriebene Software kann durch entsprechend zugeordnete Kontrollsystemparameter konfiguriert und gesteuert werden. Als Hilfsmittel zur Steuerung wurde das in Abbildung 5.20 aufgeführte Menü der Benutzeroberfläche entworfen.

Durch Eingabe eines Index kann das darzustellende Strahlspektrum (bzw. das Mittelwertspektrum) ausgewählt werden, die Werte werden im oberen der drei Fenster angezeigt. Die Resultate der Peakidentifikation und -vermessung werden für die Betatronlinien im linken, für die Synchrotron-Satelliten im rechten der beiden unteren Fenster angezeigt, begleitet durch die Angabe der gemittelten Frequenz- und Arbeitspunktwerte, inklusive der berechneten Fehler als Standardabweichung vom Mittelwert bei der Aufnahme von mehr als einem Spektrum. Der Suchbereich für die Analyse kann frei vorgegeben werden, ebenso das für eine Frequenzkorrektur verwendete Interpolationsmodell. Durch Anklicken der Fläche "IMAGE" wird die Leistungsdichtematrix des letzten Meßzyklus angefordert und mit dem `csimg`-Programm als Falschfarbenbild dargestellt. Durch Anwahl des Feldes "Technik" wird in ein Menü verzweigt, welches den Hardware-Aufbau und die aktuelle Einstellung des DSP-Systems dokumentiert.

5.6.2 Konstruktion des Diagnose-Experten

Die Ergebnisvektoren des Meßsystems für die zeitaufgelöste Diagnostik enthalten (wie beschrieben) die einzelnen Arbeitspunktwerte $Q_{x,z}(t_k)$ und $Q_s(t_k)$ zu den Zeitpunkten t_k , die durch die kohärente Strahlanregung mittels des Diagnosekickers erzeugt werden.

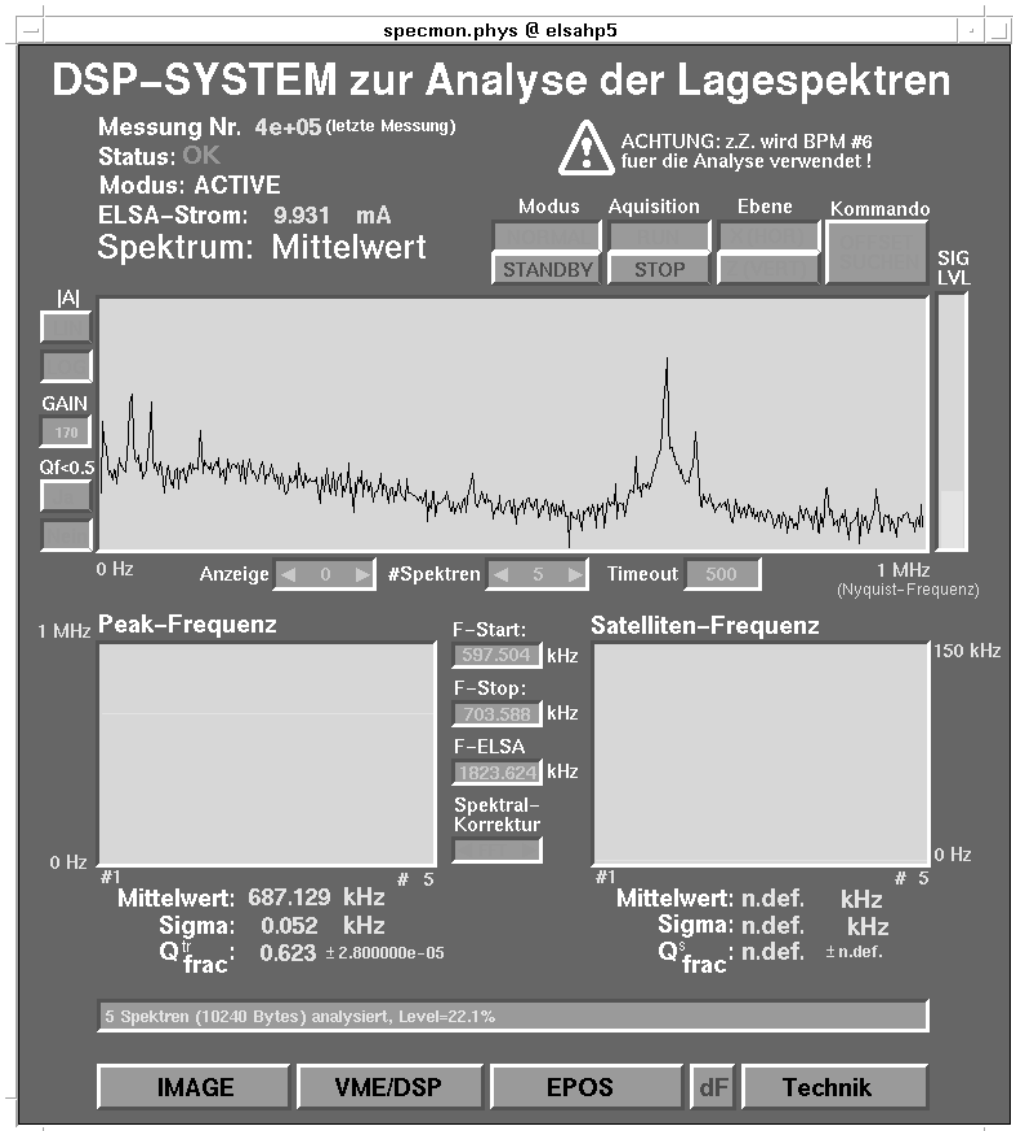


Abbildung 5.20: Menü zur Steuerung des Meßsystems mit digitalem Signalprozessor

Alle Daten werden durch den **diag**-Experten weiterverarbeitet. Dieser Experte dient hauptsächlich der Integration und Verbindung von Meßergebnissen unterschiedlicher Strahldiagnosesysteme; zum Zeitpunkt der Entwicklung war das DSP-System der erste Datenlieferant. Das Konzept des **diag**-Experten läßt sich an den folgenden, durch entsprechende Regeln festgelegten Aufgaben beschreiben:

- Die Arbeitspunktwerte Q_x und Q_z werden auf Erfüllung der Resonanzbedingung

$$n_x Q_x + n_z Q_z = l, \quad |n_x| + |n_z| \leq 5, \quad n_x, n_z, l \in \mathbb{Z}$$

überprüft. Falls die Bedingung für eine vorgegebene Genauigkeit ΔQ erfüllt wird, generiert **diag** eine entsprechende Warnungsmeldung. Ebenso wird mit der Synchrotronfrequenz verfahren; hierbei wird

die Bedingung

$$n_{x,z}Q_{x,z} + n_sQ_s = l, \quad |n_{x,z}| + |n_s| \leq 5, \quad n_{x,z}, n_s, l \in Z$$

geprüft und bei positivem Resultat eine Meldung erzeugt.

- Die Abweichungen $\Delta Q_{x,z}$ von den eingestellten Sollwerten werden ermittelt und in entsprechende Vektorparameter geschrieben. Diese Informationen können für Arbeitspunktkorrekturen bei der Berechnung der Nachbeschleunigungsrampen verwendet werden.
- Die Zeitbasis der Arbeitspunktmessungen wird bei Bedarf in die Tracking-Zeitbasis für die Nachbeschleunigung linear uminterpoliert. Dies ist erforderlich, da die Tracking-Zeitbasis nicht mit der Diagnose-Zeitbasis übereinstimmt. Erst wenn Magnetoptikwerte und gemessene Arbeitspunktverläufe in derselben Zeitbasis vorliegen, kann eine Korrekturrechnung erfolgen. Zur Vereinfachung wird die Tracking-Zeitbasis als gemeinsame Basis verwendet.
- Auf Wunsch korrigiert der Experte die gemessenen Arbeitspunkte um strahlstromabhängige, kohärente Arbeitspunktverschiebungen, die als $\Delta Q \sim I_{ELSA}/E_0$ angenommen werden. Die Größe der Verschiebung muß separat bei einer Normenergie von 1 GeV ermittelt und in einen Kontrollsystem-Parameter eingetragen werden.

Die Regeln des **diag**-Experten sind für den Anschluß weiterer Meßsysteme ausgelegt. So wird prinzipiell zwischen Systemen der transversalen und longitudinalen Strahldiagnose unterschieden; unterschiedliche Parametermengen und Regeln sind den einzelnen Aufgabenbereichen zugeordnet. Dabei ist eine gegenseitige Ergänzung aller Systeme angestrebt: Kann beispielsweise die transversale Diagnostik keinen Synchrotron-Arbeitspunkt liefern, wird statt dessen der Wert von einem anderen Meßsystem trotz eventuell geringerer Genauigkeit übernommen.

5.6.3 "off line"-Signalverarbeitung mit EPOS

Neben der zeitaufgelösten Spektralanalyse unter Echtzeitbedingungen besteht die Anforderung, einmal erfaßte Rohsignale "off line" zu analysieren. Dies ist z.B. immer dann notwendig, wenn der Funktionsumfang der in die Prozeßebene integrierten Hardware und Software für eine adäquate Analyse des Strahlverhaltens nicht ausreicht (z.B. bei sehr kleinen Kohärenzdauern oder schlechten SNR-Werten) und alternative Methoden (z.B. parametrische Modelle) eingesetzt werden müssen. Eine "off line"-Analyse wird auch dann benötigt, wenn kein "Rezept" für die Analyse des Strahlverhaltens besteht, da bestimmte Effekte sich nur als vom "Normalfall" abweichendes Strahlverhalten manifestieren und daher nur indirekt beobachtbar sind. In diesem Fall ist die Verfügbarkeit einer Menge unterschiedlicher, aber universell miteinander kombinierbarer Signalverarbeitungswerkzeuge erforderlich. Falls Strahldaten anderer Meßsysteme (z.B. von Speicheroszilloskopen) ausgewertet werden müssen und diese Meßinstrumente nicht dauerhaft an das Kontrollsystem angekoppelt sind, ist die flexible Verarbeitung der Meßwerte erforderlich; diese kann naturgemäß nur "off line" erfolgen. Unter gewissen Umständen liegen Strahldaten nur in Dateien oder Tabellen vor, ohne daß noch Zugriff auf das ursprünglich erzeugende Meßsystem besteht (beispielsweise durch Synchrotronlichtnutzer beobachtete und aufgezeichnete periodische Strahllageschwankungen). Auch diese Daten müssen geeignet ausgewertet werden können.

Zum Zweck der "off line"-Analyse wurde der Funktionsumfang des **EPOS**-Systems um diverse Operatoren der digitalen Signalverarbeitung im Zeit- und Frequenzraum ergänzt. Diese Operatoren arbeiten auf universellen Datenstrukturen, die die ursprünglich unter **EPOS** bereitgestellten Strukturen ersetzt haben bzw. ausbauen (siehe dazu [31],[67]).

Die Anforderung nach zeitaufgelöster Signalanalyse an ELSA motivierte das Konzept, grundlegende **EPOS**-Datenstrukturen aus einer Kette verschiedener Segmente aufzubauen. Jedes einzelne Segment entspricht in natürlicher Weise dem Ergebnis einer einzelnen Messung an ELSA, beispielsweise einem einzelnen Strahllagesignal $s_k(t_k)$ mit N Wertepaaren. Aufeinanderfolgende Segmente spiegeln dementsprechend auch aufeinanderfolgende Messungen wieder. In der neuen Fassung des **EPOS**-Programms werden drei segmentfähige Variablentypen für die Signalverarbeitung besonders unterstützt:

- Variablen des **WAVE**-Typs dienen zur Speicherung von diskretisierten Signalen im Zeit- oder Frequenzraum. Im Zeitraum besteht jedes Signal aus mehreren Segmenten mit jeweils einem Vektor der Amplituden s_k , der Zeitbasiswerte t_k und der Amplitudenmeßfehler Δs_k . Im Frequenzraum werden Leistungsdichten P_k oder Phasenwinkel ϕ_k einer Spektraltransformation mit entsprechenden Fehlern ΔP_k

bzw. $\Delta\phi_k$ gespeichert, wobei das Frequenzintervall durch einen Vektor f_k gegeben ist. Ein jeder **WAVE**-Variable zugeordneter Deskriptor enthält Angaben über Stützstellen, Messintervalle, physikalische Einheiten usw.. Die Größe einer **WAVE**-Variable ist nur durch den Speicherausbau des verwendeten Rechners begrenzt.

- Matrizen des **MATRIX**-Typs können beliebige Zahlen aufnehmen, wobei auch hier die Größe einer Matrix nur durch den Speicher des verwendeten Rechners limitiert ist. Ein einzelnes Segment ist durch einen Zeilen- oder Spaltenvektor der Matrix definiert.
- Digitalisierte Bilder des **IMAGE**-Typs. Eine solche Variable ist ebenfalls als Matrix strukturiert, unterstützt pro Matrixelement aber nur 256 verschiedene Werte. Auch diese Variablen können (fast) beliebig groß angelegt werden.

Zur segmentorientierten Verarbeitung⁴⁹ von **WAVE**- und **MATRIX**-Variablen wurde der **segprocess**-Operator entwickelt. Dieser Operator bildet eine segmentierte Variable in eine andere segmentierte Variable ab und bearbeitet jedes einzelne Segment während der Abbildung mit einer Berechnungsvorschrift oder einem speziellen Algorithmus; dabei kann sich die physikalische Bedeutung der gespeicherten Informationen und die Segmentlänge durchaus ändern.

Die Software des **segproc**-Operators unterstützt unter anderem Fouriertransformationen mit Rechteck- sowie Dreieck-, Hanning-, Hamming-, Welch-, Parzen- und Blackman-Harris-Fenstern. Zusätzlich sind Parametrische AR(p)-Modelle frei definierbarer Polzahl implementiert (siehe Abschnitt 5.5.5). Für spezielle Anwendungszwecke verfügt **secproc** über eine Savitzky-Golay-Filterung: Dieses digitale Filter führt eine Glättungsoperation durch, ohne eine bei der normalerweise eingesetzten gleitenden Mittelwertbildung auftretende Verbreiterung peakartiger Strukturen zu zeigen. Das Verfahren ist in [71] beschrieben.

Für die verbesserte Signalanalyse unter **EPOS** wurden die folgenden Operatoren zusätzlich bereitgestellt:

- **peaktrack**: Identifikation und Verfolgung einzelner Peaks in aufeinanderfolgenden Spektren.
- **periodsearch**: Identifikation harmonischer Signalkomponenten nach Lomb-Scargle in Meßreihen mit nicht äquidistanter Zeitbasis; das zugrundeliegende Verfahren ist in [70] beschrieben.
- **periodogram**: Berechnung des korrigierten Leistungsdichtespektrums durch überlappende Fouriertransformationen. Eine Beschreibung ist z.B. in [82] zu finden.
- **envelope**: Bestimmung der Hüllkurve eines beliebigen Signalzuges auf der Basis eines "rank"-Filters. Dieses nichtlineare Filter ersetzt einen Amplitudenwert durch den Minimal- oder Maximalwert aller Amplituden eines über die Daten geschobenen Fensters.
- Operatoren zum Entwurf und zur Analyse von "FIR"- und "IIR"-Filtern, sowie zur Systemidentifikation und Entwicklung adaptiver Filterverfahren. Diese sind in [68] beschrieben.

Zur weiteren Beschreibung der neu in **EPOS** implementierten Operatoren (insbesondere derjenigen für die Matrix- und Bildverarbeitung) muß aus Platzgründen an dieser Stelle auf die Dokumentation des **EPOS**-Systems verwiesen werden.

5.7 Zusammenwirken aller Komponenten

In den vorangegangenen Abschnitten wurden alle wesentlichen Bestandteile der Kontrolle und Diagnose für den Nachbeschleunigungsmodus in ELSA einzeln beschrieben. Erst die Kooperation zwischen diesen Subsystemen bzw. aktiven Einheiten — Experten und Steuer- und Meßprogramme in der Prozeß- bzw. Feldbusebene — stellt die für die Einstellung des Nachbeschleunigungsbetriebs notwendigen Hilfsmittel bereit. Das Zusammenwirken aller Komponenten kann anhand eines Datenflußdiagramms (Abbildung 5.21) demonstriert werden. In diesem Diagramm sind die aktiven Einheiten durch Kreise, die Daten (Kontrollsystem-Parameter) als Doppelbalken und die Berechnungen bzw. der Datentransport mit Pfeilen symbolisiert.

Allgemeine Vorgaben für den ELSA-Betriebsmodus (Endenergie, Betriebsmodus, Experiment u.a.) werden durch den bedienenden Physiker (P), unterstützt durch die Funktionen des ELSA-Modell-Experten

⁴⁹In **EPOS** wurden auch Operatoren entwickelt, die spezielle, nur an einen Variablentyp gebundene Aufgaben erfüllen. Dazu gehören z.B. Matrixinversion, Spline-Interpolation oder Bildverarbeitung, die auf einer **Matrix**- bzw. einer **VEKTOR**- oder **WAVE**-Variablen operieren, aber keine Segmente kennen. Der neu entwickelte **iproc**-Operator arbeitet nur auf **IMAGE**-Variablen.

`elsamodel`, in Vorgaben für Magneto-optik (Energie- und Arbeitspunktverlauf, Sextupolstärken), Hochfrequenzsystem und Zyklusdefinition umgesetzt. Die magneto-optischen Vorgaben sind durch den Simulatoren-Experten `simlin` anhand der daraus berechneten linearen Optik überprüfbar. Das dynamische Verhalten der Teilchen in ELSA kann durch den `xsim`-Simulator bei Bedarf für alle möglichen Einstellungen (d.h. insbesondere Injektions- und Extraktionsenergie) vorab untersucht werden. Auf diese Weise entsteht ein unter beschleunigerphysikalischen Gesichtspunkten optimierter Datensatz für den gewünschten Betriebsmodus.

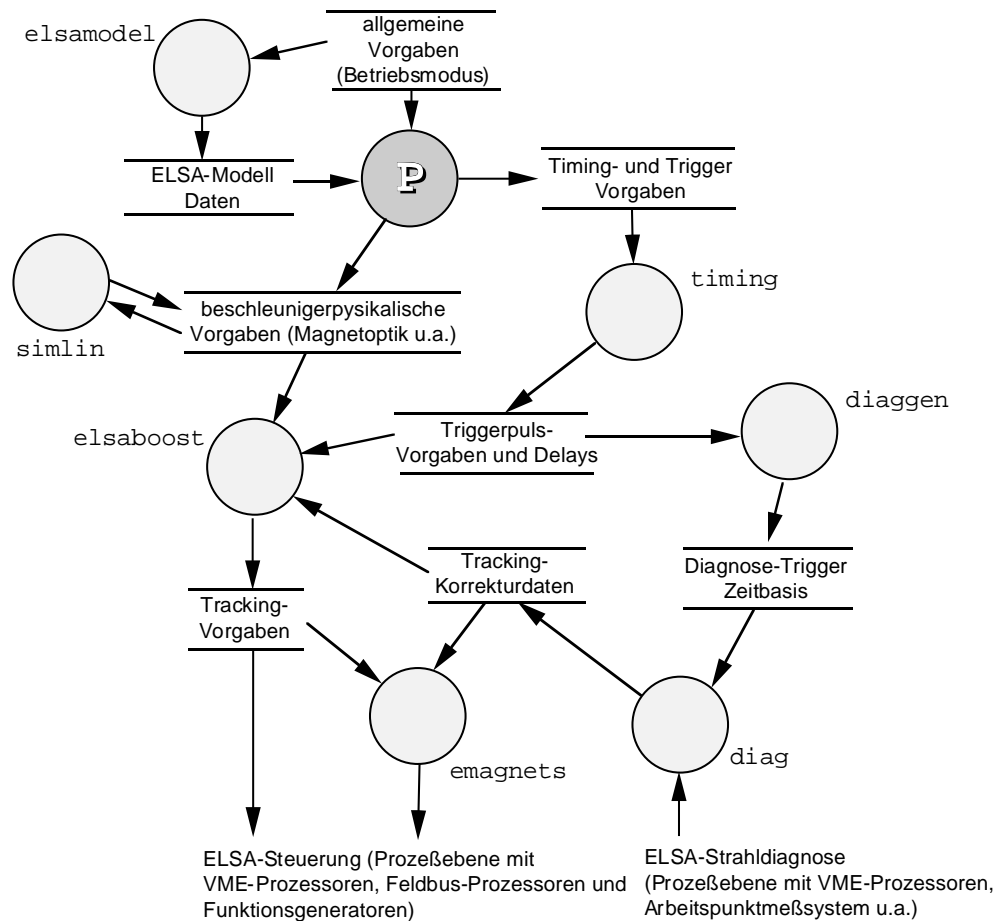


Abbildung 5.21: Zusammenwirken aller Komponenten für die Nachbeschleunigung

Die Zyklusdefinition wird durch den Timing-Experten `timing` gelesen und in einen Satz von Sollwerten für das Timing- und Triggersystem abgebildet. Der Booster-Experte `elsaboost` nimmt diese Werte zusammen mit den magneto-optischen Vorgaben und berechnet daraus alle Rampvektoren, um ein korrektes Tracking während der Nachbeschleunigung sicherzustellen. Sollvorgaben für die ELSA-Magnete werden dann durch den Magnet-Experten `emagnets` in entsprechende Steuergrößen umgerechnet und auf die ELSA-Hardware appliziert. Die durch den Timing-Experten berechneten Vorgaben können durch den Diagnose-Experten `diag` und den Diagnostrigger-Experten `diaggen` gelesen werden; der Diagnose-Experte erhält Meßergebnisse des Arbeitspunkt-Meßsystems und rechnet diese unter Berücksichtigung der Diagnose-Zeitbasis in Arbeitspunktabweichungen um, die wiederum der Booster-Experte `elsaboost` für Tracking-Korrekturen verwenden kann.

Die in [68] beschriebenen Konstruktionen und Experten für die Steuerung der Extraktion aus ELSA verwenden ebenfalls die magneto-optischen Vorgaben und die Einstellungen des Timing-Systems, um entsprechende Steuerkurven zur Kontrolle der Extraktionselemente in ELSA zu generieren.

Durch EPOS ist zu jedem Zeitpunkt über das Kontrollsystem ein Zugriff auf sämtliche Steuervektoren aus den Tracking-Rechnungen und die Rohdaten der Strahldiagnose zwecks weiterer Verarbeitung möglich.

6. Ergebnisse der ersten Betriebsphase des neuen Kontrollsystems

Das letzte Kapitel dieser Arbeit beschreibt die Migration vom alten zum neuen ELSA-Kontrollsystem und die in der ersten Betriebsphase erzielten Resultate. Zunächst wird die Inbetriebnahmeprozedur des neuen Systems beschrieben, anschließend werden Anpassungen der Software aufgeführt, die auf den Erkenntnissen der Inbetriebnahmephase basieren. Die während eines mehrwöchigen Probetriebs gesammelten Erfahrungen gaben eine Grundlage für die Strukturierung der grafischen Oberfläche, wobei die in Kapitel 3 beschriebenen Software-Werkzeuge zum Einsatz kamen.

Im zweiten Teil des Kapitels werden Tests des neuen Injektionssystems und die Auswirkungen auf das Tastverhältnis der ELSA-Füllung besprochen. Die Realisierung von Energierampen sowie die Steuerung des Nachbeschleunigungsmodus für die Experimente SAPHIR und ELAN bildet danach (entsprechend der Zielrichtung dieser Arbeit) den Schwerpunkt des zweiten Teils. Die Verifikation der angewendeten Verfahren durch die zeitaufgelöste Strahldiagnose mit dem Echtzeit-Spektralanalysesystem wird an geeigneter Stelle beschrieben, die erzielten Ergebnisse diskutiert.

6.1 Migration zum neuen Kontrollsystem

Grundforderung für die Inbetriebnahme des neuen Kontrollsystems war die Minimierung der Übergangszeit zwischen "altem" System und den neuen Hardware- und Software-Strukturen. Angestrebt wurde ein kompletter Austausch sämtlicher Komponenten in einer turnusgemäßen, zweiwöchigen Wartungsperiode. Diese für den Austausch der Kontrollsysteme relativ kurze Zeit konnte nur durch genaue Planung aller Schritte und durch entsprechende vorbereitende Maßnahmen eingehalten werden.

Die Migration vom alten zum neuen Kontrollsystem fand wie folgt statt:

1. Die gesamte Hardware-Struktur (bis auf die Feldbus-Leitungen) des neuen Systems konnte ohne störende Nebeneffekte für den ELSA-Betrieb bereits vorab aufgebaut und mit der entwickelten Software getestet werden. Dies betraf auch das komplette Timingsystem, sofern nicht die unmittelbare Ansteuerung einzelner Endgeräte betroffen war.
2. Die Systeme zur Strahldiagnose in der Prozeßebene wurden aktiviert, an das neue Kontrollsystem angeschlossen und mit simulierten Daten getestet. Nach erfolgter Konsolidierung konnten während des laufenden ELSA-Betriebs parasitär Untersuchungen mit gemessenen Strahlsignalen durchgeführt werden. Die Steuerung des Beschleunigers erfolgte dabei noch durch das alte Kontrollsystem; die Strahldiagnostik war, bis auf die Arbeitspunktverfolgung während der Nachbeschleunigung, bereits Bestandteil des neuen Kontrollsystems.
3. Unter dem alten Kontrollsystem wurde ein Konverterprogramm entwickelt, welches die in dessen zentraler Datenbank gespeicherten Informationen (Kalibrierungsfaktoren für Endgeräte u.v.m.) auslas und in Dateien überführte, welche nachträglich durch UNIX-Werkzeuge in Ressourcenbeschreibungen des RDF-Formats überführt werden konnten. Insbesondere wurde ein Index sämtlicher Parameter-Schlüssel erzeugt; diese Schlüssel sind in den EPROM-Speichern des weiterverwendeten Feldbussystems eingebrannt.
4. Ein Datensatz-Konverter wurde implementiert, der die wesentlichen optimierten Betriebsdatensätze des alten Systems (die nur in binärer, durch das alte System interpretierbarer Darstellung vorlagen) in Textdateien überführte. Diese Textdateien enthielten die gleichen Identifikatoren (Namen) wie die zuvor erzeugten RDF-Dateien.

