

UNIVERSITÄT BONN

Physikalisches Institut

**Entwurf, Entwicklung und Inbetriebnahme eines verteilten
Rechnerkontrollsystems für die Elektronen-Stretcher-Anlage ELSA, unter
besonderer Berücksichtigung der Extraktion im Nachbeschleunigungsbetrieb
bis 3.5 GeV**

von
Michael Picard

The **EL**ectron **S**tretcher **A**ccelerator **ELSA** has been designed in the energy range from 0.5 GeV to 3.5 GeV to convert the pulsed electron beam of a booster synchrotron to a CW beam with duty factor up to 95 % (Pulse-Stretcher-Method). A slow $\frac{2}{3}$ -integer-resonance extraction excited by sextupole magnets is used. The post accelerator mode of ELSA could not be achieved with the existing centralized computer control system due to limited structural and technical properties. For all ELSA operating modes with emphasis on the post accelerator mode up to the design energy and slow extraction, a new distributed control system has been developed and successfully brought into operation. This text details the system's ingredients: a homogenous communication architecture, a distributed on line database, transaction schemes and a set of event-driven rule engines carrying out all steering and physics processing. Scalability and high processing bandwidth characterizes the new system. The system's hardware and software components totally rely on "de facto" standards to cover future machine upgrades. The new system integrates realtime control, beam diagnosis and simulation tasks, into one environment.

A new timing system has been developed performing filling optimization of ELSA by successive RF-synchronous injection, raising the duty factor of the extracted beam.

Post acceleration with ELSA has been successfully performed for the SAPHIR and ELAN experiments, accumulating and accelerating beam currents of more than 90 mA up to 2.2 GeV, achieving ramping velocities of $2.3 \frac{GeV}{s}$. The slow $\frac{2}{3}$ -integer-resonance extraction method could be investigated, verified and established for ELAN in the post accelerator mode, reaching energies of 2.0 GeV and 2.2 GeV.

Post address:
Nussallee 12
53115 Bonn
Germany



BONN-IR-95-01
Bonn University
Januar 1995
ISSN-0172-8741

UNIVERSITÄT BONN
Physikalisches Institut

**Entwurf, Entwicklung und Inbetriebnahme eines verteilten
Rechnerkontrollsystems für die Elektronen–Stretcher–Anlage
ELSA, unter besonderer Berücksichtigung der Extraktion im
Nachbeschleunigungsbetrieb bis 3.5 GeV**

von
Michael Picard

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

Angenommen am: 19.01.1995
Referent: Prof. Dr. D. Husmann
Korreferent: Prof. Dr. W. Schille

Entwurf, Entwicklung und Inbetriebnahme eines verteilten
Rechnerkontrollsystems für die Elektronen–Stretcher–Anlage ELSA, unter
besonderer Berücksichtigung der Extraktion im Nachbeschleunigungsbetrieb
bis 3.5 GeV

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

vorgelegt von
Michael Picard
aus
Andernach

Bonn 1995

Angefertigt mit Genehmigung der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität
Bonn

Referent: Prof. Dr. D. Husmann
Korreferent: Prof. Dr. W. Schwille
Tag der Promotion: 19.01.1995

Inhalt

Einleitung

1 Anforderungsprofil des neuen Kontrollsystems	1
1.1 Elektronen–Stretcher–Anlage ELSA	1
1.2 Notwendigkeit eines neuen Kontrollsystems	4
1.3 Experimente an ELSA und deren Anforderungen	5
1.4 Aufgabenstellung an die Kontrolle im Nachbeschleunigungsmodus	9
2 Realisierung des Kernsystems	18
2.1 Entwurfsentscheidungen	18
2.2 Beschreibung der verteilten Kontrollsystemarchitektur	22
2.3 Software des Prozeßsystems	28
2.4 Kommunikationssystem	35
2.5 Verteiltes Datenbanksystem	45
2.6 Transaktionsformen im Kontrollsystem	48
2.7 Kooperierende Prozeßmenge des Kernsystems	56
2.8 System verteilter Regelexperten	57
3 Die graphische Bedienungsfläche	63
3.1 Konzeption der Benutzeroberfläche	63
3.2 Erstellung von Bedienungsbildern	65
3.3 Bedienungssystem	68
4 Zeitablaufsteuerung im Nachbeschleunigungsmodus	73
4.1 Definition des ELSA–Maschinenzyklus	73
4.2 System zur Zykluszeitsteuerung	77
4.3 System zur Injektionszeitsteuerung	78
4.4 System zur Strahldiagnosezeitsteuerung	82
4.5 Software und Experten der Zeitablaufsteuerung	84
5 Kontrolle, Strahldiagnose und Simulation für die Extraktion im Nachbeschleunigungs-	87
betrieb	
5.1 Extraktionsverfahren	87
5.2 Generierung von angepaßten Extraktionssteuerkurven	98
5.3 Methoden der digitalen Signalverarbeitung	99

5.4	Steuerkurvengeneratoren für Nachbeschleunigung und Extraktion	106
5.5	Integration von Simulation und Kontrolle	108
5.6	Strahldiagnose für den Nachbeschleunigungsmodus	111
5.7	Integration des ELSA-Monitorsystems	113
5.8	Überprüfung der korrigierten Füllstruktur	114
5.9	Allgemeine Meßgeräteaufbauten für die Strahldiagnose	116
5.10	System zur Messung des transversalen Phasenraums	117
5.11	Bildverarbeitendes Monitorsystem	120
6	Erste Erfahrungen und Ergebnisse mit dem neuen Kontrollsystem	124
6.1	Inbetriebnahme des Kontrollsystems	124
6.2	Erstellung der graphischen Bedienungsfläche für den ELSA-Betrieb	126
6.3	Konstruktion zusätzlicher Experten	127
6.4	Bildverarbeitende Diagnose für den Nachbeschleunigungsbetrieb	129
6.5	Homogenisierung der ELSA-Füllstruktur	129
6.6	Untersuchungen mit dem Phasenraummeßsystem	135
6.7	Betriebsmodi für die ELSA-Experimente	142
6.8	Zeitaufgelöste Strahldiagnose im Nachbeschleunigungsmodus für ELAN	152
6.9	Langzeitstrahldiagnose in ELSA	159
	Zusammenfassung	162
	Literaturverzeichnis	164
	Danksagung	169

Einleitung

Seit 1958 betreibt das Physikalische Institut der Universität Bonn Elektronenbeschleuniger; dabei war ein 500 MeV-Synchrotron [80] der erste Elektronenbeschleuniger in Europa, welche das Prinzip der starken Fokussierung verwirklichte [19]. Eine Erweiterung erfolgte 1967 durch die Inbetriebnahme eines 2.5 GeV-Synchrotrons [2]. In einem netzsynchronen 20 ms andauernden Beschleunigungszyklus konnte Experimenten für ca. 1 ms Nutzstrahl zugeführt werden; das Verhältnis aus Nutzstrahlzeit zur Gesamtzykluszeit – das sog. Tastverhältnis – war kleiner als 5 %. Sowohl die Verbesserung des Tastverhältnis als auch die Erhöhung der Teilchenenergie bis zu 3.5 GeV ist Aufgabe der **EL**ektronen-**St**retcher-**AN**lage ELSA, die 1987 in Betrieb genommen wurde [48][5][49]. Das 2.5 GeV-Synchrotron dient seitdem als Einschußmaschine für ELSA. ELSA stellt sowohl für die Forschung im Bereich der Mittlereenergie teilchenphysik als auch für Experimente mit Synchrotronlicht einen Elektronenstrahl bereit. Im Betrieb für Mittlereenergie teilchenphysikexperimente wird ein in ELSA injizierter Teilchenstrahl zunächst gespeichert, um dann langsam über nahezu die gesamte Zykluszeit durch eine drittelzahlige Resonanzextraktion extrahiert und den Experimenten zugeführt zu werden. Die Nutzstrahlzeit für Experimente im Verhältnis zur Zykluszeit ist deutlich verlängert (Stretcherbetriebsart). Für Synchrotronlichtexperimente kann ELSA den Elektronenstrahl speichern; es ergeben sich Speicherzeiten von mehr als einer Stunde.

Das ursprüngliche Rechnerkontrollsystem [115] konnte die ELSA-Inbetriebnahme und die Stretcherbetriebsart mit 50 Hz Wiederholfrequenz abdecken. Strukturelle und technische Schwächen dieses Systems – sie sind aus den zum damaligen Entwicklungszeitpunkt (1983) verfügbaren, technologischen Möglichkeiten erklärbar – verhinderten seinen Einsatz für den Nachbeschleunigungsbetrieb mit einer langsamen, drittelzahligen Resonanzextraktion.

Zur Realisierung der Nachbeschleunigungsbetriebsart – unter Berücksichtigung aller anderen Betriebsmodi bei gleichzeitiger Integration von Strahldiagnose¹ und beschleunigertheoretischer Modellbildung – wurde 1991 die Entwicklung eines neuen Kontrollsystems und eines Simulators zur Beschreibung der linearen und nichtlinearen Teilchenbewegungen in ELSA begonnen.

Der Gegenstand dieser Arbeit ist Entwurf, Entwicklung und Inbetriebnahme des neuen Rechnerkontrollsystems zur Steuerung und Überwachung der Elektronen-Stretcher-Anlage ELSA, unter besonderer Berücksichtigung der Extraktion im Nachbeschleunigungsbetrieb bis zu maximalen Endenergien von 3.5 GeV. Um die Entwicklungszeitspanne zur Realisierung möglichst gering zu halten, wurden Entwurf und Implementierung auf zwei Dissertationen aufgeteilt. Der Schwerpunkt vorliegender Arbeit ist die Kontrollsystementwicklung sowie die Realisierung der langsamen Teilchenextraktion im Nachbeschleunigungsbetrieb durch eine drittelzahlige Resonanzextraktion, begleitet durch Strahldiagnosemaßnahmen zu deren experimenteller Untersuchung. Die Konzeption der Nachbeschleunigung des Teilchenstrahls und dazu notwendiger Strahldiagnoseuntersuchungen werden von T. Götz in seiner Dissertation [38] bearbeitet. Gemeinsam wurden Entwurf, Entwicklung, Systemintegration aller Hardware- und Softwareelemente sowie die Inbetriebnahme des neuen Kontrollsystems durchgeführt. Beide Arbeiten dokumentieren den Gesamtfunktionsumfang des Kontrollsystems und die erzielten Resultate. Die Entwicklung eines interaktiven Simulationsprogramms zur Beschreibung der linearen und nichtlinearen Teilchenbewegungen in ELSA hat sich J. Wenzel als Hauptaufgabe seiner Dissertation [114] gestellt.

Das erste Kapitel entwickelt aus physikalischer und informationstechnischer Hinsicht das Anforderungsprofil des neuen Kontrollsystems zur Realisierung des Nachbeschleunigungsbetriebs. Daran schließt sich im Kapitel 2 die wesentliche Beschreibung von Hardware- und Software-Architektur des Kernsystems an². Eine Darstellung der graphischen Bedienungsoberfläche erfolgt im Kapitel 3. Das System zur Zeitablaufsteuerung aller ELSA-Betriebsarten wird im anschließenden Kapitel 4 ausgeführt. Die Kapitel 2 bis 4 bilden

¹Strahlbewegungsdiagnose bezeichnet alle Maßnahmen zur Erkennung, Bestimmung und Analyse der Teilchendynamik und daraus hervorgehender Strahlparameter. Dafür wird abkürzend der Begriff Strahldiagnose benutzt.

²Die Problemstellung einer Beschleunigerkontrolle hat Überlappungsgebiete mit der Informatik und damit verbundener Datenverarbeitungs- und Informationstechnologien. Für eine Vielzahl damit verbundener Fachbegriffe existieren keine äquivalenten Begriffe der deutschen Sprache. In dieser Arbeit wurde dennoch versucht, weitgehend deutsche Begriffsbildungen zu verwenden und auf Anglizismen zu verzichten, was an einigen Stellen nicht möglich war; der Leser wird deswegen um Verständnis gebeten.

den Ansatz zur Lösung der allgemeinen Kontrollsystemaufgabenstellung und legen das Fundament für alle folgenden, auf ELSA zugeschnittenen Konstruktionen. Die Werkzeuge zur Verwirklichung des Extraktionsbetriebs im Nachbeschleunigungsmodus, sowie Methoden der Strahldiagnose beschreibt Kapitel 5. Neben den Aufgabenstellungen der Strahldiagnose wurde auch die beschleunigertheoretische Modellbildung unterstützt. Systemtheoretische Methoden, wie auch Werkzeuge zur digitalen Signalverarbeitung, runden dieses Kapitel ab. Eine entsprechende Darstellung der Nachbeschleunigungsphase mit ihren Steuerungskonzepten findet sich in [38]. Das Kapitel 6 diskutiert die Inbetriebnahme des Kontrollsystems und die damit bereits erzielten Ergebnisse.

Die geplante Lebensdauer des neuen Kontrollsystems beträgt mehr als 10 Jahre. Um Hilfestellung für zukünftige Modifikationen und Erweiterungen zu geben, werden, neben einer physikalischen sowie konzeptionellen Darstellung des Kontrollsystems, auch seine wichtigsten Systemmerkmale im Detail ausgeführt und dokumentiert.

1. Anforderungsprofil des neuen Kontrollsystems

In diesem Kapitel werden die Beschleunigeranlagen des Physikalischen Instituts der Universität Bonn beschrieben, und die Experimente-Anforderungen an die Elektronen-Stretcher-Anlage ELSA herausgearbeitet. Es ergibt sich hiermit ein Anforderungsprofil für ELSA zur Bereitstellung des Nachbeschleunigungsbetriebs, woraus sich strahldiagnostische und informationstechnische Aufgabenstellungen für das neue Kontrollsystem ableiten lassen.

1.1 Elektronen-Stretcher-Anlage ELSA

Das Physikalische Institut der Universität Bonn betreibt eine Kette von drei Elektronenbeschleunigern. Sie besteht aus einem 20 MeV-Linearbeschleuniger, einem im Jahre 1967 in Betrieb genommenen 2.5 GeV-Synchrotron [2] und der 3.5 GeV Elektronen-Stretcher-Anlage ELSA [5][49][48] sowie den Strahltransportsystemen zwischen diesen Einheiten und zu den Experimenten.

Eine thermische Elektronenquelle liefert 120 keV-Elektronen mit einem maximalen Elektronenstrom von 1.5 A und einer Pulslänge von 1 μ sec. Die 120 keV-Elektronen werden in einem 3.0 GHz Wanderwellen-Linearbeschleuniger [2] auf eine Endenergie von 20 MeV, bei einem max. Strom von 0.5 A, beschleunigt. Davon liegen ca. 150 mA innerhalb einer Energiebreite von 0.5%. In einem Energiekompressorsystem werden sie annähernd an die Energieakzeptanz des nachfolgenden 2.5 GeV-Synchrotrons angepaßt. Zur Erzeugung polarisierter Elektronen wird eine Quelle aufgebaut, welche das Prinzip der photoinduzierten Emission von Elektronen aus einem GaAs-Kristall benutzt und einen Strahl mit einem Polarisationsgrad von max. 50 % liefern soll [25].

Zur Zeit wird ein weiterer 20 MeV-Linearbeschleuniger mit einer speziell darauf abgestimmten GaAs-Quelle für polarisierte Elektronen aufgebaut [110].

Beim 2.5 GeV-Synchrotron ist in einem physikalischen Magneten sowohl Strahlablenkung als auch Strahlfokussierung vereinigt („Combined Function“-Maschine). Es arbeitet netzsynchron mit einer Wiederholrate von 50 Hz; sein Magnetfeld $B_s(t)$ setzt sich aus einer konstanten Vormagnetisierung B_v und einer sinusförmigen Modulation $B_0 \sin \omega t$, mit $\omega = 2\pi \cdot 50 \frac{1}{s}$, zusammen:

$$B_s(t) = B_v + B_0 \sin \omega t.$$

In das 2.5 GeV-Synchrotron wird bei einer Energie von 20 MeV über 4-5 Umläufe¹ mit einer Wiederholrate von 50 Hz injiziert. Das Hochfrequenzsystem des Synchrotrons arbeitet mit einer Frequenz von 500 MHz, so daß Elektronen aus dem 3.0 GHz Linearbeschleuniger in diese Struktur umgeordnet werden und schließlich nach der Injektion alle 116 Buckets² des Synchrotrons möglichst gleichmäßig bevölkert sind. Im Anschluß an die Injektion beschleunigt das Synchrotron die Elektronen in ca. 10 ms auf eine einstellbare Endenergie. Bis zur Errichtung von ELSA erfolgte eine langsame Extraktion über etwa 1 ms [111]. Nach Abschluß der Extraktion werden die Magnete des Synchrotrons wieder auf die Einschußenergie zurückgefahren. Obwohl mit diesen Bedingungen ein makroskopisches Tastverhältnis – die Zeit, in der extrahierte Elektronen für ein Experiment zur Verfügung steht, im Verhältnis zur Zykluszeit des Synchrotrons – von ca. 5 % möglich wäre, ist maximal ein Tastverhältnis von ca. 3.4 % erreicht worden [94]. Das 2.5 GeV-Synchrotron lieferte sowohl externe Elektronenstrahlen für Elektronenstreuexperimente wie auch reelle Photonen, die an einem Bremsstrahltarget im Synchrotronring erzeugt wurden.

Experimente mit Nachweis von mehreren Teilchen im Endzustand, insbesondere Experimente mit energiemarkierten Photonen, erfordern einen primären Elektronenstrahl mit möglichst gleichmäßiger Zeitstruktur (am günstigsten wäre ein Gleichstrom), da für diesen Fall die Rate registrierter Teilchen am Experiment, welche nicht kausal zusammenhängen (zufällige Koinzidenzen) am geringsten ist. Für diesen Fall ist die vom

¹Die Umlaufzeit der Elektronen im Synchrotron beträgt 232 ns und die Pulslänge des vorgeschalteten Linearbeschleunigers ca. 1 μ s, so daß eine Injektion über 4-5 Umläufe erforderlich ist.

²Die Harmonischenzahl h_s des Synchrotrons ergibt sich aus der Periodendauer der Hochfrequenz $T_{hf} = 2$ ns und der Umlaufzeit T_u des Synchrotrons von 232 ns zu: $h_s = \frac{T_u}{T_{hf}} = 116$.

Experiment tolerierbare Intensität des primären Elektronenstrahls maximal und damit die Gesamtmeßzeit für eine ausreichende Statistik minimal.

Das 2.5 GeV-Synchrotron war hierfür ungeeignet und die Beschleunigeranlagen des Physikalischen Instituts wurden 1987 durch die Elektronen-Stretcher-Anlage ELSA [48][49] erweitert. Zum einen ist ELSA dafür vorgesehen, den Experimenten einen Elektronenstrahl mit möglichst gleichmäßiger Zeitstruktur und einstellbarer Intensität anzubieten. Zum anderen eröffnet die Erhöhung der Endenergie bis auf 3.5 GeV neue Experimentiermöglichkeiten [97]. Seit der Inbetriebnahme von ELSA wird das 2.5 GeV-Synchrotron als Vorbeschleuniger und Injektionsmaschine für ELSA eingesetzt.

ELSA ist für einen Energiebereich von 0.5 GeV bis 3.5 GeV entwickelt worden. Um den anvisierten Energiebereich abzudecken muß ELSA den Elektronenstrahl **speichern** und nachbeschleunigen. Dazu ist ELSA als „Separated Function“-Maschine, d.h. Strahlablenkung und Strahlfokussierung erfolgt getrennt durch Dipol- und Quadrupolmagnete, aufgebaut, welche aus aus 16 FODO-Zellen besteht. Eine FODO-Zelle besteht aus einem horizontal fokussierenden (F)-Quadrupol, einer Driftstrecke (O), einem horizontal defokussierenden (D)-Quadrupol sowie einer weiteren Driftstrecke³.