5. Sowohl die Ressourcenbeschreibungen als auch die konvertierten Betriebsdatensätze wurden auf die neuen Kontrollrechner übertragen und durch **UNIX**-Werkzeuge nachbearbeitet. Dabei war nur geringfügig ein manuelles Eingreifen erforderlich.
6. Alle Software-Dateien zur Programmierung des **MACS**-Feldbussystems wurden durch einen neu entwickelten Konverter so umgeformt, daß sie mit einem Cross-Entwicklungssystem auf PC-Basis verarbeitet werden konnten. Dies war deshalb notwendig, da der bis zu diesem Zeitpunkt verwendete Cross-Assembler¹ Bestandteil des alten Kontrollsystems war und mit dessen Abbau zwangsläufig entfiel. Alle Dateien (ca. 100 gerätespezifische Applikationscodes) wurden danach in ein Revisionskontrollsystem eingebracht, welches die Verwaltung und automatische Generierung aller **MACS**-Code-Module ermöglicht. Entsprechende Kommandodateien rufen dazu Cross-Assembler und -Compiler in der richtigen Reihenfolge auf und liefern anschließend **HEX**-Dateien zur Programmierung von **EPR**OM-Speichern.
7. Nach Tests mit simulierten Parametersätzen wurden die aus dem alten System abgezogenen und konvertierten Parameterdefinitionen so in das neue System "eingefüttert", daß die Gesamtparametermenge auch auf dem neuen System aktiv verwaltet werden konnte. Die Parametermenge umfaßte dabei etwa 2000 Parameter in etwa 130 Parameter-Gruppen. Die Verwaltung des kompletten Parametersatzes erlaubte bereits den Vorab-Test von Software-Komponenten (Datenbanken etc.) des neuen Systems unter realistischen Bedingungen, ohne daß der "Noch"-Betrieb des alten Systems tangiert wurde.
8. Die wichtigsten Elemente der grafischen Oberfläche wurden manuell mit dem **csmd**-Programm entworfen und getestet. Für die technische Ebene wurde durch **csmgen** automatisch ein Satz von Menüs erzeugt, der Zugriff auf alle testweise definierten Parameter ermöglichte. Dadurch war das neue System mit einer konsistenten, technisch orientierten Oberfläche für die Inbetriebnahme ausgestattet.
9. Während einer normalen Wartungsperiode von zwei Tagen wurden die beiden Feldbusleitungen des alten Systems von diesem abgekoppelt und an die **VME**-Kommunikationskontroller des neuen Systems angeschlossen; dadurch ergaben sich Testmöglichkeiten für Feldbus-Software und -Hardware unter annähernd realistischen Betriebsbedingungen. Nach erfolgten Tests wurden die Leitungen wieder auf das alte Kontrollsystem zurückgeschaltet. Während der Tests konnte insbesondere die Erreichbarkeit sämtlicher definierter Parameter und die korrekte Datentransformation für alle Werte überprüft werden.
10. In einer abschließenden Phase wurden zusätzliche Parameter in das neue System integriert und die Programmierung aller Experten abgeschlossen. Neben den bereits beschriebenen Timing- und Magnet-Experten war insbesondere die Entwicklung von Software notwendig, die die Steuerung der Synchrotron-Extraktion und **ELSA**-Injektion übernimmt. Die dazu implementierten Regelprozeduren werden durch den neu erstellten **transfer**-Experten abgewickelt:
 - Für die Ablenkwinkel der Septa in der Synchrotron-Extraktion und für die Kickwinkel der dort ebenfalls eingesetzten Bumper- und Kickermagnete wurden entsprechende Berechnungen, ausgehend von den in [63] angegebenen Größen, programmiert. Dazu gehört auch die automatische Einstellung einer geschlossenen Sollbahnbeule mit Bumper- und Kickermagneten.
 - Für die Steuerung der **ELSA**-Injektion wurden die Berechnungen für die Ablenkwinkel der Septa und Kickermagnete implementiert (definiert durch die Angaben in [24]); darüber hinaus wurde die von A. Dreist entwickelte Software (siehe ebenfalls [24]) zur Ermittlung der optimalen Kickstärken für eine geschlossene Injektionskickerbeule portiert. Dadurch sind auch die theoretisch einzustellenden Ablenkwinkel der Septa verfügbar.

Nach dieser Vorbereitungsphase lief das neue Kontrollsystem parallel zum alten System in vollständig aktiviertem Zustand. Während der endgültigen Übernahme wurden die Feldbusleitungen des alten Systems an mehreren Punkten aufgetrennt und auf die insgesamt fünf neuen Kommunikationskontroller verteilt. Die Triggereinspeisungen des alten Systems wurden auf das neu entwickelte Timingsystem umgelegt, Änderungen in der Triggerzuordnung zu einzelnen Endgeräten wurden in dieser Phase ebenfalls vollzogen. Anschließend wurden die Festspeicher einer relativ kleinen Menge von Feldbusprozessoren durch neue **EPR**OMs ersetzt. Durch Einsatz des neuen Timingsystems wurde die Modifikation wesentlicher Zeitpunktwerte (Einzelverzögerungen bestimmter Endgeräte) notwendig.

¹Der Cross-Assembler übersetzte auf der **VAX 11/750** vorliegende **MACS**-Dateien im **Z80/8085**-Dialekt in entsprechenden, **EPR**OM-fähigen Maschinencode.

Nach Abschalten des alten Kontrollsystems konnte unter der Regie des neuen Systems bereits nach wenigen Stunden wieder ein in ELSA umlaufender, akkumulierter Elektronenstrahl bei einer Energie von 1.2 GeV realisiert werden. Durch nachträgliche Fehlerbehebung, Anpassungen und Verbesserungen der Soft- und Hardware des neuen Systems war nach etwa drei Wochen ein weitgehend normalisierter Betrieb in den Standardbetriebsmodi bei 1.2 GeV und 1.6 GeV (bzw. 2.3 GeV im Speicherringbetrieb) sichergestellt.

6.2 Strukturierung der Oberfläche für den ELSA-Betrieb

Nach einer ersten Testphase des Kontrollsystems mit einer stark vereinfachten Menüführung wurde die Strukturierung der Bedienoberfläche in Angriff genommen. Dabei wurden die folgenden Entscheidungen getroffen:

- Die gesamte Menüstruktur gliedert sich in drei Ebenen: Auf der obersten Ebene ist die abstrakte, an der Beschleunigerphysik und den einzustellenden Betriebsmodi ausgerichtete Menüstruktur angesiedelt; im Mittelbau befinden sich alle Menüs zur Steuerung kompletter Bereiche oder Subsysteme (z.B. Magneto-optik, Hochfrequenz u.a.); die unterste Ebene enthält schließlich alle Menüs zum unmittelbaren technisch orientierten Zugriff auf alle Endgeräte.
- Wo immer sinnvoll möglich, ist jedes Menü in drei Varianten realisiert: eine physikalische Variante, die abstrakten Zugriff auf wesentliche beschleunigerphysikalische ELSA-Parameter gibt; eine technische Variante (Wirkungszusammenhang eines Subsystems als Blockdiagramm), die die Parameter angeschlossener Endgeräte aus der Sicht eines Technikers zugänglich macht, und eine geographische Variante, die die Lokalität von Geräten oder Subsystemen als wesentliche Information (geographischer Kontext) anbietet und im Störfall eine unterstützende Funktion bei der Fehlersuche bildet.
- Die Aktivierung von Applikationen sowie die Wahl einzelner Bereiche oder Subsysteme erfolgt durch Anwahl spezifischer Piktogramme ("Icons"); jedes Piktogramm sollte durch sein Aussehen intuitives Verständnis des darunterliegenden Bereichs erleichtern.²
- Die Menüs der obersten Ebene ergeben durch die Anordnung ihrer Elemente eine vereinfachte Benutzerführung, d.h. daß das sukzessive Anwählen einzelner Menüfenster nur in für bestimmte Betriebsabläufe sinnvoller Reihenfolge durchgeführt werden kann. So soll z.B. das Menü zur Einstellung der Magneto-optik erst nach Definition des Betriebsmodus angewählt werden können.
- Die Farben sind so vergeben worden, daß einheitliche Zuordnungen für Sollwerte und Istwerte sowie für Statusmeldungen entstanden, die bei kursorischer Betrachtung eines Menüs das Auffinden gesuchter Anzeigen erleichtern.

Diese Vorgaben wurden ergänzt durch eine Konvention, die eine grobe Richtlinie für die Entwicklung neuer Menüs angibt; hierin wird beispielsweise die Farbwahl und das Aussehen bestimmter Elemente (z.B. simulierter Knöpfe) oder die Platzierung und das Aussehen von Textinformationen weiter präzisiert. Angestrebt ist die Erstellung eines "ELSA Style Guides" für die grafische Oberfläche, damit auch bei der Menüentwicklung mit mehreren Personen eine einheitliche und mit einem Maximum an Ergonomie ausgestattete Bedienung des Beschleunigers realisierbar ist.

Zur erstmaligen Erstellung aller technischen Menüs der untersten Ebene wurde die Verwendung des Menügenerators `csmgen` beschlossen. Dieser ersparte in der ersten Betriebsphase des Kontrollsystems die zeitaufwendige Entwicklung per Hand.³ Es ist allerdings geplant, daß die technische Menü-Ebene durch manuell erstellte Grafiken ersetzt wird. Die dazu notwendige, Menüentwicklung muß von technischem Personal durchgeführt werden, da so das spezifische Know-How einzelner Spezialisten zur Steuerung bzw. Überwachung technischer Subsysteme vorteilhaft umgesetzt werden kann. Diesbezügliche Entwicklungsarbeiten sind nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit.

Eine Beispieldarstellung von drei entwickelten Menüfenstern ist in Abbildung 6.1 gegeben.

²Dieser Ansatz entspricht dem heute allgemein als "de facto"-Standard grafischer Interaktion etablierten Verfahren, welches sich im EDV-Markt erfolgreich durchgesetzt hat (vergl. `MS-Windows`, `MacOS`, aber auch Oberflächen von `SGI`, `HP`, `SUN` sowie das herstellerübergreifende `CDE`-System ("Common Desktop Environment"). Die weite Verbreitung dieses Konzepts und vor allem seine einfache, intuitive Erlernbarkeit wird im neuen Kontrollsystem positiv ausgenutzt.

³Das `csmgen`-Programm erzeugt in weniger als 60 Sekunden ca. 450 einzelne Menüs mit ca. 3800 einzelnen Parametern, versehen mit einem hierarchisch aufgebauten Zugriffsbaum. Die Arbeitsweise von `csmgen` ist in Kapitel 3 beschrieben.

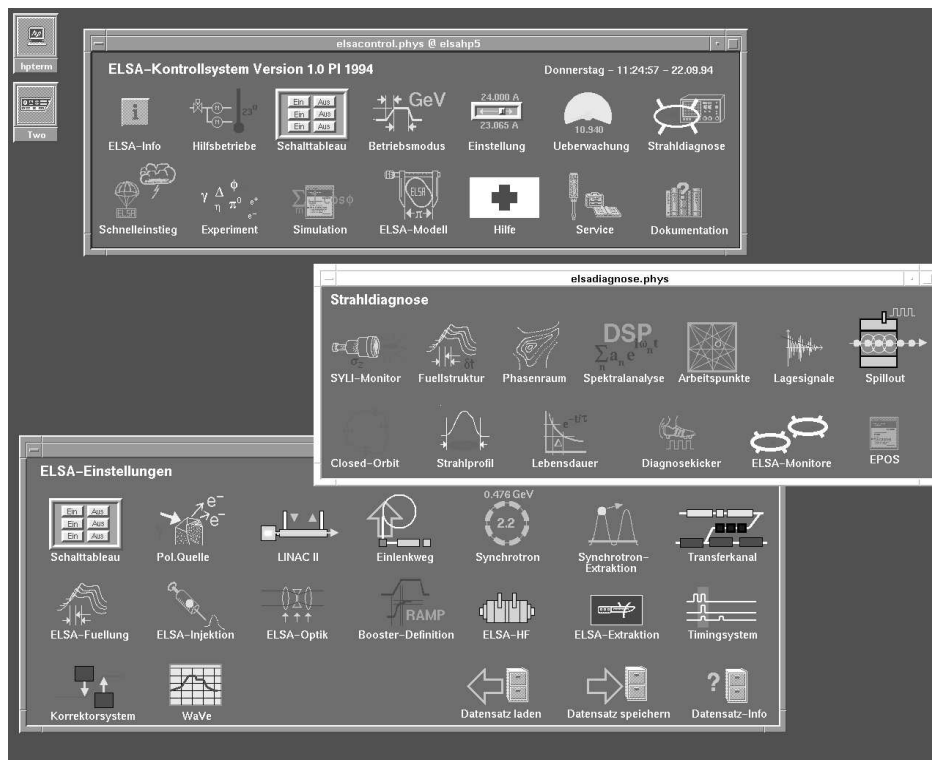


Abbildung 6.1: Die graphische Oberfläche des neuen Kontrollsystems

Das oberste Menüfenster definiert den Einstiegspunkt in das neue ELSA-Kontrollsystem. Durch Anwahl eines Piktogramms kann geeignet verzweigt werden. So ist im unteren Fenster das Menü aufgeblendet, welches durch Wahl des Punktes "Einstellung" aktiviert wird. Ein Menüfenster zur Steuerung bzw. Ergebnisanzeige der Strahldiagnosesysteme ist ebenfalls zu sehen (Mitte).

Benutzerakzeptanz

Die Akzeptanz des neuen Systems durch die mit der Bedienung von ELSA betrauten Physiker und Operateure wird wesentlich durch die Antwortzeiten des Systems bestimmt. Da die Steuerung für alle analogen Parameter (auch bei Abarbeitung sämtlicher zugeordneter Regelprozeduren) mit hoher Durchsatzrate erfolgt, ist eine intuitive Manipulation der wichtigsten Betriebsparameter sofort nach der Inbetriebnahme möglich gewesen. Insbesondere hat sich die Bedienung simulierter Potentiometer mittels Mauszeiger, ergänzt um die aufblendbaren Modifikationsboxen, als sehr praktikabel gezeigt. Die innerhalb der Modifikationsboxen angebotene Memory-Funktion zur temporären Speicherung einzelner Sollwertvorgaben hat sich gut bewährt. Zum Feinabgleich analoger Sollwertvorgaben zeigte das Konzept der Inkrement- und Dekrementgeber gute Resultate, die Bedienung analoger Werte mit den Cursorsteuerungstasten der Tastatur wurde ebenfalls sofort akzeptiert und hat sich insbesondere für das Fädeln des Elektronenstrahls in externen Strahlführungen gut bewährt.

Durch die hohe Rechen- und Grafikleistung der eingesetzten Workstations sind insbesondere die Auf- und Wegblendzeiten für Menüfenster sehr klein (weniger als 0.5 sec) und werden subjektiv als angenehm empfunden; dies gestattet den schnellen Fensterwechsel und eine effiziente Bedienung des Menüsystems.

Die in der Aufgabenstellung erhobene Forderung nach transparenter Bedien- und Beobachtbarkeit aller wichtigen Parameter über eine einfach strukturierte grafische Oberfläche ist damit erfüllt worden. Verbesserungsvorschläge zum konkreten Aufbau einzelner Menüfenster oder der Zugriffsstruktur können durch Verwendung des `csmd`-Programms leicht umgesetzt werden, ohne das Software neu entwickelt oder angepaßt werden muß.

6.3 Konstruktion von zusätzlichen Experten

Basierend auf den positiven Erfahrungen der Inbetriebnahmephase wurde die Entwicklung von Experten beschlossen, die sämtliche Status- und Istwertmeldungen aller an das Kontrollsystem angeschlossenen Endgeräte überprüfen und aus den Werten jeweils Summenstörungen und Textmeldungen generieren. Diese Summenstörungen wurden selbst wiederum zu Bereichsstörungen und Bereichsmeldungen zusammengefaßt. Durch entsprechende individuelle Regeln für jedes Endgerät wird spezifischen Randbedingungen Rechnung getragen. Alle Regeln sind in mehreren **alarm**-Experten eingekapselt. Nach dem Start des Kontrollsystems beginnen diese mit der Analyse aller empfangenen Statusmeldungen; grafische Symbole wurden beim Entwurf der Oberfläche für Ergebnisparameter immer dort plazierte, wo eine Summenstatusanzeige angemessen erschien. Auf diese Weise bekommt der Operateur die Störung oder den Ausfall eines Netzgerätes sofort mitgeteilt. Dieses Merkmal hat sich insbesondere bei der Überwachung langer Runs positiv ausgewirkt und die Fehlersuchzeiten (beispielsweise nach einem Strahlverlust infolge Netzgerätausfall) deutlich reduziert. Es stellte sich jedoch in der Praxis bei einigen Endgeräten heraus, daß die Analyse einer größeren Menge von Einzelmeldungen unter gewissen Umständen (besonders bei Mehrfachbelegungen von Einzelmeldungen durch die Hardware) keine eindeutige Bewertung eines Gerätezustandes möglich macht.

Zur Berechnung von Druckwerten und der Registrierung von Minimal-, Maximal- und Durchschnittsdruck in der ELSA-Vakuumkammer wurde der **vakuu**-Experte entwickelt. Er rechnet die von den Ionengetterpumpen gelieferten Entladeströme in Druckwerte um und soll in Zukunft so erweitert werden, daß statistische Informationen über alle Vakuumpumpen gesammelt und einer Auswertung unterzogen werden können. Dadurch wird eine bessere Unterstützung vakuumtechnischer Arbeiten (die besonders in Wartungsperioden anfallen) angestrebt.

Die einfache Anbindung externer Experiment-Datenerfassungssysteme wurde bei der Konstruktion des Kontrollsystems besonders berücksichtigt. Experimentierrechner verwenden dazu eine vom Kontrollsystem bereitgestellte Bibliothek standardisierter Kommunikationsroutinen, die auf anderen **UNIX**- und auch **VMS**-Plattformen ablauffähig ist. Durch Einbindung dieser Bibliothek in die Experimente-Software kann die Kommunikation mit dem ELSA-Kontrollsystem sowohl zum Abfragen wichtiger Parameter (etwa der Extraktionsenergie) als auch zur Übermittlung von Run-Daten (Tastverhältnis, Zählraten, Strom u.a.) dienen. Zur weiteren Aufbereitung des vom Experiment gelieferten Datenstroms wurden die Experten **saphir**, **elan** und **phoenics** entworfen. Die dort gegenwärtig implementierten Funktionen umfassen im wesentlichen eine Historienbildung der empfangenen Daten: Jeder neu ankommende Datenwert wird in eine Liste bereits registrierter Werte aufgenommen, der älteste Wert wird entfernt. Durch Anzeige der entsprechenden vektorwertigen Parameter auf der Oberfläche des Kontrollsystems wird so eine zeitliche Verfolgung der vom Experiment gelieferten Informationen stark vereinfacht und die Optimierung der Strahlbedingungen durch den Operateur erleichtert. In Zukunft sollen die Experten alle Regeln abarbeiten, die für das jeweils aktive Experiment spezifisch sind (z.B. verbesserte Steuerung der Beamlines für den optimierten Strahltransport bis zum Target). Hierzu ist eine enge Zusammenarbeit mit den betreffenden Experimentiergruppen an ELSA notwendig.

Die Erfahrungen mit dem Konzept der verteilt arbeitenden Experten war nach der Inbetriebnahme und mehrmonatiger Betriebsdauer des neuen Kontrollsystems sehr gut. Die Aktivierungsraten und der Berechnungsaufwand aller implementierter Regelprozeduren haben den Gesamtdurchsatz oder eine quasi-kontinuierliche Bedienung der wesentlichen ELSA-Parameter nicht signifikant eingeschränkt. Zur Zeit sind insgesamt 74 Regeln mit 1060 verschiedenen Ein/Ausgabeparametern aktiv (1266 Parameter mit Überschneidungen, d.h. 206 Parameter werden in mehreren Regeln parallel verwendet), die 17 Experten zugeteilt sind. Pro Sekunde werden im Routinebetrieb mehrere 10 Regeln bearbeitet.⁴

6.4 Optimierung der ELSA-Füllstruktur

Zur Messung, Überwachung und Optimierung der ELSA-Füllstruktur wurde die Entwicklung eines dafür geeigneten Monitors samt Verarbeitungselektronik und Software im Rahmen einer Diplomarbeit durchgeführt [51]. Das System sollte mit möglichst hoher Bandbreite (d.h. Zeitaufösung) arbeiten und einen ausreichend hohen Dynamikumfang besitzen, um neben den im Nachbeschleunigungsbetrieb erforderlichen hohen

⁴Diese Angaben entsprechen der normalen Betriebskonfiguration am 25.9.1994.

Strahlströmen (50 mA bis 100 mA und mehr) auch die beim Betrieb mit polarisierten Elektronen zu erwartenden relativ kleinen Ströme (maximal wenige mA in ELSA) verarbeiten zu können. Es sollte mit seiner Verarbeitungselektronik an die Prozeßebene des neuen Kontrollsystems angebunden sein, seine Ergebnisse direkt an die Kontrolle übermitteln und dadurch die einfache Integration von Kontrolle und Strahldiagnose prototypisch demonstrieren. Der nach diesem Konzept realisierte schnelle Intensitätsmonitor ist detailliert in [51] beschrieben.

Durch Messungen konnte noch unter dem alten Kontrollsystem der Aufbau einer Füllstruktur in ELSA durch Akkumulieren von Strahl aus dem Synchrotron detailliert beobachtet werden. Der Intensitätsmonitor war zu diesem Zeitpunkt bereits in das neue Kontrollsystem integriert, die Analysen der gemessenen Signale erfolgte unter EPOS auf den Workstations der Kontrollebene. Ergebnisse der Messungen sind in [51] zu finden. Es stellte sich heraus, daß selbst bei einer größeren Zahl von Injektionen die in ELSA entstandene Ringfüllung nicht optimal war und sich Strukturen ausbildeten, die zu einer deutlichen Einschränkung des Tastverhältnisses der Füllung führten. Exemplarisch für eine Messung wird an dieser Stelle das sich entwickelnde Füllsignal beim Akkumulationsbetrieb mit 35 Injektionen, organisiert durch das alte Timingsystem, betrachtet (vergl. [51]). Dabei wurde das Umlaufsignal $I_{fill}(t)$ in Zeitabständen von 5 msec gemessen, die Gesamtmeßzeit beträgt 1 sec, so daß die Füllstruktur in ELSA nach Abschluß der Injektion besser beobachtet werden konnte. Die Daten sind in Abbildung 6.2 zu sehen.

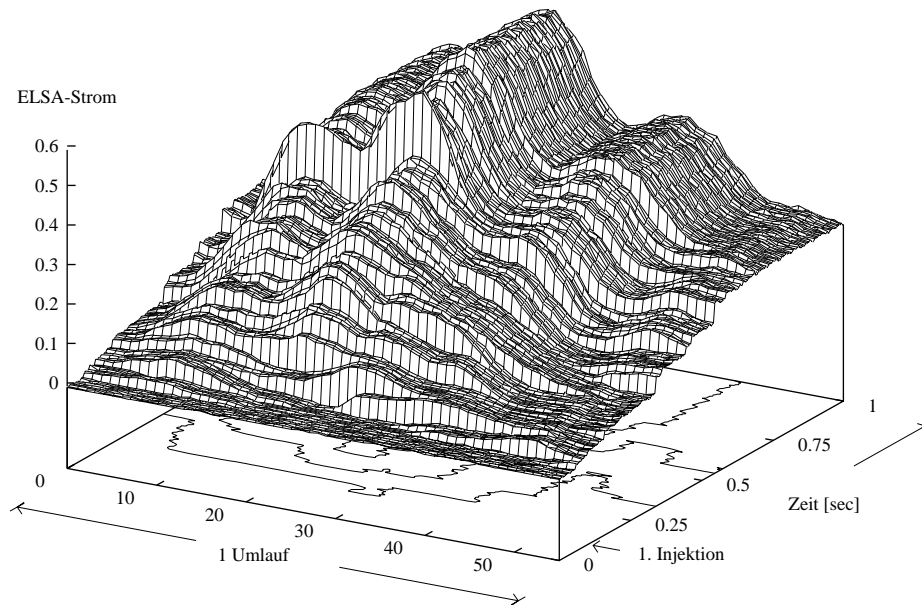


Abbildung 6.2: ELSA-Füllung bei 35 Injektionen im alten Kontrollsystem

Nach der Injektionsphase bleibt die Füllstruktur näherungsweise unverändert. Sie ist relativ inhomogen; insbesondere ist aus dem Diagramm ersichtlich, daß sich die injizierten Strahlstücke nicht gleichmäßig über den ELSA-Ringumfang verteilen.⁵ Zusätzlich kann beobachtet werden, daß der aus dem Synchrotron extrahierte Strom deutlichen Schwankungen unterworfen ist. Insgesamt stellt sich also eine sehr inhomogene Füllstruktur ein, die das mikroskopische Tastverhältnis bei der Extraktion entsprechend reduziert.

Die Inbetriebnahme des neuen Timingsystems gestattete erstmals einen Test des neuen Injektionschemas. Zur Einstellung einer optimalen Füllstruktur in ELSA müssen die einzelnen Verzögerungskanäle des Injektionsgenerators geeignet konfiguriert werden. Wesentlicher Parameter ist hierbei der zeitliche Versatz Δt

⁵Da im alten Kontrollsystem keine Synchronisation zwischen der ELSA-Injektion und dem ELSA-Umlauf bestand, erwartet man (bezogen auf den ELSA-Umlauf) mehr oder weniger gleichverteilte Anfangszeitpunkte des in ELSA injizierten Strahls. Diese Gleichverteilung sollte umso besser sichtbar sein, je mehr Injektionen vorgenommen wurden.

einzelner, nacheinander in ELSA transferierter Füllungen des Synchrotrons (siehe dazu die Ausführungen in Kapitel 4).

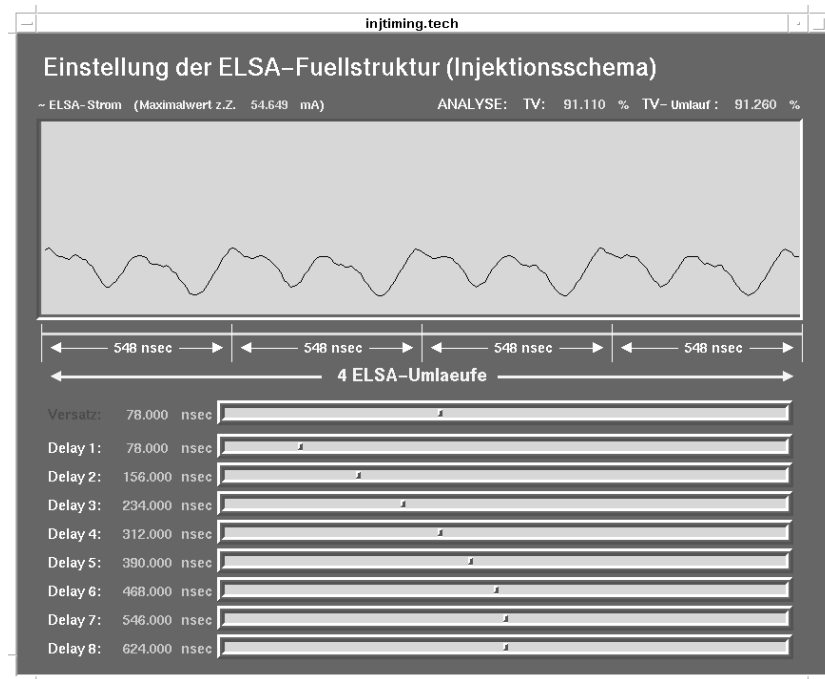


Abbildung 6.3: Menü zur interaktiven Optimierung der ELSA-Füllstruktur

Die Optimierung der ELSA-Füllung kann durch Variation dieses Versatzes erfolgen, wenn gleichzeitig die durch den schnellen Intensitätsmonitor gemeldeten Tastverhältniswerte berücksichtigt werden. Dabei stellt der Operateur über das Kontrollsystem den Zeitversatzwert so ein, daß sich ein maximales Tastverhältnis der Füllung ergibt. Zur vereinfachten Bedienung wurde das in Abbildung 6.3 aufgeführte Menü entwickelt. Durch Verfahren des simulierten Potentiometers "Versatz" werden die Verzögerungswerte des Injektionsgenerators kanalweise durch den **timing**-Experten berechnet. Das sich einstellende Tastverhältnis der ELSA-Füllung wird rechts oben angezeigt; das darunterliegende Diagramm gibt die gemessene Ringfüllung in ELSA über vier Umläufe (d.h. ca. $2.2 \mu\text{sec}$) wieder. Die durch das Kontrollsystem erzielbaren Aktualisierungsraten erlauben eine Anzeige der Ringfüllung mit maximal ca. 3 Hz, was die manuelle Optimierung der Füllstruktur sehr erleichtert — die Auswirkung einer Änderung des Versatzwertes ist instantan sichtbar.