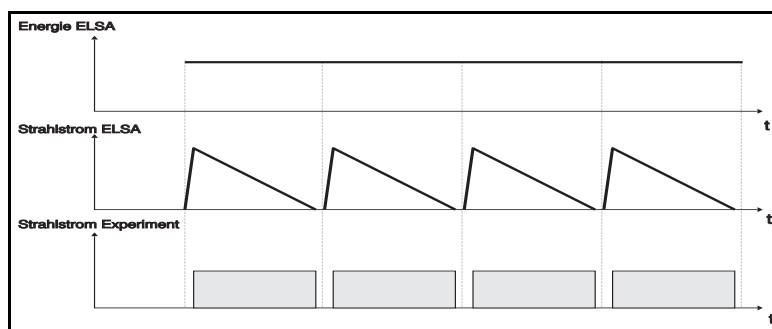


Abbildung 1.1: 50 Hz-Stretchermodus

Die grundlegende ELSA-Betriebsart ist der **Stretchermodus** (Abb. 1.1), bei dem das Synchrotron im 50 Hz-Rhythmus Elektronen nach ELSA transferiert und sich die Extraktion des Elektronenstrahls aus ELSA unmittelbar an das Ende der Injektion anschließt. Dieser Betriebsmodus wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit wegen seiner Wiederholrate von 50 Hz auch als 50 Hz-Stretchermodus bezeichnet. Bis zur nächsten Injektion wird der gespeicherte Elektronenstrahl durch eine langsame, drittelzahlige Resonanzextraktion mit zeitlich möglichst konstanter Intensität extrahiert [75]. In dieser Betriebsart wird die Extraktion immer nur für kurze Zeit durch die Injektion neuer Elektronen und die Vorbereitungen für deren anschließende Extraktion unterbrochen (dafür wird typischerweise 0.3 ms benötigt), so daß ein maximales Tastverhältnis von über 90 % möglich ist. Der 50 Hz-Stretchermodus ist im Energiebereich von 0.5 GeV bis zu 1.8 GeV möglich, da das Strahltransfersystem zwischen Synchrotron und ELSA bis zu dieser Energie ausgelegt ist⁴.

Für Experimente mit der Synchrotronstrahlung wird ELSA im **Speichermodus** (Abb. 1.2) betrieben. In dieser Betriebsart wird solange in ELSA injiziert, bis ein gewünschter zirkulierender Strom erreicht ist; es schließen sich eine Nachbeschleunigung des Elektronenstrahls auf typische Endenergien von 1.9 GeV bis 2.7 GeV, sowie die Speicherung des Strahls an. Für eine Endenergie von 2.3 GeV kann zur Zeit eine Strahllebensdauer von ca. 1 h bei 60 mA und ca. 2.5 h bei 20 mA erreicht werden.

Für höhere Endenergien als die im 50 Hz-Stretchermodus für Teilchenexperimente erreichbaren, wird der Elektronenstrahl in ELSA nachbeschleunigt und anschließend extrahiert (Abb. 1.3). Um ein akzeptables makroskopisches Tastverhältnis zu erreichen, muß die Rampzeit im **Nachbeschleunigungsmodus** durch eine entsprechend lange Extraktionszeit kompensiert werden. Lange Extraktionszeiten bei genügend hoher

³Neben Dipolmagneten und Quadrupolmagneten verfügt ELSA auch über Sextupolmagnete. Alle Magnettypen zusammengefasst werden im Text auch als Magnetfamilie bezeichnet.

⁴Der Winkel zwischen dem Transferkanal vom Synchrotron nach ELSA und der Tangente an die Elektronenbahn im Synchrotron am Extraktionspunkt mußte aufgrund der baulichen Gegebenheiten ca. 9 Grad betragen. Da für den Extraktionsmagneten des Synchrotrons nur 90 cm Platz zur Verfügung standen, kann die Extraktion aus dem Synchrotron mit einem technisch noch gut machbaren Magnetfeld von etwas über 1 T im Extraktionsmagneten nur bis ca. 1.8 GeV erfolgen [75]. Zur Zeit kann wegen technischer Schwierigkeiten mit dem Extraktionsmagneten nur bis zu einer maximalen Transferenergie von 1.6 GeV gearbeitet werden.

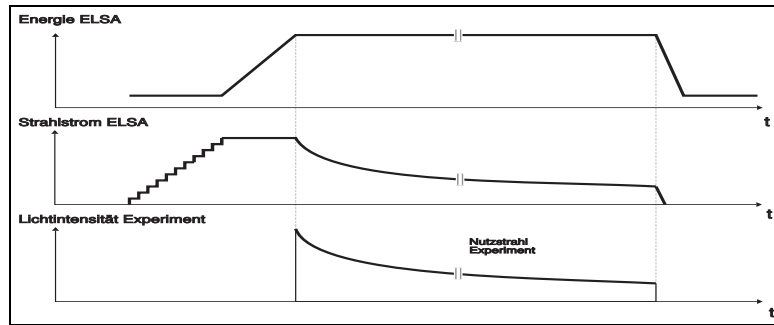


Abbildung 1.2: Speichermodus

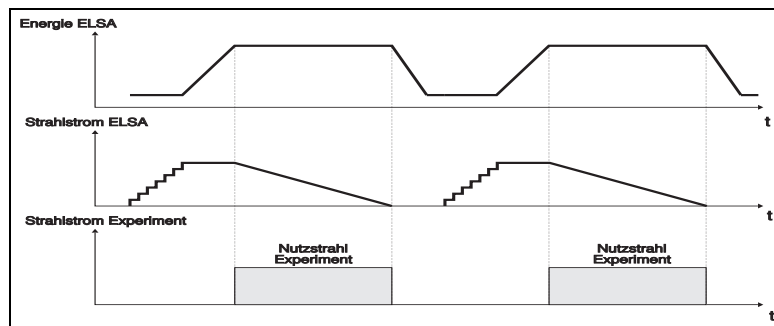


Abbildung 1.3: Nachbeschleunigungsmodus

Intensität des extrahierten Elektronenstrahls setzen einen ausreichenden Anfangsstrom zum Startzeitpunkt der Extraktion voraus. Er muß vor der Nachbeschleunigung durch mehrmalige Injektion mit der Wiederholrate des Synchrotrons akkumuliert werden, was dann allerdings wieder das makroskopische Tastverhältnis verschlechtert.

Eine gleichmäßige Zeitstruktur des extrahierten Strahls setzt eine möglichst homogene Füllung von ELSA mit Elektronen voraus. Da die Umlaufzeit in ELSA 548 ns beträgt, muß sich die Extraktion aus dem Synchrotron im 50 Hz–Stretchemodus zumindest über diesen Zeitraum erstrecken, d.h. die Extraktion muß ca. drei Synchrotronumläufe (Umlaufzeit 232 ns) andauern. Kann ELSA innerhalb einer Injektionsperiode nicht homogen gefüllt werden, zeigt der extrahierte Elektronenstrahl eine Periodizität im Takt der ELSA–Umlaufzeit. Die Synchrotronextraktion wurde von H.D.Nuhn in einer Dissertation [76] realisiert. Mit Hilfe der gewählten Extraktionsmethode ist es möglich, über einen Zeitraum von 600 ns bis 700 ns Elektronen aus dem Synchrotron zu extrahieren und nach ELSA zu transferieren. Drei Bumpermagnete, sie bezeichnen im System der Synchrotronextraktion gepulste Dipolmagnete mit Anstiegszeiten von etwa 500 μ s, leiten die Extraktion ein, indem sie eine lokale Sollbahnbeule erzeugen und den Elektronenstrahl an den für die Extraktion benötigten Septummagneten⁵ heranführen. Drei schnelle Kickermagnete, d.h. gepulste Dipolmagnete mit Anstiegszeiten im Bereich von 100 ns, bewirken die eigentliche Extraktion, indem sie den Elektronenstrahl in das Feldvolumen des Septummagneten einlenken. Vom Septummagneten gelangen die Elektronen mit immer größer werdenden Winkeln über ein Hauptseptum zum Extraktionsmagneten und werden nach ELSA transferiert.

Das Injektionssystem von ELSA wurde von A.Dreist aufgebaut [27]; es nutzt eine Sollbahnbeule, die durch drei schnelle Kickermagnete für kurze Zeit erzeugt wird; ELSA läßt sich damit über die gesamte Ringlänge füllen. Auf einen bereits umlaufenden Elektronenstrahl lassen sich weitere Elektronen injizieren, was insgesamt eine Strahlakkumulation bewirkt; sie ist Voraussetzung für Speichermodus und Nachbeschleunigungsmodus.

ELSA verfügt über zwei verschiedene Hochfrequenzsysteme. Sie bestehen aus einem System für Endenergien bis ca. 2.0 GeV mit einem 50 kW–Klystron an einem einzelligen HF–Resonator vom DORIS–Typ sowie einem

⁵Es handelt sich um einen gepulsten Strahlteiler mit besonders schmalen Septum (0.5 mm) zur Minimierung von Strahlverlusten.

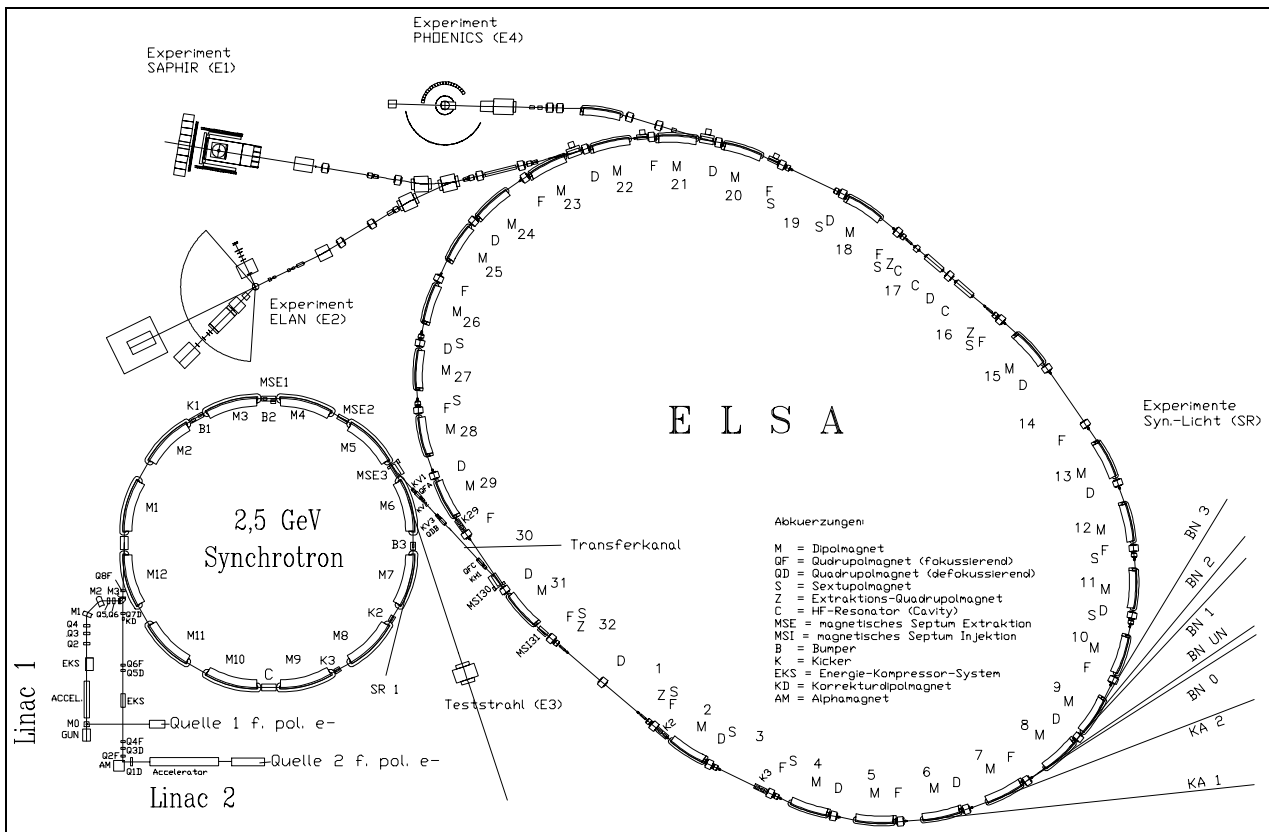


Abbildung 1.4: Die Beschleunigeranlage ELSA der Universität Bonn

größeren System für höhere Strahlenergien mit einem 250 kW-Klystron und zwei fünfzelligen Resonatoren vom PETRA-Typ. Die Hochfrequenzsysteme des Synchrotrons und von ELSA speist ein gemeinsamer Mutteroszillator, so daß eine starre Phasenbeziehung beider Hochfrequenzsysteme besteht.

Die Beschleunigeranlage des Physikalischen Instituts der Universität Bonn zeigt Abbildung 1.4.

1.2 Notwendigkeit eines neuen Kontrollsystems

Im Rahmen einer Dissertationsarbeit wurde für ELSA ein computergestütztes Kontrollsystem erstellt [115]. Es beruhte auf einer Zentralrechnerlösung VAX 11/750 der Firma Digital Equipment in Kombination mit einem vorgeschalteten und räumlich verteilten Feldbussystem. Die Feldbusprozessoren stellen die unterste, intelligente Schnittstelle zu den Endgeräten dar und basieren auf dem Mikroprozessor 8085. Über zwei serielle Datenleitungen und einen speziellen Peripheriebus-Adapter war das Feldbussystem mit dem Zentralrechner verbunden. Die Bedienung des Kontrollsystems erfolgte durch eine Graphikhardware mit Eingabemöglichkeit über Rollbälle und Tastatur, welche direkt an den internen Peripheriebus des Zentralrechners gekoppelt war.

Dieses Kontrollsystem ist den Anforderungen für Aufbau und Inbetriebnahme von ELSA gerecht geworden. Es deckte zusammen mit dem EPOS-System [37][81] die Bedürfnisse an den Maschinenbetrieb im 50 Hz-Stretchermodus und im Speichermodus für Synchrotronlichtexperimente ab⁶. Eine Analyse des alten Kontrollsystems [43] im Rahmen der vorliegenden Arbeit ergab, daß ein reproduzierbarer Nachbeschleunigungsbetrieb damit nicht zu realisieren war.

Das System konnte nur zwei globale Synchronisierungssignale (Trigger) ausliefern. Es war nicht möglich, verschiedene Subsysteme (z.B. Magnetfamilien, Hochfrequenzanlage, schnelle Extraktions-Quadrupole etc.)

⁶EPOS ist gleichermaßen als Strahl diagnose- und Steuersystem konzipiert. Als Strahl diagnoseinstrument wurden seine Fähigkeiten auf dem Feld der digitalen Signalverarbeitung von Strahl data aus dem ELSA-Monitor system entwickelt. Die Steuer- und Kontrollfunktionen von EPOS werden insbesondere zur Einstellung, Ablaufsteuerung und -überwachung des Synchrotronlichtbetriebs eingesetzt.

zu einem bestimmten Zeitpunkt eines ELSA-Zyklus zu aktivieren. Zwar konnten Subsysteme durch zeitlich variable Steuerkurven angesprochen werden; deren mögliche Maximallänge, bei guter zeitlicher Auflösung, war aber eingeschränkt. Die Ansteuerung der Extraktionsquadrupole bei guter zeitlicher Auflösung erlaubte eine maximale Extraktionszeit von nur etwa 67 ms. Das Kontrollsystem verwaltete die Datenwerte von Parametern der Beschleunigeranlage in 16 Bit-Worten, welche für Erweiterungen ungeeignet waren. Weder die Hardware- noch die Softwarebestandteile waren in ihren Strukturen erweiterbar. Damit war die Gesamtleistungsfähigkeit nicht ausbaubar und notwendige Kapazitätserhöhungen für den Nachbeschleunigungsbetrieb nicht durchzuführen. Besonders rechen- und speicherintensive Operationen für den Nachbeschleunigungsmodus sowie die Verarbeitung von Daten aus der Strahldiagnose mit fortgeschrittenen Methoden waren im Rahmen dieses Kontrollsystems nicht ausführbar. Lediglich EPOS ermöglichte Strahldiagnoseuntersuchungen, seine Leistungsfähigkeit war allerdings wegen der eingeschränkten Rechenkapazität nicht voll nutzbar. Das ELSA-Monitoring-System [93] und das Korrektorsystem waren nicht vollständig in das Kontrollsystem integriert und konnten nur durch das EPOS-System zugänglich gemacht werden. Eine Verlagerung von fortgeschrittenen Berechnungen zur Geräteseite war durch die geringe Prozessorleistungsfähigkeit und unzureichende Speicherkapazität der Feldbusrechner nicht praktikabel. In der Hauptsache verwaltete das Kontrollsystem technische Größen auf Basis von Strömen und Spannungen; eine beschleunigerphysikalische Sichtweise wurde von der Kontrolle nur in wenigen Fällen angeboten. Wartungs- und Serviceaufwendungen der veralteten Hardware stehen aus heutiger Sicht in keinem Verhältnis zu der Leistungsfähigkeit der Gesamtanlage.

Alle Punkte zusammengenommen machen deutlich, daß das alte Kontrollsystem die Hardware- und Softwaretechnik von 1983 widerspiegelt; es konnte die Aufgaben im Nachbeschleunigungsmodus nicht abdecken.

Das Feldbussystem ließ sich wegen seiner Standzeiten und seiner Störsicherheit zur Ansteuerung der überwiegenden Mehrzahl aller Endgeräte weiterhin verwenden. Insgesamt befinden sich ca. 80 Feldbusprozessoren, gruppiert in 30 Überrahmen („Crates“), im räumlichen Bereich der Bonner Beschleunigeranlagen. Diese Anzahl von Baugruppen stellt eine bedeutende Investition dar, die auch in Zukunft gesichert sein soll. Aus der Entscheidung zur Weiterverwendung des Feldbussystems ergibt sich die Forderung an das neue Kontrollsystem, das Feldbussystem unter weitgehender Berücksichtigung seiner Randbedingungen einzubinden.

1.3 Experimente an ELSA und deren Anforderungen

Die an ELSA aufgebauten Koinzidenzexperimente sind darauf ausgelegt, daß ihnen ein Quasigleichstrom kontrollierbarer Intensität bereitgestellt wird. Zur Bewertung der Zeitstruktur im extrahierten Elektronenstrahl wird das Tastverhältnis verwendet.

1.3.1 Mikroskopisches und makroskopisches Tastverhältnis

ELSA soll einen externen Elektronenstrahl mit möglichst hohem Tastverhältnis zur Verfügung stellen. Dabei gibt das Tastverhältnis an, wie nahe ein zeitlich veränderlicher Strom $I(t)$ einem zeitunabhängigem Strom I_{const} entspricht. Für eine bestimmte Meßdauer T wird das Tastverhältnis $dc(T, I(t))$ definiert durch

$$dc(T, I(t)) := \frac{\left(\frac{1}{T} \int_0^T I(t) dt\right)^2}{\frac{1}{T} \int_0^T I^2(t) dt} = \left(\frac{I_{avg}}{I_{eff}}\right)^2 = 1 - \left(\frac{\sigma}{I_{eff}}\right)^2, \quad (1.1)$$

d.h. als der quadrierte Quotient aus Mittelwert und Effektivwert des extrahierten Stroms $I(t)$. Das Tastverhältnis wird um so schlechter, je größer das Verhältnis zwischen der dynamischen und der statischen Komponente (dargestellt durch die Standardabweichung σ bzw. den Effektivwert I_{eff}) im extrahierten Strom $I(t)$ ist. Ein Tastverhältnis von 1 entspricht einem Gleichstrom.

Im Fall eines Stroms, der aus Rechteckpulsen besteht, ist das Tastverhältnis gleich dem Verhältnis aus Pulsdauer zu Periodendauer.

Das **makroskopische Tastverhältnis** dc_M wird durch die ELSA-Betriebsart und den damit verbundenen Zyklus bestimmt. Es nimmt im Nachbeschleunigungsmodus die ungünstigsten Werte an. Durch das Verhältnis aus Extraktionszeit τ_{ext} zur Gesamtzykluszeit τ_{zyklus} ist das makroskopische Tastverhältnis bestimmt:

$$dc_M = \frac{\tau_{ext}}{\tau_{zyklus}}. \quad (1.2)$$

Unter dem **mikroskopischen Tastverhältnis** dc_m wird das erreichbare Tastverhältnis während der tatsächlichen Extraktionsphase verstanden. Zeitabschnitte, in denen wegen des eingestellten Betriebszyklus keine Extraktion möglich ist, bleiben unberücksichtigt.

Das Gesamttastverhältnis für ELSA dc_{elsa} setzt sich aus dem makroskopischem und dem mikroskopischem Tastverhältnis zusammen:

$$dc_{elsa} = dc_M \cdot dc_m. \quad (1.3)$$

Koinzidenzexperimente bestimmen das Tastverhältnis aus den Raten ihrer Zählerelektroniken für den Zeitraum der Extraktion und messen damit das mikroskopische Tastverhältnis. Dabei ist die mittlere Rate der zufälligen Koinzidenzen R_z proportional dem Produkt der mittleren Zählraten R_1 und R_2 der beiden Zähler zwischen denen die Koinzidenz geschaltet ist multipliziert mit der Auflösungszeit $\Delta\tau$ der Zählerapparatur und umgekehrt proportional dem Tastverhältnis dc :

$$dc = \frac{R_1 R_2}{R_z} \Delta\tau. \quad (1.4)$$

Die Auflösungszeit der Triggerelektroniken der Experimente an ELSA beträgt typischerweise 10 ns. Einzelne Detektorkomponenten (z.B. für Flugzeitmessungen) haben eine Auflösungszeit von kleiner als 1 ns. Die Angabe des Tastverhältnis macht demnach nur zusammen mit der Zusatzangabe der Auflösungszeit $\Delta\tau$, für welche das Tastverhältnis bestimmt wird, einen Sinn. Die Definition 1.1 ist entsprechend aufzufassen.

In der Realität zeigt der aus ELSA extrahierte Elektronenstrahl auf unterschiedlichen Zeitskalen periodische Strukturen. Die Zyklusdauer im 50 Hz–Stretcher-, wie auch im Nachbeschleunigungsmodus definiert eine Zeitstruktur von 20 ms bis eine Minute. Durch eine ungleichmäßige ELSA–Füllstruktur ergibt sich eine Periodizität auf einer Zeitskala von 548 ns. Die Hochfrequenzbunchstruktur des Elektronenstrahls erzeugt eine 2 ns Zeitstruktur.

Die Auflösungszeit $\Delta\tau$ bestimmt, welche periodischen Strukturen für ein Experiment erkennbar sind: Das Tastverhältnis verschlechtert sich sprunghaft, wenn im extrahierten Strahl eine weitere Struktur sichtbar wird, wenn also $\Delta\tau$ kleiner als die charakteristische Zeitkonstante einer Struktur gewählt wird. Die Ursache für diesen Effekt liegt in der Faktorierbarkeit des Tastverhältnisses, falls der Strom eine mehrfache Periodizität mit zeitlichen Längen von $\tau_1 > \tau_2 > \dots > \tau_n$ aufweist. Bei einer Meßzeit $T > \tau_1$ und einer Auflösungszeit $\Delta\tau \ll \tau_n$ gilt:

$$dc(T, I(t), \Delta\tau) = dc_1(T, \tau_1) \cdot dc_2(\tau_1, \tau_2) \cdot \dots \cdot dc_{n+1}(\tau_n, \Delta\tau).$$

Das Tastverhältnis ist damit immer kleiner oder gleich dem kleinsten partiellen Tastverhältnis dieses Produktes und hängt von der Meßauflösung $\Delta\tau$ und der Meßdauer T der Messung ab [12].

Dominant für ELSA sind das Tastverhältnis der Füllstruktur und das makroskopische Tastverhältnis aufgrund des eingestellten Betriebszyklus.

1.3.2 Mittelenergiephysikteilchenexperimente

Die Teilchenexperimente an ELSA sind im Bereich der mittlereenergetischen Hadron- und Kernphysik ⁷ angesiedelt, welche ein Bindeglied zwischen Kernphysik und Hochenergiephysik bzw. Elementarteilchenphysik darstellt. Die Kernphysik beschreibt die Kernkräfte und die Wechselwirkung von Nukleonen durch Mesonenaustausch, was im Bereich großer Nukleonenabstände zu befriedigenden Ergebnissen führt. Die Hochenergiephysik untersucht die Wechselwirkung der Nukleon–Konstituenten (Quarks) für den Fall sehr kleiner Abstände; hierbei können die Quarks als quasifreie Teilchen aufgefaßt werden, die durch Gluonenaustausch untereinander wechselwirken. Die Mittelenergiephysik beschreibt die Kernkräfte unter Berücksichtigung der inneren Nukleon–Quarkstruktur und trägt in diesem Bereich zum Verständnis des mikroskopischen Aufbaus der Materie bei.

Um Fragestellungen der Mittelenergiephysik zu erforschen, werden im Physikalischen Institut der Universität Bonn drei Teilchendetektoren PHOENICS, SAPHIR und ELAN eingesetzt, deren Anforderungen für den ELSA–Betrieb maßgebend sind. Alle Experimente benötigen ein möglichst hohes Tastverhältnis; sie haben unterschiedliche Anforderungen bzgl. Energie und Intensität des extrahierten Elektronenstrahls.

⁷Die mittlereenergetische Hadron- und Kernphysik wird in diesem Text abgekürzt als Mittelenergiephysik bezeichnet.

Das PHOENICS-Experiment benutzt einen Großraumwinkel-Detektor und ein Taggingssystem zur Erzeugung energiemarkierter, reeller Photonen, ausgelegt für Strahlenergien bis zu 1.2 GeV [22]. Das Taggingssystem deckt dabei einen Photonenenergiebereich von 20%-95% der Primärstrahlenergie ab. PHOENICS kann in der gegenwärtigen Ausbaustufe Zweiteilchen-Endzustände untersuchen. Koinzidenzbedingungen innerhalb der Detektoranlage begrenzen die ausnutzbare Intensität auf etwa 10^7 Photonen/sec für ein Tastverhältnis des Elektronenstrahls in der Nähe von 100 %. Es sind Doppelpolarisationsexperimente geplant, bei denen von polarisierten Photonen induzierte Reaktionen am Nukleon untersucht werden sollen. Polarisierte Protonen- sowie Deuteronentargets sollen dazu eingesetzt werden. Für PHOENICS ist keine Nachbeschleunigung erforderlich, da der Energiebereich des Experiments im 50 Hz-Stretchermodus abgedeckt werden kann. Für PHOENICS besteht die Aufgabe das mikroskopische Tastverhältnis weiter zu steigern.

Der Großraumwinkel-Detektor SAPHIR ist zur Untersuchung von Reaktionen energiemarkierter Photonen an Nukleonen und leichten Kernen mit Vielteilchen-Endzuständen bis zu den höchsten an ELSA verfügbaren Energien konzipiert [95]. SAPHIR ist in der Lage, nahezu alle geladenen und einige ungeladene Reaktionsprodukte in einem unabgeschatteten Raumwinkelbereich von 2.3π , sowie die Photonenenergie in einem großen Energiebereich zu messen [71]. Im jetzigen Ausbau des Taggingssystems zeigen die verwendeten Zählerbaugruppen Sättigungserscheinungen bei einer Taggingrate größer als 500 kHz, was eine Verschlechterung der Zeitauflösung bewirkt [95]. Für die nächsten anstehenden Untersuchungen der Reaktionen $\gamma p \rightarrow \omega p$ - Suche nach neuen Resonanzen - und $\gamma p \rightarrow K$ -Hyperon-Erzeugung, muß für SAPHIR ein Elektronenstrahl der Energie 3.3 GeV bereitgestellt werden. Insbesondere soll in der letztgenannten Reaktion mit linear polarisierten Photonen gearbeitet werden, wobei die maximale Polarisation bei der Hälfte der Primärenergie erreicht wird. Zur Zeit ist nicht das Taggingssystem des SAPHIR-Detektors der limitierende Faktor für die Intensität des primären Elektronenstrahls, vielmehr wird bereits unterhalb einer kritischen Rate zufälliger Koinzidenzen die Ereignisrate in der zentralen Driftkammer zu hoch, was ein Abschalten der Kammer bewirkt. Die e^+e^- -Paarbildung ist die Reaktion, welche am häufigsten bei SAPHIR auftritt. Sie belastet die zentrale Driftkammer mit einer hohen Untergrundrate und begrenzt die Photonrate für das Experiment auf ca. 200 kHz bis 300 kHz (entspricht für die gegebene Experimentenanordnung einem externen Elektronenstrom von ca. 20 pA). Dies bedeutet, daß SAPHIR nicht nur ein hohes Tastverhältnis benötigt, sondern daß ebenfalls eine obere Stromgrenze des primären Elektronenstrahls nicht überschritten werden darf. Zur Zeit werden Umbauarbeiten und weitere Verbesserungen am SAPHIR-Detektor ausgeführt, um die Untergrundverhältnisse zu optimieren. Für die Zukunft bedeutet dies, daß SAPHIR mit einer bis zu einem Faktor 5 höheren Photonrate [96], also auch einem höheren primären Elektronenstrom, versorgt werden muß.

Das ELAN-Experiment untersucht elektroinduzierte Reaktionen am Nukleon oder an leichten Kernen. Zum Nachweis der Reaktionsprodukte wird eine hochauflösende Zweiarms-Spektrometer-Anordnung mit einem nutzbaren Energiebereich von 0.2 GeV - 1.9 GeV eingesetzt. Die Anordnung besteht aus einem magnetischen Elektronen-Spektrometer zum Nachweis der gestreuten Elektronen, und aus einem Flugzeit-Hadronen-Spektrometer, das abhängig von der zu untersuchenden Reaktion aufgebaut wird [90]. Zur Bestimmung des elektrischen Neutron-Formfaktors soll in einem Doppelpolarisationsexperiment die Streuung von polarisierten Elektronen an polarisierten Neutronen gemessen werden [97]. Dazu ist ein polarisiertes ND_3 -Target vorgesehen, wobei ELSA einen polarisierten Elektronenstrahl bereitstellen soll. Weitere zukünftige Experimente an ELAN beschäftigen sich mit der Prüfung der Drell-Hearn-Gerasimov-Summenregel, welche eine Messung des totalen Wirkungsquerschnittes der Streuung zirkular polarisierter Photonen an polarisierten Nukleonen für die Fälle paralleler und antiparalleler Spins erfordert. ELAN hat neben der Forderung nach möglichst hohem Tastverhältnis die höchsten Anforderungen an den externen Elektronenstrom. Abhängig von der Spektrometereinstellung und der zu messenden differentiellen Wirkungsquerschnitte schwankt der gewünschte externe Elektronenstrom zwischen ca. 10 nA und 100 nA. Für die nächsten Messungen der Quadrupolanregung der Δ^+ -Resonanz am Proton [53] und besonders der Quadrupolanregung des Übergangs $N \rightarrow \Delta$ am Neutron [61] soll ELSA eine Endenergie von 2.0 GeV bis 2.2 GeV bereitstellen.

1.3.3 Nachbeschleunigung, makroskopisches Tastverhältnis und Hochstromproblematik

Wie gezeigt wurde, benötigen die Experimente ELAN und SAPHIR Endenergien, wie sie nur im Nachbeschleunigungsmodus von ELSA erreichbar sind. Zur Veranschaulichung wird zunächst ein einfaches Schema des Nachbeschleunigungsbetriebs vorgestellt (Abb. 1.5). Der Nachbeschleunigungsmodus zerfällt danach in vier Phasen: Injektion, Rampphase von Injektionsenergie auf Extraktionsenergie, Extraktionsphase und

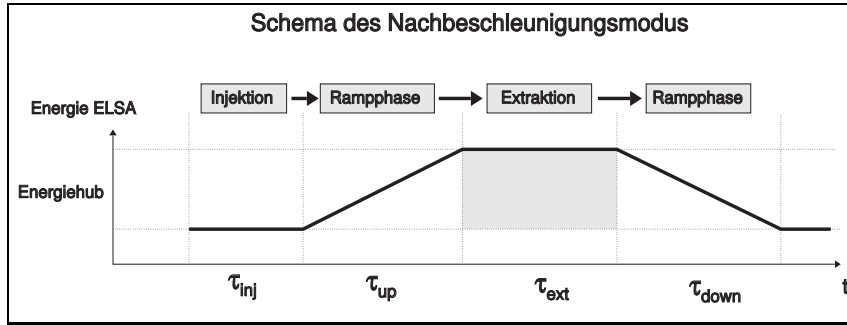


Abbildung 1.5: Grundlegendes Schema des Nachbeschleunigungsmodus

Rampphase von Extraktionsenergie auf Injektionsenergie. Diese wiederholen sich periodisch und sind durch ihre jeweilige Zeitdauer gekennzeichnet. Das makroskopische Tastverhältnis für den Nachbeschleunigungsmodus läßt sich aus Abbildung 1.5 ablesen:

$$dc_M = \frac{\tau_{ext}}{\tau_{inj} + \tau_{up} + \tau_{ext} + \tau_{down}}. \quad (1.5)$$

Die Gesamtzykluszeit τ_{zyklus} beträgt $\tau_{inj} + \tau_{up} + \tau_{ext} + \tau_{down}$. Das erreichbare makroskopische Tastverhältnis ist durch die Länge der Injektionsphase – ein genügend hoher Ausgangsstrom muß durch wenige Injektionen erreicht werden – und die Längen der Rampphasen – wegen technischer Randbedingungen⁸ oder physikalische Phänomene⁹ – nach oben begrenzt.

Ein akzeptables makroskopisches Tastverhältnis läßt sich nur durch eine entsprechend lange Extraktionsphase erreichen. Für lange Extraktionszeiten mit einer genügend hohen Intensität des extrahierten Elektronenstrahls am Experiment, muß zunächst ein hoher Strom möglichst schnell akkumuliert, gespeichert, ohne Verluste nachbeschleunigt und gleichmäßig extrahiert werden. Eine Beispielrechnung verdeutlicht den Sachverhalt: Angenommen, die Extraktionseffizienz ϵ – die zum Experiment während der Extraktion transportierte Ladungsmenge im Verhältnis zur verfügbaren Ladungsmenge am Anfang der Extraktion – sei über die gesamte Extraktionsperiode konstant 50 %, die Extraktionszeit τ_{ext} sei 3 s, der mittlere Elektronenstrom am Experiment I_{ext} sei 10 nA, dann ergibt sich über die Beziehung 1.6

$$I_{inj} = \frac{1}{\epsilon} I_{ext} \frac{\tau_{ext}}{T_{elsa}} \quad (1.6)$$

ein dazu notwendiger Ausgangsstrom I_{inj} von etwa 109 mA (die ELSA-Umlaufzeit T_{elsa} beträgt 548 ns). Das Verhalten von ELSA für diese hohen Ströme muß untersucht werden. Diese Fragestellung folgt unmittelbar aus dem Nachbeschleunigungsmodus.

Die Anzahl von Injektionen in ELSA durch Schüsse des vorgeschalteten Synchrotrons während der Injektionsphase wird durch den Ausgangsstrom für die Extraktion bestimmt. Angenommen, die Transfereffizienz ϵ_s zwischen Synchrotron und ELSA beträgt 50 % und das Synchrotron beschleunigt einen mittleren Strom von 10 mA, so muß es, um einen Strom von etwa 100 mA in ELSA zu akkumulieren, rund fünfzigmal in ELSA injizieren; die Injektionszeit beträgt somit 1 s. In dieser Abschätzung ist die Injektionseffizienz von ELSA mit 1 angenommen.

Durch die Vorgabe eines gewünschten makroskopischen Tastverhältnis dc_M ist eine Mindestdauer für die Extraktionsphase festgelegt:

$$\tau_{ext} \geq \frac{\tau_{inj} + \tau_{up} + \tau_{down}}{\frac{1}{dc_M} - 1}. \quad (1.7)$$

Die Netzgeräte der ELSA-Hauptmagnete lassen zwei Betriebsarten zu:

1. Im „langsamen“ Rampbetrieb ist die maximale Energieänderung $\frac{dE}{dt}$ durch die maximale Änderungsgeschwindigkeit des Stroms $\frac{dI}{dt}$ der Dipol-Netzgeräte auf $1.0 \frac{GeV}{s}$ beschränkt.

⁸Die maximale Änderungsgeschwindigkeit des Stroms $\frac{dI}{dt}$ der Magnetnetzgeräte setzt eine obere Grenze.

⁹Ein Strahlverluste kann z.B. durch Resonanzerscheinungen infolge von Arbeitspunkt-, oder Chromatizitätsschwankungen in der Rampphase auftreten.

2. In der „schnellen“ Betriebsart ist eine maximale Energieänderung $\frac{dE}{dt}$ von $8.5 \frac{GeV}{s}$ durch die gezielte Aktivierung eines Zusatznetzgerätes¹⁰ erreichbar.

Für einen Energiehub von 2.0 GeV ergeben sich in den beiden Betriebsarten Mindestrampzeiten von 2.0 s bzw. 0.24 s. Variiert man das makroskopische Tastverhältnis in der Beziehung 1.7 zwischen 50 % und 95 % und nimmt eine Injektionszeit von 1.0 s an, so ergibt sich unter Berücksichtigung der Beziehung 1.7 die Abbildung 1.6. Die untere Kurve zeigt die Verhältnisse für eine Mindestrampzeit von 0.24 s, die obere

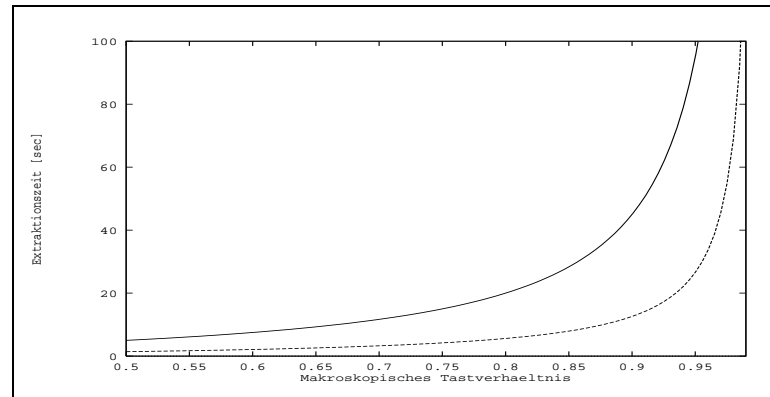


Abbildung 1.6: Extraktionsdauer in Abhängigkeit vom makroskopischen Tastverhältnis

Kurve für 2.0 s. Für eine Rampzeit von 2.0 s ergeben sich Extraktionszeiten von größer als 10.0 s, falls ein makroskopisches Tastverhältnis von größer als 75 % erreicht werden muß. Soll das makroskopische Tastverhältnis bis auf größer als 90 % gesteigert werden, wachsen die Extraktionszeiten auf ca. 50 s an. Im schnellen Rampbetrieb sind dafür immerhin noch Extraktionszeiten von ca. 10 s erforderlich. Insgesamt bedeutet dies, daß ein Nachbeschleunigungszyklus im langsamen Rampbetrieb mehrere 10 s bis zu einer Minute in Anspruch nehmen kann.

Im schnellen Rampbetrieb mit kleinem Energiehub kann die Injektionszeit die Rampzeiten übertreffen und eine nicht zu vernachlässigende Reduzierung des makroskopischen Tastverhältnis bewirken. Die Akkumulation hoher Ströme zur Erreichung langer Extraktionszeiten ist also stets gegen die damit verbundene Verlängerung der Injektionszeit abzuwägen.

1.4 Aufgabenstellung an die Kontrolle im Nachbeschleunigungsmodus

In diesem Abschnitt wird das bisher beschriebene Anforderungsprofil durch zusätzliche Randbedingungen weiter ausgebaut und technische Aufgabenpunkte für das neue Kontrollsystem abgeleitet. Dabei wird ein Modellansatz zur Realisierung des Nachbeschleunigungsbetriebs entwickelt, welcher über typische Merkmale eines Beschleunigerkontrollsystems hinausgeht.

1.4.1 Grundlegende Aufgabenstellungen

Basisanforderung an das neue Kontrollsystem ist die Steuerung und die Überwachung – wenn möglich auch die Kontrolle¹¹ – sowie zeitgenaue Synchronisierung aller Komponenten des Beschleunigers in den verschiedenen Betriebsarten. Durch definierte Abstimmung dieser Grundaufgaben ist die Einstellung eines Betriebszyklus sicherzustellen. Aus den Erfahrungen der Vergangenheit lassen sich die Aufgabenpunkte zusammentragen.

¹⁰In die Dipolnetzgeräte wurden aktive Filter zur Reduzierung des Magnetfeldripples eingebaut, so daß die ursprünglich geplante Rampzeit von 150 ms für einen Energiehub von 1.8 GeV auf 3.5 GeV [115] auf ca. 200 ms heraufgesetzt wurde. Das Zusatznetzgerät muß 5 ms vor Überschreitung der kritischen Rampgeschwindigkeit von $1.0 \frac{GeV}{s}$ aktiviert, und kann frühestens 5 ms nach Unterschreitung der kritischen Steigung deaktiviert werden. Für diese Situation wird das Zusatznetzgerät 5 ms vor den Rampphasen des Nachbeschleunigungsmodus für die gesamte Rampzeit zugeschaltet.