Zur Bewertung des neuen Injektionsverfahrens wurde eine Messung des Tastverhältnisses der ELSA-Füllung in Abhängigkeit vom Zeitversatz der Injektion vorgenommen. Dazu wurde ein "7er"-Injektionsschema gewählt und der Versatzwert Δt , beginnend von 0 nsec bis zu einem Endwert von 300 nsec in Schritten von 5 nsec variiert. Bei jeder Messung wurden 7 sukzessiv verzögerte Injektionen vorgenommen und das Tastverhältnis der entstandenen Ringfüllung in einer nachfolgenden Pause ermittelt. Die Extraktion aus dem Synchrotron wurde zuvor auf eine maximale Transfereffizienz eingestellt und die Länge einer Synchrotronfüllung ausgemessen. Bei einem Synchrotronstrom von 7 mA konnte pro Injektion in ELSA ein Strom von 2.5 mA gespeichert werden, dies entspricht einer Transfereffizienz von 84%. Die gemessene Form der Synchrotronfüllung war dabei symmetrisch und näherungsweise durch ein Trapez der Basislänge $\tau = 230 \text{ nsec}$ beschrieben.

Das Ergebnis der Messung ist in Abbildung 6.4 aufgetragen. Der Fehler bei der Messung des Tastverhältnisses beträgt ca. 0.5%, der Fehler bei der Einstellung von Δt ist durch die Einstellgenauigkeit der Verzögerungsgeneratoren gegeben und liegt bei ca. 1 nsec. Es zeigten sich deutlich ausgeprägte Maximalwerte (jeweils ca. 95%–98%) des gemessenen Tastverhältnisses bei Werten von $\Delta t = 80 \pm 5 \text{ nsec}$, $160 \pm 5 \text{ nsec}$ sowie $240 \pm 5 \text{ nsec}$. Diese Zeitversatzwerte entsprechen fast exakt Vielfachen eines Siebtels der ELSA-Umlaufszeit von $548/7 \approx 78 \text{ nsec}$. Bei der Injektion von 7 um $\Delta t = 80 \text{ nsec}$ versetzten Synchrotronfüllungen kann also offensichtlich eine sehr gute Homogenisierung der ELSA-Füllung erzielt werden.

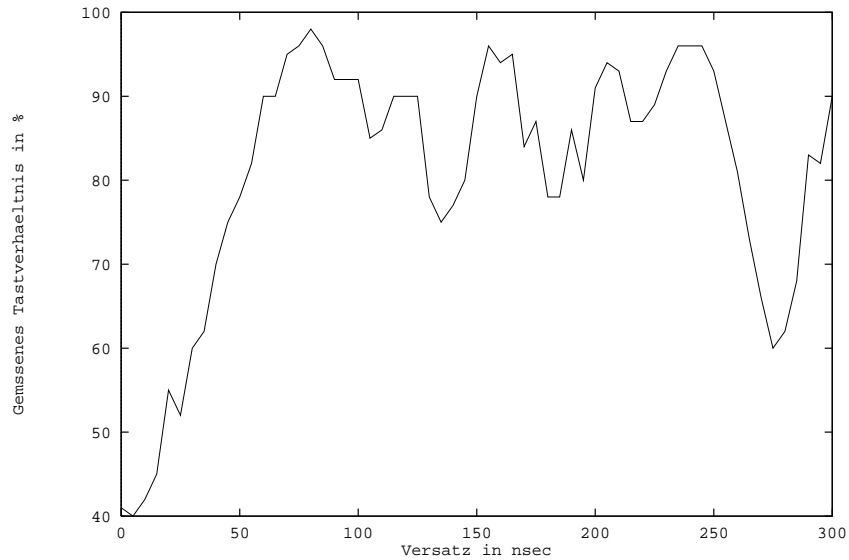


Abbildung 6.4: Gemessenes Tastverhältnis der ELSA-Füllung als Funktion des Zeitversatzes

Bei sukzessivem Einschub des Strahls auf die immer gleiche Position in ELSA ($\Delta t = 0$) ergibt sich insbesondere ein Tastverhältnis, welches durch Länge und Form der Synchrotronfüllung charakterisiert ist.⁶ Um die mögliche Zeitauflösung bei der Füllungsoptimierung besser zu bewerten, wurde bei dem ermittelten Maximum des Tastverhältnisses eine verfeinerte Messung im Intervall $\Delta t = [75, 90]$ nsec in Abständen von 1 nsec vorgenommen.

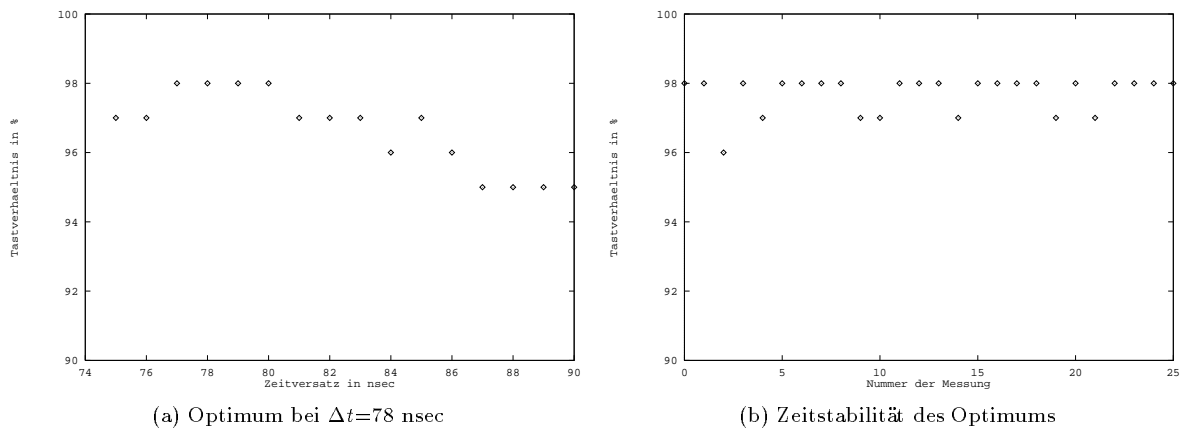


Abbildung 6.5: Untersuchung des Optimums bei $\Delta t \approx 80$ nsec

Das Ergebnis ist in Abbildung 6.5 (a) zu sehen und legt die Position des Maximums auf $\Delta t = 78 \pm 3$ nsec fest, was mit dem Wert $548/7 \approx 78$ nsec korrespondiert. Zur Prüfung der zeitlichen Stabilität der Füllkorrektur wurde die TV-Messung für $\Delta t = 78$ nsec in Abständen von 10 sec mehrfach wiederholt, die Ergebnisse sind

⁶Das für $\Delta t = 0$ nsec erzielte Tastverhältnis der ELSA-Füllung beträgt laut Abbildung nur etwa 40%. Dieser Wert ist gut verträglich mit einem rechteckförmigen Puls der Länge von $\tau \approx 230$ nsec in ELSA: Da bei $\Delta t = 0$ nsec alle injizierten Strahlstücke immer wieder aufeinander zu liegen kommen (mit Versatzfehlern in nsec-Bereich), bildet sich in ELSA eine etwa 230 nsec lange Struktur aus, deren Form zwischen Trapez- und Rechteckform liegt; dies ergibt abgeschätzt ein Tastverhältnis von ca. $230/548 \approx 40\%$.

in Abbildung 6.5 (b) zu sehen. Es zeigt sich eine gute Stabilität des erreichten Tastverhältnisses der ELSA-Füllung mit Schwankungen von maximal 1%. Die zeitliche Auflösung kann aus dem linken Bild mit etwa 3–4 nsec abgeschätzt werden. Dies bedeutet in praxi, daß eine Änderung der Füllstruktur in ELSA bereits bei Änderung der Zeitversatzwerte um ca. 3–4 nsec signifikant nachgewiesen werden kann. Dies rechtfertigt insbesondere den Einsatz spezieller Verzögerungsgeneratoren (siehe Kapitel 4) mit einer Einstellgenauigkeit im Nanosekundenbereich.

Zur Überprüfung der sich bei einem "7er"-Schema einstellenden Füllstruktur wurde die Füllstruktur über 7·10 Injektionen gemessen und umlaufssynchron aufgetragen. Hierbei waren Standard-Injektionsbedingungen für den Akkumulationsbetrieb eingestellt. Das Ergebnis beschreibt Abbildung 6.6.

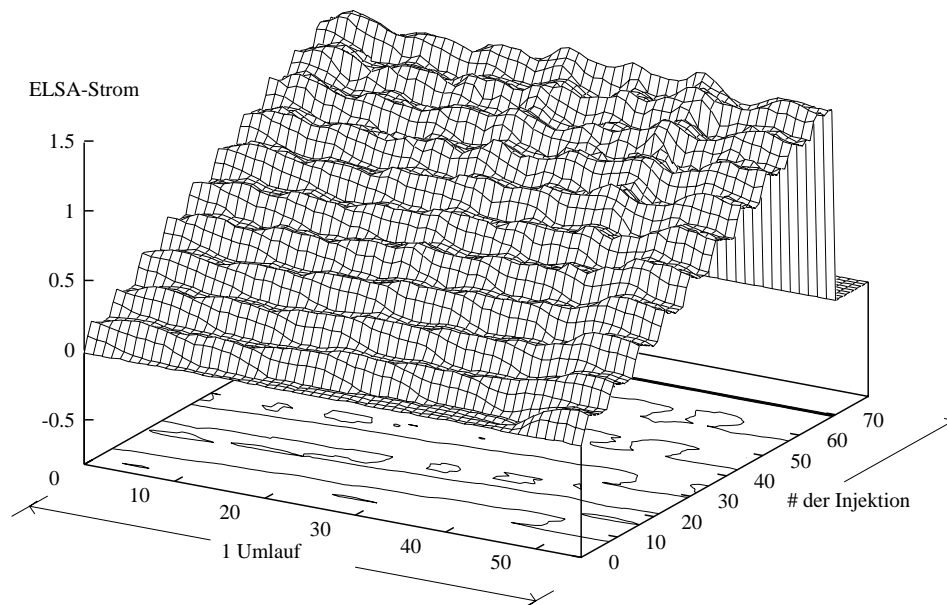


Abbildung 6.6: Stromsignal der ELSA-Füllung bei 7·10 Injektionen und $\Delta t = 79$ nsec

Deutlich sichtbar ist die fast vollständige Glättung der Füllstruktur über 7 aufeinander folgende Injektionen. Jede der 10 Injektionszüge zu je 7 Einzelinjektionen addiert einen fast konstanten Strom zum bereits in ELSA akkumulierten, mittleren Strom. Offensichtlich ist bei diesem Verfahren die Form und Länge der Synchrotronfüllung nicht in dem Maße wesentlich wie erwartet. Das Diagramm zeigt darüber hinaus, daß bei überlappender Injektion, d.h. Injektion einer Synchrotronfüllung auf ein Stück des bereits in ELSA umlaufenden Füllmusters, die Stromakzeptanz von ELSA im Bereich der Überlappung, d.h. in den betroffenen HF-Buckets, limitiert ist. Bei überlappendem Einschub entstehen durch diese Limitierung nicht die erwarteten Stromspitzen, sondern es stellt sich ein relativ glatter, durch eine obere Schranke begrenzter Verlauf ein. Insgesamt ergibt sich näherungsweise eine Treppenstufenfunktion, die die Wirkungsweise des zeitversetzten Injektionsverfahrens gut demonstriert.

Beobachtungen der in ELSA injizierten Synchrotronfüllung über einen längeren Zeitraum haben gezeigt, daß deren Form stark von der jeweils gewählten Einstellung aller Beschleunigerkomponenten, inklusive der Injektionselemente in ELSA, abhängt und je nach Betriebseinstellung stark differieren kann. Vor allem ergibt die Methodik der Synchrotronextraktion (Extraktion über einen, zwei oder drei Umläufe) stark differierende Strommuster des in ELSA injizierten Strahls. Die einfach durchzuführende Steuerung des Injektionsgenerators durch das Kontrollsystem erlaubt aber im Akkumulationsbetrieb eine interaktive Optimierung und mindert daher den Einfluß unterschiedlicher Extraktionsmethoden und variierender Formen Synchrotronfüllung erheblich.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß das gewählte Injektionsschema, realisiert durch das neue

Kontrollsystem, eine deutliche Verbesserung der Homogenität der ELSA-Füllstruktur möglich macht; die im ersten Kapitel formulierten Anforderungen an das Timingsystem werden damit erfüllt.

Einstellung für das PHOENICS-Experiment

Das PHOENICS-Experiment wird im reinen Stretcherbetrieb bis zu einer Energie von 1.2 GeV betrieben und kann daher mit hohem makroskopischen Tastverhältnis bedient werden. Die in der Vergangenheit durch fortlaufende Optimierung erzielten Werte für das mikroskopische Tastverhältnis waren im wesentlichen durch das Tastverhältnis der ELSA-Füllung nach oben beschränkt. Optimale Betriebsbedingungen lieferten in der Regel Werte zwischen 50% und 60%.

Die für PHOENICS eingesetzte Extraktionsmethode basiert nicht auf der Resonanzextraktion in der Nähe eines drittelzahligen Arbeitspunktes, sondern auf der Elektronenstreuung an einem in den Strahlweg eingeschobenen, 50 μm dicken Berylliumfaden. Durch Streuung der Elektronen an diesem "internen Target" werden Teilchen instabil und aus ELSA extrahiert; der Mechanismus ist in [21] beschrieben. Bei dieser "Fadenextraktion" wird Strahl aus dem Synchrotron in ELSA fortwährend akkumuliert, bis sich in ELSA ein Gleichgewicht aus extrahierten Teilchen zu injizierten Teilchen einstellt. Die extrahierten Teilchen stammen dabei sowohl aus dem akkumulierten (und bereits abgedämpften Strahl) als auch aus dem gerade injizierten Strahl.

Das Tastverhältnis der ELSA-Füllung war unter Regie des alten Kontrollsystems auch beim Akkumulationsbetrieb nicht optimal, wie die Daten in Abbildung 6.2 demonstrieren. Aufgrund dieser Tatsache konnte für das PHOENICS-Experiment das mikroskopische Tastverhältnis nicht wesentlich verbessert werden.

Da für die Fadenextraktion Strahl in ELSA akkumuliert werden muß, bot sich nach Inbetriebnahme des neuen Kontrollsystems die Verwendung eines vom reinen Stretcherbetriebs abweichenden Injektionsschemas an: der Injektionsgenerator des neuen Kontrollsystems wurde auf eine "7er"-Sequenz mit einem fortlaufenden Zeitversatz von $\Delta t = 78$ nsec programmiert, so daß sich durch sukzessives Aneinanderreihen von injizierten Synchrotronfüllungen bei Betrachtung über einen Zeitraum von wesentlich mehr als 7 Injektionen eine gleichmäßige ELSA-Füllung einstellte. Die Füllung konnte mit dem schnellen Intensitätsmonitor und der Anzeige von $I_{fill}(t)$ auf der grafischen Oberfläche fortlaufend überwacht und analysiert werden.⁷

Durch die Programmierung des neuen Injektionsschemas konnte für PHOENICS eine Verbesserung des mikroskopischen Tastverhältnis auf Werte zwischen 80% und 90% erreicht werden, bei einer gemessenen Füllstruktur in ELSA von 98%. Insbesondere stellte sich erwartungsgemäß eine starke Abhängigkeit des vom Experiment gemessenen Tastverhältnisses vom Zeitversatz Δt des Injektionsgenerators ein. Durch manuelle Anpassung des Zeitversatzes über das bereits beschriebene Menü kann der Operateur interaktiv eingreifen und die Experimentierbedingungen optimieren.

Erfahrungen mit dem DSP-Spektralanalysesystem

Das aufgebaute Spektralanalysesystem verwendet einen fest zugeordneten ELSA-Monitor. Der Monitor ist durch das Kontrollsystem für die zeitaufgelöste Diagnostik reserviert. Dieses Konzept hat sich in der Praxis bewährt. Der Zugriff auf alle wesentlichen Monitorparameter über das Kontrollsystem erlaubt die einfache Anpassung der Signalverstärkung und die Einstellung eines Offsetpegels. Dadurch kann die Zahl der effektiven Bits der Datenerfassung maximiert werden, was wiederum die Amplitudenauflösung und damit das Signal-Rausch-Verhältnis verbessert.

Die Wahl einer hohen Bitbreite der Datenwandlung (12 Bit) zur Verbesserung des SNR-Wertes und das Konzept der Mittelwertbildung zur Reduktion des Rauschuntergrundes haben die Meßmöglichkeiten wesentlich verbessert. Bei stabilen Betriebsbedingungen können Schwingungskomponenten des Strahls in ELSA isoliert werden, die bei Einzelmessungen fast vollständig durch Rauschen verdeckt sind.⁸ Insbesondere können auch bei engen Überlappungen einzelner Peaks zugeordnete Satelliten gut identifiziert werden. Ein Beispiel ist in Abbildung 6.7 zu sehen.

⁷ Bei dieser Methode kann jedoch ebenfalls für PHOENICS kein optimales mikroskopisches Tastverhältnis erreicht werden, da Teilchen auch aus dem aktuell injizierten Strahl durch den Faden sofort (d.h. nach wenigen Umläufen) extrahiert werden. Die Füllungskorrektur wirkt aber nur auf den akkumulierten Strahl in ELSA.

⁸ Die erzielten Verbesserungen sind besonders im Vergleich zu der 8 Bit-Datenwandlung mit den "Sample-Modulen" des ELSA-Monitorsystems sowie der Datennahme mit den bei ELSA eingesetzten Speicheroszilloskopen (ebenfalls mit 8 Bit-Wandlern ausgestattet) signifikant.

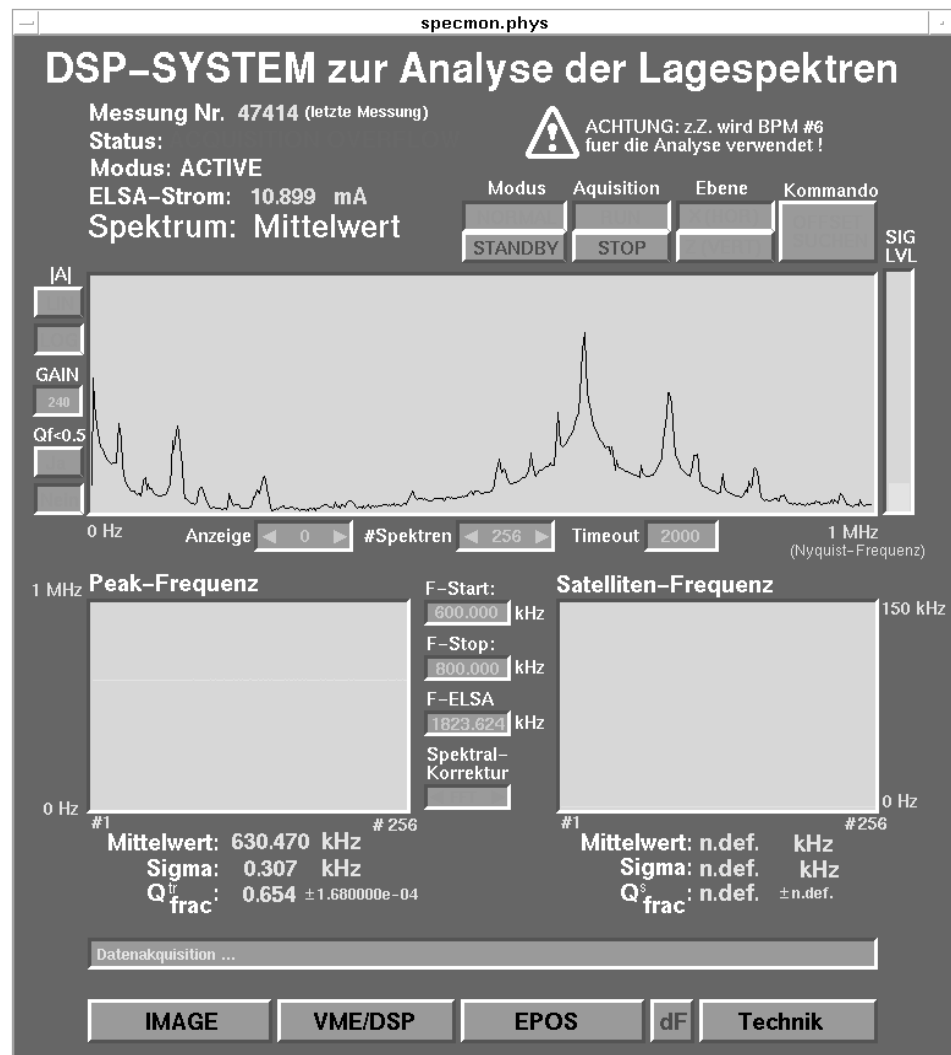


Abbildung 6.7: Anzeige des DSP-Systems bei PHOENICS-Betrieb (Messung von 256 Spektren)

Im dargestellten Fall wurden bei konstanter Betriebseinstellung 256 Lagesignale gemessen, sämtliche Spektren berechnet und anschließend gemittelt. Die zwei höchsten Peaks des Spektrums sind die Arbeitspunktpeaks Q_x (links) und Q_z (rechts), beide umgeben von Synchrotron-Satelliten.⁹ Die "Sockel" beider Peaks überlappen sich stark.

Während des Betriebs stellte sich heraus, daß ein transparenter Zugriff auf alle digitalisierten Eingangsamplitudenwerte des Strahlagesignals wünschenswert ist. Der Zugriff auf diese Rohdaten macht eine flexiblere Analyse des Signals mit EPOS-Operatoren möglich, als dies mit der Standardkonfiguration des Signalprozessorsystems durchführbar wäre. Aus diesem Grund wurde der "sigmon"-AFB verwendet, der den Signalprozessor nur zur Datennahme, Formatkonversion und Segmentierung einsetzt, aber keine weitere Berechnung durchführt. Das sigmon-System kann als Alternative zur normalen specmon-Konfiguration gestartet werden und erlaubt die Erfassung und Verwaltung von maximal 256 Datensegmenten zu je 1024 im Abstand von 0.5 μ sec erfaßten und mit 12 Bit gewandelten Amplitudenwerten. Eine Applikation kann über transiente Transaktionen auf diese Rohdaten zugreifen, die maximale sigmon-Rohdatenmenge pro Transaktion beträgt 1 MByte. Der sigmon-AFB bildet damit die Grundlage für alle Detailuntersuchungen erfaßter Strahlagesignale an ELSA, die über die "normale" Spektralanalyse und Arbeitspunktverfolgung hinausgehen.

⁹Diese Messung wurde während des Betriebs für das PHOENICS-Experiment durchgeführt. Das Auftauchen des Q_z -Peaks wurde durch eine bestimmte, von den für PHOENICS normalerweise verwendeten Werten abweichende Betriebseinstellung hervorgerufen. Normalerweise ist der Q_z -Peak im horizontalen Lagespektrum nicht zu beobachten.

6.5 Anpassung der magnetoptischen Berechnungen

Der **emagnets**-Experte führt alle im Kontrollsystem notwendigen magnetoptischen Berechnungen für Dipol-, Quadrupol- und Sextupolmagnete durch. Die entsprechenden Funktionen wurden durch Arbeitspunktmessungen an ELSA überprüft. Aus den Ergebnissen der Messungen konnten dann Korrekturen abgeleitet werden, die dem Kontrollsystem zur Anpassung der Berechnungen an die reale Maschine als Korrekturgrößen zur Verfügung gestellt wurden.

Die im Nachbeschleunigungsbetrieb zur Messung von Q_z erforderliche vertikale kohärente Anregung des akkumulierten Strahls kann bei ELSA in Ermangelung eines geeigneten Kickers nicht durchgeführt werden.¹⁰ Dies limitiert die Korrekturfähigkeiten des Kontrollsystems auf Q_x und die auf Q_x wirkenden Effekte. Die Meß- und Korrekturmöglichkeit für Q_z wurde allerdings in der Software berücksichtigt und kann aktiviert werden, sobald ein vertikaler Diagnosekicker zur Verfügung steht.

Wegen der mangelnden Meßmöglichkeit bzw. unzureichenden Meßgenauigkeit von Q_z ist insbesondere die Erstellung der Arbeitspunktkarte (vergl. Kapitel 5) als alternative Methode der Arbeitspunktkontrolle mit der Methode der Kickanregung in ELSA nicht realisierbar. Für die Erstellung der Arbeitspunktkarte kann die alternative Bestimmung der Arbeitspunkte über die Frequenzraummethode mit Stripline-Kicker und Spektralanalysator herangezogen werden. Um eine ausreichend dichte Abdeckung (Simulationsergebnis unter **EPOS**: $\Delta Q_{x,z} \approx 0.02$) des für ELSA relevanten Arbeitspunktintervalls sicherzustellen, müssen etwa 50 Tupel Q_x, Q_z für jeweils konstanten, in allen Messungen annähernd gleichen akkumulierten Stroms in ELSA gemessen werden. Bei diesem Verfahren wird umlaufender Strahl in ELSA bis zu einem Maximalwert des Stroms akkumuliert und anschließend die Position der x - und z -Betatronpeaks mit ausreichend hoher Genauigkeit bestimmt. Die dazu notwendige große Meßzeit des Analysators macht das Verfahren insgesamt relativ zeitaufwendig. Bei ersten Messungen ergab sich, daß im vertikalen Strahllagesignal trotz maximaler, aber durch den verwendeten Verstärker limitierter vertikaler Anregung keine kohärente Betatronschwingung mit ausreichendem Rauschabstand isolierbar war. Die dafür verantwortlichen Effekte konnten noch nicht identifiziert werden. Aus diesem Grund war ein Test der Arbeitspunkteinstellung über die Methode einer "Arbeitspunktkarte" noch nicht möglich.

Einstellung und Korrektur der Arbeitspunkte

Zur Überprüfung der Arbeitspunkteinstellung wurden bei drei festen Sollwerten von Q_z Meßreihen aufgenommen, die bei der Energie $E_0 = 1.2$ GeV für verschiedene Sollwertvorgaben von $Q_x^{(soll)}$ die dazu gemessenen Istwerte $Q_x^{(ist)}$ enthalten. Alle Messungen wurden mit dem im Kapitel 5 beschriebenen Signalprozessorsystem bei einem gespeicherten Strom von ca. 3 mA durchgeführt. Zur Verbesserung des Rauschabstandes wurden je 10 gemessene Spektren vor der Frequenzanalyse gemittelt. Alle Arbeitspunktmessungen waren, bedingt durch die Spectral-Leakage-Interpolation, mit einer Genauigkeit von $\Delta Q \leq 10^{-4}$ möglich. In Abbildung 6.8 ist exemplarisch eine Meßreihe für $Q_z^{(soll)} = 4.708$ dargestellt.

Die durchgezogene Linie beschreibt die exakte Übereinstimmung von $Q_x^{(soll)}$ mit $Q_x^{(ist)}$. Als Resultat einer Auswertung der Daten mit **EPOS** ergab sich, daß eine annähernd konstante Verschiebung von $Q_x^{(ist)}$ gegen $Q_x^{(soll)}$ von $\Delta Q \approx 0.0270 \pm 0.0005$ zu beobachten ist. Diese Verschiebung war unabhängig vom eingestellten Sollarbeitspunkt $Q_z^{(soll)}$.

Zur Analyse dieses Resultats wurde die Abweichung in den **xs im**-Simulator eingegeben (siehe dazu [93]). Zur möglichen Erklärung der Abweichungen wurden eine hypothetische Fehlanpassung der Fokussierungsstärken k der ELSA-Quadrupole um einen konstanten Faktor angenommen. Eine solche Fehlanpassung kann beispielsweise durch eine systematische Abweichung in der Messung des Feldgradienten $\partial B_{x,z}/\partial(z,x)$ in Abhängigkeit vom Erregerstrom entstehen.

Der Simulator ermittelte einen Anpassungsfaktor von $k_{corr} = 1.0043$ zur Korrektur der Fokussierungsstärken gemäß $k' = k \cdot k_{corr}$. In diesem Fall müßte aber auch eine systematische Fehleinstellung des Arbeitspunktes Q_z zu beobachten sein.

¹⁰Man kann sich bei Arbeitspunktmessungen während der Injektion in ELSA dadurch behelfen, daß die Teilchenbahn im Transferkanal zwischen Synchrotron und ELSA durch Strahlschieber so verschoben wird, daß eine vertikal leicht versetzte Injektion in ELSA erfolgt; dadurch entsteht eine entsprechende kohärente Schwingung relativ kleiner Amplitude, aus der Q_z extrahiert werden kann. Die kleinen Amplituden limitieren jedoch infolge des wesentlich verschlechterten Signal-Rausch-Verhältnisses die Meßgenauigkeit auf höchstens $\Delta Q_z \approx 0.001$. Außerdem werden die Injektionsbedingungen in ELSA deutlich verschlechtert, so daß eine Arbeitspunktmessung ohnehin stark erschwert ist.

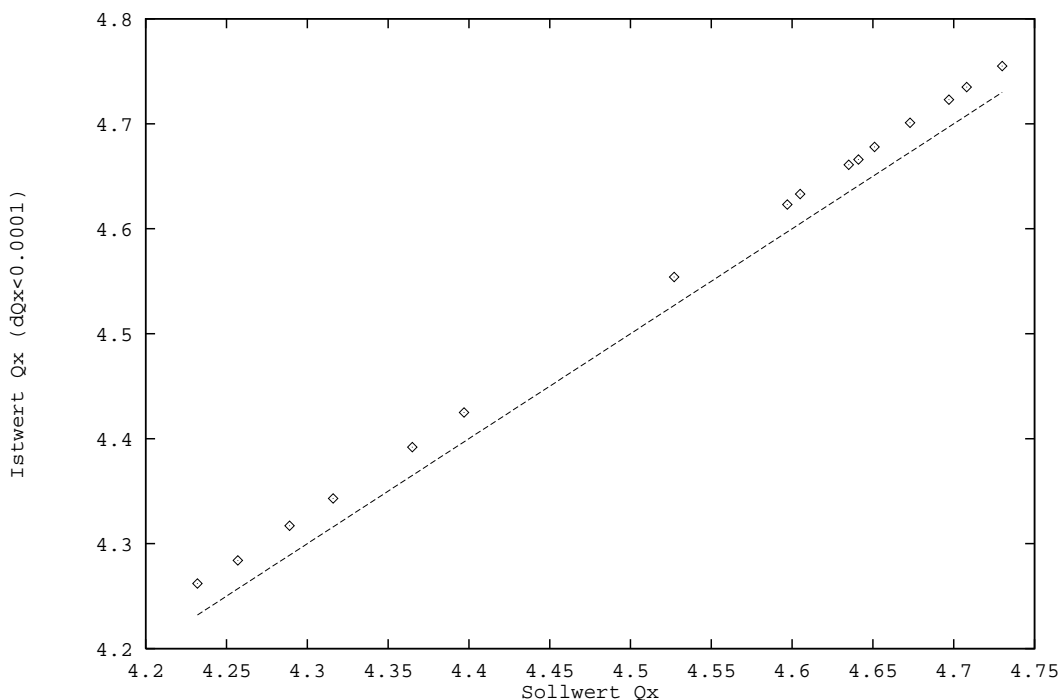


Abbildung 6.8: Meßreihe $Q_x^{(soll)}(Q_x^{(ist)})$ bei $Q_z^{(soll)} = 4.708$

Eine Messung von Q_z mit der Frequenzraummethode (Stripline-Kicker und Frequenzanalysator) ergab jedoch in den wenigen Fällen, bei denen der z -Arbeitspunkt ausreichend genau zu bestimmen war, eine wesentlich kleinere Abweichung ΔQ_z des Istwertes vom Sollwert, als dies unter der Hypothese der fehlerhaften k -Anpassung zu erwarten wäre. Damit kann diese Erklärung mit großer Wahrscheinlichkeit ausscheiden.

Die im **emagnets**-Experten angebotene lineare Transformation aller Arbeitspunktwerte wurde in Ermangelung einer theoretischen Erklärung der Abweichungen zur empirisch motivierten Korrektur der gemessenen Arbeitspunktverschiebung genutzt, indem als Offset der Transformation der Versatz von $\Delta Q_x = 0.027$ eingetragen wurde. Damit wird eine Sollwertkorrektur gemäß

$$Q_x^{(soll,corr)} = Q_x^{(soll)} + 0.027 \quad (6.122)$$

implementiert. Eine erneute Messung des Arbeitspunktes ergab anschließend eine Übereinstimmung des gemessenen vom eingestellten Arbeitspunkt von $|Q_x^{(soll,corr)} - Q_x^{(ist)}| \leq 1 \cdot 10^{-3}$.

Einfluß der Sextupole auf den Arbeitspunkt

Während des ELSA-Betriebs konnte beobachtet werden, daß die Aktivierung der Sextupolmagnete in ELSA den horizontalen Arbeitspunkt signifikant verschiebt. Da dieser Effekt besonders für die Modellierung der Extraktion aus ELSA relevant ist, wurden in [93] entsprechende Messungen durchgeführt. Dabei kam ebenfalls das Signalprozessorsystem zur Bestimmung der Arbeitspunkte zum Einsatz. Es ergaben sich die folgenden Verschiebungen ΔQ_x :

- F-Sextupole: $\Delta Q_x/m_F = 0.005/m^{-3}$.
- D-Sextupole: $\Delta Q_x/m_D = 0/m^{-3}$.
- Extraktionsextupole: $\Delta Q_x/m_X = -0.002/m^{-3}$.

Diese Daten sind mit hypothetisch angenommenen, mittleren Stellfehlern der ELSA-Sextupole von $\bar{\Delta x} = 3.4 \text{ mm}$ (SF), $\bar{\Delta x} = 0 \text{ mm}$ (SD) und $\bar{\Delta x} = -1.4 \text{ mm}$ (SX) verträglich, wobei impliziert wird, daß ein mit

der horizontalen Ablage Δx durchlaufener Sextupol eine zusätzliche Fokussierung $\Delta k = \Delta x \cdot m$ bewirkt. Die berechneten, mittleren Stellfehler der Magnete sind Ergebnisse einer diesbezüglich durchgeführten Testrechnung mit dem ELSA-Simulator `xsim` und bedürfen noch weiterer konsolidierender Messungen.

Zur empirisch motivierten Korrektur der Arbeitspunktwerte Q_x und Q_z sind im Kontrollsystem entsprechende Korrekturparameter implementiert, deren Werte von `emagnets` berücksichtigt werden. Der Experte kann dann die ermittelten Abweichungen zur Korrektur der Arbeitspunkteinstellung bei Sollwertvorgaben verwenden. Dadurch ist die Arbeitspunktkontrolle an die real vorliegenden Bedingungen in ELSA adaptierbar.

Abhängigkeit des Arbeitspunktes vom gespeicherten Strom

Durch das in die Kontrolle integrierte Signalprozessorsystem steht der ELSA-Arbeitspunkt als normaler Parameter allen Applikationen zur Verfügung und wird auf der grafischen Oberfläche zusammen mit anderen Meßdaten periodisch angezeigt. Dies gestattet die vereinfachte Beobachtung strahlstromabhängiger Effekte. Von großer Bedeutung ist in diesem Zusammenhang die in ELSA erwartete kohärente Arbeitspunktverschiebung in Abhängigkeit vom gespeicherten Strahlstrom (siehe z.B. [41],[69]).

Bei ELSA-typischen Strömen von bis zu 80 mA können Arbeitspunktverschiebungen ΔQ im Bereich mehrerer 10^{-3} beobachtet werden. Diese Größenordnung liegt im Bereich des Hubs der bei der Resonanzextraktion zu steuernden Arbeitspunktkurven, kann aber auch Auswirkungen auf das Strahlverhalten bei der Nachbeschleunigung haben. Eine detaillierte Untersuchung der strombedingten Verschiebungen ist daher für den ELSA-Betrieb mit hohen Strömen wichtig.

Zur vorläufigen Quantifizierung des beobachteten Effektes wurden Messungen im Speicherringbetrieb durchgeführt.¹¹ Dazu wurde Strahl in ELSA bis zu einem Maximalstrom I_{max} akkumuliert und anschließend auf die gewünschte Endenergie nachbeschleunigt. Nach dem Erreichen der Endenergie wurde während der langsamen Abnahme des gespeicherten Stroms der Arbeitspunkt gemessen. Durch Protokollierung der Daten des entsprechend eingestellten Arbeitspunktmeßsystems für einen aktuell gemessenen ELSA-Stromwert konnte die Arbeitspunktverschiebung ermittelt werden. Die dabei eingestellten Energien und Ströme sind der nachfolgenden Tabelle zu entnehmen. Eine Analyse der Daten ergab, daß sich der horizontale Arbeitspunkt Q_x bei allen Energien in sehr guter Näherung linear mit ansteigendem Strom in ELSA erhöht. Die gemessenen Verschiebungen sind ebenfalls in der Tabelle eingetragen.

Energie	I_{max}	$\frac{\Delta Q}{\Delta I}$	$\frac{\Delta Q/\Delta I}{GeV}$	Bemerkungen
1.2 GeV	18 mA	$(2.8 \pm 0.1) \cdot 10^{-4} mA^{-1}$	$(3.0 \pm 0.1) \cdot 10^{-4} mA^{-1} GeV^{-1}$	Keine Nachbeschl.
2.3 GeV	35 mA	$(1.3 \pm 0.1) \cdot 10^{-4} mA^{-1}$	$(3.0 \pm 0.1) \cdot 10^{-4} mA^{-1} GeV^{-1}$	
2.7 GeV	20 mA	$(1.2 \pm 0.1) \cdot 10^{-4} mA^{-1}$	$(3.2 \pm 0.1) \cdot 10^{-4} mA^{-1} GeV^{-1}$	

Diese Daten stützen relativ gut die Hypothese kohärenter Arbeitspunktverschiebungen gemäß $\Delta Q \sim I/E_0$ (vergl. Kapitel 5, Seite 100). Eine genauere Quantifizierung und die damit mögliche Überprüfung dieser Hypothese kann allerdings erst nach wesentlich ausführlicheren Messungen erfolgen, als dies im zeitlichen Rahmen der vorliegenden Arbeit machbar gewesen ist. Die Resultate sollen daher lediglich der Motivation derartiger Messungen dienen, damit die Extraktionseinstellungen bei hohen akkumulierten Strahlströmen entsprechend angepaßt werden können, d.h. insbesondere die Arbeitspunktabnahme mit abnehmendem ELSA-Strom ausreichend berücksichtigt wird.

Die ermittelte Arbeitspunktverschiebung von ca. $3.0 \cdot 10^{-4} mA^{-1} GeV^{-1}$ wurde dem Diagnose-Experten `diag` als optionaler Korrekturwert über einen Kontrollsystemparameter mitgeteilt. Auf Wunsch korrigiert dieser Experte jeden gemessenen Arbeitspunktwert um die angegebene Verschiebung und gibt somit einen fiktiven Arbeitspunkt für die Näherung verschwindenden Stroms in ELSA aus. Dies ist in der Einstellpraxis zur Zeit allerdings nicht relevant, sondern dient vielmehr der Unterstützung zukünftig geplanter, in das Kontrollsystem integrierter, strahldiagnostischer Systeme zur Messung stromabhängiger Effekte in ELSA.

¹¹ Normalerweise sind beim Speicherringbetrieb alle Injektionskicker auf Minimalwerte zurückgefahren. Für die Messung wurde einer der drei vorhandenen Kicker in der Amplitude etwas erhöht und im Abstand von 1.6 sec getriggert. Dies ergab ein für die Arbeitspunktmessung ausreichend stark angeregtes Lagesignal.

6.6 Tests der Nachbeschleunigung

Alle im folgenden beschriebenen Tests der Nachbeschleunigung eines zuvor in ELSA akkumulierten Strahls basieren auf dem als "smooth"-Rampmodell bezeichneten Ansatz

$$E_{smooth}(t) = E_{inj} + \frac{1}{2}(E_{extr} - E_{inj})(1 - \cos(\frac{\pi t}{\Delta T})) \quad (6.123)$$

sowie dem linearen Rampmodell gemäß der Beziehung

$$E_{lin}(t) = E_{inj} + \frac{E_{extr} - E_{inj}}{\Delta T} t. \quad (6.124)$$

Beide Modelle sind (neben anderen Alternativen) durch den **elsaboost**-Experten anwählbar und wurden exemplarisch für die Tests der Nachbeschleunigung ausgewählt.¹² In beiden Modellen durchläuft t die Werte $t = 0$ sec bis zur Rampzeit $t = \Delta T$. Die Injektionsenergie wird durch E_{inj} definiert, analog die Extraktionsenergie E_{extr} . Die bei $E_{smooth}(t)$ zur Zeit $t = \Delta T/2$ erreichte Maximalsteigung ist um den Faktor $\pi/2$ größer als $(E_{extr} - E_{inj})/\Delta T$ und wird für die Berechnung der Steuerfunktion zur Kontrolle des Dipol-Zusatznetzgerätes bei kurzen Rampzeiten durch den **elsaboost**-Experten entsprechend berücksichtigt.

Zum Zeitpunkt der Tests war die Hochfrequenz-Eichfunktion zur Berechnung des Ansteuerwertes des 250 kW-HF-Senders für eine gewünschte Resonator-Spitzenspannung nicht bekannt. Aus diesem Grund wurde die Leistung des HF-Senders und damit die Spitzenspannung in den Resonatoren auf einen konstanten Wert eingestellt. Die benötigte Vorlaufleistung P_V wurde empirisch ermittelt und so gewählt, daß keine HF-bedingten Strahlverluste nach Erreichen der Endenergie zu beobachten waren. Die Überprüfung der HF-Tracking-Berechnungen konnte im Zeitrahmen der vorliegenden Arbeit nicht mehr durchgeführt werden und muß daher zu einem späteren Zeitpunkt erfolgen, wenn die Eichfunktion durch entsprechende Messungen am ELSA-HF-System ermittelt worden ist. Bedingt durch die konstante HF-Spitzenspannung wird das Wandern des Synchrotronarbeitspunktes Q_s während der Nachbeschleunigung in Kauf genommen. Andererseits kann die Beobachtung des zeitlichen Verlaufs $Q_s(t)$ über die Strahldiagnose Rückschlüsse auf das Strahlverhalten während der Energierampe zulassen und durch den Vergleich mit dem theoretisch zu erwartenden Verhalten zu einem besseren Verständnis von ELSA beitragen.

Für die Ramptests wurde eine stabile Arbeitspunktconfiguration empirisch ermittelt. Aus dem ELSA-Betrieb der letzten Jahre sind günstige Arbeitspunktwerte bekannt, die sowohl zum Akkumulieren bei Injektionsenergie als auch zum langsamen Rampen im Speicherringbetrieb für Synchrotronlichtnutzer geeignet sind. Ausgehend von diesen Arbeitspunkten wurden dem **elsaboost**-Experten die notwendigen Sollwertvorgaben mitgeteilt. Nachdem das Timingsystem per Mausclick auf einen Nachbeschleunigungszyklus umprogrammiert war (siehe Kapitel 4), konnte die Nachbeschleunigung selbst durch einfaches Anwählen der relevanten Steuerfelder auf der grafischen Oberfläche aktiviert werden: Der **elsaboost**-Experte rechnet alle Rampvektoren für das Magnettracking aus und startet den Zyklus durch einen entsprechenden Befehl an den Zyklus-Generator des Timingsystems. Strahlverluste während der Nachbeschleunigung konnten zunächst durch empirische Anpassung der Arbeitspunktconfiguration eliminiert werden. Auf diese Weise wurde eine Nachbeschleunigung in ELSA für variable Injektionsenergien bis zur Endenergie von maximal 3.0 GeV ohne Strahlverlust eingestellt, die gerampten Ströme lagen bei etwa 50 mA. Der dabei maximal realisierte Steigungswert betrug 0.5 GeV/sec im Normalbetrieb. Durch Hinzuschalten des Dipol-Zusatznetzgerätes durch den **elsaboost**-Experten konnte im schnellen Rampmodus (realisierte minimale Rampzeit 300 msec, Endenergie 2.2 GeV) eine Steigung von 2.1 GeV/sec erzielt werden.¹³ Kriterium einer erfolgreichen Nachbeschleunigung war in allen Fällen die Vermeidung von Strahlverlusten auf der Energierampe und nach Erreichen der Endenergie.

Die realisierten Steigungsraten liegen deutlich unter den theoretisch gegebenen Werten von 1 GeV/sec bzw. 8.5 GeV/sec (Leistungswerte der Netzgeräte). Eine Messung des in den Dipolwicklungen fließenden Erregerstroms ergab, daß die Netzgeräte einen etwas unterhalb dieser theoretischen Steigungswerte liegenden

¹²Das Kontrollsystem gestattet auch die Definition beliebiger Verläufe $E(t)$; die Wahl einfacher, analytisch beschreibbarer Steuerkurven dient gleichwohl der Vereinfachung vieler Berechnungen, als auch der besseren Vergleichsmöglichkeit mit Ergebnissen der Strahldiagnose, falls diese Ergebnisse mit dem gewählten Energieverlauf $E(t)$ deutlich korreliert sind.

¹³Dieser Wert ist als vorläufig zu betrachten, da es während der Tests wiederholt zum Ausfall der aktiven Filter der Magnetnetzgeräte gekommen war. Bis zu einer endgültigen Klärung der Ursachen wurden keine Tests mit höheren Rampsteigungswerten anberaumt. Die Verifikation der theoretisch möglichen Werte bis zu 8.5 GeV/sec muß in Zukunft noch erfolgen.

Maximalgradienten dI/dt gerade noch einstellen konnten und daher die theoretischen Angaben in Richtung kleinerer Werte von dI/dt leicht korrigiert werden müssen. Dennoch ist aber die relativ große Abweichung der empirisch ermittelten Steigungswerte von den rein technisch limitierten Werten nicht zu erklären. Dies ist ein deutliches Indiz für Effekte, die die minimal realisierbare Rampzeit nach unten und damit das makroskopische Tastverhältnis nach oben limitieren und nicht ohne weiteres durch technische Beschränkungen erklärbar sind. Es stellte sich während der Ramptests heraus, daß eine Untersuchung dieser Effekte bzw. eine Optimierung der Betriebskonfiguration erwartungsgemäß nicht ohne wesentliche Unterstützung durch die Strahldiagnose während der Nachbeschleunigung angegangen werden kann.

Der nachfolgende Abschnitt beschreibt die Inbetriebnahme des Meßsystems für die zeitaufgelöste Spektralanalyse und die in bezug auf die Untersuchung des Strahlverhaltens während der Rampphase erzielten vorläufigen Ergebnisse.

6.7 Diagnostik im Nachbeschleunigungs-Modus

Zur zeitaufgelösten Strahldiagnose während der Nachbeschleunigung wurde zunächst das Signalprozessorsystem mit dem "specmon"-AFB eingesetzt. Der Diagnosekicker wurde in Abständen von 20 msec gezündet, um eine kohärente Strahlanregung zu erzielen. Das Triggermuster des Kickers wurde über die grafische Oberfläche eingegeben und durch den **diaggen**-Experten in einen Steuervektor für den Diagnosetrigger-Generator umgerechnet. Die Analog-Digital-Wandlung wurde ebenfalls mit dem Diagnosetrigger angestoßen.

Nach erfolgter Tracking-Berechnung und Start der Nachbeschleunigungszyklen über den **elsaboost**-Experten meldete das Spektralanalysesystem einmal pro Zyklus die gemessenen Verlaufskurven für $Q_x(t)$ und $Q_s(t)$ an das Kontrollsystem. Die Anzahl der gemessenen Arbeitspunktwerte wurde dabei durch die Länge des Zyklus und durch den Zeitabstand zweier Kicanregungen festgelegt. Alle Daten wurden über das entsprechende Menü der grafischen Oberfläche zur Anzeige gebracht. Dabei konnten drei wesentliche Resultate erzielt werden:

- Das Konzept der Kicanregung eines kohärenten Lagesignals und die Analyse der digitalisierten Werte mit einem Signalprozessorsystem in Echtzeit arbeitet erfolgreich; insbesondere ist das erzielte Signal-Rausch-Verhältnis für die genaue Vermessung der Arbeitspunkte ausreichend. Die Amplitude des erfaßten Signals ist (trotz der durch die im Verlauf der Nachbeschleunigung abnehmenden Kickstärke) auch bei hohen Energien für eine digitale Spektralanalyse und Spectral-Leakage-Korrektur der Frequenzwerte ausreichend groß. Die maximale Zahl von 512 verarbeitbaren Segmenten erlaubt bei einem minimalen Meßabstand von 20 msec auf der Energierampe eine zeitlich sehr gut aufgelöste Rekonstruktion der Arbeitspunktverläufe $Q_x(t)$ und $Q_s(t)$ über maximal 10.24 sec (Rampzeiten von 300 msec werden immerhin noch durch maximal 15 Einzelmessungen abgedeckt). Eine Verlängerung des Meßzeitraumes durch Vergrößern des Zeitabstandes zwischen zwei Messungen ist einfach durchführbar; das Meßintervall kann durch Anpassung der Vorgaben für **diaggen** auf interessante Bereiche innerhalb eines Zyklus geeignet plaziert werden.
- Der Synchrotronarbeitspunkt ist sehr gut rekonstruierbar, wenn der zu $f = 0$ Hz direkt benachbarte Satellitenpeak für die Vermessung herangezogen und ein Monitor verwendet wird, der an einer Position mit einer Dispersionsfunktion $D_x \neq 0$ positioniert ist. Die Größenordnung der Verschiebung von Q_s auf der Energierampe entspricht den Erwartungen bei konstant eingestellter Hochfrequenzleistung (d.h. konstanter Spitzenspannung in den Resonatoren).
- Während der Nachbeschleunigung treten deutlich sichtbare, horizontale Arbeitspunktverschiebungen bis zu $\Delta Q = 0.03$ auf. Die maximale Arbeitspunktverschiebung und die Form der rekonstruierten Zeitverläufe ist konstant und ändert sich auch nicht bei Messungen über viele Maschinentzyklen. Der Verlauf von $Q_x(t)$ differiert jedoch deutlich für das lineare und das "smooth"-Rampmodell. Die maximale Arbeitspunktverschiebung ΔQ_x wächst mit ansteigenden Werten von $|\Delta E/\Delta t|$ in der Nachbeschleunigung. Dies ist ein erster Hinweis auf dynamische Effekte in ELSA, die nicht durch fehlerhafte Tracking-Berechnungen des Kontrollsystems, wie z.B. die Fehlanpassung von Magnetströmen um einen konstanten Faktor, begründet sind.

Die gemessenen und in dieser Stärke nicht erwarteten Arbeitspunktverschiebungen im Bereich mehrerer 10^{-2} während der Energierampe bilden eine Gefährdung des gespeicherten Strahls in ELSA, da hierdurch

der Arbeitspunkt durchaus in die Nähe stärkerer Resonanzen gelangen kann oder diese sogar kreuzt. Dieses vorläufige Resultat macht die in der Vergangenheit oft beobachtete, empfindliche Abhängigkeit einer ohne Strahlverlust abgeschlossenen Nachbeschleunigung von der Arbeitspunktconfiguration zum Rampstart plausibel. Um eine weitere Analyse der Effekte während der Energieerhöhung vorzunehmen und insbesondere einen Vergleich der gemessenen Werte mit dem theoretisch erwarteten Verhalten der Arbeitspunkte (siehe Kapitel 5) zu ermöglichen, wurde der "sigmon"-AFB eingesetzt. Der hierdurch realisierte Zugriff auf die erfaßten Rohdaten des Strahlagesignals wird durch ein eigens entwickeltes EPOS-Programm ("mxd") ausgenutzt, welches seinerseits die Berechnung der spektralen Leistungsdichten, der rekonstruierten Arbeitspunkte und anderer Informationen ermöglicht. Im mxd-Programm wird im wesentlichen der **segproc**-Operator zur Segmentverarbeitung sowie der **peaktrack**-Operator zur Frequenzverfolgung eingesetzt. Das EPOS-Grafiksystem dient zur Erzeugung aller Diagramme und vor allem der Falschfarbdarstellungen der berechneten logarithmierten Leistungsdichtematrizen.¹⁴ Die folgenden Meßergebnisse sind Resultate der digitalen Signalverarbeitung mit mxd unter EPOS.

Diagnose auf der Energierampe

Zur Detailuntersuchung des Strahlverhaltens auf der Energierampe wurde eine Nachbeschleunigung von 1.6 GeV auf 2.2 GeV mit einer Rampzeit von 2 sec eingestellt. Die Hochfrequenz-Vorlaufleistung war dabei konstant gewählt. Alle Sextupolmagnete waren ausgeschaltet, um störende Arbeitspunktverschiebungen auszuschließen. Es wurde ein Strom von ca. 20 mA akkumuliert. Die Rampphase wurde mit 100 Messungen abgedeckt (der Zeitabstand zweier aufeinanderfolgender Messungen betrug 20 msec). Als Arbeitspunktconfiguration wurden Sollwerte von $Q_x = 4.618$, $Q_z = 4.604$ eingestellt, Q_x wurde gemessen und als $Q_x^{(meas)} = 4.617$ bestimmt. Für Q_x war die Anpassung der magnetoptischen Berechnungen bereits erfolgt (siehe entsprechende Beschreibung auf Seite 141). Für jede Messung wurden Daten über 20 nicht direkt aufeinanderfolgende Maschinenzyklen aufgezeichnet. Es ergab sich bei Untersuchung sämtlicher Daten für alle Zyklen, daß eine einmal eingestellte Configuration über alle Meßzyklen zu reproduzierbarem Maschinenverhalten führte und sich keine kurzzeitig von Zyklus zu Zyklus variierenden Effekte einstellten. Aus diesem Grund werden in den folgenden Abschnitten die Ergebnisse für einen einzelnen, repräsentativen Zyklus vorgestellt. In Abbildung 6.9 sind die für beide verwendeten Rampmodelle ermittelten Leistungsdichtematrizen als Falschfarbbilder dargestellt. Höhere Leistungsdichtewerte sind durch eine proportional stärkere Schwärzung kodiert. Die beiden Matrizen enthalten 100 Zeilen (entsprechend den Einzelmessungen) zu je 512 Frequenzwerten für $f = 0$ Hz bis zur Nyquist-Frequenz $f = 1$ MHz. Die erste Messung wird durch die oberste Matrixzeile angegeben, der Verlauf der dominanten Spektrallinien ist also von oben nach unten zu verfolgen.