¹¹Die Kontrolle wird gesondert erwähnt, da hiermit eine unmittelbare Rückwirkung (Regelung) auf die Beschleunigeranlage in Abhängigkeit eines Istsignals impliziert wird. Die reine Steuerung erfordert kein Istsignal.

Das neue Kontrollsystem muß den im alten Kontrollsystem rudimentär vorhandenen Ansatz eines **ereignisgetriebenen Datenflusses** konsequent verwirklichen. Er muß so ausgebaut werden, daß er sich als ein Hauptmerkmal des neuen Kontrollsystems zeigt.

Notwendige Voraussetzung zur Erfüllung der Basisanforderung ist eine Beobachtbarkeit aller relevanten Parameter. Beobachtungen des ELSA-Betriebs haben gezeigt, daß dazu eine **autonome Istwerterfassung** ein unverzichtbares Hilfsmittel für ein reibungsloses Funktionieren der Beschleunigeranlagen darstellt. Die autonome Istwerterfassung setzt eine periodische Messung des Istzustandes aller Geräte der Beschleunigeranlage durch eine Feldbus- oder Prozeßebene im Hertzbereich voraus. Die Istwerterfassung profitiert unmittelbar vom ereignisgetriebenen Datenfluß im Kontrollsystem, da sie nicht angefordert werden muß, sondern immer aktiv sein kann; sie schafft somit ein „lebendes“ Abbild des Maschinenzustandes im Kontrollsystem.

Das Kontrollsystem muß eine **Quasianalogsteuerung** für Parameter mit einer Wiederholrate von mindestens 20 Hz, soweit die Eigenschaften des Endgerätes dies zulassen, anbieten. Diese Anforderung hat nicht unerhebliche Konsequenzen für die Transaktionsrate, welche das neue Kontrollsystem bereitzustellen hat. Wird z.B. von einer Parametersollwertänderung eine Reihe von Berechnungen abgeleitet, so muß eine solche Operation ebenfalls mit dieser Rate erfolgen; nur dann ist eine quasianaloge Steuerung durch einen Anwender sicherstellt. Dies ist z.B. im Fall der ELSA-Energie gegeben, die eine Berechnung der Stärke aller Magnetfamilien und anderer Größen bewirkt, welche ihrerseits in Parameterwertänderungen resultieren. Kurzfristig kann somit die Steuerungsrate von 20 Hz für einen Parameter um eine Größenordnung übertroffen werden. Die Quasianalogsteuerung in Verbindung mit der autonomen Istwerterfassung erleichtert die Einstellung eines Betriebsmodus der Maschine bzw. macht ihre Verbesserung in einem sinnvollen Zeitraum erst möglich. Als Beispiel ist die Einstellung der Synchrotron-Extraktion und die darauf abgestimmte ELSA-Injektion zu nennen. Die Quasianalogsteuerung ist im Sinne des ereignisgetriebenen Datenflusses zu verwirklichen, d.h. eine Setzoperation ist als Ereignis aufzufassen, welches sich in den geforderten Gesamtdatenfluß einreicht.

Die gute **Bedienbarkeit** des Kontrollsystems ist unabdingbare Voraussetzung für eine ausreichende Benutzerakzeptanz. Dabei haben die verschiedenen Anwendergruppen (Operateure, Experimentatoren und Beschleunigerphysiker) erfahrungsgemäß unterschiedliche Bedürfnisse. Die Kontrollsystembedienung muß deswegen durch ein flexibles Instrument möglich sein, das leicht an z.B. spezielle Darstellungswünsche angepaßt werden kann. Die Interaktion und die Überwachung soll durch intuitive graphische Elemente (z.B. Potentiometer) unterstützt werden¹². Die standardmäßige Verbreitung von Workstations mit Fenstersystemen entspricht dem Stand der Technik, und deshalb soll auch für das ELSA-Kontrollsystem eine graphische Bedienungsoberfläche auf Fensterbasis entwickelt werden. Die Bedienungsoberfläche sollte möglichst flexible graphische Darstellungselemente bereithalten und eine wahlfreie Anordnung in Fenstern ermöglichen. Die Erstellung und Inbetriebnahme von neuen Darstellungsfenstern muß besonders einfach sein. Im Rahmen der Kontrollsystementwicklung muß eine Grundmenge von Darstellungsbildern für die Maschinensteuerung entworfen werden. Die Bedienbarkeit wird dadurch verbessert, daß Anfragen mit einer möglichst kurzen Reaktionszeit beantwortet werden. Das stellt hohe Anforderungen an die Reaktionsgeschwindigkeit des Kontrollsystems insgesamt, aber auch an die Schnelligkeit der Bedienungsoberfläche, welche entsprechende Reaktionen darstellen muß. Erst dadurch kann sie die für einen Benutzer erforderliche Darstellung des konsistenten Kontrollsystemzustandes übernehmen.

Ein Maschinenzustand ist das Ergebnis gezielter Einstellungsarbeiten der Beschleunigeranlage, dem ein iterativer Optimierungsprozeß vorausgegangen ist. Günstige Maschinenzustände müssen deshalb in einer Datenbank gesichert und archiviert werden sowie für spätere Einstellungen abrufbar sein.

Das Kontrollsystem muß ein **Spiegelbild** des Maschinenzustandes wiedergeben, in dem sowohl der Sollwert als auch der Istwertzustand gehalten wird. Damit wird die Fragestellung der Konsistenz des Kontrollsystemzustandes aufgeworfen, womit sich die Problemstellung der Kausalität im Kontrollsystem verknüpft¹³.

1.4.2 Kontrolle, Strahldiagnose und theoretische Modellbildung

Die Erfahrung mit dem alten ELSA-Kontrollsystem zeigt, daß eine Verwendung rein technischer Größen (Ströme und Spannungen) keine ausreichende Basis zur Kontrolle eines anspruchsvollen Betriebsmodus dar-

¹²Für Entwurf und Realisierung eines Kontrollsystems ist Darstellung und Interpretation des Gesamtzustandes durch eine, wie auch immer geartete visuelle Schnittstelle von geringer Bedeutung. Für die spätere Akzeptanz des Kontrollsystems durch die Anwender ist eine ergonomische und optisch ansprechende Bedienungsoberfläche von größter Relevanz; der Einstellbetrieb profitiert unmittelbar davon.

¹³Die Wichtigkeit der Kausalitätsforderung verdeutlicht die Beschreibung des realisierten Kontrollsystems im Abschnitt 2.6.

stellt. Das neue Kontrollsystem will eine **physikalische Sichtweise** auf die Beschleunigeranlagen anbieten (Verwendung von beschleunigerphysikalisch relevanten Größen wie Arbeitspunkte, Chromatizität etc.), also eine **Abstraktion** von einer technischen Sichtweise der Nachbeschleunigungsaufgabenstellung auf eine rein beschleunigerphysikalische Interpretation vollziehen. Dazu müssen beschleunigerphysikalische Berechnungen sowie Regelungen im Kontrollsystem integriert und ausgeführt werden. Dabei wird die Anzahl der tatsächlich notwendigen Einstellparameter von ELSA durch Kopplung in den Berechnungen auf ein Mindestmaß reduziert, was die Übersichtlichkeit verbessert und die Einstellung erleichtert. Der im Vergleich zum 50 Hz-Stretcherbetrieb umfangreichere Nachbeschleunigungsmodus verlangt nach einer physikalischen Darstellung relevanter Parameter, da auf dieser Basis das Verständnis von beschleunigerphysikalischen Effekten wachsen kann. Im 50 Hz-Stretchermodus kann die Wirkung einer Parametervariation auf den Teilchenstrahl instantan beobachtet werden. Im Nachbeschleunigungsmodus, welcher mehrere 10 Sekunden andauern kann, ist eine sofortige Eingriffsmöglichkeit nicht mehr gegeben, da die Wirkung auf eine Parameterveränderung erst nach Durchgang eines Zyklus zu beobachten ist. Eine Fehleinstellung führt in aller Regel zum Verlust eines oder mehrerer Zyklen und behindert damit den Betrieb in entscheidender Weise. Insgesamt ist im Nachbeschleunigungsbetrieb die Manipulierbarkeit – im Sinne der Häufigkeit von Parametervariationen – von Maschinenparametern, allein aus der gegebenen Problemstellung heraus, eingeschränkt. Das Kontrollsystem muß also weitgehende Automatismen, Berechnungen und Regelungen bereitstellen, welche die Notwendigkeit für Parametervariationen auf ein Mindestmaß reduziert.

Der Nachbeschleunigungsmodus verlangt eine Überprüfung durch Strahldiagnosesysteme. Die Strahldiagnose muß dabei sowohl Meßgrößen in Form von Strahlparametern liefern, welche eine Einstellung verbessern helfen, als auch Rohdaten, die mit fortgeschrittenen Methoden analysierbar sind und die physikalische Modellbildung verfeinern. Ein wichtiges Instrument zur Förderung des Maschinenverständnis ist der ELSA-Simulator, welcher von J.Wenzel in seiner Dissertation [113] zur Beschreibung der linearen und nichtlinearen Teilchenbewegung erstellt wurde.

Damit sich Kontrolle, Strahldiagnose und theoretische Beschreibungsweise ergänzen, müssen die Strahldiagnosesysteme und der ELSA-Simulator integraler Bestandteil des neuen Kontrollsystems sein. Die Summe bisheriger Betrachtungen macht einen Ansatz¹⁴ einsichtig, welcher sich zur Realisierung des Nachbeschleunigungsmodus auf drei Grundbausteine stützt (Abb. 1.7).

Die Grundlage der Kontrolle ist ein von der Beschleunigerphysik unabhängiges Kernkontrollsystem. Auf diesem Fundament wird eine Abstraktionsebene zur Herstellung der beschleunigerphysikalischen Gesamt-sicht eingeführt. Die Einbindung der Strahldiagnose in das Kontrollsystem liefert Datenmaterial sowohl für die unmittelbare Verbesserung von Maschineneinstellungen und gegebenenfalls für automatische Korrekturverfahren, als auch für die theoretische Modellbildung z.B. durch ein Simulationsprogramm oder andere Analysewerkzeuge. Das Kernkontrollsystem wird so angelegt, daß eine Ankopplung der beschleunigerphysikalischen Simulation sowie Modellbildung möglichst einfach ist. Am beschleunigerphysikalischen Modell orientierte Ergebnisdaten werden zur Verbesserung der Betriebsbedingungen in das Kontrollsystem eingespeist.

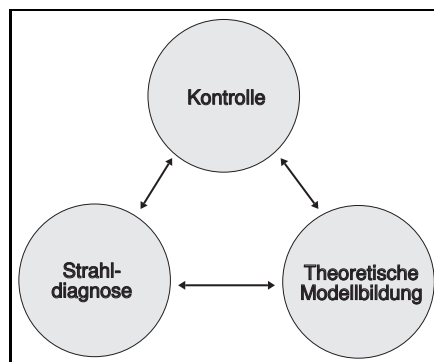


Abbildung 1.7: Modell des Gesamtsystems

Die Konzeption des Kontrollsystems berücksichtigt eine Kombination und Wechselbeziehung zwischen diesen Grundbausteinen und versucht durch Integration ein Gesamtsystem zu schaffen, dessen Leistungsfähigkeit

¹⁴Ähnliche Bemühungen werden auch in anderen Kontrollsystemen verfolgt [56].

größer ist als im Fall einer separaten Verwendung dreier Komponenten.

Kontrolle im Nachbeschleunigungsmodus

Im Abschnitt 1.3.3 wurde ein einfaches Modell für den Nachbeschleunigungsmodus beschrieben und in Abbildung 1.5 dargestellt. Danach zerfällt der Nachbeschleunigungsmodus in vier Phasen, wobei Injektionsphase, Rampphase und Extraktionsphase jeweils spezielle beschleunigerphysikalische Anforderungen stellen, und dazu unterschiedliche und zeitlich getrennte Ansteuerungen erfordern. Das Kontrollsystem hat die zeitliche Markierung einzelner Teilphasen vorzunehmen und dadurch ihre Entkopplung zu erreichen¹⁵. Das Kontrollsystem muß die Übergänge zwischen den Phasen im Nachbeschleunigungszyklus so gestalten, daß beschleunigerphysikalische Anschlußbedingungen (z.B. für die Magnetfamilien oder die Extraktionselemente) definiert, und reproduzierbar eingehalten werden. Ein solches Aufgabenpaket erfordert von seiten des Kontrollsystems eine Echtzeit-Prozeßsteuerung. Darunter versteht man eine Steuerung, die garantiert determiniert in Echtzeit auf ein externes Signal hin eine Reaktion auslöst. Für das neue Kontrollsystem müssen somit zwei Dinge gefordert werden:

1. Für den Nachbeschleunigungsbetrieb mit ELSA muß eine zeitliche Ablaufsteuerung¹⁶ definiert und erstellt werden, welche eine Separation des Maschinenzyklus in die beschriebenen Teilphasen erlaubt und die zeitliche Abfolge der Teilphasen miteinander synchronisiert. Dabei erzeugt es für jeden Abschnitt dedizierte Triggersignale. Den Experimenten an ELSA ist eine Synchronisationsmöglichkeit auf die Extraktionsphase in Form eines Triggerpulses oder eines Torsignals (Gatesignal) anzubieten. Die erwarteten langen Zykluszeiten – sie sind notwendig zur Maximierung des makroskopischen Tastverhältnisses – müssen durch die Zeitablaufsteuerung abgedeckt sein.
2. Der Teil des Kontrollsystems, welcher die unmittelbare Prozeßsteuerung der ELSA-Subsysteme übernimmt, muß in Hardware und in Software Echtzeitanforderungen genügen. Hierbei sollten Reaktionen auf externe Ereignisse auf einer Mikrosekundenzeitskala erfolgen.

Weitere Bestandteile des Anforderungsprofils lassen sich aus den Phasen eines Maschinenzyklus ableiten.

Aufgabe der **Injektionsphase** im Nachbeschleunigungszyklus ist die Akkumulation und Speicherung eines möglichst hohen Stroms in ELSA. Eine minimale Schußzahl des 2.5 GeV-Synchrotrons, bei gleichzeitiger Optimierung des Tastverhältnis der ELSA-Füllstruktur dc_f^{elsa} , wird angestrebt. Experimentelle Erfahrungen zeigen, daß dem akkumulierten Elektronenstrahl vor der Rampphase eine Möglichkeit zur Abdämpfung der longitudinalen, wie der transversalen Teilchenschwingungen, durch eine Warteperiode gegeben werden muß. Eine Warteperiode ist in der Zeitablaufsteuerung zu berücksichtigen. Die maschinenoptische Einstellung von ELSA ist so zu wählen, daß optimale Anschlußbedingungen für die nachfolgende Rampphase gegeben sind.

Die Problematik des Elektronentransfers vom 2.5 GeV Synchrotron nach ELSA, hier ist besonders die Transfereffizienz und die Möglichkeiten zur Erreichung eines hohen Tastverhältnis der ELSA-Füllung gemeint, wurde in der Arbeit von M.Neckenic [75] untersucht. Die günstigsten Verhältnisse ließen sich durch eine Shaving-Extraktion (siehe auch [76]) über zwei Umläufe aus dem Synchrotron mit einer geschlossenen Beule herstellen. Dabei kann ELSA zu ca. $\frac{2}{3}$ bei einer Transfereffizienz von ca. 50 % gefüllt werden, so daß für den 50 Hz-Stretchermodus das mikroskopische Tastverhältnis auf ca. 50 % bis 60 % beschränkt bleibt.

Für den Nachbeschleunigungsbetrieb wird der Injektionsmechanismus hinsichtlich einer maximalen Transfereffizienz bei gleichzeitiger Optimierung der Ringfüllung abgeändert. Im Nachbeschleunigungsmodus sind in jedem Fall mehrere Schüsse des Synchrotrons zur Erreichung des Ausgangstroms der Extraktion notwendig. Sie sollen so definiert hintereinander in ELSA positioniert werden, daß ein Tastverhältnis der Füllung von nahezu 100 % möglich wird. Eine Injektionszeitsteuerung ist dafür zu entwickeln.

Die Aufgabe der **Rampphase** ist es, einen vorgegebenen Energiehub (gegeben durch Injektions- und Extraktionsenergie) in möglichst kurzer Zeit, ohne Verlust an Strahlintensität zu überbrücken. Anschließend ist ein definiertes Fahren der Magneto-optik, wenn nötig auch der Hochfrequenzanlage, für die reproduzierbare Präparierung von optimalen Extraktionsanfangsbedingungen sicherzustellen. Die Rampgeschwindigkeit von ELSA ist durch die maximale Stromänderung $|\frac{dI}{dt}|$ der Netzgeräte der Hauptmagnete (Dipole, Quadrupole,

¹⁵Das Triggersystem im alten Kontrollsystem konnte keine Separation des Nachbeschleunigungszyklus in Teilphasen vornehmen. Durch den ausschließlichen Einsatz im 50 Hz-Stretchermodus wurde diese notwendige Bedingung für den Nachbeschleunigungsmodus nicht entwickelt.

¹⁶Dafür wird in dieser Arbeit der Begriff eines Trigger- und Timingsystems benutzt.

Sextupole) vorgegeben. Die technische Aufgabe des Kontrollsystems in der Rampphase besteht in einer genauen Abstimmung der Stärken der Magnetfamilien und der Hochfrequenzanlage von ELSA, so daß die oben angeführten Bedingungen erfüllt sind. Das Kontrollsystem berechnet und generiert dazu aufeinander abgestimmte Steuerkurven in Amplitude und Zeit; die zeitliche Dimension ist zu berücksichtigen, da Steuerkurven im Kontrollsystem in diskretisierter Form verwaltet werden

Ein Strahlverlust in der Rampphase ist durch die Wahl eines günstigen Bereichs im Arbeitspunktdiagramm in der Injektionsphase und dessen Einhaltung (entspricht einem zeitlich vorgegebenen Arbeitspunktsollverlauf $Q_x(t), Q_z(t), Q_s(t)$) während der Rampphase zu vermeiden. Zusätzlich ist dazu eine Steuerung der Chromatizität sowie eine Einstellung der Beschleunigungsspannung V_c durch die Hochfrequenzanlage (damit der Verlauf eines stabilen Synchrotronarbeitspunktes $Q_s(t)$ und einer ausreichenden longitudinalen Akzeptanz für hohe Ströme gegeben ist) notwendig.

Die **Präparation der Extraktionsphase** ist dadurch gekennzeichnet, daß die stabile Einstellung der Magnetoptik und/oder der Hochfrequenzanlage nach Erreichen der Extraktionsenergie so gezielt verändert wird, daß die Extraktion eingeleitet werden kann. Dabei ist ein Intensitätsverlust zu vermeiden. Die Zeitablaufsteuerung muß eine Warteperiode nach Erreichen der Extraktionsenergie bis zum Startzeitpunkt der eigentlichen Extraktionsphase vorsehen, damit die beschriebenen Vorbereitungsmaßnahmen ausführbar sind.

Zur **Extraktion** des Elektronenstrahls aus ELSA wird eine langsame, drittelzahlige Resonanzextraktion im horizontalen Phasenraum [26][75], welche durch Sextupolmagnete angeregt wird, verwendet. Dazu ist eine Arbeitspunktänderung während der Extraktion notwendig, welche in Abhängigkeit von der gewünschten extrahierten Teilchenrate durch zwei Arten erreicht wird.

Für das Experiment ELAN wird die horizontale Teilchenbewegung durch Sextupolmagnete bei einem horizontalen Arbeitspunkt in der Nähe von $\frac{14}{3}$ resonanzartig angeregt. Der stabile Bereich des horizontalen Phasenraums wird durch gezielte Veränderung des horizontalen Arbeitspunktes¹⁷ kontrolliert eingeschränkt und die Teilchenbewegung instabil gemacht. Die Teilchen laufen entlang der Separatrizen der charakteristischen Phasenraumfigur nach außen und werden durch einen geeignet positionierten Septummagneten extrahiert. Mit dieser Methode können hohe extrahierte Ströme eingestellt werden. In dieser Betriebsart wird ELSA nahezu achromatisch eingestellt.