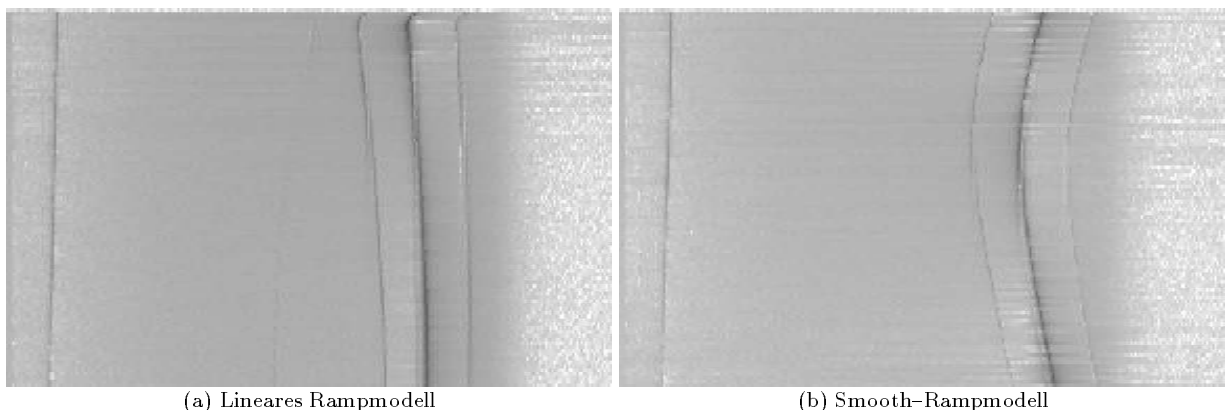


Abbildung 6.9: Spektren des Lagesignals bei Nachbeschleunigung von 1.6 GeV auf 2.2 GeV

¹⁴Die durch EPOS dabei zu verarbeitenden Meßdatenvolumina liegen für einen Zyklus im Bereich mehrerer MByte. Die Leistungsfähigkeit der im neuen Kontrollsystem verwendeten RISC-Rechner erlaubte erstmals die ausreichend schnelle Bearbeitung dieser Datenmengen mit den vorgestellten Methoden der digitalen Signalverarbeitung, wobei auch die relativ rechenintensive Spektralschätzung eingesetzt wurde. Die Berechnungszeit für die zeitaufgelöste Spektralschätzung für Diagnosedaten mit 200 Einzelsignalen beträgt auf einer HP-9000/750 unter EPOS etwa 10 sec.

Deutlich sichtbar ist die Struktur des horizontalen Spektrums (vergl. Kapitel 5), gebildet durch den dominanten Betatronpeak, umgeben von zwei deutlich sichtbaren Synchrotron-Satelliten, sowie einen Synchrotron-Satellit zu $f = 0$ Hz. Höhere Arbeitspunktwerte Q_x entsprechen bei der Betatronlinie einer Verschiebung nach links (der Nachkommaanteil des Arbeitspunktes ist größer als 0.5), höhere Werte von Q_s entsprechen einer Verschiebung des $f = 0$ Hz benachbarten Synchrotron-Satelliten nach rechts. Zu beobachten ist in beiden Fällen die Verschiebung von Q_s zu kleineren Werten im Laufe der Nachbeschleunigung. Beim Arbeitspunktverlauf $Q_x(t)$ zeigt sich eine für das gegebene Rampmodell differierende, deutliche Variation der Werte. Der Verlauf der Synchrotronfrequenz wurde durch das `mxid`-Programm verfolgt und in den Verlauf $Q_s(t)$ umgerechnet. Das Ergebnis der Messung ist in Abbildung 6.10 aufgetragen.

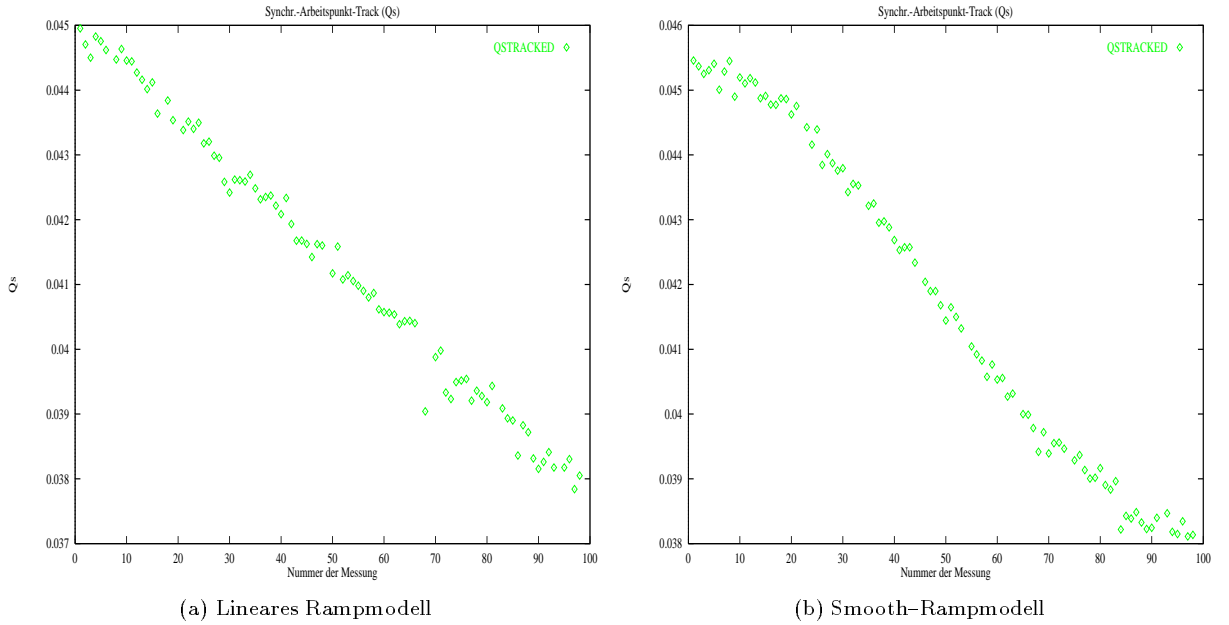


Abbildung 6.10: Gemessener Synchrotron-Arbeitspunkt $Q_x(t)$ aus Leistungsdichtematrix

Die Änderung ΔQ_s beträgt in beiden Fällen ca. $0.045 - 0.038 = 0.007$, das theoretisch erwartete Verhältnis $Q_{s,extr}/Q_{s,inj} \approx \sqrt{E_{inj}/E_{extr}} = \sqrt{1.6/2.2} \approx 0.85$ wird mit dem Quotienten $0.038/0.045 \approx 0.84$ fast genau erreicht. Die Form des zeitlichen Verlaufs ist direkt korreliert mit dem verwendeten Rampmodell. Um eine qualitative Überprüfung der Messung anhand der in Kapitel 5 aufgeführten Näherung 5.39 durchzuführen, wurden die durch 6.123 bzw. 6.124 angegebenen Rampmodelle in den Ansatz

$$Q_s(t) = \kappa \frac{1}{\sqrt{E(t)}} \quad (6.125)$$

eingesetzt und der Proportionalitätsfaktor κ bestimmt. Hierbei ist hervorzuheben, daß es sich nur um eine Abschätzung handelt, da die zeitliche Änderung der Sollphase während der Nachbeschleunigung nicht beachtet wird und deshalb zwangsläufig leichte Abweichungen von der $1/\sqrt{E}$ -Form auftreten müssen. Das Ergebnis einer Anpassung von 6.125 an die Meßdaten ist in Abbildung 6.11 zu sehen. Beide Datenzüge ergeben einen Wert von $\kappa = 0.058\sqrt{GeV}$. Die Übereinstimmung von κ für beide Rampmodelle ist physikalisch begründet, da die Gesamtänderung von Q_s nicht vom Rampmodell, sondern nur vom Verhältnis der Energien abhängen darf (bei Vernachlässigung einer Sollphasenverschiebung, die im Rahmen dieser Abschätzung gerechtfertigt ist). Dieses Verhalten wird durch die Meßdaten gut widerspiegelt. Die Strahldiagnose kann also für den Verlauf $Q_s(t)$ das theoretisch erwartete Verhalten von ELSA gut untermauern.

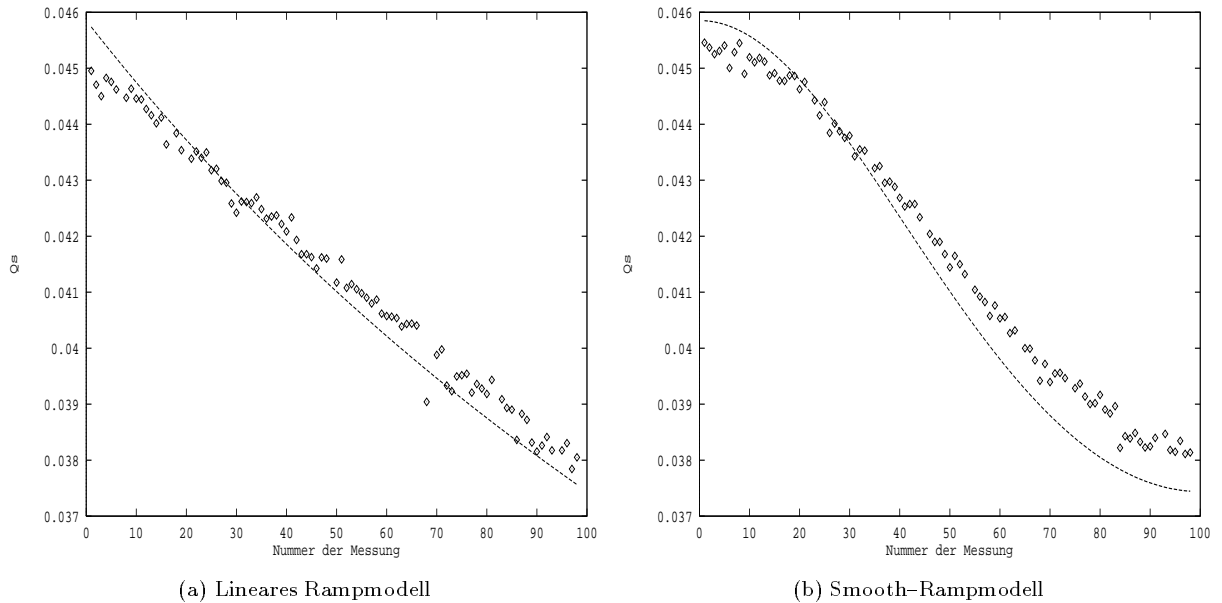


Abbildung 6.11: Modellrechnung für den energieabhängigen Verlauf von $Q_s(t)$

Der ermittelte Wert für κ läßt sich über die Beziehung 5.35 für die Abschätzung der effektiven Beschleunigungsspannung in den Hohlraumresonatoren verwenden, indem näherungsweise $\kappa = (\alpha h / 2\pi \cdot e U_{max})^{1/2}$ gesetzt wird ($|\cos \phi_s| = 1$); es ergibt sich ein durchaus realistischer Wert von $U_{max} \approx 1.3$ MV für die Addition der Beschleunigungsspannungen beider PETRA-Resonatoren. Die Verfolgung von Q_s während der Nachbeschleunigung liefert damit im Ansatz eine dynamische Meßmethode für die Beschleunigungsspannung in den Resonatoren und kann eventuell zur Bestimmung einer Eichkurve herangezogen werden. Hierzu muß das sehr einfache Modell 6.125 allerdings noch durch Einbeziehung von 5.35 besser angepaßt werden.

Die Vermessung des horizontalen Arbeitspunktes aus der berechneten Leistungsdichtematrix erfolgt in `mxid` analog zur Verfolgung des Synchrotron-Satelliten.

Die Position der Betatronlinie wird über alle Messungen verfolgt, der jeweils ermittelte Frequenzwert f_β bei gegebener Umlauffrequenz f_0 in ELSA über die Beziehung $Q_x = 1 - f_\beta / f_0$ in den Nachkommteiler des Arbeitspunktes umgerechnet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6.12 aufgetragen. Deutlich wird auch hier die signifikante Formänderung des zeitlichen Verlaufs bei den unterschiedlichen Rampmodellen. Beim linearen Rampmodell steigt der Arbeitspunkt im Übergangsbereich von der Injektionsenergie zur Rampe ("Knickbereich") in kurzer Zeit signifikant um etwa $\Delta Q \approx 0.006$ an, um dann bis zum Ende der Rampe bei 2.2 GeV monoton abzunehmen. Der sichtbare Hub beträgt insgesamt ca. $\Delta Q \approx 0.02$. Beim "smooth"-Rampmodell steigt der Arbeitspunkt langsam bis zu einem Maximum an und fällt dann bis zu einem Endwert, der fast 0.008 vom Startwert $Q_x^{(meas)} = 4.617$ entfernt liegt. Während der Energierampe wird aber ein Gesamthub von $\Delta Q \approx 0.03$ durchfahren.

Die relativ schnelle Änderung des Arbeitspunktes beim linearen Modell kurz nach Start der Energierampe deckt sich mit dem in der Vergangenheit oft beobachteten partiellen Strahlverlust zu Beginn der Rampphase in ELSA, wenn man annimmt, daß die Arbeitspunktverschiebung Ursache für den teilweisen Strahlverlust ist. Bei Verwendung des "smooth"-Rampmodells wurde bei ungünstigen Arbeitspunkt Konfigurationen ein Strahlverlust meistens im mittleren Bereich der Energierampe beobachtet, was durch den gemessenen Verlauf von $Q_x(t)$ erklärbar wird.

Der nach Abschluß der Energierampe erreichte Arbeitspunktwert differiert bei beiden verwendeten Rampmodellen untereinander um etwa 0.015. Es kann also bei der Energieerhöhung in ELSA davon ausgegangen werden, daß der bei Endenergie erreichte Arbeitspunkt im allgemeinen deutlich von den eingestellten Werten zu Beginn der Nachbeschleunigungsphase abweicht.

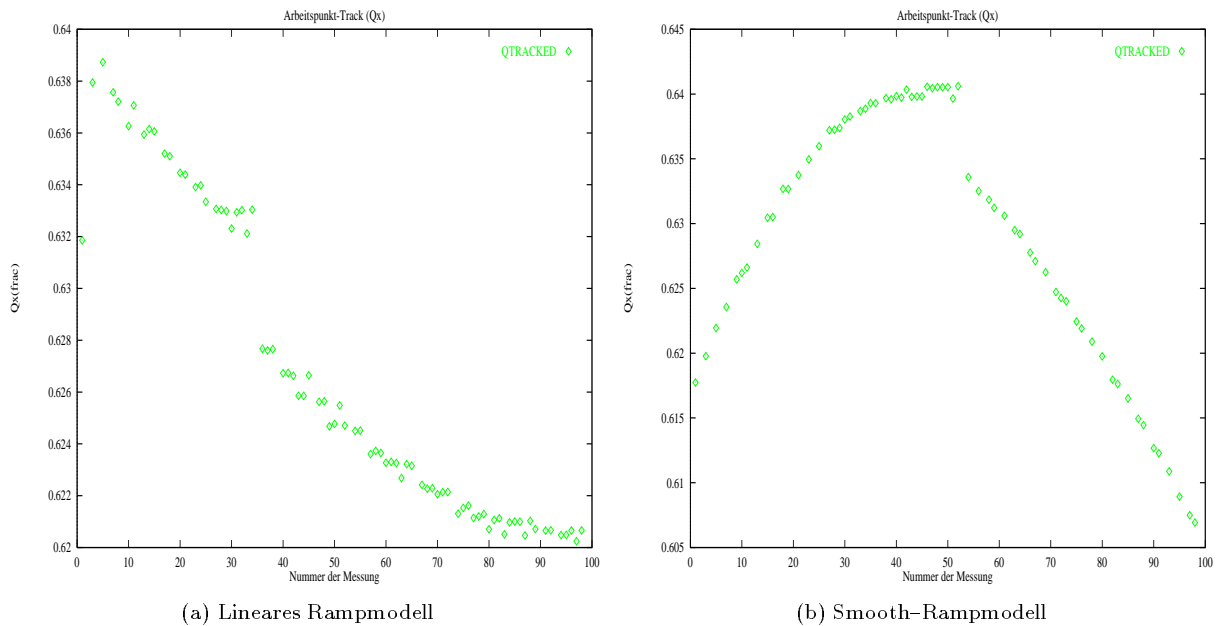


Abbildung 6.12: Gemessener Arbeitspunktverlauf $Q_x(t)$ während der Energierampe

Ein weiteres Ergebnis dieser Messung besteht in der Tatsache, daß in einem bestimmten (für beide Rampmodelle unterschiedlichen) Energieintervall während der Nachbeschleunigung eine Aufspaltung des Betatronpeaks in zwei fast gleich hohe Komponenten zu beobachten ist. Die Aufspaltung ist ebenfalls in den Synchrotron-Satelliten zur Betatronlinie zu sehen. Da die Peakverfolgung im `mx`-Programm innerhalb eines prognostizierten¹⁵ Suchintervalls immer den höchsten Peak selektiert, "springt" die verfolgte Betatronfrequenz von einer auf die andere Komponente über, wenn diese einen höheren Amplitudenwert aufweist. Dadurch entsteht eine "Sprungstelle" mit $\Delta Q \approx 0.005$ als Artefakt im rekonstruierten Verlauf von $Q_x(t)$. Um das Phänomen der Aufspaltung der Betatronlinien in ELSA genauer zu untersuchen, wurde das Frequenzspektrum des Strahlagesignals im Frequenzbereich von 550 kHz bis 800 kHz mit einem parametrischen Modell AR(150) mit höherer Frequenzauflösung bestimmt. Die so ermittelte Leistungsdichtematrix ist für beide Rampmodelle in Abbildung 6.13 abgebildet.

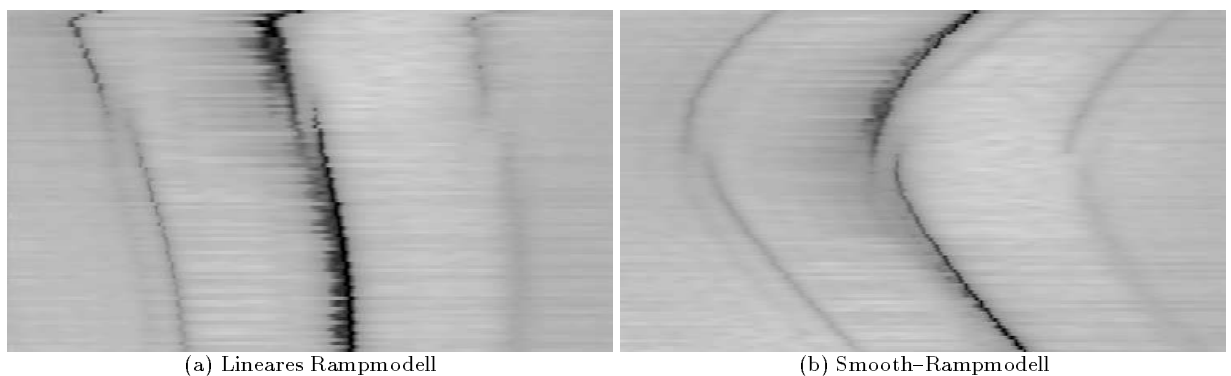


Abbildung 6.13: Detailrechnung für Strahlagespektrum mit AR(150)-Modell

¹⁵Der im `mx`-Programm verwendete `peaktrack`-Operator sucht den nächsten Peak immer in einem Frequenzintervall, dessen Mittenposition durch das Mittel der jeweils 10 vorangegangenen Peakpositionen und die Breite durch den fünffachen, über ebenfalls 10 Messungen gemittelten FWHH-Wert der letzten Peaks definiert wird. Dadurch entsteht eine "Suchstraße" in den Frequenzspektren. Die Mittelwertbildung und die Prognose des Meßintervalls ist im `peaktrack`-Operator durch Optionen konfigurierbar.

In der Darstellung wird die im Vergleich zur Fouriermethode wesentlich verbesserte Frequenzauflösung sowie das bessere Signal-Rausch-Verhältnis direkt sichtbar. Die Aufspaltung der Betatronlinie kann mit 9.4 kHz gemessen werden, was einer Arbeitspunktaufspaltung von $\Delta Q \approx 0.005$ entspricht. Für den Bereich der Aufspaltung sind in Abbildung 6.14 zwei Strahlspektren (berechnet mit Fouriertransformation) aufgetragen, in denen die zwei Betatronkomponenten mitsamt der zugehörigen Synchrotron-Satelliten deutlich zu sehen sind.

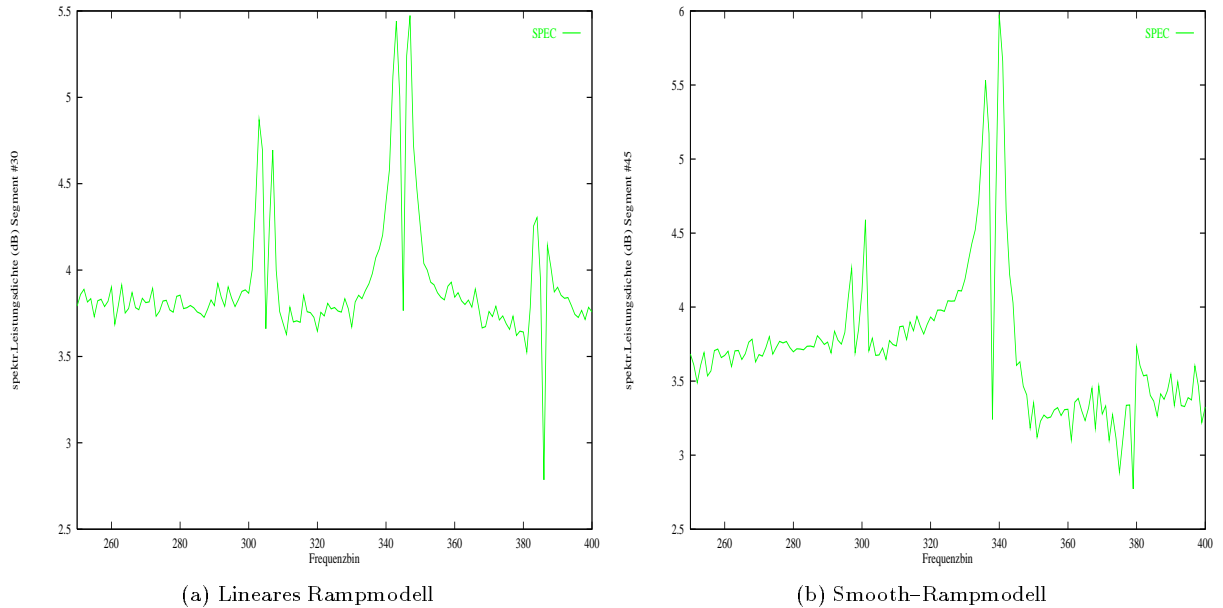


Abbildung 6.14: Einzelspektren mit aufgespaltenen Betatronpeaks aus Leistungsdichtematrix

Das linke Spektrum ist nach $t = 30 \cdot 20$ msec bei einer Rampenergie von $E(t) = 1.78$ GeV berechnet, das rechte Spektrum für $t = 45 \cdot 20$ msec bei einer Rampenergie von $E(t) = 1.85$ GeV.

Aus der Theorie der transversalen Teilchenbewegung in einem Speicherring ist bekannt, daß bei bestimmten Arbeitspunktfigurationen, die einer transversalen Koppelresonanz $n_x Q_x + n_z Q_z = p$, $n_x, n_z \in \mathbb{Z}$ entsprechen, Aufspaltungen der Betatronlinien zu beobachten sind (siehe beispielsweise [35], [5]). Diese Aufspaltung beruht auf der durch die Kopplung hervorgerufenen Amplitudenmodulation der transversalen Lagesignale, da periodisch Energie von einer in die andere Schwingungsebene transportiert wird. Aus der Theorie der transversalen Koppelresonanzen ergibt sich weiterhin, daß alle Summenresonanzen $n_x \cdot n_z > 0$ auf den Strahl destabilisierend wirken, die Differenzresonanzen $n_x \cdot n_z < 0$ jedoch keine Gefährdung des Strahls mit sich bringen. Im ersten Fall können sich die Amplituden der Teilchenschwingung aufschaukeln, im zweiten Fall wird hingegen nur Energie periodisch zwischen den beiden Schwingungsebenen ausgetauscht, wobei die Bewegung aber gebunden bleibt. Die theoretische Beschreibung der zu erwartenden Frequenzspektren ist relativ kompliziert und kann an dieser Stelle nicht angegeben werden. Im Falle einer transversalen Koppelresonanz muß die Betatron-Linie des horizontalen Arbeitspunktes im vertikalen Spektrum zu finden sein, und umgekehrt. Die Amplitudenverhältnisse können dabei sehr verschieden sein. Unter der Hypothese einer transversalen Koppelresonanz in ELSA als Ursache für die Frequenzaufspaltung der Betatronlinie müßte also in den gemessenen Spektren eine Komponente für Q_z zu finden sein, die zu Anfang der Rampe einen kleineren Arbeitspunktwert aufweist, da die Startkonfiguration der Arbeitspunkte $Q_x = 4.618$, $Q_z = 4.604$ war. Durch eine Berechnung des Spektrums mit nochmals besserer Frequenzauflösung über ein parametrisches Modell AR(175) im Frequenzbereich von 620 kHz bis 730 kHz konnte diese Q_z -Komponente mit gutem Rauschabstand isoliert werden. Die berechnete Leistungsdichtematrix ist in Abb. 6.15 zu sehen. Die dabei im linken unteren Bereich der Matrix sichtbare Linie ist ein Teil des unteren Synchrotron-Satelliten der Betatronlinie (vergl. Abbildung 6.13).

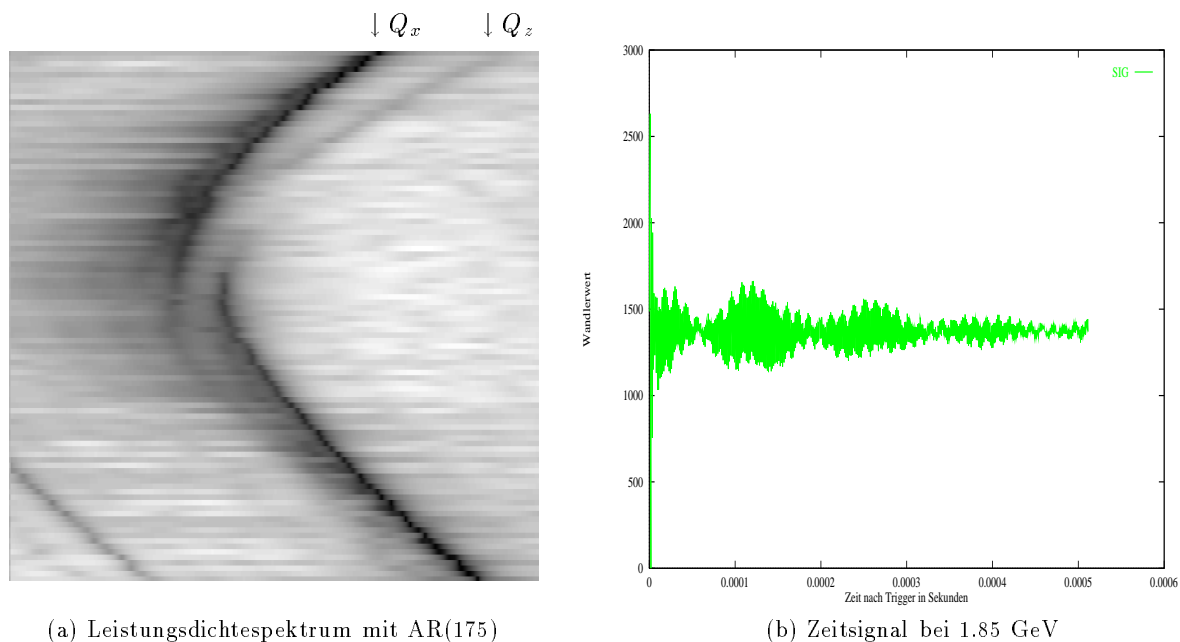


Abbildung 6.15: Identifikation der Koppelresonanz $Q_x - Q_z = 0$ während der Energierampe

Das rechte Diagramm in Abbildung 6.15 zeigt das Zeitsignal im Bereich der Betatronaufspaltung. Deutlich zu erkennen ist die starke Amplitudenmodulation des Lagesignals, welche zur Aufspaltung der Linien führt. Der Frequenzabstand der Linien ist durch die Modulationsfrequenz gegeben. Die Betatronlinie des Q_z -Arbeitspunktes startet (linkes Bild) bei etwas kleineren Arbeitspunktwerten als Q_x , nähert sich aber im Verlauf der Energierampe über etwa 0.3 sec dem Q_x -Wert. Die Änderungsrate $|dQ_z/dt|$ ist dabei offensichtlich größer als die Rate $|dQ_x/dt|$, so daß trotz der relativ starken Arbeitspunktdifferenz zu Beginn der Rampe der x -Peak vom z -Peak "eingeholt" wird.

Deutlich zu sehen ist die beginnende Aufspaltung der Q_x -Betatronlinie fast genau zu dem Zeitpunkt, wenn Q_z den Wert von Q_x erreicht hat. Die damit identifizierte Resonanz ist also eine transversale Differenzresonanz zweiter Ordnung

$$Q_x - Q_z = 0 \quad (6.126)$$

und wirkt nicht destabilisierend auf den gespeicherten Strahl, was sich mit den Beobachtungen bei den Ramptests deckt. Dieses Meßergebnis ist kongruent zur theoretischen Beschreibung.

Die spezielle Form der Resonanz $n_x = 1, n_z = -1$ ist auch die Ursache dafür, daß die Q_z -Linie über den ganzen Verlauf nur sehr schwach ausgeprägt ist: Die Amplitude der Q_z -Linie im horizontalen Lagespektrum kommt nur dann nennenswert in den Bereich der Amplitude der Q_x -Linie, wenn die Kopplung ausreichend stark ist. Da im gemessenen Fall die Kopplung erst bei $Q_x = Q_z$ erreicht wird, kann dann die Q_z -Linie nicht mehr von der Q_x -Linie separiert werden. Nur die Aufspaltung in die zwei Schwingungsmodi ist noch nachweisbar.

Die Hypothese einer transversalen Koppelresonanz bedingt die Existenz koppelnder Magnetfelder in ELSA. Im allgemeinen koppeln dreidimensionale Magnetfelder mit nichtverschwindenden Komponenten B_x, B_z und B_s die Schwingungen der Teilchen zwischen dem horizontalen und vertikalen Phasenraum. Diese koppelnden Felder lassen sich in drei Gruppen unterteilen:

1. Durch gekippte Dipolmagnete $\frac{1}{\rho_x} \cdot \frac{1}{\rho_z} \neq 0$ entstandene Felder mit $B_x \neq 0, B_z \neq 0$. Die Verkippung von Dipolmagneten in ELSA wird an dieser Stelle als nicht gegeben angenommen.
2. Solenoid-Felder und Randfelder von Solenoiden mit einer B_s -Komponente, sowie deren inhomogene Randfelder mit $B_x \neq 0, B_z \neq 0, B_s \neq 0$. Solenoidmagnete sind in ELSA nicht eingebaut.
3. Gedrehte Quadrupolfelder (Drehung der Feldgeometrie um eine angenommene Strahlachse, sogenannte "skew"-Quadrupolfelder) mit $B_x \neq 0, B_z \neq 0, B_s = 0$. Diese Felder entstehen entweder durch verkippete Quadrupolmagnete oder durch vertikale Verschiebungen der Gleichgewichtsbahn in Sextupolmagneten.

Da bei keinem der Ramptests Sextupolmagnete aktiviert waren, kann an dieser Stelle bereits ausgeschlossen werden, daß die koppelnden Magnetfeldkomponenten durch eine vertikale Verschiebung der Gleichgewichtsbahn in den Sextupolen entstanden sind. Falls statische Sextupolfelder dennoch existieren, können diese nur durch Sextupolkomponenten in den Feldern der Dipol- und Quadrupolmagnete gegeben sein. Die in [55] und [99] durchgeführten Feldmessungen zeigen aber, daß die Stärke der Sextupolkomponenten in Dipol- und Quadrupolmagneten im Bereich der Sollbahn vernachlässigbar klein ist.

Damit bleibt nur noch die Möglichkeit zu betrachten, daß in ELSA "skew"-Quadrupol-Komponenten durch Feld- und/oder Justagefehler der Quadrupolmagnete mit nicht zu vernachlässigender Stärke existieren, oder daß diese Komponenten erst während der Rampphase entstehen. Die erste Hypothese ist nicht sehr wahrscheinlich, da transversale Kopplungen — die sich durch aufgespaltene Betatronlinien manifestieren — im Normalbetrieb ohne Sextupolmagnete nicht mit ausreichender Signifikanz beobachtbar waren.

Eine naheliegende Hypothese für die konsistente Erklärung der Kopplung und der eindeutig beobachteten Arbeitspunktverschiebung in Q_x mitsamt ihrer charakteristischen Form ist die Annahme der Existenz eines bezüglich der Strahlachse asymmetrisch versetzt liegenden Sextupolfeldes, welches erst während der Rampphase entsteht und damit einen dynamischen Effekt darstellt. Eine vertikale Versetzung der Strahlachse führt infolge der dann auftretenden, effektiven "skew"-Quadrupol-Komponenten dieses Feldes zu einer Kopplung der horizontalen und vertikalen Schwingungsebene, ein horizontaler Versatz resultiert in einer Arbeitspunktverschiebung ΔQ_x .

Dynamische Effekte könnten beispielsweise durch die auch bei anderen Beschleunigern beobachtete Anregung von Wirbelströmen in der elektrisch leitenden Vakuumkammer entstehen (siehe z.B. [39]). Wirbelströme können ein inhomogenes Magnetfeld mit starken Sextupolkomponenten aufbauen. Dieser Effekt wurde beispielsweise bei der Nachbeschleunigung im Synchrotron DESY II beobachtet [43]. Die dort verwendete Vakuumkammer ist sowohl vom geometrischen Aufbau als auch von den Materialeigenschaften direkt mit der Vakuumkammer von ELSA vergleichbar.

Zur weiteren Analyse des beobachteten Arbeitspunktverlaufs unter Annahme der Wirbelstromhypothese wurde wie folgt verfahren:

Die Stärke der Sextupolkomponenten wird als direkt zur Wirbelstromstärke und damit zur Steigung $dB/dt \sim dE/dt$ proportional angenommen; die in einer Arbeitspunktverschiebung resultierende fokussierende oder defokussierende Wirkung des Sextupolfeldes müßte dann mit $1/E(t)$ skalieren, da die Fokussierungsstärke $k(t)$ über 5.18 gegeben ist und mit ansteigender Energie immer weiter abnimmt. Die resultierende Arbeitspunktverschiebung $\Delta Q(t)$ entsteht dann über

$$\Delta Q(t) = -\frac{1}{4\pi} \oint_s \beta(s)k(s,t)ds, \quad k(s,t)|_{s=const.} \sim \frac{dE(t)}{dt} \cdot \frac{1}{E(t)}. \quad (6.127)$$

Zur Untersuchung dieser Hypothese wurde versucht, den gemessenen Arbeitspunktverlauf $Q_x(t)$ näherungsweise durch den Ansatz

$$Q_x(t) = Q_x^{(const)} + \kappa \frac{dE(t)}{dt} \cdot \frac{1}{E(t)} \quad (6.128)$$

zu modellieren, wobei dieser Ansatz sicherlich nur eine grobe Abschätzung der auftretenden Effekte erlaubt. Eine qualitative Überprüfung der Vermutung sollte damit aber möglich sein.

In Abbildung 6.16 ist das Ergebnis einer Anpassung der Ansatzfunktion 6.128 für die verwendeten Energieverläufe $E(t)$ an die Meßdaten zu sehen. Da für diese Berechnung die Sprungstellen ignoriert werden müssen, erfolgte die Anpassung "per Hand" durch sukzessive Verbesserung der Werte $Q_x^{(const)}$ und κ . Für $E(t)$ wurden jeweils die Rampmodelle 6.123 und 6.124 eingesetzt.

Trotz des sehr einfachen phänomenologischen Ansatzes gibt das Ergebnis der Anpassung den gemessenen Arbeitspunktverlauf erstaunlich gut wieder. Es ergaben sich Werte von $Q_x^{(const)} = 0.611$ und $\kappa = 0.05 \text{ sec}$ für das "smooth"-Rampmodell sowie $Q_x^{(const)} = 0.577$ und $\kappa = 0.18 \text{ sec}$ im linearen Fall. Die Konstante $Q_x^{(const)} = 0.611$ liegt beim "smooth"-Modell sehr nahe am eingestellten Nachkommerteil des Startarbeitspunktwertes von $Q_x^{(meas)} = 0.617$. Die Abweichung von diesem Wert ist beim linearen Modell etwas größer.

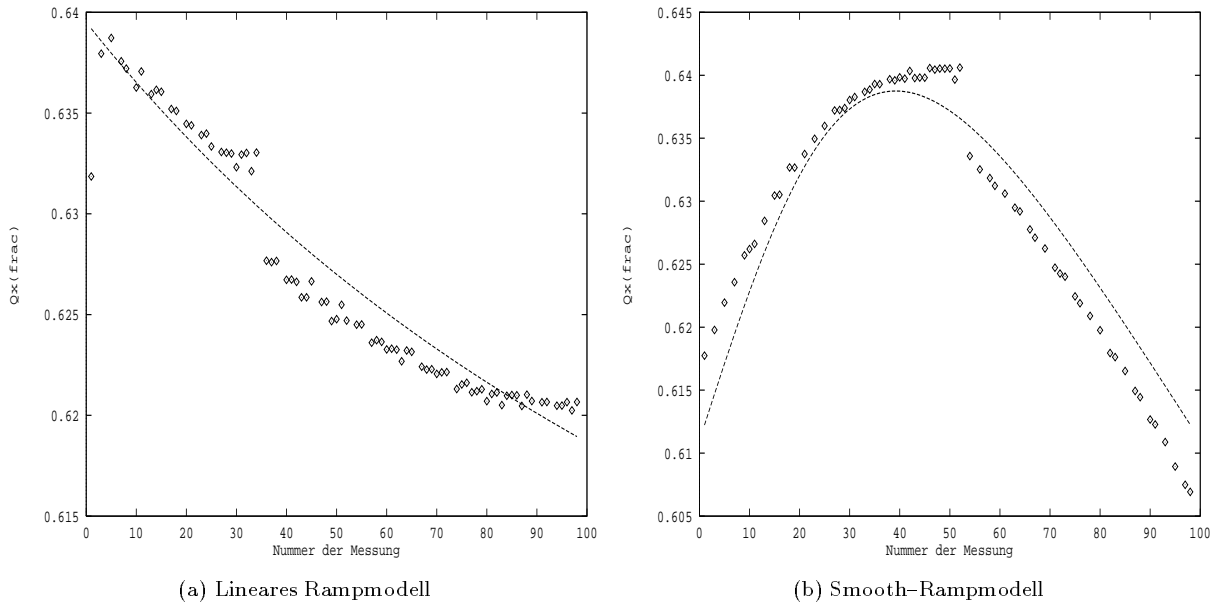


Abbildung 6.16: Modellrechnung für $Q_x(t)$ mit Hypothese dynamischer Effekte prop. dE/dt .

Insbesondere wird die Form und Richtung der Arbeitspunktverschiebungen, bis auf die starke Anfangsverschiebung beim linearen Modell, korrekt modelliert. Da offenkundig eine proportionale Abhängigkeit der Arbeitspunktverschiebung von der Energieänderung $dE(t)/dt$ vorliegt, können statische Fehlerquellen, wie z.B. falsche Skalierungen in der Tracking-Software, mit hoher Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden. Die beobachteten unterschiedlichen Raten $|dQ/dt|$ für Q_x und Q_z während der Rampe stützen die Hypothese von in der Vakuumkammer angeregten Wirbelströmen, da bei der vorliegenden Kammergeometrie von ELSA der Elektronenstrahl vertikal einen etwa halb so großen Abstand zur Kammerwand wie horizontal hat (bei angenommener Mittellage). Die durch die Magnetfelderhöhung erzeugten Wirbelströme haben daher eine stärkere Auswirkung auf das vertikale als auf das horizontale Strahlverhalten. Die relativ stark differierenden Werte von κ bei beiden Rampformen sind allerdings ein Indiz für eine zu einfache Beschreibung des Phänomens. Die Resultate rechtfertigen insgesamt die Vermutung, daß dynamisch entstehende Sextupolfelder in ELSA als Kandidaten für die Arbeitspunktverschiebungen und für die Kopplung der horizontalen und vertikalen Betatronbewegung während der Nachbeschleunigung durchaus in Erwägung gezogen werden müssen. Weitere Analysen konnten im zeitlichen Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt werden. Sie bedürfen eines verbesserten Modells mit konkreten ELSA-Daten sowie den Einsatz von Simulationswerkzeugen zur Modellierung der Störfelder in der Rampphase. Dies könnte in Zukunft durch eine Ergänzung des ELSA-Simulators `xsim` geschehen.

Abschließend wurde untersucht, ob sich aus den Meßdaten eine Verschiebung der Gleichgewichtsbahn in ELSA während der Nachbeschleunigung ermitteln läßt. Eine solche Verschiebung kann in einer mit Feldfehlern behafteten Magneto-optik aus einer Arbeitspunktverschiebung und/oder den Auswirkungen von auf der Rampe entstandenen Störfeldern entstehen. Für die Messung wurde der Amplitudenmittelwert $\langle s_k \rangle$ jedes gemessenen Strahlagesignals gegen die Nummer des Signalsegments (d.h. für den Zeitverlauf von $E(t)$) aufgetragen. Diesem Vorgehen liegt zugrunde, daß das Lagesignal im wesentlichen die Betatronschwingung der Teilchen um die stabile Gleichgewichtsbahn wiedergibt. Durch den technischen Aufbau des ELSA-Monitorsystems ist die Stärke des Lagesignals allerdings nicht nur zur Position des Ladungsschwerpunktes der Teilchenverteilung proportional, sondern auch proportional zum Strahlstrom in ELSA. Bei den vorgestellten Messungen wurde aber kein Strahlverlust auf der Rampe beobachtet, so daß der Ansatz

$$\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} s_k \sim x_{c.o.} \cdot I_{ELSA}(t) \approx x_{c.o.} \cdot I_{const} \sim x_{c.o.}$$

gerechtfertigt ist. Abbildung 6.17 gibt das Ergebnis dieser Berechnung wieder.

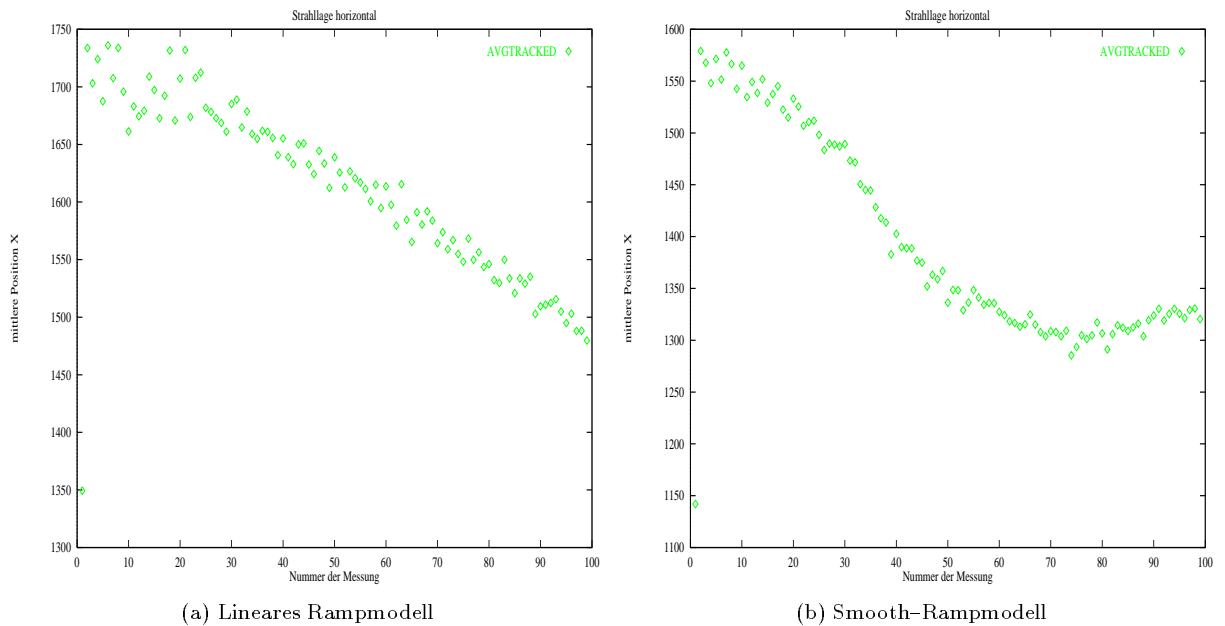


Abbildung 6.17: Mittlerer Signalpegel des horizontalen Strahlagesignals während der Rampe

Für beide Energieverläufe ist eine Verschiebung der horizontalen Gleichgewichtsbahn in ELSA in Richtung kleinerer x -Werte zu sehen. Dieses Verhalten bezüglich der relativen Verschiebung als auch der Form ist bei allen Messungen (20 Zyklen) festgestellt worden. Die Verschiebung der Gleichgewichtsbahn an der Stelle des Lagemonitors kann aus der Verschiebung des horizontalen Arbeitspunktes herrühren. Da bei ELSA zur Zeit keine zeitaufgelöste und kalibrierte Messung der Gleichgewichtsbahn mit allen Monitoren möglich ist, können an dieser Stelle keine weiteren Aussagen über die Form der Gleichgewichtsbahn während der Rampe getroffen werden. Die observierte Lageverschiebung hat aber eine Relevanz für die mit hoher Wahrscheinlichkeit nachgewiesenen koppelnden Magnetfelder während der Nachbeschleunigung. Die gemessenen Daten erhärten die (durch andere Beobachtungen bei ELSA entstandene) Hypothese einer vertikalen Lageänderung der Gleichgewichtsbahn in den Sextupolmagneten. Nimmt man in ELSA eine vertikale Verschiebung der Gleichgewichtsbahn in den Sextupolen an, so dürfte sich das Problem der transversalen Koppelresonanzen bei der Nachbeschleunigung, aber auch bei der Extraktion deutlich verstärken, wenn eine Chromatizitätskorrektur auf der Energierampe durch Aktivierung der Sextupolmagnete gefahren wird, oder für die Resonanzextraktion die Extraktionssextupole aktiviert werden. Die Messung und Korrektur der vertikalen Gleichgewichtsbahn in ELSA ist also von großer Bedeutung für den erfolgreichen Nachbeschleunigungsbetrieb.

Für das Kontrollsystem haben die beobachteten Arbeitspunktverschiebungen durch dynamische Effekte die besondere Konsequenz, daß eine Arbeitspunktstabilisierung auf der Energierampe durch Berücksichtigung gemessener Arbeitspunktdifferenzen in den Tracking-Berechnungen der Hauptquadrupole durchgeführt werden kann, indem deren Steuerkurven beim Rampen entsprechend geändert werden. Die hierfür geeignete Funktionalität ist in der Software des `elsaboost`- und des `diag`-Experten angelegt, konnte aber im Rahmen dieser Arbeit nicht getestet werden. Bei genauerem Verständnis und entsprechender Simulation bzw. theoretischer Modellierung der Arbeitspunktverschiebungen auf der Rampe könnte darüber hinaus ein Steuermodell für die ELSA-Quadrupole gefunden werden, welches die Verschiebungen auf einen vorgegebenen Maximalhub begrenzt. Diese Möglichkeit muß in Zukunft untersucht werden.

Eine erfolgversprechende Alternative für die Kompensation der erwarteten Arbeitspunktverschiebungen besteht im Einbau zusätzlicher Quadrupole, die einen Arbeitspunkthub von mindestens $\Delta Q \approx 0.03$ in der ELSA-Optik erzielen können¹⁶ und die mit einem Strom angesteuert werden, der bei gegebenem Energieverlauf $E(t)$ proportional zur Steigung $dE(t)/dt$ ist. Das Kontrollsystem kann die entsprechende Steuerkurve

¹⁶Die in ELSA eingebauten eisenlosen Quadrupolmagnete können diesen Hub nicht erzeugen und sind daher für die Arbeitspunktkompensation auf der Energierampe ungeeignet.

berechnen und gleichzeitig mit der Energierampe starten. Durch dieses Verfahren kann der Arbeitspunkt im Nachbeschleunigungsbetrieb stabilisiert werden. Außerdem gibt der Einsatz spezieller, separat ansteuerbarer Quadrupolmagnete einen zusätzlichen Freiheitsgrad für die Kontrolle der ELSA-Magnetoptik in allen Betriebsphasen und ist daher zu empfehlen.

6.8 Einstellung neuer Betriebsmoden für SAPHIR und ELAN

Nachbeschleunigung und Extraktion für SAPHIR

Der Nachbeschleunigungsbetrieb für das SAPHIR-Experiment konnte reproduzierbar, wenn auch in stark vereinfachter Form, bereits vor der Inbetriebnahme des neuen Kontrollsystems erprobt werden, da wesentliche Software-Teile zunächst unter EPOS implementiert wurden. Dazu gehörten insbesondere die Rampengenerierungs- und Tracking-Module. Durch Ausnutzung einer technischen Besonderheit des alten Timingsystems konnten Stromrampen aktiviert werden,¹⁷ ohne daß jedoch eine nachfolgende, durch Trigger eingeleitete Extraktion zu realisieren war. Das für den SAPHIR-Betriebsmodus eingesetzte Verfahren der hochfrequenzbasierten Extraktion über eine chromatische Optik konnte aber bereits dadurch getestet werden, daß zusammen mit den Stromrampen für die Magnete eine Steuerkurve für die Resonatorleistung appliziert wurde. Die Reduktion der HF-Amplitude führte gerade dann zum langsamen Strahlausfall, als die magnetoptische Einstellung von ELSA die Extraktionswerte erreicht hatte (d.h. im wesentlichen die Annäherung des horizontalen Arbeitspunktes Q_x an die drittelzahlige Resonanz bei $4\frac{2}{3}$). Der genaue Start- und Endzeitpunkt des Ausfalls war mit diesem Verfahren aber nicht universell festzulegen. Eine Steuerung des Betriebsmodus mußte vielmehr über empirische und regelmäßige Anpassung magnetoptischer Vorgaben erfolgen. Dadurch war ein wiederholtes manuelles Eingreifen des Operateurs notwendig. Dennoch konnte ein Experimentbetrieb mit einem mikroskopischen Tastverhältnis von ca. 70% bei einem makroskopischen Tastverhältnis von ca. 40% sichergestellt werden. Die maximale Extraktionszeit war auf ca. 4 sec beschränkt.¹⁸

Durch das neue Kontrollsystem konnte der SAPHIR-Modus wesentlich verbessert werden. Hierzu trug erheblich die stark vereinfachte Bedienung über die grafische Oberfläche bei, die das Berechnen und Applizieren von Rampen per Mausklick (vermittelt durch den `elsaboost`- und den `emagnets`-Experten) gestattet. Hinzu kommt die Homogenisierung der ELSA-Füllstruktur, die reproduzierbare Steuerung aller Betriebsabläufe über das neue Timing- und Triggersystem, sowie die verbesserte Auslegung aller Funktionsgeneratoren zur Magnet- und HF-Steuerung.

Mit dem neuen Kontrollsystem war in kurzer Zeit die Etablierung einer Standardkonfiguration für SAPHIR möglich, aufbauend auf den bereits unter EPOS gemachten Erfahrungen. Im neuen Modus werden bei 1.2 GeV oder 1.6 GeV zwischen 5·7 und 10·7 Injektionen in ELSA mit einem Zeitversatz von $\Delta t = 78$ nsec eingefüllt, so daß je nach Synchrotronstrom etwa 50 mA akkumuliert werden und die Füllstruktur in ELSA ausreichend homogenisiert ist. Anschließend wird innerhalb von 1.5 sec bzw. 2 sec auf eine Endenergie von 2.2 GeV nachbeschleunigt. In der Extraktionsvorbereitungsphase wird der horizontale Arbeitspunkt in die Nähe der Extraktionsresonanz verlagert, die F-Sextupole zurückgefahren und die Extraktionssextupole zur Einschränkung des stabilen transversalen Phasenraums aktiviert. Mit dem Extraktionsstart-Trigger wird dann die Steuerkurve zur Reduktion der HF-Amplitude gestartet. Die Berechnung der Steuerkurve durch einen dedizierten Kontrollsystem-Experten ist in [68] beschrieben.

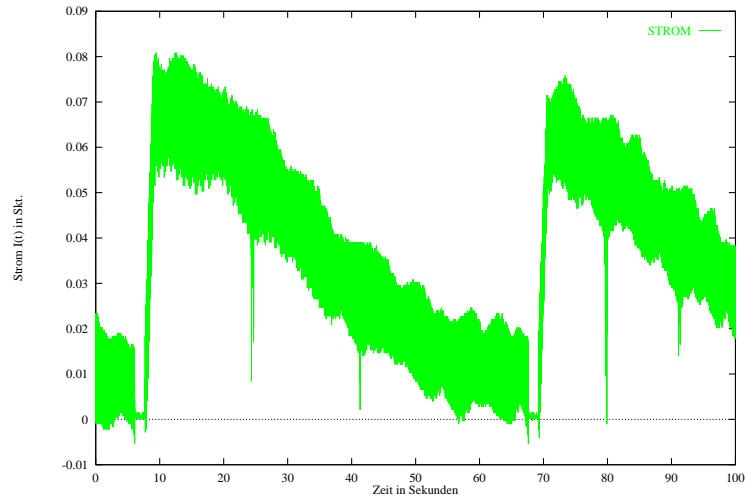
Im neuen Kontrollsystem konnte durch die schnellere und verbesserte Einstellmöglichkeit aller Parameter eine Betriebskonfiguration mit einer Extraktionszeit von 60 sec bei einer Rampzeit von 2 sec entwickelt werden. Dies ergibt ein makroskopisches Tastverhältnis von ca. 90%. Die mit dem neuen System vermessene Abhängigkeit des Arbeitspunktes von der Strahlintensität motivierte den Einsatz einer Arbeitspunkt-korrektur durch die Extraktionsquadrupole, um den durch die Stromabnahme sich von der Resonanz wegbe-
wegenden Arbeitspunkt Q_x zu stabilisieren. Dadurch konnte eine geringfügig bessere Gleichmäßigkeit des extrahierten Strahls erzielt werden.