Für niedrigere extrahierte Ströme, wie sie für das Experiment SAPHIR notwendig sind, wird eine sog. „stochastische Resonanzextraktion“ verwendet, die Extraktionszeiten von bis zu einer Minute möglich macht. Der Prozeß erfolgt in zwei Stufen. Zunächst wird der longitudinale Phasenraum durch Verkleinerung des HF-Buckets eingeschränkt, so daß Elektronen, die durch Synchrotronlichtabstrahlung eine Energieänderung ΔE erfahren, den stabilen Teil des longitudinalen Phasenraums verlassen. Diese relative Energieänderung $\frac{\Delta E}{E_0}$ wird durch die Chromatizität C_x in den horizontalen Phasenraum transportiert und bewirkt dort eine Arbeitspunktänderung ΔQ_x gemäß:

$$\Delta Q_x = C_x \frac{\Delta E}{E_0} \quad (1.8)$$

Die Präparation von longitudinalem und horizontalem Phasenraum ist für diese Extraktionsmethode entscheidend. Der horizontale Arbeitspunkt Q_x und die Chromatizität C_x müssen so gewählt sein, daß die durch die Energieänderung und durch die Chromatizität vermittelte Arbeitspunktänderung ΔQ_x Elektronen in die drittelzahlige Resonanz befördern. Die tatsächliche Extraktion erfolgt dann im horizontalen Phasenraum, so wie es bereits oben beschrieben ist. In dieser Betriebsart muß ELSA mit nicht verschwindender horizontaler Chromatizität betrieben werden. Damit die extrahierte Teilchenrate aus den HF-Buckets möglichst konstant über die gesamte Extraktionsphase bleibt, muß die Ansteuerung der Hochfrequenz gezielt reduziert werden. Das mikroskopische Tastverhältnis bei dieser Extraktionsmethode ist im allgemeinen hoch, da der zugrunde liegenden Prozeß der Synchrotronlichtabstrahlung stochastisch ist.

Beide Methoden unterscheiden sich lediglich durch die Art der Arbeitspunktänderung; es ist für die Darstellung in dieser Arbeit dennoch vorteilhaft eine sprachliche Unterscheidung einzuführen, da das Kontrollsystem zu deren Ansteuerung unterschiedliche Maßnahmen ergreifen muß. Wird im Text die langsame Resonanzextraktion erwähnt, so ist damit die Variante im Sinne des Experiments ELAN gemeint. Die stochastische Resonanzextraktion benennt die Variante, welche eine Arbeitspunktänderung durch die Synchrotronlichtabstrahlung, vermittelt durch die Chromatizität, erreicht. Zusätzlich wird dadurch gekennzeichnet, daß der longitudinale Phasenraum der Teilchenbewegung eine wesentliche Bedeutung für diese Extraktionsvariante besitzt.

¹⁷Die Variation des horizontalen Arbeitspunktes erfolgt durch eisenlose Quadrupole [28].

Zur Realisierung der angegebenen Extraktionsmethoden muß das Kontrollsystem diskretisierte Steuerkurven von mehreren 10 Sekunden für die Extraktionssextupole, die eisenlosen Extraktionsquadrupole und die Amplitude der Hochfrequenz berechnen, sowie Einheiten bereitstellen, welche die Steuerkurven mit möglichst hoher zeitlicher Auflösung an die beteiligten Subsysteme ausgeben. Das Kontrollsystem muß die Generierung der Steuerkurven möglichst einfach anbieten. Reproduzierbarkeit ist durch eine Parametrisierung von Modellkurven zu fördern. Eine algorithmische Optimierung der Steuerkurven, z.B. in Abhängigkeit eines gemessenen Experimente-Spillsignals sowie die anschließende Rückwirkung auf ELSA, muß mit Werkzeugen des Kontrollsystems durchführbar sein.

Strahldiagnose im Nachbeschleunigungsmodus

Die Steuerungsmaßnahmen in den einzelnen Phasen eines Maschinenzyklus müssen durch Strahldiagnose überprüft werden. Das Kontrollsystem soll in der Lage sein, zu jedem beliebigen Zeitpunkt des Nachbeschleunigungszyklus eine oder eine Kette von Diagnosemaßnahmen durch entsprechende Triggersignale auszulösen. Dazu muß es einen universell einsetzbaren Diagnostriggenerator bereitstellen. Der Diagnostriggenerator ist Bestandteil der neuen Zeitablaufsteuerung. Die Strahldiagnoseaufbauten für den Nachbeschleunigungsmodus lassen sich grob in zwei Gruppen aufteilen:

1. Für Routinemessung und Analyse von wichtigen Strahlparametern (z.B. der Arbeitspunkte) sind **dedizierte Meßsysteme** aufzubauen. Sie melden ihre Ergebnisdaten periodisch (in möglichst kurzen Intervallen) an das Kontrollsystem, damit Korrekturen an der Einstellung der Beschleunigeranlage unmittelbar durchführbar sind. Diese Eigenschaft ist für die interaktive Optimierung von Teilphasen des Nachbeschleunigungszyklus von großem Vorteil. Auf Anfrage müssen die Meßsysteme ihre Rohdaten für detaillierte Analysen durch Mittel der „off line“-Verarbeitung (z.B. mit EPOS) bereitstellen.
2. Die Mehrzahl der Strahldiagnoseaufbauten entsteht durch **Kombination von komplexen Meßgeräten** (z.B. Speicheroszilloskop, Spektrumanalysator). Sie werden speziell zur Untersuchung einer beschleunigerphysikalischen Fragestellung im Nachbeschleunigungsmodus (z.B. Studium von Instabilitäten oder Untersuchung der Extraktionsverfahren) zusammengestellt. Es liegt in der Verantwortung des Kontrollsystems, eine schnelle und flexible Kombination von Meßgeräten sicherzustellen. Ein Meßsystem ist – eingebettet in die Kontrolle – mit allen Infrastrukturen (z.B. Trigger zur Synchronisierung der Meßgeräte auf den Nachbeschleunigungszyklus) zu versorgen. Zur Koordination eines Meßaufbaus bietet sich das EPOS-System mit darin enthaltenen Operatoren an. So kann sich der Beschleunigerphysiker auf das Strahldiagnoseproblem konzentrieren; der technische Aufwand zur Realisierung des Meßaufbaus entfällt weitgehend. Das Kontrollsystem muß dazu einen einfach zu handhabenden Meßgerätebus, die Programmierung und Datenauslesung der Meßgeräte und ihre konsistente Verwaltung unterstützen.

Alle Strahldiagnosesysteme für den ELSA-Nachbeschleunigungsmodus, entweder vorhanden oder geplant, liefern **digitale** Rohdaten. Detaillierte Analysen der Strahldiagnosedaten sind im Nachbeschleunigungsmodus notwendig; sie sind vom Kontrollsystem durch allgemein verwendbare Algorithmen (Werkzeuge) zur **digitalen Signalverarbeitung im Zeit- und Frequenzraum** zu unterstützen. Für den im Aufbau befindlichen Synchrotronlichtmonitor [45] und zur Messung von Strahlprofilen mit Folienmonitoren in den Transferkanälen müssen Methoden zur **digitalen Bildverarbeitung** entwickelt werden. Die Werkzeuge zur digitalen Signalverarbeitung sollen untereinander kombinierbar sein.

Jeder Abschnitt im Nachbeschleunigungszyklus hat zur Unterstützung der Kontrollfunktion Anforderungen an die Strahldiagnose.

In der **Injektionsphase** muß eine Homogenisierung der ELSA-Füllstruktur durch einen breitbandigen longitudinalen Strahlmonitor mit großem Dynamikumfang (wegen der hohen erwarteten Ströme) überwacht werden. Das Meßsystem auf Basis dieses Monitors hat das Tastverhältnis zur Charakterisierung der Füllstruktur, welches aus einer „on line“-Messung unter Verwendung der Werkzeuge zur digitalen Signalverarbeitung abgeleitet wird, in periodischen Abständen an das Kontrollsystem zu senden. Von Vorteil wäre eine Wiederholrate der Messung von mehreren Hz, da somit eine interaktive Einstellung oder eine automatische Regelung im Kontrollsystem erleichtert wird.

Die Arbeitspunkte der transversalen sowie der longitudinalen Teilchenschwingungen sind in der Injektionsphase zu messen. Durch die Istinformation der Arbeitspunkte kann eine maschinenoptische Anpassung der Injektionsphase an die Rampphase erfolgen.

In der **Rampphase** müssen Arbeitspunktverläufe gemessen werden. Die Messung muß so oft erfolgen, daß die Rampphase mit genügender zeitlicher Überdeckung aufgelöst wird. Eine zur Durchführung einer Messung notwendige kohärente Teilchenschwingung muß durch Aktivierung eines ELSA-Kickers zu festgesetzten Diagnosezeitpunkten erfolgen. Die Ankopplung einer ELSA-Kickereinheit an den Diagnostrigger ist eine Forderung an das Kontrollsystem.

In der **Extraktionsphase** sind die eingestellten Extraktionsbedingungen und deren Verlauf über den Extraktionszeitraum zu messen. Dazu gehören Arbeitspunkte aber auch weitere Informationen, welche speziell zur Begutachtung der Extraktionsverhältnisse von Bedeutung sind:

1. Die Präparierung des horizontalen Phasenraums für die langsame Resonanzextraktion muß durch eine Phasenraummessung überprüft werden [81]. Aus der Phasenraummessung muß der Abstand zur drittelzahligen Resonanz ermittelt werden. Eine Arbeitspunktmessung und damit eine zusätzliche Sicherheit zur Einstellung der Extraktion soll dieses Meßsystem ebenfalls liefern. Die Phasenraummessung erfordert zur Meßwerterfassung ein umlaufsynchrotes Signal von ELSA (Umlaufuhr). Neben der Bestimmung von Strahlparametern lassen sich Meßdaten des Phasenraummeßsystems direkt mit Ergebnisdaten des ELSA-Simulators vergleichen; damit besteht die Möglichkeit, Fixpunkte der Bewegung und somit die Separatrixlage am Beobachtungsort festzustellen. Mit dem Simulator kann dann der Extraktionsprozeß am Ort des Extraktionsseptummagneten verfolgt werden. Die Kombination Phasenraummeßsystem und Simulator ist im Sinne der Modellvorstellung aus Abschnitt 1.4.2 als Beispiel für die Verbindung von Strahldiagnose mit beschleunigertheoretischer Modellbildung zu verwirklichen. Eine kohärente Teilchenschwingung wird durch Anregung des Strahls mit einer ELSA-Kickereinheit in Verbindung mit dem Diagnostriggengenerator erreicht.
2. Signale der extrahierten Elektronenstrahls (Spillsignale) sollen gemessen und hinsichtlich des mikroskopischen Tastverhältnis ausgewertet werden. Zur Überprüfung der mit dem neuen Injektionsschema korrigierten ELSA-Füllstruktur ist die periodische Untersuchung der Spillstruktur auf der Zeitachse eines ELSA-Umlaufs hilfreich. Aus dem Spillsignal sollen Gütezahlen abgeleitet werden, welche eine Verbesserung der Extraktionsverfahren möglich machen (z.B. Berechnung von Steuerkurven für die eisenlosen Extraktionsquadrupole [75]).

Die Erfassung von Strahlprofilen durch einen Synchrotronlichtmonitor soll zusätzliche Information für die Präparierung der Extraktion, aber auch zur Überwachung der Ramp- und Extraktionsphase liefern.

Beschleunigertheoretische Modellbildung und Simulation

Die Maßnahmen von Kontrolle und Strahldiagnose müssen durch eine beschleunigertheoretische Modellbildung unterstützt werden. Umgekehrt müssen Meßdaten der Strahldiagnosesysteme in die Modellbildung einfließen, damit eine genaue Abstimmung auf die Verhältnisse an ELSA möglich wird und anschließend ein Vergleich zwischen Messung und Theorie stattfinden kann. Mit den Ergebnissen der Strahldiagnose kann der Simulator von J. Wenzel helfen, z.B. die Transfereffizienz der Extraktion aus ELSA zu verbessern oder Verbesserungsvorschläge hinsichtlich einer Anordnung der Extraktionssepta und -sextupole zu liefern. Ein detailliertes Verständnis der verwendeten Extraktionsverfahren kann durch die Wechselbeziehung von Strahldiagnose und Simulator erlangt werden. Diese Erkenntnisse fließen zurück in die Kontrolle und sind hier für eine Verbesserung der Extraktionsverhältnisse nutzbar. Als Beispiel ist eine verbesserte Ansteuerung der Extraktionsquadrupole durch angepaßte Steuerkurven zu nennen.

Für die Zusammenarbeit mit dem Simulator stellt das Kontrollsystem die gesamte Infrastruktur bereit; er kann somit komplette Maschineneinstellungen oder eine ausgewählte Parametermenge – sie enthalten auch Strahldiagnosedaten – lesen und schreiben. Der Simulator erzeugt in Abhängigkeit von Maschineneinstellungen Ergebnisparameter, welche der Kontrolle zur unmittelbaren Verbesserung einer Einstellung zur Verfügung gestellt werden (z.B. theoretische Arbeitspunkte, Chromatizität und andere Strahlparameter).

1.4.3 Informationstechnische Entwurfsziele

In den vorangegangenen Abschnitten ist das Anforderungsprofil an die Kontrolle durch die Mittelenergieexperimente und den zu realisierenden Nachbeschleunigungsmodus entwickelt worden. Somit ist der Anteil

im Anforderungsprofil aufgezeichnet, der sich unmittelbar aus physikalischen Randbedingungen ergibt. Weitere Anforderungen ergeben sich aus den informationstechnischen Randbedingungen zur Realisierung des Kontrollsystems.

In den folgenden Punkten werden informationstechnische Entwurfsziele angegeben, welche die strukturelle Auslegung des Kontrollsystementwurfs maßgeblich beeinflussen. In welchem Umfang verschiedene Entwurfsziele in der Realisierung des Kontrollsystems ihre Ausprägung erhalten, wird im konkreten Fall durch die beschleunigerphysikalischen Randbedingungen bestimmt.

Den Anwendern des Kontrollsystems, seien es interaktiv arbeitende Anwender oder Entwickler, soll eine **konsistente** Systemsicht gegeben werden. Anordnung und Strukturierung beteiligter Hardware- und Softwarekomponenten, aus denen das Gesamtsystem zusammengesetzt ist, bleibt ihnen verborgen. Implikationen, die sich aus dieser allgemeinen Transparenzforderung ergeben, haben hauptsächlich Einfluß auf die Auslegung der Systemsoftware. Das Konzept der **Transparenz** [101] beinhaltet verschiedene Aspekte:

- **Ortstransparenz:** Ein Anwender braucht nicht zu wissen wo sich Hardware- und Softwarekomponenten im System befinden. Der Standort von Subsystemen innerhalb der Beschleunigeranlagen ist für Anwender des Systems unerheblich.
- **Zugriffstransparenz:** Für den Zugriff auf ELSA-Parameter (werden auch als Maschinenparameter bezeichnet) bzw. die damit gekoppelten Geräte oder Subsysteme (z.B. Netzgeräte oder Vakuumpumpen), seien es ELSA-Parameter mit skalarer, vektorwertiger oder matrixwertiger Interpretation, seien sie lokal auf einem Rechner, oder auf einem über ein Netzwerk angekoppelten Rechner verfügbar, wird ein und dieselbe Grundmenge von Operationen verwendet. Datenmodellierung, Datenhaltung sowie Datentransport im Kontrollsystem sind entsprechend auszulegen.
- **Migrationstransparenz:** Einzelne Maschinenparameter, Gruppen von Maschinenparametern, Geräte oder Subsysteme können jederzeit im System umgeordnet werden, ohne daß sich ihr Name dabei ändert. Die Migrationsfähigkeit ist Ausprägung der allgemeineren Forderung, das Kontrollsystem in allen seinen Komponenten konfigurierbar zu halten, damit neue Erkenntnisse in Zukunft z.B. in eine günstigere Strukturierung des Kontrollsystems einfließen können.
- **Nebenläufigkeitstransparenz:** Mehrere Anwender oder Applikationsprogramme können Maschinenparameter und damit verbundene Komponenten gemeinsam nutzen. Notwendige Synchronisierungsmaßnahmen hat das System selbsttätig auszuführen. Der Schreib- und Lesezugriff auf Parameter muß für eine Applikation jederzeit möglich sein.

Skalierbarkeit ist in allen Hardware- und Softwarekomponenten durch **modulare Erweiterbarkeit** sicherzustellen. Der Kontrollsystementwurf im Rahmen dieser Arbeit soll so angelegt sein, daß eine Kapazitätserweiterung des Kontrollsystems in den nächsten Jahren nicht notwendig ist.

An das Kontrollsystem wird die Forderung nach hoher **Leistungsfähigkeit** gestellt. Aus den Erfahrungen der Vergangenheit wird die quasianaloge Steuerung eines Maschinenparameters mit einer Wiederholrate von mindestens 20 Hz sowie eine autonome Istwerterfassung gefordert (Abschnitt 1.4.1). Zusätzlich ergibt sich aus der Forderung nach Nebenläufigkeitstransparenz, daß eine unbestimmte Zahl von Applikationen im Kontrollsystem Transaktionen auslösen kann. Die anfallenden Daten der Istwerterfassung müssen durch das Kontrollsystem geschleust werden. Aus den Erfahrungen des alten Kontrollsystems bedeutet das für die Kontrolle mindestens 100 Ist-Transaktionen pro Sekunde. Die Aktivierung des Nachbeschleunigungsmodus erfordert Berechnung und Übermittlung von diskretisierten Steuerkurven an Funktionsgeneratoren. Für die komplette Einstellung des Nachbeschleunigungsmodus müssen 8 Magnetgruppen und die Hochfrequenzanlage angesteuert werden, wobei jeweils mehrere tausend Stützstellen mit Zeit- sowie Amplitudeninformationen vorzugeben sind, welche das Kontrollsystem möglichst schnell zu übertragen hat. Die Berechnung von Steuerkurven erfordert vom Kontrollsystem kurzfristig eine große Rechenleistung. Die Einbindung von Strahldiagnosesubsystemen und theoretischen Untersuchungen macht es notwendig, daß Datenmengen in Portionen bis zu 1 MByte in akzeptabler Zeit (einige Sekunden) zu übertragen sind.

Voraussetzung für hohe Leistungsfähigkeit ist die Unterstützung von **Parallelarbeit** in allen Kontrollsystembereichen. Insgesamt muß das Kontrollsystem eine möglichst hohe Gesamtleistungsfähigkeit mit kostengünstigen Komponenten erreichen.

Aus der Vielzahl möglicher ELSA-Betriebsmodi ist **Flexibilität** und **Konfigurierbarkeit** des Kontrollsystems auf allen Ebenen gefordert. Ein Ansatz zur Erreichung von Flexibilität besteht in einer Trennung

der Kontroll-Gesamtaufgabe in einen Bereich **Kernkontrollsystem** und einen **Applikationsteil**. Das Kernkontrollsystem ist dabei allgemein einsetzbar, kennt also seine Verwendungsmöglichkeit nicht und muß demzufolge unabhängig von jeglichen beschleunigerphysikalischen Berechnungen sein. Der Applikationsteil bündelt alle beschleunigerphysikalischen Berechnungen und baut auf dem Kernkontrollsystem auf. Dem Applikationsteil stehen alle Infrastrukturen des Kernkontrollsystems offen. Neue physikalische Erkenntnisse, die Berücksichtigung in der Kontrolle finden sollen, dürfen keine Änderung des Kontrollsystemkerns erfordern. Zur Realisierung des Applikationsteils ist ein möglichst anpassungsfähiges Konzept zu wählen.

Die **Ankopplung von Applikationen** an das Kontrollsystem und die Steuerung des Datenflusses in eine Applikation muß auf verschiedene Weisen unterstützt werden, damit sich eine Vielzahl von Anforderungen unterschiedlichster Applikationen abdecken läßt. Eine Applikation kann nach ihrer Aufgabenstellung den am besten geeigneten Zugriffsmechanismus auf Maschinenparameter auswählen. Applikationen sollten insbesondere an dem für das neue Kontrollsystem geforderten **ereignisorientierten Datenfluß** teilhaben können. Für das Kontrollsystem werden zur Ankopplung von Applikationen drei Mechanismen gefordert:

1. Alle Parameterwerte müssen durch Abfrage abrufbar sein. Dieser **Abfragemechanismus** setzt also eine selbstständige Aktivität der Applikation voraus; das Kontrollsystem ist nur in soweit aktiv, als es die Abfrage der Parameterwerte ausführt. Der Abfragemechanismus ergibt sich aus der Forderung nach Nebenläufigkeitstransparenz.
2. Durch einen **ereignisgesteuerten Warteschlangenmechanismus** wird zwischen dem Kontrollsystem und einer Applikation ein Erzeuger-Verbraucher-Verhältnis hergestellt. In diesem Fall kann die Applikation passiv bleiben, solange keine Werteänderung eines Parameters vorliegt. Im Fall einer Werteänderung wird das Kontrollsystem selbst aktiv und benachrichtigt die Applikation, welche ihrerseits dieses Ereignis weiterverarbeitet. Für welche Parameter ein Erzeuger-Verbraucher-Verhältnis aufgebaut werden soll, kann die Applikation frei bestimmen.
3. Durch einen **Unterbrechungsmechanismus** kann eine Applikation unmittelbar von der Werteänderung eines Parameters unterrichtet werden und so in minimaler Zeit darauf reagieren.