Das von SAPHIR gemessene mikroskopische Tastverhältnis wurde während der Extraktion als 90% bei

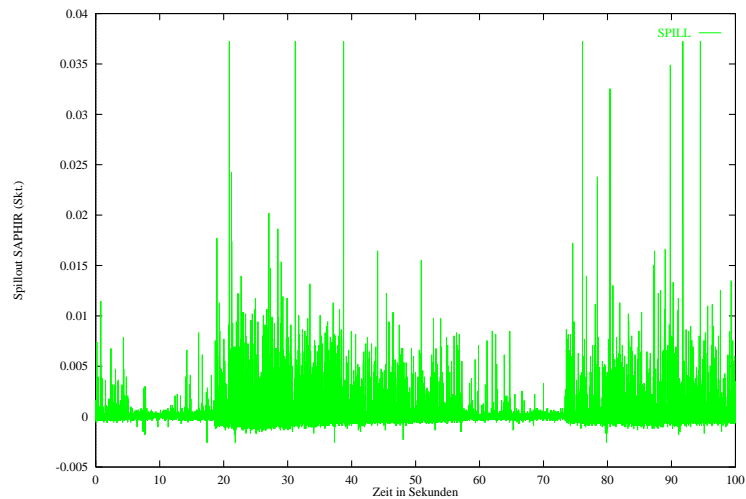
¹⁷Siehe dazu die Beschreibung des Trigger- und Timingsystems in Kapitel 4.

¹⁸Es wurden Tests für eine höhere Endenergie bis zu 3.1 GeV durchgeführt. Dabei waren aber noch die alten Eichdaten für die ELSA-Dipolmagnete verwendet worden, Sättigungseffekte in den Magneten wurden ebenfalls nicht berücksichtigt. Es gelang in einer Meßschicht, etwa 15 mA gespeicherten Strahl bis auf 3.0 GeV zu beschleunigen und anschließend für 2 sec eine Extraktion für SAPHIR durchzuführen. Die Betriebseinstellungen waren aber nicht reproduzierbar; weitere Tests wurden wegen technischer Beschränkungen und in Ermangelung konkreten Experimentierbedarfs bei 3 GeV nicht anberaumt.

einer mittleren Zählrate des Taggingsystems von 500 kHz gemessen. Diese Ergebniswerte der SAPHIR-Datenerfassung wurden unter Ausnutzung des vom Kontrollsystem angebotenen Kommunikationskanals direkt in das neue Kontrollsystem eingespeist und auf der grafischen Oberfläche zur Anzeige gebracht. In Abbildung 6.18 sind das ELSA-Stromsignal $I(t)$ und der gemessene Spillout für einen typischen ELSA-Zyklus aufgetragen.



(a) Stromsignal $I(t)$ in ELSA über einen Zyklus



(b) Spillsignal am SAPHIR-Experiment über einen Zyklus

Abbildung 6.18: Strom und Spillout für SAPHIR im Nachbeschleunigungsmodus

Der SAPHIR-Betriebsmodus kann durch die in den vorangegangenen Abschnitten beschriebenen Methoden der Strahldiagnose weiter untersucht werden. In Abbildung 6.19 ist die Matrix der logarithmierten spektralen Leistungsdichten aufgetragen. Der Abstand zwischen zwei Messungen betrug 80 msec, insgesamt wird mit 251 erfaßten Segmenten eine Zeitspanne von 20.08 sec abgedeckt. Die Messungen wurden nach Abschluß der Injektionsphase gestartet und beginnen mit einer Dämpfungsperiode von 1 sec, gefolgt von einer Energierampe von 1.6 GeV auf 2.2 GeV in 2 sec. Dabei kam das "smooth"-Rampmodell zum Einsatz. Nach Erreichen der Endenergie wurde der horizontale Arbeitspunkt innerhalb von 10 msec dicht unter die Extraktionsresonanz geschoben. Der eingestellte Hub beträgt ca. $\Delta Q = 0.03$. Dies äußert sich in den Messungen als "Sprung" der Betatronlinie. Der Verlauf des Synchrotronarbeitspunktes (konstanter

Wert nach der Injektion, Abnahme während der Rampphase, wiederum konstanter, dann kleinerer Wert im Extraktionszeitraum) ist ebenfalls gut zu verfolgen.

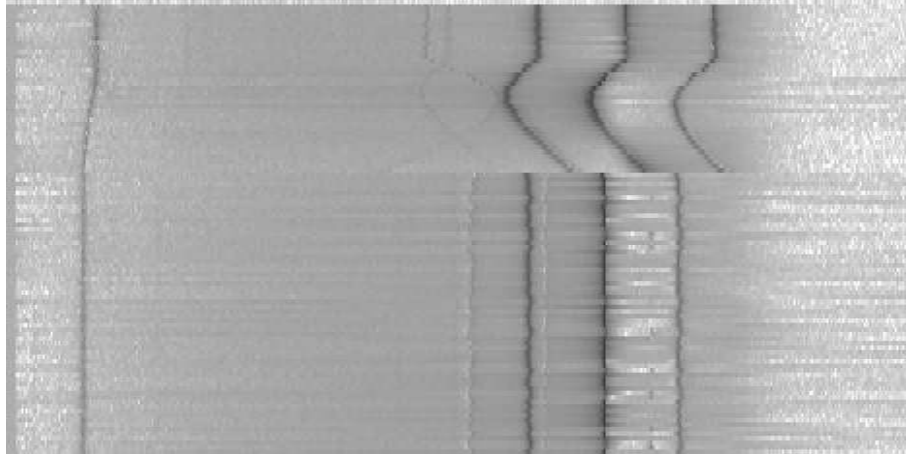


Abbildung 6.19: Spektrale Leistungsdichte in Dämpf-, Ramp- und einem Teil der Extraktionsphase

Die daraus erfolgte Rekonstruktion der Arbeitspunkte $Q_s(t)$ und $Q_x(t)$ ist für die ersten 100 Messungen (entspricht 8 sec) in Abbildung 6.20 angegeben.

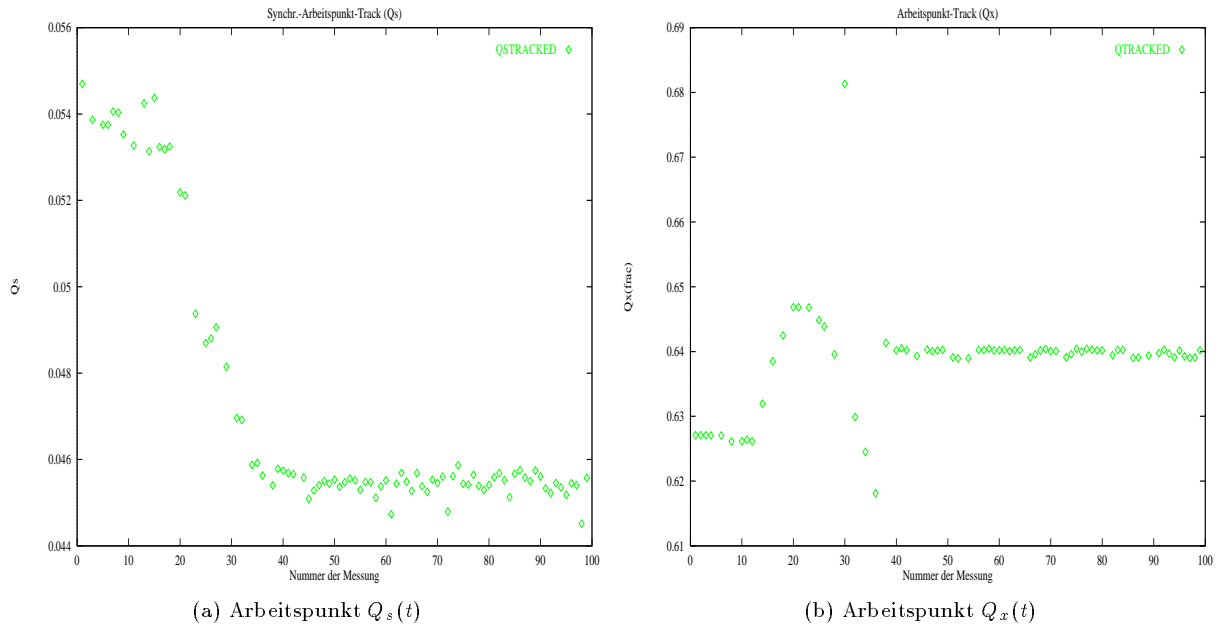


Abbildung 6.20: Verfolgung der Arbeitspunkte $Q_s(t)$ und $Q_x(t)$ im SAPHIR-Modus

Die durch das neue Kontrollsystem bereitgestellten, verbesserten Diagnose- und Steuerungsmöglichkeiten erlauben eine detaillierte Untersuchung des SAPHIR-Modus. Erste Analysen haben ergeben, daß ein einfaches Erklärungsmodell, bei dem die Teilchen longitudinal instabil werden und dann über die chromatisitätsbedingte Arbeitspunktverschiebung aus dem transversalen Phasenraum extrahiert werden, die Beobachtungen und Ergebnisse der Messungen nicht ausreichend beschreiben kann. Insbesondere sind im extrahierten Strahl und vor allem im Stromsignal von ELSA immer wieder periodische Modulationen erkennbar, die mit dem

angenommenen gleichmäßigen stochastischen Teilchenausfall nicht ausschließlich zu erklären sind, so daß von zusätzlichen, die Extraktion stark beeinflussenden Effekten ausgegangen werden muß. Die beobachteten Modulationen können zu burstartigen Strukturen im extrahierten Strahl führen und sind für das SAPHIR-Experiment sehr ungünstig, da im Fall einer Ratenüberschreitung in der zentralen Driftkammer eine Abschaltung dieser Detektorkomponente erfolgt und die Datennahme erst nach einer längeren Erholzeit fortgesetzt werden kann. Ein anderer Problempunkt besteht in der Ansteuerung der Hochfrequenzamplitude, die beim gefahrenen Betriebsmodus im Vergleich zu theoretischen Überlegungen relativ hoch eingestellt werden muß. Die Problematik wird in [68] detaillierter untersucht.

Es stellte sich bald heraus, daß die Weiterentwicklung des SAPHIR-Betriebsmodus nur durch eine enge Zusammenarbeit der Kontrolle und Diagnostik- bzw. Simulationswerkzeuge angegangen werden kann. In einem ersten Schritt wurden die in der Praxis empirisch gefundenen Betriebseinstellungen durch den `xsim`-Simulator analysiert und verschiedene Hypothesen der Teilchenextraktion im Detail untersucht. Die Ergebnisse sind in [93] zu finden. Durch die enge Kopplung des Simulators an das Kontrollsystem können in Zukunft verbesserte Betriebseinstellungen direkt in die ELSA-Steuerung übernommen werden.

Nachbeschleunigung und Extraktion für ELAN

Die Erprobung des Nachbeschleunigungsbetriebs für ELAN wurde in mehreren Schritten durchgeführt:

In der ersten Phase wurden optimale magnetooptische Einstellungen und Extraktionsbedingungen für die Resonanzextraktion im reinen Stretcherbetrieb bei 1.2 GeV eingestellt. Dadurch wurden wesentliche Parameter festgelegt (Arbeitspunkte u.a.), die Anhaltspunkte über die bei höherer Endenergie einzustellenden Werte gaben.

Der Betriebszyklus wurde anschließend so modifiziert, daß nach der Injektion mit 7 Schüssen aus dem Synchrotron eine Dämpfungsphase von 1 sec eingeschoben wurde. Dies entspricht in guter Näherung dem dämpfenden Effekt der Nachbeschleunigung. Es zeigte sich, daß der horizontale Arbeitspunkt näher an die drittelzahlige Extraktionsresonanz gefahren werden und daher der erforderliche Arbeitspunkthub der Extraktionsquadrupole kleiner ausfallen konnte; das Vorseptum der Extraktion konnte näher am Strahl platziert werden. Ausgehend von diesen Änderungen wurden die Vorgaben für die zeitabhängige Steuerung der Extraktionsquadrupole (siehe dazu [68]) und -sextupole angepaßt. Es konnte eine Extraktion über 1 sec mit relativ gleichmäßiger Teilchenrate eingestellt werden. Diese Betriebsart entspricht einem neuen ELSA-Betriebsmodus ("gedämpfter Stretcherbetrieb"), dessen Realisierung mit dem alten Kontrollsystem nicht möglich war. Dieser Betriebsmodus ist für die Zukunft auch teilweise für das PHOENICS-Experiment geplant, bei dem (bedingt durch die geringere Stromforderung) die Extraktionszeit wesentlich verlängert werden kann.

Für die Nachbeschleunigung wurde die Betriebskonfiguration weiter modifiziert: Eingestellt wurden 70 Injektionen mit einem "7er"-Schema und einem Zeitversatz von $\delta t = 78$ nsec zur Optimierung der Füllung; die Nachbeschleunigungszeit auf 2.2 GeV betrug 3 sec, die eingestellte Extraktionszeit ebenfalls 3 sec. Die Korrektur der horizontalen Chromatizität wurde durch Rampen der SF-Sextupole vorgenommen, wobei die einzustellenden Sextupolstärken vom ELSA-Simulator ermittelt worden waren.¹⁹ Es konnten 50 mA injiziert und ohne Strahlverlust auf 2.2 GeV beschleunigt werden, wobei das lineare Rampmodell zum Einsatz kam.²⁰ Das durch den schnellen Intensitätsmonitor ermittelte Tastverhältnis der ELSA-Füllung betrug ca. 95%. Es konnte über einen Zeitraum von 3 sec extrahierter Strahl mit einer von ELAN gemessenen mittleren Stromstärke von 2 nA erzielt werden, was einer Extraktionseffizienz von 25% entspricht. Das ELAN-Experiment ermittelte das mikroskopische Tastverhältnis des Spillouts mit etwa 75%.

Durch weitere Verbesserungen dieser Betriebseinstellung konnte die Extraktionszeit auf 6 sec verlängert werden, ohne daß der mittlere extrahierte Strom abnahm. Dies entspricht einer Effizienzsteigerung der Extraktion auf ca. 50%.

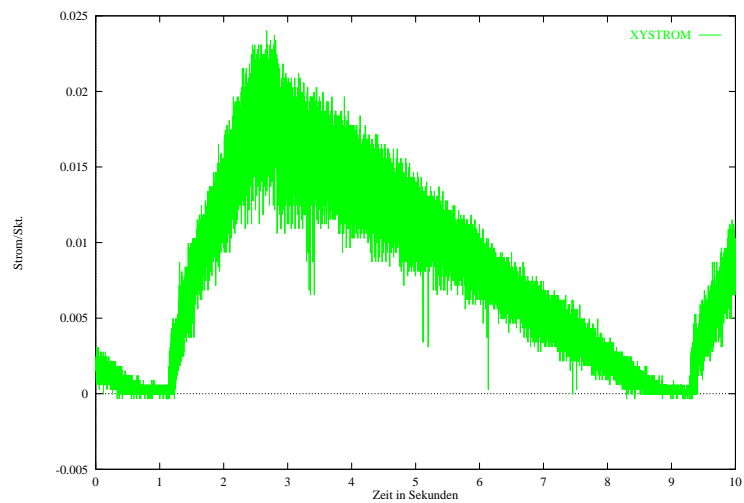
Zur Verbesserung des makroskopischen Tastverhältnisses wurde die Nachbeschleunigungszeit anschließend

¹⁹Zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme und Tests des neuen Kontrollsystems und zur Erprobung der neuen ELSA-Betriebsmodi war der `xsim`-Simulator noch nicht an das Kontrollsystem angeschlossen. Die zur Chromatizitätskorrektur ermittelten Sextupolstärken mußten also manuell in das Kontrollsystem (über die grafische Oberfläche) eingegeben werden. Durch den `emagnets`-Experten wurden dann die dazu notwendigen Ströme appliziert und für die Tracking-Rechnungen des `elsaboost`-Experten zugänglich gemacht.

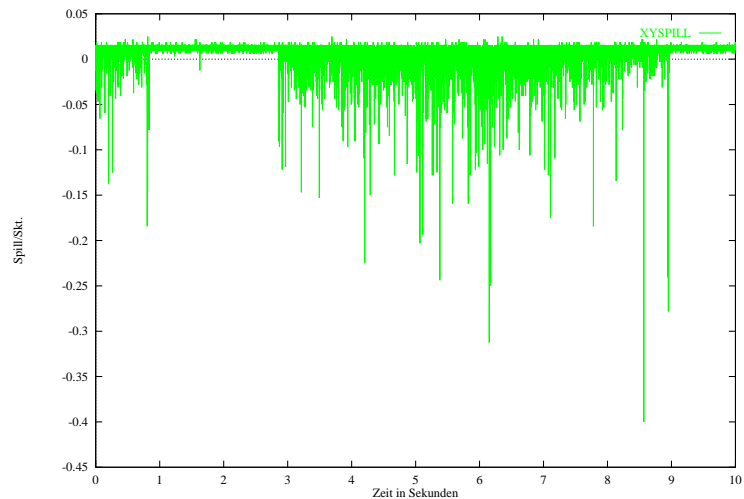
²⁰Das smooth-Rampmodell weist im Mittelteil eine im Vergleich zum linearen Modell um den Faktor $\pi/2$ größere Steigung $\Delta E/\Delta t$ auf und zieht dementsprechend einen größeren Arbeitspunkthub auf der Rampe nach sich. Zur Realisierung der schnellstmöglichen Rampen wurde deshalb das lineare Modell zu bevorzugt.

von 3 sec auf 300 msec reduziert. Die Injektionsenergie wurde von 1.2 GeV auf 1.5 GeV angehoben, um den Energiehub zur Endenergie zu verringern. Die Extraktionsbedingungen waren, bedingt durch die im Kontrollsystem realisierte Entkopplung der einzelnen Phasen, davon nicht betroffen. Diese Einstellung entspricht damit einer Rampengeschwindigkeit von $\Delta E/\Delta t = 2.1$ GeV/sec. Das Kontrollsystem (d.h. der **elsaboost**-Experte) berechnete dazu die notwendige Steuerfunktion zur Selektion des Zusatznetzgerätes für die Dipolmagnete (siehe dazu Kapitel 5).

Mit den gefundenen Einstellungen konnte reproduzierbar ein akkumulierter Strahl von 50 mA ohne Verluste auf 2.2 GeV nachbeschleunigt werden. Das makroskopische Tastverhältnis betrug für das ELAN-Experiment dementsprechend ca. 75%, bei einem gemessenen mikroskopischen Tastverhältnis von ca. 70%. Der gemessene Strom in ELSA ist zusammen mit dem registrierten Spilloutsignal²¹ von ELAN in Abbildung 6.21 zu sehen.



(a) Stromsignal $I(t)$ in ELSA über einen Zyklus



(b) Spillsignal am ELAN-Experiment über einen Zyklus

Abbildung 6.21: Strom und Spillout bei ELAN im Nachbeschleunigungsmodus

²¹ Das Spilloutsignal stammt aus einem Szintillationszähler unmittelbar vor dem Faraday-Cup des ELAN-Detektors und ist in dieser Abbildung (anders als bei den SAPHIR-Daten) invertiert aufgetragen worden.

Eine testweise Verringerung der Extraktionszeit ergab ein dazu proportionales Ansteigen des mittleren extrahierten Stroms. So wurde bei 1 sec Extraktion ein mittlerer extrahierter Strom von ca. 12 nA durch ELAN gemessen.

Aufbauend auf diesen Erfahrungen wurde für das ELAN-Experiment eine weitere, verbesserte Betriebskonfiguration erfolgreich realisiert: In dieser Konfiguration wurden im Mittel 80 mA akkumuliert und innerhalb von 350 msec von 1.2 GeV auf 2.0 GeV ohne Strahlverlust nachbeschleunigt ($\Delta E/\Delta t \approx 2.3 \text{ GeV/sec}$). Die Extraktion lieferte über 2 sec einen mittleren Strom von ca. 10 nA mit einem mikroskopischen Tastverhältnis von über 80%. Insbesondere wurde in diesem Betriebsmodus erstmals für ELSA demonstriert, daß Ströme von ca. 100 mA erfolgreich ohne Strahlverlust mit einer Steigung $\Delta E/\Delta T > 2 \text{ GeV/sec}$ nachbeschleunigt werden können.

Durch Diagnosemessungen im Abstand von 30 msec auf der Rampe und im Extraktionsbereich wurden die Steuervorgaben des Kontrollsystems überprüft. Die in Abbildung 6.22 angegebene Leistungsdichtematrix enthält 18 Spektren, beginnend mit einer Messung in der Abdämpfzeit des Strahls nach der Injektion bei 1.2 GeV, gefolgt von 11 Messungen auf der Energierampe (lineares Modell, 350 msec Rampzeit). Nach Erreichen der Extraktionsenergie wird der Arbeitspunkt Q_x in Richtung der Extraktionsresonanz verschoben, was aus dem Diagramm gut ablesbar ist.

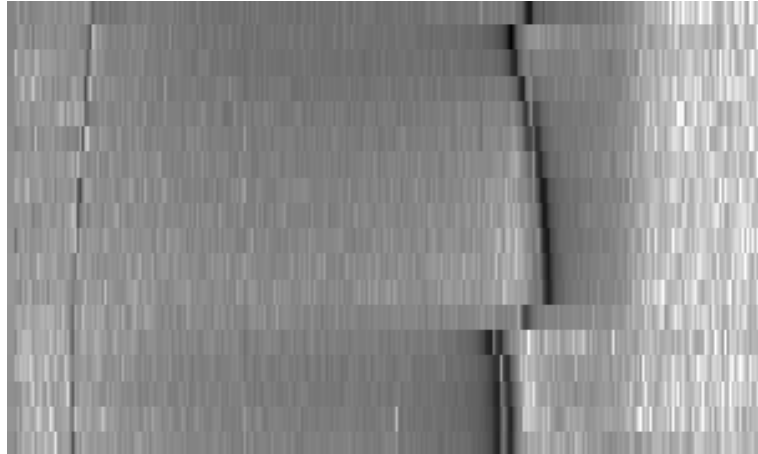


Abbildung 6.22: Lagespektren im ELAN-Betrieb (1.2 GeV \rightarrow 2.0 GeV in 350 msec)

Auch hier ist der für das lineare Rampmodell typische Arbeitspunktverlauf während der Nachbeschleunigung gut erkennbar. Wie bereits bei den Ramptests zeigt sich das Auftreten einer transversalen Kopplung zwischen Q_x und Q_z in einem bestimmten Zeitintervall während der Energieerhöhung. Nach Einstellen der Arbeitspunkte für die Resonanzextraktion ist ebenfalls eine Aufspaltung der Betatronlinie zu beobachten. Diese Betatronkopplung ist ungünstig für die Extraktion mit hohem mikroskopischen Tastverhältnis, da die auftauchende Amplitudenmodulation der Strahllage eine zeitliche Modulation des extrahierten Strahlstroms nach sich ziehen kann, die das Tastverhältnis verringert. Dies deckt sich mit der in diesem Betriebsmodus wiederholt gemachten experimentellen Beobachtung, daß das mikroskopische Tastverhältnis des für ELAN extrahierten Strahls signifikant vom vertikalen Arbeitspunkt Q_z abhängt.²² Durch die zeitaufgelöste Diagnostik im Nachbeschleunigungsbetrieb konnte damit untermauert werden, daß die bislang gefundenen Einstellungen der ELSA-Optik für die Resonanzextraktion bei hohen Energien weiter verbessert werden müssen. Dabei ist besonders die genaue Kenntnis von Q_z auf der Rampe und auch im Extraktionsbereich für eine Optimierung der Extraktionsbedingungen unverzichtbar.

Die im vorangegangenen Abschnitt angeführten Ergebnisse der ersten Betriebsphase zeigen, daß mit dem neuen Kontrollsystem erstmals die Realisierung des ELSA-Nachbeschleunigungsmodus für das ELAN-Experiment mit relativ gutem mikroskopischen und makroskopischen Tastverhältnis möglich war. Eine noch notwendige Verbesserung der Betriebseinstellungen (im wesentlichen in Hinsicht auf die verbesserte Einstellung

²²Generell kann bei einem durch die Strahldiagnose gemessenen kohärenten Effekt nicht ohne weiteres auf die Existenz dieses Effektes im unangeregten Strahl geschlossen werden. Eine Modulation des aus ELSA extrahierten Teilchenstroms bedingt immer einen kohärenten Effekt in ELSA.

der Arbeitspunkte und eine Erhöhung der Extraktionseffizienz) kann mit den bereitgestellten Werkzeugen in Angriff genommen werden. Das Konzept der Integration von Kontrolle, Strahldiagnose und Simulation hat sich damit bereits in der Anfangsphase bewährt.

6.9 Langzeitdiagnose des Strahlverhaltens in ELSA

Das aufgebaute Arbeitspunktmeßsystem gestattet die Verfolgung von Q_s und Q_x auch über lange Zeiträume, wenn man die berechneten Spektren periodisch aufzeichnet. Durch eine nachfolgende Analyse der Spektren mit EPOS kann dann das Verhalten von ELSA über entsprechend viele Betriebszyklen rekonstruiert werden. Im nachfolgenden Beispiel (siehe Abbildung 6.23) ist das Frequenzspektrum der horizontalen Betatronschwingung über einen Zeitraum von ca. $5\frac{1}{2}$ h während des Synchrotronlicht-Speicherringbetriebs von ELSA aufgezeichnet. Die als Falschfarbenbild dargestellte Matrix der logarithmierten Leistungsdichtewerte enthält pro Zeile ein Mittelwertspektrum, gebildet aus 7 einzelnen, im Abstand von 20 msec berechneten Spektren (insgesamt enthält die Matrix 1000 Zeilen zu je 512 Leistungsdichtewerten). Der Zeitabstand zwischen zwei Mittelwertspektren beträgt 20 sec. Höhere Leistungsdichten sind durch eine entsprechend stärkere Schwärzung dargestellt. Jedes Spektrum deckt das Frequenzintervall von 0 Hz (linker Rand) bis 1 MHz (rechter Rand) ab. Die Messung beginnt in der obersten Zeile der Matrix und definiert damit den Zeitpunkt $t = 0$ der Aufzeichnung.

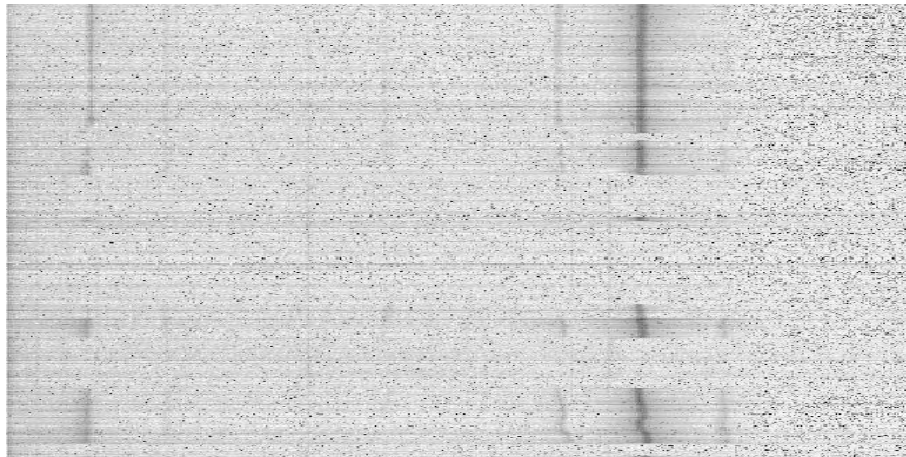


Abbildung 6.23: Langzeitdiagnose des Speicherringbetriebs über $5\frac{1}{2}$ Stunden

Man erkennt deutlich das Betatronseitenband bei etwa 720 kHz (höchste Leistungsdichte) und die zugeordneten Synchrotron-Satelliten (auch als Satellit zu $f = 0$ Hz zu sehen). Zu Beginn der Aufzeichnung war Strahl in ELSA gespeichert, die magnetoptischen Bedingungen ($Q_x \approx 4.604$) sind konstant über einen Zeitraum von ca. $1\frac{1}{2}$ h. Danach wird neu injiziert, und ein neuer Speicherzyklus wird gestartet. Im nachfolgenden Verlauf erkennt man, daß etliche Unterbrechungen des Betriebs aufgetreten sind, die entweder zu einem vorzeitigen Strahlausfall oder zu veränderten magnetoptischen Einstellungen geführt haben. Dies ist an der Variation der stärksten Frequenzlinien zu erkennen. Insbesondere ist im unteren Teil der Matrix eine wiederholte, kurzzeitige Veränderung des horizontalen Arbeitspunktes über einen Zeitraum von wenigen Minuten zu beobachten. Diese entstand durch manuelle, vom Operateur durchgeführte Änderungen am Sollarbeitspunkt der Maschine, motiviert durch die vom Strahlutzer erwünschte Verbesserung der Lebensdauer des Strahls.