Die beiden letztgenannten Mechanismen lassen Applikationen am ereignisorientierten Datenfluß teilhaben. Alle Ankoppelmechanismen sind im Sinne der Transparenzforderung zu verwirklichen, auch dann, wenn eine variable Menge von Kontrollrechnern zum Einsatz kommt.

Die **Verfügbarkeit** bezeichnet den Anteil der Zeit, in dem das System benutzbar ist. Für das Kontrollsystem wird eine möglichst hohe Verfügbarkeit gefordert; sie ist unerläßlich für den 24-Stunden-Betrieb der Gesamtanlage.

Zuverlässigkeit muß darin bestehen, daß dem System anvertraute Daten sicher und eindeutig verwaltet und weitergegeben werden. Der Teilausfall einer Hardware- oder Softwarekomponente darf nicht den Ausfall des Gesamtsystems bewirken.

Die konkrete Implementierung darf an keiner Stelle des Kontrollsystems besondere Hardwarespezialitäten, z.B. eine Rechnerarchitektur, ausnutzen und auf der Softwareseite nur Standardprogrammierungswerkzeuge und eine Standardprogrammiersprache verwenden. Bedenkt man die voraussichtliche Lebensdauer des neuen Kontrollsystems von etwa 10 Jahren, so ist in diesem Zeitraum mit großen Entwicklungen auf dem Hardware- und Softwaresektor zu rechnen. Damit das Kontrollsystem auch in Zukunft von diesen Entwicklungen profitieren kann, sollen für die Implementierung ausschließlich „Standardbausteine“ Berücksichtigung finden. Eine **Standardisierung** erleichtert eine Einarbeitung in das System sowie seine Erweiterbarkeit durch Mitarbeiter des Physikalischen Instituts. Zusätzlich ist weitgehend sichergestellt, daß ein Ersatz von Komponenten auch in Zukunft erfolgen kann.

Die Darstellung der grundsätzlichen Zielsetzungen für das neue Kontrollsystem ist abgeschlossen. Entwurfsentscheidungen und Entwurfsrealisierung auf Grundlage des entworfenen Anforderungsprofils werden in den Kapiteln 2 bis 4 dargestellt. Die konkrete Entwurfsverwendung für ELSA zur Realisierung des Nachbeschleunigungsmodus ist im Kapitel 5 ausgeführt. Erste Betriebsergebnisse stellt Kapitel 6 vor.

2. Realisierung des Kernsystems

In diesem Kapitel wird die Realisierung des Kontrollsystemkerns beschrieben. Begründet durch das Anforderungsprofil des Kontrollsystems, welches im vorangegangenen Kapitel erarbeitet wurde, wird die Entscheidung für eine verteilte Gesamtarchitektur des Systems getroffen. Die verteilte Architektur des universellen Kontrollsystemkerns wird vorgestellt. Das darauf aufbauende Konzept des Systems verteilter Regelexperten zur Einbindung beschleunigerphysikalischer Berechnungen wird beschrieben. Der Schwerpunkt der softwaretechnischen Realisierung liegt auf dem Kommunikationssystem, aus dem wesentliche Transaktionsformen hervorgehen. Daneben bildet das System verteilter Datenbanken einen anderen Schwerpunkt. Die Ereignis- und Transaktionsverarbeitung im Kontrollsystem wird ausführlich diskutiert. Das System kooperierender Prozesse stellt die aktiven Instanzen im Kernsystem dar und wird im Überblick besprochen. Die Beschreibung der Implementierung des Systems verteilter Regelexperten beendet das Kapitel.

2.1 Entwurfsentscheidungen

Auf der Basis des Anforderungsprofils, insbesondere der informationstechnischen Entwurfsziele, wird die Frage nach der Gesamtarchitektur des Systems diskutiert und entschieden.

Architektur

Eine Architekturbeschreibung definiert die Hauptkomponenten (Hardware und Software) des Systems, ihre Aufgaben sowie ihr Zusammenwirken. Wichtige Aspekte sind z.B. die verwendeten Rechnertypen, ihre Anordnung in einem Netzwerk und die Orte an denen Kernprogramme und Applikationsprogramme arbeiten. Für ELSA lassen sich zwei Architektur-Modelle – die **zentrale** und die **verteilte** Lösung¹ – an Hand ihrer Vorteile und Nachteile vergleichen.

1. **Zentrale Lösung:** Grundmerkmal eines zentralen Systems ist das Vorhandensein eines Zentralrechners; er muß also Kapazität bieten, um alle Anforderungen abzudecken. Der Zentralrechner hat zu jeder Zeit die Gesamtsicht der Beschleunigeranlagen.

Zunächst werden die Vorteile einer zentralen Lösung beschrieben: Die Softwaremittel zur Konstruktion eines zentralen Systems ist im Rahmen der Informatik gut verstanden. Alle Aktivitäten laufen unter der Aufsicht des lokalen Rechnerbetriebssystem ab. Ein aufwendiges Kommunikationssystem ist nicht notwendig, da alle Operationen zwischen aktiven Einheiten lokal stattfinden. Die Zeitverzögerung innerhalb einer Kommunikationsoperation ist vernachlässigbar klein, da sie in einem gemeinsamen Speicher vollzogen wird. Es kann dabei auf die Standardmechanismen eines Rechnerbetriebssystems zurückgegriffen werden. Die Implementierungsdauer für ein zentrales System bleibt deswegen überschaubar. Die Herstellung eines konsistenten Gesamtzustands der Beschleunigerkontrolle ist mit geringer Anstrengung herstellbar, da nur eine Referenz auf einen Maschinenparameter an genau einer Stelle gehalten wird.

Nachteile einer zentralen Lösung sind: Der Ausfall des Zentralrechners macht eine Steuerung der Beschleunigeranlagen unmöglich. Damit ist ein zentrales System nicht fehlertolerant und die Verfügbarkeit des Kontrollsystems dadurch eingeschränkt, falls nicht durch zusätzliche Maßnahmen Redundanzen eingebaut werden. Beschränkungen in der Rechenleistung oder der Speicherkapazität können durch Austausch des Zentralrechners gegen ein leistungsstärkeres Modell teilweise ausgeglichen werden. Der Erweiterbarkeit und damit der Leistungssteigerung durch die Verwendung einer einzigen Recheneinheit ist Grenzen gesetzt. Erweiterungen der Kontrolle in der Zukunft – heute sind sie noch nicht abzusehen –, z.B. durch den Ausbau der Beschleunigeranlagen, können im ungünstigsten Fall eine komplette Neuentwicklung des Kontrollsystems notwendig machen.

¹ Ausführliche Diskussionen, das Für und Wider beider Lösungsansätze betreffend, finden sich in der Literatur zu verteilten Betriebssystemen. An dieser Stelle sei auf [18][36][73][103] verwiesen.

2. **Verteilte Lösung:** Für die folgende Betrachtung soll implizit immer ein räumlich verteiltes und damit lose gekoppeltes System gemeint sein, da dies der Anordnung von Geräten und Subsystemen einer Beschleunigeranlage entspricht. Die räumliche Verteilung des Systems ist keine Notwendigkeit, sondern eine Spezialisierung, durch die Beschleunigeranlage gegeben.

Im Fall eines verteilten Systems ist die Gesamtaufgabe auf eine Anzahl von Recheneinheiten verteilt. Keine der beteiligten Recheneinheiten hat zu einem Zeitpunkt die Gesamtsicht der Beschleunigeranlagen. Eine Kontrolle der Beschleunigeranlagen muß dennoch ein „kohärentes“ Zusammenwirken aller Komponenten erreichen.

Auf der Seite der Vorteile eines verteilten Systems stehen folgende Punkte: Verteilte Systeme sind in aller Regel bereits durch ihre lose Kopplung gut modularisiert. Die Modularisierung sichert eine Erweiterbarkeit des Systems. Parallelarbeit wird durch die Struktur eines verteilten Systems implizit gefördert. Verteilte Systeme lassen sich so auslegen, daß sie gegenüber dem Ausfall einer Teilkomponente tolerant reagieren und ihre Arbeit – wenn auch mit verminderter Leistung – fortsetzen. Die Verfügbarkeit eines verteilten Systems ist hoch. Ein verteiltes System kann so ausgelegt werden, daß sich seine Verarbeitungsleistung durch zusätzliche Recheneinheiten erhöht läßt.

Folgende Punkte sind Nachteile einer verteilten Lösung: Die Herstellung einer konsistenten Gesamtsicht erweist sich als das Hauptproblem der verteilten Lösung [103]. Das verteilte System bedarf einer aufwendigen Kommunikationsarchitektur, welche den Hauptunterschied zu einem zentralen System ausmacht. Im Fall eines räumlich verteilten Systems ist das Gesamtverhalten stark von Netzwerkleistungsfähigkeit und –zuverlässigkeit abhängig. Das Netzwerk stellt im allgemeinen einen Kommunikationsengpaß in einem verteilten System dar. Die damit verbundenen Kommunikationsverzögerungen sind um Größenordnungen höher als im Fall der zentralen Lösung und werfen damit besondere Problemstellungen auf. Programmieraufwand und Komplexität der Software ist entsprechend hoch. Für ein räumlich verteiltes System kann im wesentlichen wegen der nicht vernachlässigbaren Kommunikationsverzögerungen keine gemeinsame Zeitachse aller Komponenten angegeben werden. Ereignisse und Aktivitäten in einem verteilten System laufen in hohem Maß zueinander parallel ab, was Kausalitätsprobleme schaffen kann. Der interne Verwaltungsaufwand in einem verteilten System (z.B. Synchronisierung von Parameterzugriffen, Förderung von Parallelität etc.) ist wesentlich höher und anspruchsvoller als im zentralen Fall.

Die Nachteile der verteilten Lösung lassen sich durch eine sorgfältige Softwarekonzeption und zusätzlichen Softwareeinsatz auf der Basis intelligenter Algorithmen abschwächen oder insgesamt ausräumen. Die Nachteile einer zentralen Lösung liegen in der Systemstruktur und lassen sich nicht eliminieren. Ein verteiltes System ist hinsichtlich seiner Struktur konfigurierbar, es kennt strukturbegründete Einschränkungen der zentralen Lösung nicht. Damit stehen Freiräume für die konkrete Realisierung und Konfiguration eines verteilten Kontrollsystems bei ELSA offen. Sicherlich ist der Einsatz eines zentralen Systems für eine genau bestimmte, dann für immer fixierte Aufgabenstellung gerechtfertigt; der Ausgangspunkt für ELSA ist anders. Hier ist die beschleunigerphysikalische Aufgabenstellung für den Nachbeschleunigungsmodus vorgegeben, die weiteren Entwicklungen für die Zukunft sind im Detail jedoch nicht genau vorhersehbar. Eine zentrale Lösung für die Kontrollaufgabe an ELSA würde von vornherein das Akzeptieren einer strukturellen, und leistungsmäßigen Beschränkung bedeuten.

Die informationstechnischen Entwurfsziele für die Realisierung der Beschleunigerkontrolle fordern ein leistungsfähiges, durch modulare Erweiterbarkeit skalierbares und zuverlässiges System mit großer Verfügbarkeit. Alle Punkte zusammen kann ein zentrales System nicht abdecken.

Der angemessene Lösungsansatz der Beschleunigerkontrollaufgabe an ELSA ist ein in Hardware und Software verteiltes Kontrollsystem². Für ELSA wurde deswegen der Aufbau eines **verteilten Kontrollsystems** beschlossen.

Das verteilte Kontrollsystem für ELSA besteht auf der Hardwareseite aus einem **räumlich verteilten Rechnersystem**, zusammengesetzt aus autonomen Recheneinheiten. Sie sind in der Lage, miteinander zu kommunizieren und zu kooperieren.

Die Kontrollsystemsoftware hat die Operationen des verteilten Rechnersystems so zu steuern, daß es dem Anwender als virtuelle „Einprozessormaschine“ erscheint. In Analogie zu einem **Rechnerbetriebssystem**

²An dieser Stelle ist die Definition eines verteilten Systems von Lampert zu erwähnen [103]: „Ein verteiltes System ist ein System, mit dem man plötzlich nicht mehr arbeiten kann, weil ein Rechner ausgefallen ist, von dem man vorher noch nie etwas gehört hat.“

kann der Aufbau einer Kontrollsystemsoftware verstanden werden. Die Aufgabe eines Betriebssystems besteht in der Verwaltung aller Betriebsmittel eines Rechnersystems. Dazu muß das Betriebssystem die Betriebsmittel steuern, konkurrierende Anforderungen synchronisieren und zuteilen. Die Betriebsmittel eines Rechnersystems sind z.B. auf der Hardwareseite Prozessoren, Speicher, Festplatten, Ein-/Ausgabegeräte, Kommunikationskanäle und auf der Softwareseite Programme oder Dienstbibliotheken aller Art. Analog dazu sind die Betriebsmittel der Beschleunigersteuerung Magnetnetzgeräte, Hochfrequenzsysteme, Vakuumsysteme etc. sowie im Sinne der Modellbildung aus Abschnitt 1.4.2, Meßsysteme für die Strahldiagnose und ein Simulationsprogramm zur Berechnung der linearen Maschinoptik und daraus resultierender Strahlparameter. Die Betriebsmittel der Beschleunigersteuerung werden in Parameter abgebildet und damit für die Kontrolle formalisiert. Für die Kontrollsystemsoftware stellen dann diese „Kontrollsystemparameter“ die unmittelbaren Betriebsmittel dar, welche im Sinne eines Betriebssystems zu verwalten sind. Die Wertemenge der Beschleunigerparameter spiegelt in ihrer Gesamtheit den aktuellen Soll- und Istzustand der Beschleunigeranlage wider. Aufgabe des Kontrollsystems ist dementsprechend auf der Menge der Kontrollsystemparameter ein **konsistentes** Abbild des Beschleunigerzustandes darzustellen. Die Ergebnisse der Strahldiagnose und „on line“-Simulation werden, soweit möglich und sinnvoll, direkt in Form von Beschleunigerparametern in das Kontrollsystem eingespielt und damit eine Integration und Kopplung dieser, für gewöhnlich getrennten, Systeme im Sinne der angeführten Modellbildung aus Abschnitt 1.4.2 erreicht. Die Software des neuen ELSA-Kontrollsystems wird zusammenfassend als **verteilttes Beschleunigerbetriebssystem zur Integration von Kontrolle, Strahldiagnose und Simulation** definiert.

Kernkontrollsystem und beschleunigerphysikalische Berechnungen

Im Rahmen der Flexibilitätsforderung in Abschnitt 1.4.3 wurde eine Trennung der Gesamtaufgabenstellung an das Kontrollsystem in eine **beschleunigerphysikunabhängige Basiskontrolle** und einen **beschleunigerphysikspezifischen Applikationsteil** angeregt. Dieser Ansatz soll nochmals hervorgehoben werden. Die Einbindung beschleunigerphysikalischer Berechnungen in das Kontrollsystem ist näher zu diskutieren. Ein möglichst allgemeiner Ansatz zur Integration von Rechenvorschriften ist Ausgangspunkt; Berechnungen lassen sich in Funktionen sammeln, welche in Abhängigkeit von Parameterwertänderungen auszuführen sind, denn nur so kann sie das Kontrollsystem selbsttätig und an Ereignisse gekoppelt abarbeiten. Es liegt nahe, diese Berechnungen unmittelbar an den geforderten ereignisgesteuerten Datenfluß im Kontrollsystem anzubinden. Die Forderung nach Leistungsfähigkeit läßt sich durch Parallelarbeit erfüllen. Die beschleunigerphysikalischen Berechnungen sind zweckmäßigerweise auf mehrere Einheiten aufzuteilen. Um eine Standardisierung zu erreichen, bietet es sich an, alle Berechnungen einheitlich in Regeln zu formalisieren. Alle beschleunigerphysikalischen Berechnungen für ELSA definieren eine Regelmenge bzw. ein Regelwerk, das von aktiven Einheiten parallel zu bearbeiten ist. Günstig strukturiert man das Regelwerk so, daß logisch zusammengehörende Berechnungen in einer Einheit gebündelt sind. Logisch zusammengehören z.B. alle Berechnungen der Subsysteme zum Strahltransfer vom Synchrotron nach ELSA. Eine solche Einheit ist somit durch sein zugeordnetes Regelwerk ein „**Experte**“ für ein Subsystem. Die Abdeckung aller beschleunigerphysikalischen Berechnungen durch ein System von **Regelexperten** soll damit motiviert sein; sie setzt folgende Punkte voraus:

- Ein strukturiertes Regelwerk, welche die „Intelligenz“ eines Experten für eine bestimmte Aufgabe festlegt sowie eine Menge von Ein- und Ausgabeparametern für jede Regel ist zu definieren.
- Die Zuordnung eines Regelwerkes zu einer aktiven Einheit ist durchzuführen.
- Schließlich hat die Ankopplung eines Experten an den ereignisorientierten Datenfluß des Kernkontrollsystems – es bietet sich hierfür der geforderte ereignisorientierte Warteschlangenmechanismus an – zu erfolgen.

Über dem universellen Kernsystem wird somit eine „intelligente“ Schicht der Beschleunigerphysik eingezo-gen, welche eine **Abstraktion** zur Kontrolle mit physikalisch motivierten Parametern vollzieht (Abb. 2.1). Die Experten bilden eine eigenständige Schicht im Gesamtsystem; ihre Funktionalität, genauso wie der Funktionsumfang des Kernsystems, ist für andere Applikationen oder Anwender auf einer höheren Schicht transparent nutzbar, da sie ausschließlich auf der Parametermenge des Kontrollsystems arbeiten. Die Experten und das verteilte Kernsystem bilden zusammen das **Beschleunigerbetriebssystem** und schaffen für Schichten oberhalb eine einheitliche physikalische Gesamtsicht der Beschleunigeranlagen (Abbildung 2.1).

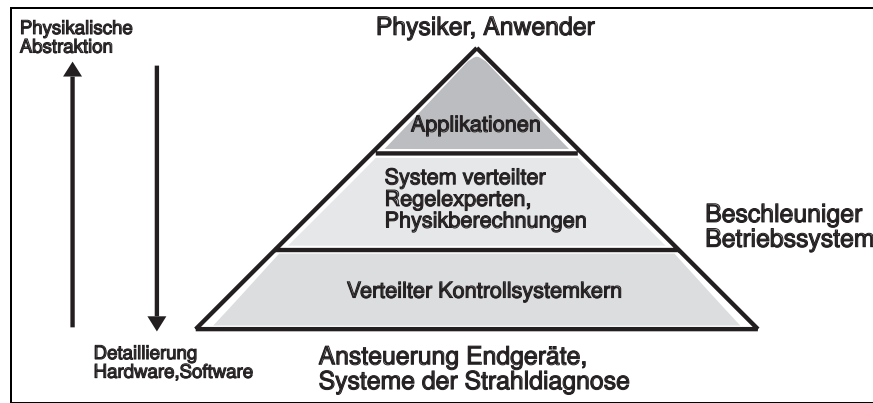


Abbildung 2.1: Aufgabenschichtung im Kontrollsystem

Die Realisierung des universellen Kernkontrollsystems und des Konzeptes der Regelexperten zur Integration beschleunigerphysikalischer Berechnungen wird im restlichen Teil des Kapitels beschrieben.

Leitlinien der Entwurfsrealisierung

Durch die Entscheidung für ein verteiltes Kontrollsystem unter Berücksichtigung der informationstechnischen Entwurfsziele können nun Leitlinien für seine Entwurfsrealisierung festgelegt werden. Weitestgehend sollen Standardeinheiten für alle Hardware- und Softwarekomponenten Verwendung finden:

- Dazu gehört der Aufbau eines Rechnernetzes mit leistungsfähigen und universell verwendbaren RISC-Workstations³. Eine hohe Verfügbarkeit sowie Skalierbarkeit des Gesamtsystems wird durch eine verteilte Kontrolle auf diesen Rechnern sichergestellt.
- Ein netzwerkfähiges Graphiksystem hoher Qualität (Farbdarstellung und Auflösung) sowie eine „de facto“ Graphikstandardsoftware finden ihren Einsatz: X11-Fenstersystem [77] und OSF/MOTIF [79].
- Das UNIX-Betriebssystem [6][63] wird für das Rechnersystem der Kontrolle ausgewählt. Es empfiehlt sich aus Gründen der Skalierbarkeit, der Portabilität sowie seiner ausgeprägten Fähigkeiten zur Interoperabilität. Es ist für wichtige, neue Kontrollsystementwicklungen anderer Beschleunigeranlagen (z.B.: CERN, COSY, DELTA, MAMI-II, CEBAF u.a.) [84] gewählt worden.
- Die Programmiersprache C findet einheitliche Verwendung auf allen Ebenen.
- Das Rechnernetzwerk der Kontrolle verwendet Ethernet (IEEE 802.3) und die Standard Internet-Kommunikationsprotokolle [15][63][59][100], welche integraler Bestandteil der UNIX-Umgebung sind.
- Ein Prozeßsystem wird auf Basis des etablierten VME-Bussystems⁴ [108] aufgebaut. Die Ankopplung des Feldbussystems erfolgt durch VME-Komponenten direkt unterhalb des Prozeßsystems. Für die Prozessorkomponenten im Prozeßsystem werden Einheiten der Motorola-Familie 680xx [69] und 683xx [70] gewählt. Es erfolgt eine Verlagerung von Intelligenz und Rechenleistung zur Bearbeitung lokaler Strahldiagnoseaufgaben und anderer Berechnungen hin zum Prozeßsystem. Für die VME-Prozessoreinheiten wird das Echtzeitbetriebssystem VxWorks [109][33] eingesetzt.
- Eine einheitliche Entwicklungsumgebung für alle Softwarekomponenten auf Workstations sowie der Einsatz von Entwicklungswerkzeugen für Programmpflege und Dokumentation wird angestrebt.

³„RISC“ ist eine Abkürzung für Reduced Instruction Set Computer und hat, wie der Name sagt, einen eingeschränkten Befehlssatz. Dieser ist hinsichtlich der Ausführung optimiert und wird direkt durch Hardware zur Ausführung gebracht. Der RISC-Befehlssatz ist darauf ausgelegt, daß Codegeneratoren von Hochsprachencompilern die optimale Abbildung eines Programms auf seinen Befehlssatz finden. Die RISC-Architektur entwickelt in Verbindung mit daran angepaßten Compilern eine optimale Leistungsfähigkeit.

⁴„VME“ bedeutet Versa Module Europe und ist ein standardisiertes Bussystem zur Verbindung verschiedener Baugruppen unterschiedlicher Hersteller. Die Mikroprozessoren der Firma Motorola sind optimal auf den VME-Bus abgestimmt. Es werden 16 Bit und 32 Bit-Prozessoren unterstützt.

Eine Untermenge dieser Standardeinheiten, in dem einen oder anderen Punkt modifiziert, taucht in allen modernen Kontrollsystementwicklungen auf [84]. Eine Verwendung von Standardkomponenten ermöglicht, daß in dem begrenzten zeitlichen Rahmen dieser Arbeit die Entwicklung des Kontrollsystems geleistet werden kann und das System „offen“ für zukünftige Erweiterungen und Entwicklungen ist.

Das Kernsystem der Kontrolle bleibt frei von beschleunigerphysikalischen Aufgaben und bekommt damit allgemeinen Charakter. Beschleunigerphysikalische Applikationen sollen an das Kernsystem ankoppeln und dann ihre Aufgaben ausführen. Diese Zerteilung steigert die Modularität im Gesamtsystem. Die Netzwerkbandbreitenbegrenzung wird durch die Verwendung mehrerer paralleler Netzwerkstränge vermindert. Die Software der Kommunikationsarchitektur muß sicherstellen, daß die geforderte Transaktionsbandbreite im System erreicht wird. Der Datenfluß im System erfolgt ereignisgetrieben. Ein solcher Mechanismus legt eine asynchrone Arbeitsweise des Gesamtsystems nahe, in das sich Applikationen einbinden lassen. Für eine Ankopplung von Applikationen werden die in Abschnitt 1.4.3 geforderten ereignisgetriebenen Mechanismen bereitgestellt. Die für die Kontrolle Verwendung findende Datenorganisation muß flexibel sein und die Datenhaltung von der Dateninterpretation trennen.

Mit der Entscheidung zur Verwirklichung eines verteilten Kontrollsystems sowie den Leitlinien zur Entwurfsrealisierung, ergibt sich die Gesamtarchitektur des realisierten Kontrollsystems.

2.2 Beschreibung der verteilten Kontrollsystemarchitektur

Die Endgeräte der Bonner Beschleunigeranlage sind räumlich über das Institutsgelände verteilt und erfordern eine Echtzeitansteuerung (z.B. Netzgeräte der Extraktionselemente). Dementsprechend müssen sich die Rechneinheiten des Kontrollsystems dieser räumlichen Aufteilung anpassen. Sie können also nur auf der Basis eines oder mehrerer Netzwerke gekoppelt sein und durch einen Botschaftenmechanismus miteinander kommunizieren. Man spricht in einem solchen Fall von einem **lose gekoppelten** System [34][101].

2.2.1 Beschreibung der verteilten Hardwarearchitektur

Aus den Kontrollsystementwicklungen anderer Beschleunigerlabors [51][67][20][21] hat sich eine strukturelle Anordnung der Rechnerhardware in drei Ebenen durchgesetzt [84]. Eine solche Einteilung erlaubt eine natürliche Aufgabenverteilung auf die verschiedenen Rechneinheiten, bestimmt durch Anforderungen der Endgeräte und Subsysteme. Sie fördert die Modularität im Gesamtsystem. Die Auslegung der verteilten

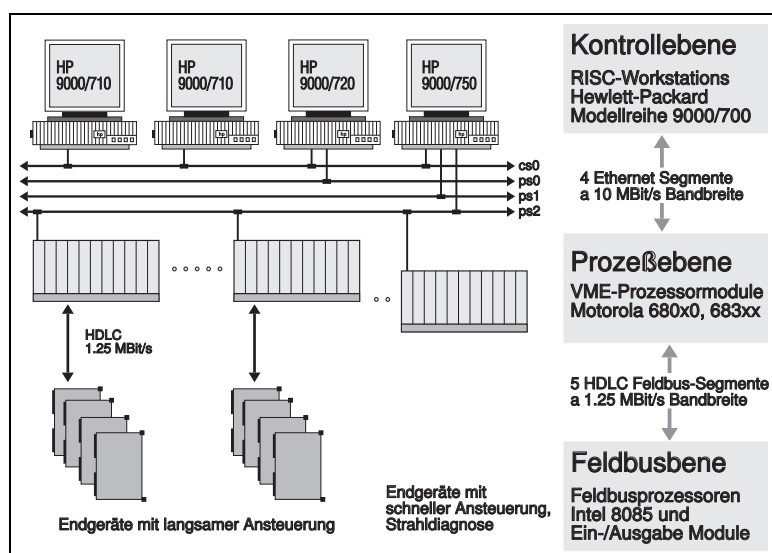


Abbildung 2.2: Hardwarearchitektur

Hardwarearchitektur im ELSA-Kontrollsystem berücksichtigt diese Entwicklung und wählt ebenfalls eine Einteilung in drei Ebenen:

1. Die **Kontrollebene** bildet die oberste Ebene des verteilten Hardwaresystems und wird durch eine Gruppe vernetzter RISC-Workstations gebildet. Auf dieser Ebene erfolgt die Bedienung der Beschleunigeranlage durch ein farbgraphisches Bedienungssystem. Alle nichtdeterministischen Applikationen sowie Anwendungen, welche eine globale Systemsicht benötigen, sind hier angesiedelt. In der Kontrollebene wird die größte Rechenleistung benötigt, da hier die überwiegende Anzahl beschleunigerphysikalischer Applikationen abläuft. Detaillierte Untersuchungen zur Strahldiagnose, wie auch zur theoretischen Beschreibung der Teilchendynamik, werden hier ausgeführt.
2. Die **Prozeßebene** ist auf der Basis des VME-Standards aufgebaut und bearbeitet subsystemorientierte Aufgaben. Deterministische Aufgabenstellungen, die eine Adaption auf den Nachbeschleunigungsmodus in Echtzeit erfordern, sind in die Prozeßebene eingebettet. Strahldiagnosesubsysteme werden auf dieser Ebene in das Kontrollsystem integriert. Die Prozeßebene leistet im Rahmen der Strahldiagnose wesentliche Vorverarbeitungen und Berechnungen, bestimmt Strahlparameter und entlastet damit die Kontrollebene. Ansteuerungen von Endgeräten, welche über die Leistungsfähigkeit des Feldbussystems hinausgehen, sind auf der Prozeßebene angesiedelt. Die Prozeßebene bindet die Feldbusebene an das Kontrollsystem an.
3. Die **Feldbusebene** ist die unterste intelligente und echtzeitfähige Instanz der Kontrollsystemarchitektur und Bindeglied zu den Endgeräten. Sie leistet die autonome Istwerterfassung aus den Endgeräten und Subsysteme auf Basis zahlreicher, standardisierter Schnittstellenkarten. Parameterwertänderungen werden an die Prozeßebene gemeldet, welche diese, im Bedarfsfall, an die Kontrollebene weiterleitet. Die überwiegende Zahl von Echtzeitansteuerungen (z.B. der Extraktionselemente) an ELSA wird auf dieser Ebene abgewickelt. Die Hardwareeinheiten der Feldbusebene wurden aus dem alten Kontrollsystem übernommen und in die verteilte Hardwarestruktur des neuen Systems eingefügt.

Abbildung 2.2 zeigt die schematisierte Anordnung der Rechnerhardware im ELSA-Kontrollsystem. Die räumliche Trennung der Rechereinheiten von Kontrollebene und Prozeßebene erfordert eine lose Kopplung über Netzwerke, die zur Zeit mit Koaxialkabeln ausgeführt sind⁵. Die Kommunikation findet auf unterster Ebene gemäß der Ethernet-Definition (IEEE-Norm 802.3) mit einer Übertragungsbandbreite von brutto 10 $\frac{MBit}{s}$ statt. Eine Anbindung des Feldbussystems erfolgt über bitserielle Kommunikationsleitungen mit einer Übertragungsbandbreite von 1.25 $\frac{MBit}{s}$, wobei das HDLC-Protokoll [42] eingesetzt wird.

Die Kontrollebene bilden eine Menge vernetzter RISC-Workstations⁶, im System als „Kontrollrechner“ bezeichnet. Alle Kontrollrechner verfügen über ein hochauflösendes Graphiksystem mit 1280x1024 Punkten und 256 Farben. Jeder Kontrollrechner ist autonom konfiguriert und verfügt über eine eigene Betriebssystemkopie; dies erhöht die Ausfallsicherheit, da ein Rechnerausfall die anderen nicht beeinflusst. Die Workstations der Kontrollebene teilen sich ein separates Netzwerk **cs0**. Über einen Signalverstärker („Repeater“) wird dieses Netzwerk in Teilsegmente zerlegt. Die Kontrollrechner haben Zugriff auf das Hausnetzwerk des Physikalischen Instituts, sind aber vom dort herrschenden Datenverkehr durch eine Brücke („Bridge“) getrennt.

Die Prozeßebene wird über drei Ethernet-Netzwerkstränge (sie heißen Prozeßnetze) **ps0**, **ps1**, **ps2** an die Kontrollebene angekoppelt. Die gewählte Anzahl der Prozeßnetze ist ein Kompromiß aus den geforderten Bandbreiten für das Kontrollsystem und einem notwendigen Verkabelungsaufwand. Insgesamt wurde die Konfiguration so bestimmt, daß die Netzwerke des Kontrollsystems keine Beschränkungen für seine Gesamtleitungsfähigkeit sind. Die Prozeßnetze erlauben eine an die Beschleunigeranlage günstig angepaßte Verteilung von Komponenten des Prozeßsystems, so daß beim Betrieb des Kontrollsystems eine gleichmäßige Belastung aller Netzwerke auf niedrigem Niveau sichergestellt ist. Untersuchungen zur mittleren Datenbelastung der Netzwerkstränge im Kontrollsystem wurden im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt und ergaben im laufenden Betrieb eine mittlere Netzwerkbelastung kleiner als 10 %. Es wird dadurch vermieden, daß

⁵Die Verkabelung auf Basis von Koaxialkabeln wird durch eine Glasfaserverkabelung ersetzt. Dies war schon von Anfang an projektiert, konnte aber bislang nicht angegangen werden. Ein Konzept für die Glasfaserverkabelung ist ausgearbeitet. Die Verwendung von Glasfaserkabeln macht die Netzwerke unempfindlich gegen elektromagnetische Einstrahlung, wie sie überall im Bereich von ELSA durch die Vielzahl gepulster Komponenten erzeugt wird. Außerdem wäre keine Neuverkabelung erforderlich, falls in Zukunft der FDDI-Standard im Kontrollsystem Verwendung finden sollte.

⁶Es werden RISC-Workstations der Firma Hewlett-Packard 9000/700 verwendet. In der ersten Ausbaustufe werden ein Rechner 9000/750 mit 64 MByte Hauptspeicher und 1.3 GByte Plattenspeicher, ein Rechner 9000/720 mit 48 MByte Hauptspeicher und 425 MByte Plattenspeicher, sowie zwei Rechner 9000/710 mit 32 MByte Hauptspeicher und 525 MByte Plattenspeicher eingesetzt. In der nächsten Stufe ist ein Ausbau um einen Rechner 9000/755 mit 128 MByte Hauptspeicher und 2 GByte Plattenspeicher und zwei Modelle 9000/715 mit 64 MByte Hauptspeicher vorgesehen. Die Kontrollrechner benutzen das Betriebssystem HP/UX in der Version 9.0 (Derivat von UNIX System V mit BSD 4.3 Erweiterungen).

die Strategie der Zugangskontrolle [101] auf das Netzwerkmedium im Fall von Ethernet eine Überlastungserscheinung zeigt⁷. Zwei Workstations der Kontrollebene verfügen über mehrere Ethernetschnittstellen und die notwendige Softwareinfrastruktur, um die Prozeßebene anzukoppeln. Sie organisieren und schalten Zugriffswege von und zur angekoppelten Prozeßebene (Routerfunktion). Die eingeschaltete Routerfunktion macht einen Zugriff auf das Prozeßsystem über Rechner, die nicht der Kontrollebene angehören, unmöglich. Andererseits können alle Rechereinheiten im Prozeßsystem untereinander und mit den Kontrollrechnern kommunizieren. Die Prozeßnetze müssen erhebliche Entfernungen (mehrere hundert Meter) überbrücken, so daß in jedes Netz Signalverstärker („Repeater,“) eingeschaltet sind, welche eine physikalische Aufspaltung in jeweils mehrere Teilsegmente durchführen.

Im Prozeßsystem kommen insgesamt 14 VME-Überrahmen („Crates“) mit 16 VME-Prozessoren auf Basis der Mikroprozessorfamilie **mc68k** zum Einsatz⁸. In jedem Überrahmen übernimmt ein Prozessormodul, gemäß der VME-Spezifikation [108], die Aufgabe eines Systemüberwachers („Controllers“). Die weitere Ausstattung richtet sich nach der Steuerungsaufgabe im angeschlossenen Subsystem. In aller Regel kommen hierbei Schnittstellenkarten oder Koprozessoreinheiten zum Einsatz, welche für eine intelligente Ansteuerung oder Strahldiagnoseaufgabe benötigt werden, deren Leistungsanforderungen die Möglichkeiten des Feldbus-systems übersteigt. Folgende Einzelgeräte, Subsysteme oder Strahldiagnosemeßsysteme sind durch VME-Module an das Prozeßsystem angebunden:

- Die Erfassung des gespeicherten ELSA-Stroms und der Strahllebensdauer wird vom Prozeßsystem ausgeführt.
- Wesentliche Teilkomponenten der neuen Zeitablaufsteuerung, insbesondere das System zur Generierung der HF-synchronisierten Injektionszeitsteuerung, ist an VME-Module gekoppelt.
- In das Prozeßsystem sind Präzisionsmeßgeräte, welche über eine Standardschnittstelle gemäß der IEC-Bus-Definition verfügen, eingegliedert. Diese sind durch das Kontrollsystem als individuelle Meßsysteme für strahldiagnostische Untersuchungen dedizierter Fragestellungen der Teilchendynamik konfigurierbar⁹.
- Das System zur breitbandigen Analyse der ELSA-Füllstruktur wurde in einer Diplomarbeit [57] entwickelt und ist in das Prozeßsystem integriert. Es dient der Verifizierung der neuen Injektionszeitsteuerung und dem damit verbundenen Injektionsschemas.
- Die Extraktionsquadrupole lassen sich optional durch digitale, arbiträre Funktionsgeneratoren auf VME-Basis angesprechen. Diese können eine Tabellenlänge von 128 k Einträgen zu jeweils 16 Bit mit einem zeitlichen Minimalabstand von 5 μ s ausgeben.
Die Hochfrequenzamplitude zur Steuerung der Resonatorspitzenspannung erfolgt ebenfalls optional durch einen Funktionsgenerator beschriebener Art.

⁷Ein Netzwerk auf Ethernet-Basis ist nicht deterministisch und legt eine globale Busstruktur fest, an die alle Rechner an-koppeln. Alle Rechner senden parallel ihre Informationen über diesen Bus und es muß folglich eine Regelung für diesen Zugriffskonflikt zum Medium geben. Die Zugriffskontrolle von Ethernet ist auf der Basis des CSMA/CD-Verfahrens geregelt [34][42]. Die inkrementelle Erweiterbarkeit eines globalen Bus ist gut, solange keine Sättigungserscheinungen auftreten. Die Ausfallsicherheit ist beschränkt, da nur ein globales Medium existiert.

⁸Im Kontrollsystem werden zwei Prozessormodule eingesetzt, sie verfügen über folgende Ausstattung:

Das 6 Höhereinheiten Prozessormodul FRC30ZBE der Firma Force basiert auf einer CPU 68030 mit einer Taktfrequenz von 25 MHz, einem Koprozessor FPU 68882 mit 4 MByte dynamischem Speicher, einer integrierten Ethernetschnittstelle, einer SCSI-Schnittstelle (sie findet im Kontrollsystem keine Verwendung, da alle VME-Systeme ohne Festplatte betrieben werden) und vier seriellen RS232-Schnittstellen.

Das 3 Höhereinheiten Prozessormodul der Firma PEP VM30 benutzt eine mit 40 MHz getaktete CPU 68030. Sie ist mit einem dynamischen Speicher von 4 MByte und drei seriellen RS232-Schnittstellen ausgestattet. Das Modul VM30 verfügt über einen zusätzlichen Prozessor MC68302 [70], aufgebaut aus einem MC68000-Prozessor mit einer RISC-Kommunikationseinheit. Der MC68302 ist mit 16 MHz getaktet und verfügt über einen 1 MByte großen statischen Speicher, welcher auch von der MC68030 aus angesprochen werden kann. Im Rahmen dieser Arbeit wurde auf der Grundlage der RISC-Kommunikationseinheit des MC68302 ein Kommunikationsmodul zur Anbindung des Feldbus-systems an die Prozeße-bene entwickelt (Abschnitt 2.3.5). Die Anbindung der VM30 an das Ethernet findet über ein weiteres Prozessormodul VCOM auf der Basis des 16 Bit Ethernet-Koprozessors 82596CA der Firma Intel statt.

⁹Die Gruppe dieser Geräte umfaßt mehrere digitale Speicheroszilloskope der Firmen LeCroy, HP und Tektronix, einen Spektrumanalysator der Firma Rhode&Schwarz, mehrere Universal-Voltmeter, mehrere HF-Millivoltmeter, ein HP Vektorvoltmeter sowie ein Signalgenerator von Rhode&Schwarz für den Einsatz im ELSA-Monitorsystem.

- Das System zur Aufnahme und spektralen Verarbeitung eines Lagesignals an ELSA ist in das Prozeßsystem integriert. Für die Echtzeitverarbeitung ist neben einem VME-Prozessormodul ein digitaler Signalkopprozessor eingesetzt.
- Das System zur Bilddatenverarbeitung für den im Transferkanal zwischen Synchrotron und ELSA eingesetzten Folienmonitor [11] und für den im Aufbau befindlichen Synchrotronlichtmonitor an ELSA [45] ist im Prozeßsystem angesiedelt. Dabei findet eine Bildverarbeitungseinheit IPP-100 [30] in Kombination mit einem VME-Prozessormodul ihren Einsatz. Sie erlaubt eine zyklussynchronisierte (getriggerte) oder periodische Datenaufnahme sowie -analyse.
- Das System zur Phasenraummessung der transversalen Teilchenbewegung reiht sich in das Prozeßsystem ein. Dazu werden mehrere Lage- und Summensignale des ELSA-Monitorsystems benutzt. Die Messung erfolgt mit einem digitalen Speicheroszilloskop, das über eine IEC-Bus Schnittstellenkarte an ein VME-Prozessormodul angeschlossen ist.