Das im vorangegangenen Abschnitt beschriebene Beispiel gibt einen Eindruck von den durch das neue Kontrollsystem bereitgestellten Werkzeugen, um im Routinebetrieb eine langfristige strahldiagnostische Überwachung des Maschinenverhaltens durchzuführen. Die Ergebnisse einer solchen Überwachung dienen beispielsweise zur Verfolgung erwarteter Langfrist-Driften einzelner Parameterwerte, können aber auch die Überprüfung bestimmter Arbeitshypothesen in der Praxis motivieren und dadurch zu Verbesserungen im Verständnis von ELSA beitragen. Diese Verbesserungen kommen direkt den von ELSA bedienten Experimentiergruppen zugute.

Zusammenfassung

Gegenstand der vorliegenden Arbeit war der Entwurf, die Entwicklung und die Inbetriebnahme eines neuen Rechnerkontrollsystems zur Steuerung und Überwachung der Elektronen-Stretcher-Anlage ELSA, mit besonderer Berücksichtigung der Anforderungen des Nachbeschleunigungsbetriebs bis zu Endenergien von 3.5 GeV. Der Schwerpunkt dieser Arbeit lag dabei neben der eigentlichen Kontrollsystementwicklung auf der Realisierung der Nachbeschleunigung und der dafür notwendigen strahldiagnostischen Hilfsmittel.

Das neue Kontrollsystem besitzt eine *verteilte* Architektur und wurde analog zu einem echtzeitfähigen, verteilten Betriebssystem konstruiert. Alle verwendeten Hardware- und Software-Komponenten basieren auf etablierten "de facto"-Standards der EDV-Technik, um eine hohe Zukunftssicherheit des Systems zu gewährleisten. Die beschleunigerphysikalischen Anforderungen wurden durch die weitestgehende Integration von Kontrolle, Strahldiagnose und Simulationsverfahren berücksichtigt. Diese Integration wird auf allen Ebenen des Kontrollsystems in Hardware- und Software besonders unterstützt und ist neben der hohen Transaktionsbandbreite das wesentliche Leistungsmerkmal des neuen Systems.

Zur verbesserten Steuerung von ELSA im Nachbeschleunigungsmodus wurde ein neues Timingsystem entwickelt und vollständig in das Kontrollsystem integriert. Dieses System erzeugt alle für die Ablaufsteuerung einzelner Betriebsphasen notwendigen Pulse und gestattet darüber hinaus durch die Realisierung eines hochfrequenzbasierten Injektionsgenerators die Optimierung der ELSA-Füllstruktur durch umlaufssynchronisierte, zeitversetzte Steuerung der Extraktion des Teilchenstrahls aus dem Synchrotron. Zusätzlich kann das System frei definierbare Muster von Triggerpulsen erzeugen, die zur Durchführung strahldiagnostischer Messungen an ELSA verwendbar sind.

Zur Realisierung des Nachbeschleunigungsbetriebs wurden Algorithmen für alle notwendigen magnetoptischen Berechnungen sowie für die zeitsynchronisierte Steuerung der ELSA-Magnete ausgearbeitet und erfolgreich getestet. Durch das Timingsystem werden alle berechneten Steuerfunktionen synchronisiert und in einen Beschleunigungszyklus zusammengefaßt, der interaktiv über die grafische Oberfläche des Kontrollsystems konfigurierbar ist. Die Verifikation der beschleunigerphysikalischen Vorgaben erfolgt durch ein speziell entwickeltes, vollständig in die Kontrolle integriertes Meßsystem zur zeitaufgelösten Spektralanalyse des Strahlagesignals in ELSA. Dieses System basiert auf einem digitalen Signalprozessor, kann unter Echtzeitbedingungen bis zu 512 aufeinander folgende Lagespektren mit hoher Frequenzauflösung im Abstand von 20 msec berechnen und gestattet dadurch die Verfolgung des horizontalen Arbeitspunktes $Q_x(t)$ sowie des Synchrotron-Arbeitspunktes $Q_s(t)$. Für die Arbeitspunktreakonstruktion wurde zusätzlich ein auf dem Konzept der Identifikation linearer, zeitinvarianter diskreter Systeme beruhendes Spektralmodell implementiert.

Das Konzept der Integration von Kontrolle, Strahldiagnose und Simulation in einem homogenen Gesamtsystem hat sich für alle Einstellarbeiten an ELSA und insbesondere für die Erprobung neuer, zuvor nicht realisierbarer Betriebsmodi bewährt. Bedingt durch die verfügbare Rechenleistung und durch die verteilte Hardware- und Software-Architektur des Systems war erstmals die Implementierung beschleunigerphysikalischer Modellierung und numerisch relativ aufwendiger Methoden der digitalen Signalverarbeitung möglich, deren Ergebnisse unmittelbar in eine Verbesserung der Betriebseinstellung einfließen können. Die schnelle Reaktion des Systems auf Änderungen der beschleunigerphysikalisch motivierten Steuervorgaben sowie auf Ergebnisdaten der Strahldiagnose macht eine interaktive Optimierung wichtiger Strahlparameter praktikabel und erlaubt im Zusammenwirken mit den bereitgestellten Simulationswerkzeugen ein wesentlich detaillierteres Verständnis des Beschleunigers.

Durch die mit dem neuen ELSA-Kontrollsystem gewonnenen Möglichkeiten kann die weitere Optimierung der Qualität des an die Experimente gelieferten Elektronenstrahls unter deutlich verbesserten Randbedingungen in allen Betriebsmodi angegangen werden.

Literaturverzeichnis

- [1] K.H.Althoff et. al. — *Das 2.5 GeV Elektronen-Synchrotron der Universität Bonn*, Sonderdruck aus dem Jahrbuch 1969 des Landesamtes für Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen, Westdeutscher Verlag Köln Opladen.
- [2] K.H.Althoff et.al. — *The 2.5 GeV Electron Synchrotron of Bonn University*, Nucl.Instr. and Meth. 61:1-30,1968, Elsevier Publ.Serv., North Holland
- [3] K.H.Althoff et.al. — *ELSA - the 3.5 GeV Electron Stretcher Accelerator of the Bonn University*, Nucl.Instr. and Meth., Elsevier Publ.Serv., North Holland, Veröffentlichung in Vorbereitung
- [4] E.Asseo — *Causes et corrections des erreurs dans la mesure des caracteristiques des oscillations beta-troniques obtenues a partir d'une transformation de fourier*, CERN PS 85-9 (LEA), Dezember 1985
- [5] J.Bengtsson — *Nonlinear transverse dynamics for storage rings with applications to the low energy antiproton ring LEAR at CERN*, CERN PS/88-05
- [6] *BERGOZ fast beam current transformer*, Technical Documentation
- [7] J.Bloomer — *Power Programming with RPC*, O'Reilly and Associates, Sebastopol, 1992
- [8] E.B.Blum, R.J.Nawrocky — *Tune measurement in the NSLS booster synchrotron*, Nucl.Instr. and Meth. A333 244-250,1993, Elsevier Publ.Serv., North Holland
- [9] H.J.Bongartz — *Entwicklung und Test eines universellen Steuerkurvengenerators für das ELSA-Kontrollsystem*, Diplomarbeit, BONN-IR-93-74, Bonn 1993
- [10] M.Botlo et.al. — *VxWorks V5.1 Benchmark Tests*, SSC Laboratory, SSCL-627, May 1993
- [11] H.Brandau — *Die Entwicklung eines Folienmonitors für den Transferkanal vom 2.5 GeV Synchrotron nach ELSA*, Diplomarbeit, 1993.
- [12] A.Breest — *Analyse und Optimierung des extrahierten ELSA-Strahls am Bonner ELAN-Experiment*, Diplomarbeit, Bonn, September 1989
- [13] W.T.Cochran et. al. — *What is the Fast Fourier Transform ?*, Proceedings of the IEEE, Vol. 55, No. 10, October 1967
- [14] J.Cooley, J.Tukey — *An Algorithm for the Machine Computation of Complex Fourier Series*, Math.Comp. Vol.19, pp.297-301, April 1965
- [15] D.Comer — *Internetworking with TCP/IP*, Prentice Hall, 1988
- [16] T.Cormen, Ch.E.Leiserson, R.L.Rivest — *Introduction to Algorithms*, MIT Press Cambridge, Massachusetts, 1990
- [17] M.C.Crowley-Milling — *The control system for LEP*, in: IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. NS-30, 1983
- [18] M.C.Crowley-Milling — *Control problems in very large accelerators*, in: IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. NS-32, 1985
- [19] R.J.Cypser — *Communications Architecture for Distributed Systems*, Addison-Wesley Publishing Company, 1978

- [20] DVME630F2 — *Handbuch zum VME-Modul Datel DVME630F2*, Datel GmbH, München
- [21] P.Detemple — *Aufbau, Test und Betrieb eines energiemarkierten Elektronenstrahls am PHOENICS-Experiment der Bonner Elektronen-Stretcher-Anlage ELSA*, Dissertation, BONN-IR-90-44, 1990
- [22] P.Detemple et.al. — *The photon tagging system of the PHOENICS-Experiment at ELSA*, Nucl.Instr. and Meth., A321 (1992) 479-488, 1992, Elsevier Publ.Serv., North Holland
- [23] *Digital Delay/Pulse Generator DG535*, technical documentation, Stanford Research Systems Inc.
- [24] A.Dreist — *Das Injektionssystem des Streherringes ELSA*, Dissertation BONN-IR-89-26, 1989
- [25] H.Ebeling — *Konzeption, Bau und Test eisenloser Quadrupole für die Resonanzextraktion aus ELSA*, Diplomarbeit, BONN-IR-87-35, Bonn 1987
- [26] H.Ehrenberg, W.Paul — *Das 500 MeV-Elektronen-Synchrotron in Bonn*, in: R. Kollath, "Teilchenbeschleuniger", Vieweg Verlag, Braunschweig 1962, auch in: "Die Atomwirtschaft", Ausgabe Juli/August 1958
- [27] P.Flannery, H.Press, A.Teukolsky, T.Vetterling — *Numerical Recipes - The Art of Scientific Computing*, Cambridge University Press 1986
- [28] J.Fogelin — *The vxWorks Real-Time Kernel*, Wind River Systems Inc., 1010 Atlantiv Avenue, Alameda, CA 94501
- [29] FSA — *Grundlagen der Spektrumanalyse mit dem Spektrum Analyzer FSA*, Rhode&Schwartz, technische Dokumentation zum FSA INFO 001-38 D-1
- [30] J.Gareyte — *Observation and Correction of Instabilities in Circular Accelerators*, CERN SL/91-09(AP), Geneva 1991
- [31] T.Götz — *Vollautomatische Messung des ELSA-Arbeitspunktes mit "EPOS"*, Diplomarbeit, BONN-IR-90-50, 1990
- [32] T.Götz, M.Picard — *Bewertung des ELSA-Kontrollsystems*, Physikalisches Institut der Universität Bonn, interner Bericht, 1991
- [33] G.H.Gonnet, R.Baeza-Yates — *Handbook of Algorithms and Data Structures*, Addison-Wesley Publishing Company, 1991
- [34] A.Goscinski — *Distributed Operating Systems - The Logical Design*, Addison Wesley Publ. Comp. 1991
- [35] G.Guignard, J.Hagel — *Betatron Coupling - Hamiltonian Treatment*, in: S.Turner, Editor, CERN accelerator school CERN 92-01
- [36] D.P.Gurd, M.Crowley-Milling, Editors — *Accelerators and large experimental physics control systems*, Proceedings of the International Conference on Accelerator and large experimental physics control systems, Vancouver, Canada, BC, 1989, Nucl.Instr. and Meth., A293, 1990, Elsevier Publ.Serv., North Holland
- [37] U.Hacker et.al. — *The COSY control system: A Distributed Realtime Operating System for Accelerator Control*, Proceedings of the IEEE 7th REAL TIME Conference 1991, Jülich/Germany
- [38] F.Harris — *On the use of windows for harmonic analysis with the discrete fourier transform*, Proceedings of the IEEE, VOL.66, No.1, January 1978
- [39] S.Herb — *Betatron Tune Measurements and control in the PETRA proton ring*, Proceedings of the IEEE Particle Accelerator Conf. (PAC) 1991, San Francisco
- [40] W.Hillert — *Der ELSA Synchrotronlicht-Monitor*, Veröffentlichung in Vorbereitung
- [41] A.Hofmann — *Tune shifts from self-fields and images*, in: S.Turner, Editor, CERN accelerator school CERN 94-01

- [42] E. Horowitz, S. Sahni — *Fundamentals of Data Structures*, Pitman Publishing Limited, London, 1984
- [43] D.Husmann — private Mitteilung, November 1994
- [44] D.Husmann — *ELSA — Ein neuer Beschleuniger der Mittelenergiephysik*, BONN-IR-87-30, Phys.Inst. Uni Bonn, 1987. ISSN-0172-8741
- [45] D.Husmann — *The ELSA Stretcher Ring*, Lecture Notes in Physics No.234, Springer Verlag Berlin Heidelberg New York Tokyo
- [46] D.Husmann, W.J. Schulle — *ELSA - die neue Elektronen-Stretcher-Anlage*, Physikalische Blätter 44 (1988) Nr.2
- [47] T.Ieiri — *A real time bunch-length monitor using the beam spectrum and measurements of bunch lengthening*, in: Nucl.Instr. and Meth., A329(1993) 371-380, Elsevier Publ.Serv., North Holland
- [48] P.G.Innocenti — *The LEP control System*, Nucl.Instr. and Meth. A293 (1990) 1-5, Elsevier Publ.Serv., North Holland
- [49] N.Joepen — *Das Photonennachweissystem des SAPHIR-Spektrometers*, Dissertation, BONN-IR-90-40, Bonn 1990
- [50] N.B.Jones — *Digital Signal Processing*, IEEE Control Engineering Series 22, 1982
- [51] J. Keil — *Aufbau eines breitbandigen Intensitätsmonitors zur Messung, Überwachung und Optimierung der ELSA-Füllstruktur*, Diplomarbeit, BONN-IR-94-18, Bonn 1994
- [52] J.Kewisch et.al. — *Accelerator Simulation and Operation via identical operational interfaces*, Proceedings of the IX. IEEE Particle Accelerator Conf. (PAC) 1991, San Francisco
- [53] M.Kiesheyer — *Entwicklung und Test eines Datenerfassungsmoduls für das ELSA-Kontrollsystem*, Diplomarbeit, Mai 1989
- [54] K.H.Kissler — private Mitteilung, Dezember 1991
- [55] K.Kraus — *Experimentelle Bestimmung von Kenndaten der ELSA Dipol Magnete*, Diplomarbeit, BONN-IR-86-16, 1986
- [56] S.Y.Kung, K.S.Arun, D.V.Bashkar Rao — *State-space and singular value decomposition-based approximation methods for the harmonic retrieval problem*, in: Journal of the Optical Society of America, Vol. 73, No.12/December 1983
- [57] K.Low et.al. — *Overview of real time kernels at the SSCL*, Proceedings of the IX. IEEE Particle Accelerator Conf. (PAC) 1991, San Francisco
- [58] M.P. Magnacco — *The ELETTRA control System*, Nucl.Instr. and Meth. A293 (1990) 144-49, Elsevier Publ.Serv., North Holland
- [59] *OSF/Motif 1.2 Prgrammers Guide, Reference Guide*, Open Software Foundation, Prentice Hall, Eaglewood Cliffs NJ, 1992
- [60] S.Mullender, Editor — *Distributed Systems*, ACM Press / Groniert Series, New York 1991
- [61] M.Neckenig — *Der Einfluß von Synchro-Betatron-Koppelresonanzen auf den extrahierten Strahl des Stretchrings ELSA*, Diplomarbeit, BONN-IR-88-03, Bonn 1988
- [62] M.Neckenig — *Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Verbesserung der Zeitstruktur des extrahierten Elektronenstrahls aus dem Stretcherring ELSA*, Dissertation, BONN IR-93-16, Bonn 1993
- [63] H.D. Nuhn — *Schnelle Extraktion aus dem Bonner 2.5 GeV Elektronensynchrotron und Strahltransfer zur neuen Stretcheranlage ELSA*, Dissertation, BONN-IR-88-03, 1988
- [64] A.Nye, T. O'Reilly — *The X Window System*, Vol.0—Vol.6, O'Reilly and Associates, Sebastopol 1990

- [65] A.V.Oppenheim, A.S.Willsky, I.T.Young — *Signals and Systems*, Prentice Hall International Editions 1983.
- [66] D.Peterson, J.Marriner — *A frequency tracking synthesizer for beam diagnostic systems*, Proceedings of the IX. IEEE Particle Accelerator Conf. (PAC) 1991, San Francisco
- [67] M.Picard — *Die Rekonstruktion des ELSA-Phasenraums mit EPOS*, Diplomarbeit, BONN-IR-91-76, 1991
- [68] M.Picard — *Entwicklung und Inbetriebnahme eines verteilten Rechnerkontrollsystems zur Steuerung der Elektronen-Stretcher-Anlage ELSA, unter besonderer Berücksichtigung der Anforderungen der Extraktion im Nachbeschleunigungsbetrieb bis 3.5 GeV*, Dissertation in Vorbereitung
- [69] A.Piwinski — *Impedances in Lossy Elliptical Vacuum Chambers*, DESY 94-068, April 1994, ISSN 0418-9833
- [70] W.H.Press, S.A.Teukolsky — *Search Algorithm for weak periodic signals in unevenly spaced data*, in: Computers in Physics, NOV/DEC 1988
- [71] W.H.Press, S.A.Teukolsky — *Savitzky-Golay Smoothing filters*, in: Computers in Physics, NOV/DEC 1990
- [72] J. Proakis, D.Manolakis — *Introduction to Digital Signal Processing*, MacMillan Publishing Company, New York 1988
- [73] G.R.B.de Prony — *Essai Experimentale et Analytique . . .*, Paris Journal de l'Ecole Polytechnique, vol.1, no.Cahier 2, pp. 24-76, 1795
- [74] B.D.Rao, K.S.Arun — *Model Based Processing of Signals: A State Space Approach*, Proceedings of the IEEE, Vol. 80, No.2, Febr.1992
- [75] M.Sands — *The Physics of Electron Storage Rings - An Introduction*, SLAC Report No.121 1970
- [76] M.Schillo — *Entwicklung und Test eines Mikroprozessormoduls für das ELSA-Kontrollsystem*, Diplomarbeit BONN-IR-84-33, August 1984
- [77] M.Schillo — *Das Strahlmonitorsystem des Stretcherrings ELSA*, Dissertation , BONN-IR-91-77, 1991
- [78] W.J.Schwille et al. — *Design and construction of the SAPHIR detector*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A344 (1994) 470-486, 1994
- [79] W.J.Schwille — *Physik an der Bonner Elektronen-Stretcher-Anlage ELSA*, Physikalische Blätter 45 (1989), Nr. 7
- [80] M.Serio — *Transverse Betatron Tune Measurements*, Conference Proceedings for "Frontiers of Particle Beams; Observation, Diagnosis and Correction", Anacapri, Italy 1988
- [81] M.Serio, M.Zobov — *Measurement of Transverse and Longitudinal Spectra*, First European Workshop on beam diagnostics and Instrumentation for particle accelerators, CERN PS/93-35(BD), Montreux, 1993, Proceedings of the IEEE Particle Accelerator Conf. (PAC) 1991, San Francisco
- [82] S.Stearns, A.David — *Signal Processing Algorithms*, Prentice Hall, Eaglewood Cliffs, NJ, 1993
- [83] W.R.Stevens — *UNIX Network Programming*, Prentice Hall Software Series, 1990
- [84] A.S.Tanenbaum — *Computer-Netzwerke*, Wolfram's Verlag, 1992
- [85] A.S.Tanenbaum — *Moderne Betriebssysteme*, Hanser Verlag München, 1994
- [86] *TMS320C3X User's Guide*, Texas Instruments, 1992
- [87] R.Unbehauen — *Systemtheorie*, Oldenbourg-Verlag, München 1993
- [88] K.B.Unser — *Design and preliminary tests of a beam intensity monitor for LEP*, CERN/LEP-BI/89-07.

- [89] VITA — *The VMEbus specification*, VITA, VMEbus Internation Trade Association, Scottsdale, USA
- [90] G.A.Voss — *Single Beam Collective Phenomena in Electron Storage Rings – Diagnosis and Cures*, in: Theoretical Aspects of the behaviour of beams in accelerators and storage rings, Proceedings CERN 77-13, July 1977
- [91] J.Welt, private Mitteilung, Bonn 1993
- [92] J.Wenzel — *Korrektur des Closed-Orbit bei ELSA*, Diplomarbeit, BONN IR-90-36, Bonn 1990
- [93] J.Wenzel — *Entwicklung und Test eines Simulators der Teilchenbewegung in der 3.5 GeV Elektronen-Stretcher-Anlage ELSA*, Dissertation, Bonn 1994
- [94] D.Wehrmeister — *Aufbau und Test einer Quelle polarisierter Elektronen für die Bonner Beschleunigeranlage*, Dissertation, 1993
- [95] C.Wermelskirchen — *Das Kontroll- und Steuersystem der Bonner 3.5 GeV-Elektronen-Stretcher-Anlage ELSA*, Dissertation BONN-IR-88-31, Juli 1988
- [96] C.Wermelskirchen, S.Brennan, T.Götz, W.Lavender, R.Ortiz, M.Picard, J.Yang — *The SSRL injector control system*, Proceedings of the Particle Accelerator Conference, San Francisco, 1991
- [97] H. Wiedemann — *Particle Accelerator Physics*, Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York 1993
- [98] K. Wille — *Physik der Teilchenbeschleuniger und Synchrotronstrahlungsquellen*, Teubner-Verlag Stuttgart, 1992
- [99] M.Zimmer — *Messung der Multipolverteilung der ELSA-Quadrupol- und Sextupolmagnete*, Diplomarbeit, BONN-IR-86-05, 19986

Danksagung

An erster Stelle möchte ich Herrn Prof.Dr. D.Husmann für die Themenstellung und die Betreuung während der vergangenen Jahre danken. Das von ihm entgegengebrachte Vertrauen und seine Hilfestellung bei der Lösung auch unphysikalischer Probleme haben während der Entwicklungszeit und Inbetriebnahmephase des neuen Kontrollsystems den Fortschritt der Arbeit wesentlich erleichtert.

Herrn Prof.Dr. W.Schwille danke ich für die Übernahme des Korreferats.

Herrn Prof.Dr. K.H.Althoff und Herrn Prof.Dr. B.Schoch danke ich vor allem für die motivierende Betreuung im Rahmen des Graduiertenkollegs "Die Erforschung der subnuklearen Struktur der Materie", dessen Mitglied ich sein durfte. Herrn Prof.Dr. K.H.Althoff danke ich besonders für seine ermutigenden Worte auch in schwierigen Phasen der Kontrollsystem-Entwicklung.

Allen Mitgliedern der ELSA-Gruppe gilt mein herzlicher Dank für das gute Arbeitsklima und die anregende Zusammenarbeit. Ihre Ratschläge und Kommentare haben den Entwurf und die Implementierung des neuen Systems stets positiv unterstützt.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dipl.Phys. M.Picard für die langjährige und erfolgreiche Zusammenarbeit, auch weit über den Rahmen dieser Arbeit hinaus. Die zusammen mit ihm in vielen Einzeldiskussionen entwickelte Konzeption des Kontrollsystems und die anschließende Implementierung fand stets in einer freundschaftlichen und motivierenden Atmosphäre statt und hat diese Arbeit wesentlich geprägt.

Herrn Dipl.Phys. J.Wenzel möchte ich für die gute und freundschaftliche Zusammenarbeit sowie seine tatkräftige Unterstützung in beschleunigerphysikalischen Fragen danken. Die mit ihm geführten, kritischen Diskussionen haben die Substanz und das Potential des neuen Kontrollsystems gewinnbringend beeinflusst.

Herrn Dipl.Phys. J.Keil danke ich besonders für viele anregende Diskussionen über die Strahldiagnose an ELSA und seine Mithilfe bei Hardware- und Software- Tests.

Herrn Dr. W.v.Drachenfels bin ich vor allem für seine ermutigenden Worte und seine Mithilfe bei der Inbetriebnahme des neuen Systems zu Dank verpflichtet. Er stand während der Maschinentests und der Erprobung des Kontrollsystems stets mit Rat und Tat zur Seite. Ohne seine Mithilfe hätte die Inbetriebnahme von ELSA in den neuen Arbeitsmodi nicht annähernd so zügig erfolgen können.

Herrn cand.phys. Ch.Steier sei für seine engagierte Mitarbeit bei der Inbetriebnahme des neuen Systems sehr gedankt. Ausdrücklich möchte ich seine professionelle Betreuung der Feldbussoftware erwähnen, ohne die ein wichtiger Teil der Funktionalität des Kontrollsystems nicht hätte realisiert werden können.

Herrn Dipl.Ing. W.Lindenberg bin ich für seine tatkräftige Unterstützung beim Entwurf und Test des Injektionsgenerators sowie seiner Mitarbeit bei der Ergänzung der Monitor-Elektronik zu Dank verpflichtet.

Den Herren J.Welt, H.Schug und R.Müller möchte ich für ihre Mithilfe bei der Planung und Realisierung der Hardware-Strukturen des neuen Systems ausdrücklich danken, besonders auch für ihre Bereitschaft, spontane Ideen schnell und professionell zu realisieren.

Mein Dank gilt nicht zuletzt den direkt mit dem neuen Kontrollsystem konfrontierten Mitgliedern der Experimentiergruppen an ELSA. Sie haben das neue System trotz unvermeidlicher Fehler und "Fallstricke" sofort positiv akzeptiert und durch kritische Kommentare nicht unerheblich zur guten Anpassung des Systems beigetragen.

Der Betriebsmannschaft der Beschleunigeranlagen möchte ich ebenfalls meinen herzlichen Dank aussprechen. Viele Operateure haben die Arbeit in der Inbetriebnahmephase vorbehaltlos unterstützt und durch wertvolle Verbesserungsvorschläge maßgeblichen Einfluß auf die Ausrichtung des Systems an die Anforderungen des täglichen Betriebs ausgeübt.

Mein ganzer Dank gilt meiner Frau Yasmin für ihr Verständnis und ihre Geduld.