Alle VME-Prozessormodule in der Prozeßebene werden ohne Festplatte betrieben. Dies erhöht ihre Ausfallsicherheit. Die notwendige Betriebssoftware für die Prozessormodule wird von den Kontrollrechnern über die Prozeßnetze geladen. Dazu ist eine flexible Art der Konfiguration notwendig.

Zur Ankopplung der Feldebene an das Prozeßsystem werden schnelle VME-Mehrprozessorkommunikationsmodule verwendet. Ein Kommunikationsmodul muß die vorgegebene Übertragungsbandbreite von $1.25 \frac{MBit}{s}$ und das im Feldbussystem verwendete HDLC-Protokoll unterstützen¹⁰. Zusätzlich mußte eine direkte Anbindung an das Ethernet-Prozeßnetzwerk möglich sein. Die Integration des Feldbussystems in das neue Kontrollsystem ist im Abschnitt 2.3.5 ausführlich beschrieben.

2.2.2 Beschreibung der verteilten Softwarearchitektur

Die Aufgabe der Kernsoftware im Kontrollsystem ist es, seine Hardwarearchitektur zu einer „virtuellen Einprozessormaschine“ [103] funktional zusammenzufügen. Sie muß sicherstellen, daß auf einer genügend hohen Betrachtungsebene ein **kohärentes Bild** der Hardwarearchitektur für den Anwender entsteht [36][103]. Zusätzlich ist sie so aufgebaut, daß die beschleunigerphysikalische Aufgabenstellung auf Grundlage des Kernsystems gelöst werden kann.

Globale Definitionen

Eine Menge systemweiter Informationen, welche das verteilte System benötigt, werden zunächst festgelegt. Im laufenden Betrieb bleiben diese Informationen bestehen.

Wie in Abschnitt 2.1 ausgeführt, sind die „Betriebsmittel“ der Beschleunigeranlage in Kontrollsystemparameter formalisiert. Es wurde eine Konvention zur Benennung aller Kontrollsystemparameter definiert, so daß über anwenderfreundliche, eindeutige Namen systemweit im Kontrollsystem auf sie Zugriff erfolgen kann. Die entwickelte Namenverwaltung erfüllt die folgenden, für ein verteiltes System, notwendigen Eigenschaften:

- Namen sagen nichts über die Standort des Objektes aus (Transparenz der Namen).
- Für den Fall einer Veränderung des Objektstandortes muß der Objektname nicht modifiziert werden (Transparenz des Ortes).
- Es herrscht Transparenz in der Verteilung der Objekte und der dazu notwendigen Verwaltungsinformationen.

Eine hohe Zugriffsgeschwindigkeit auf Namen und daran angebundener Informationen findet besondere Berücksichtigung. Die Menge aller Namen definiert den **ELSA-Namenraum**¹¹. Weitere Ausführungen

¹⁰Die Interruptverarbeitung üblicher Kommunikationseinheiten ist zu aufwendig für die geforderte Datenrate im Feldbussystem. Nur eine Einheit, welche die Kommunikation durch direkten Speicherzugriff (DMA), parallel zur eigentlichen Kommunikationsaufgabe abarbeitet, ist für den Einsatz im Prozeßsystem geeignet. Insgesamt war zum Zeitpunkt der Entwicklung nur das Prozessorsystem VCOM/VM30 mit dem MC68302 verfügbar, für das gleichzeitig auch eine Unterstützung des Echtzeitbetriebssystems VxWorks angeboten wurde.

¹¹Bereits im alten Kontrollsystem waren ca. 2200 Parameternamen definiert. Die neue Namenskonvention wurde aktualisiert, dabei aber Rücksicht auf die bestehende Namensgebung genommen, da das Betriebspersonal damit vertraut ist.

zur Notwendigkeit einer **eindeutigen Namensdefinition** in einem verteilten System und davon abgeleiteter Informationen finden sich in [36]. Für die interne Verarbeitung im Kontrollsystem werden die eindeutigen Parameternamen aus Geschwindigkeitsgründen in systemweit eindeutige 32 Bit lange **Schlüssel** (Identifizier) übersetzt. Ein geschwindigkeitsoptimierter Parameterzugriff findet systemweit über die Parameter-Identifizierer statt. Im verteilten Kontrollsystem sind die Kontrollsystemparameter den Rechneinheiten zugeteilt. Für alle Parameter wird jeweils ein **Block von Adressierungsinformationen** gehalten, um ihre Erreichbarkeit sicherzustellen. An einen Parameter sind bestimmte **Strukturinformationen** gebunden. Dazu gehören die Speicherplatzangabe für einen Wertebereich, eine mögliche lineare Transformation, Wertebereichsgrenzen, Warnungsgrenzen, Alarmgrenzen etc. Ein Kontrollsystemparameter verfügt über eine Reihe von **Attributen**, die seine konkrete Behandlung im laufenden Kontrollsystem näher festlegen. Dazu gehören z.B Attribute zur Festlegung eines Schreibschutzes oder einer Zugriffs- und Alarmbehandlung etc. Jeder Rechner in Kontroll- und Prozeßebene verfügt über eine statische Rechnertabelle sowie eine **Netzwerkarte** des gesamten Systems. Mit Hilfe der Netzwerkarte kann ein Rechner jeden anderen Rechner über die Netzwerkstränge des Kontrollsystems erreichen. Alle Rechneinheiten der Kontroll- und Prozeßebene haben Zugriff auf ein logisch zusammengehörendes **Dateisystem** auf Basis des NFS-Standards. Das „Network File System“ NFS ist eine betriebssystem- und rechnerunabhängige Möglichkeit, lokale Dateisysteme netzwerkweit zur Verfügung zu stellen [59]. **Fehlermeldungen** werden innerhalb des Kontrollsystems einheitlich behandelt und in sieben Fehlerklassen nach ansteigender Wichtigkeit eingeteilt¹². Ein Alarm- und Loggersystem nimmt Alarmmeldungen entgegen, bewertet und sichert sie in einem Alarm-Logbuch. Das entwickelte Alarmsystem ist als Teil des Kommunikationssystems der Kontrolle in Abschnitt 2.4.3 beschrieben.

Softwarearchitektur des Kernsystems

Die Gesamtfähigkeiten, welche das Kontrollsystem seinen Anwendern anbieten kann, wird vor allem durch das „Beschleunigerbetriebsystem“ und nicht durch die Hardware bestimmt. Die Software kann nicht, wie im Fall der Hardware, in statische Blöcke eingeteilt werden, da sie dynamischer und vielseitiger ist. Zur Beschreibung der Softwarearchitektur wird deswegen von der Hardwarearchitektur abstrahiert und angepaßte Begriffsbildungen verwendet. Analog dazu, daß aktive Hardwareeinheiten Prozessoren heißen, wird allgemein für aktive Softwareeinheiten der Begriff **Prozeß**¹³ eingeführt. Die Schlüsselidee ist dabei, daß ein Prozeß eine Aktivität beliebiger Art darstellt. Er ist durch sein Programm, seine Eingaben, Ausgaben und seinen Zustand festgelegt. Ein Prozeß muß einer Hardwareinheit nicht fest zugeordnet sein.

Mit dieser Begriffsbildung erweist sich das verteilte Kontrollsystem, unter Berücksichtigung aller Anforderungen, einschließlich denen der Beschleunigerphysik, als **eine Menge kooperierender und kommunizierender Prozesse, welche gemeinsam die Beschleunigerkontrolle ausführen**.

Damit die Prozesse des Kontrollsystems kooperieren, sind Mechanismen zur Interprozeßkommunikation¹⁴ Voraussetzung und von wesentlicher Bedeutung für das Gesamtsystem.

Der folgende Teil beschreibt schrittweise den Aufbau zum verteilten Kernsystem. Ausgegangen wird vom lokalen Kernsystem der Einrechnerlösung. Mehrere lokale Einrechnerkernsysteme bilden ohne weitere Maßnahmen ein paralleles Kernsystem. Durch Verkopplung der lokalen Kernsysteme entsteht aus einem parallelen Kernsystem das verteilte Kernsystem der Kontrolle.

Ein rechnerlokales Kernsystem besteht aus einer Menge aktiver Prozesse, die auf einer Kernsoftware arbeiten, welche im wesentlichen Mittel zur Datenspeicherung, zur Synchronisierung und zur Interprozeßkommunikation bereitstellt. Es gestaltet sich frei von beschleunigerspezifischer Programmierung (Abschnitt 1.4.3) und ist somit universell einsetzbar. Die lokale Kernsoftware setzt sich aus einer Kommunikationsschicht mit Ereignismechanismus, einer Datenbank und einer funktionalen Zugriffsschnittstelle zusammen (Abb. 2.3 oben), welche von aktiven Instanzen – den Prozessen – genutzt werden. Sie gruppieren sich um die Kerndatenstrukturen und formieren ein **rechnerlokal** arbeitsfähiges Kernkontrollsystem (Abb. 2.3 links unten). Aus „makroskopischer“ Sicht bildet das soweit beschriebene „mikroskopische“ System eine aktive Kontrollzelle, welche Lese- und Schreiboperationen erlaubt, mit anderen Kontrollzellen kooperieren kann

¹²Diese Einteilung von Meldungen in Fehlerklassen wird auch in anderen Kontrollsystemen benutzt [40].

¹³Der Prozeßbegriff und die damit verbundenen Konzepte sind in der Fachliteratur behandelt [6][63][100][103].

¹⁴Diese Mechanismen müssen, wegen der verteilten Hardwarestruktur, über Rechengrenzen hinweg arbeiten.

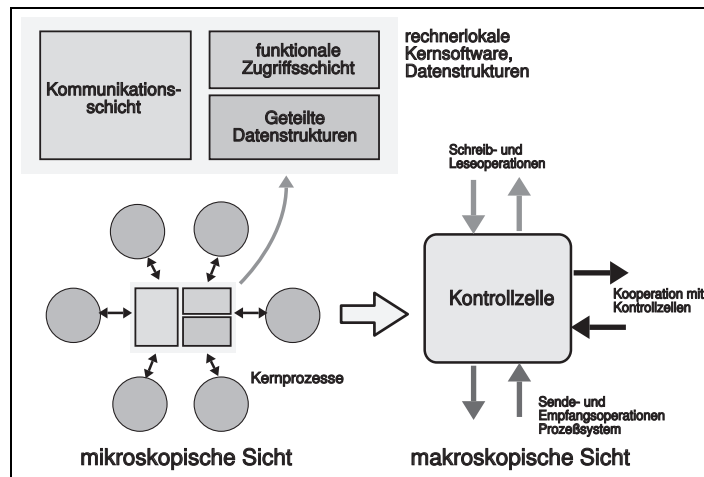


Abbildung 2.3: Kernsoftware, Prozesse und Kontrollzelle

und Mechanismen zur Kommunikation mit dem Prozeßsystem bereitstellt. Abbildung 2.3 rechts dient der Verdeutlichung.

Das rechnerlokale Kernsystem wird auf alle Rechereinheiten¹⁵ verteilt und bildet ohne weitere Maßnahmen bereits ein **paralleles** System (Abb. 2.4 links). Nach Ablauf der Startphase der rechnerlokalen Kernsysteme

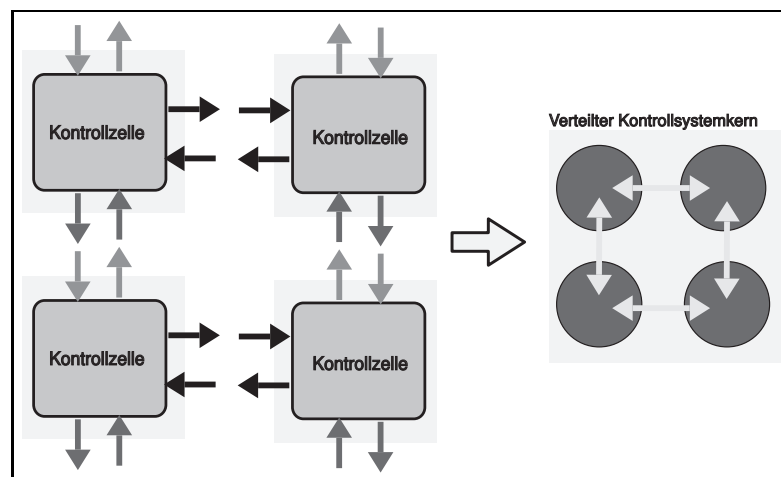


Abbildung 2.4: Parallele Kontrollzellen, Übergang zum verteilten Kern

verbinden sich deren Prozesse untereinander über alle Rechereinheiten hinweg und führen eine Kopplung zu einem **virtuellen, verteilten Kontrollsystemkern** herbei, wobei die Hardwarestruktur für einen Anwender nicht mehr erscheint.

Nach der Formierung aus dem parallelen zum verteilten System ist eine **einheitliche Gesamtkontrollansicht** hergestellt. Aus Anwendersicht ist das verteilte Kernkontrollsystem aus drei Schichten zusammengesetzt, welche Abbildung 2.5 zeigt:

1. Die innerste Schicht bildet das **Kommunikationssystem**; es beruht auf dem Prinzip des Botschaftenaustausches [34]. Der gesamte Datenfluß im System wird durch das Kommunikationssystem transportiert, synchronisiert und koordiniert. Durch das Kommunikationssystem werden insbesondere interne Verwaltungsdaten, Synchronisationsdaten und die Wertedaten der Maschinenparameter übertragen. Das Kommunikationssystem realisiert die geforderten Interprozeßkommunikationsmechanismen.
2. Eine weiter außen liegende Schicht bildet das rechnerübergreifende **verteilte Datenbanksystem**,

¹⁵Für diese überblicksartige Darstellung wird nicht zwischen Rechnern auf Kontroll- bzw. Prozeßebene unterschieden.

welches durch Kopplung der Kontrollzellen aus deren lokalen Datenbanken während der Startphase des Gesamtsystems zusammengesetzt wurde. Die Aufgabe des Datenbanksystems ist die Speicherung und Verwaltung von statischen Strukturinformationen und sich dynamisch ändernden Parameterwerten der Beschleunigeranlage, die deren Zustandsbild beschreiben. Die Parameterwerte werden entweder von einem Anwender-/Applikationsprogramm (Sollvorgaben) oder durch die autonome Istwerterfassung verändert.

3. Die **Applikationsschnittstelle** schließt als oberste Schicht das Kernsystem nach außen hin ab. Applikationen verbinden sich über diese Schnittstelle mit dem Kontrollsystem. Der Zugriff auf alle Parameter der Maschinenkontrolle erfolgt lesend oder schreibend über Parameternamen. Um Werteänderungen von Maschinenparametern zu erfahren, stehen für Applikationen entsprechend den informationstechnischen Anforderungen aus Abschnitt 1.4.3 ein **Abfragemechanismus**, ein **ereignisgesteuerter Warteschlangenmechanismus** und ein **direkter Unterbrechungsmechanismus** bereit. Die Mechanismen können innerhalb einer Applikation gemischt verwendet werden.

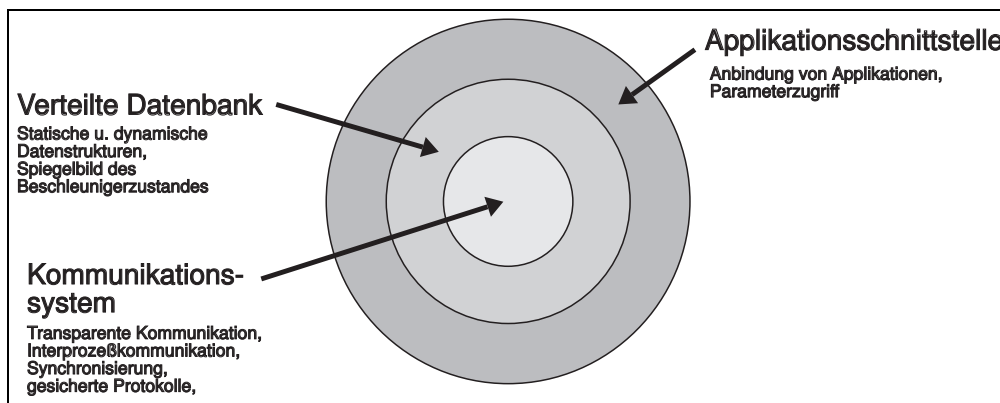


Abbildung 2.5: Softwarearchitektur

Die drei Grundbausteine des Kontrollsystem-Kerns werden wegen ihrer Bedeutung für das Gesamtsystem in späteren Abschnitten 2.4, 2.5, 2.6 ausgeführt. Das Kernsystem erfüllt die gestellten Anforderungen an eine allgemeine Einsetzbarkeit und ist von den beschleunigerphysikalischen Aufgaben getrennt. Beschleunigerphysikalische Applikationen nutzen das ihnen angebotene verteilte Kernkontrollsystem zur Lösung ihrer Aufgabenstellung.

Anbindung beschleunigerphysikalischer Berechnungen an das Kernsystem

Zur Anbindung beschleunigerphysikalischer Berechnungen an das Kernsystem wird das in Abschnitt 2.1 motivierte Konzept implementiert. Die beschleunigerphysikalische Berechnungen werden in das Kontrollsystem durch die Entwicklung einer Menge eigenständiger Prozesse integriert, welche alle beschleunigerspezifischen Berechnungen und Funktionen logisch kapseln und zur Laufzeit des Systems in aktive Einheiten konzentrieren. Solche Prozesse heißen gemäß dem motivierten Konzept **Regelexperten** oder nur kurz **Experten**. Im Abschnitt 2.8 findet sich die genaue Beschreibung des implementierten Systems verteilter Regelexperten.

2.3 Software des Prozeßsystems

Das Prozeßsystem koexistiert mit dem Kernsystem. Beide Teile sind über das Kommunikationssystem lose miteinander gekoppelt. Es findet eine Lastverteilung auf beide Systeme entsprechend ihren speziellen Fähigkeiten und den gestellten Anforderungen statt.

2.3.1 Softwareorganisation im Prozeßsystem

Die Softwareorganisation im Prozeßsystem hat aus Anwendersicht einen dem Kernsystem ähnlichen Aufbau. Die Bereiche Kommunikationsschicht, Prozeßdatenbank und Applikationsschnittstelle haben aber einen spezialisierten Funktionsumfang:

1. Die Kommunikationsschicht der Prozeßebene ist analog der des Kernsystems aufgebaut. Für die Kommunikationsschicht existiert kein Unterschied in der Behandlung von Prozeß- und Kernsystem. Die Kommunikationsschicht unterstützt dementsprechend den Zugriff auf alle Parameter im gesamten Kontrollsystem, auch wenn sie nicht dem lokalen Kontext eines VME-Prozessormoduls angehören. So kann von einem VME-Prozessormodul auf jeden Parameter der Maschinensteuerung lesend und schreibend zugegriffen werden. Zusätzlich umfaßt die Kommunikationsschicht Mechanismen zur selbsttätigen Konfiguration eines VME-Prozessormoduls in der Startphase des Systems. Die Kommunikationsschicht besitzt eine Überwachung und Durchsatzmessung.
2. Die Prozeßdatenbank speichert und verwaltet statische und dynamische Daten lokal für ein VME-Prozessormodul. Die Verwaltung lokaler Daten erweist sich als ausreichend, da auf der Prozeßebene keine Gesamtsicht des Systems notwendig ist, um die hier gegebene lokale Aufgabenstellung zu bearbeiten. Die Prozeßdatenbank ist eine Konstruktion auf Basis dynamischer Datenstrukturen (binäre gewichtsbilancierte Bäume [17][35]). In der Startphase eines VME-Prozessormoduls wird der lokale Arbeitskontext der Einheit im verteilten Datenbanksystem über die Kommunikationsschicht angefragt und geladen. Die Prozeßdatenbank wird im Rahmen dieses Initialisierungsprozesses angelegt und durch die Kommunikationsschicht mit Daten gefüllt.
3. Die Applikationsschnittstelle gestattet den Abfrage- und einen Unterbrechungsmechanismus für den Zugriff auf lokale Parameter. Für den rechnerfernen Zugriff wird nur der Abfragemechanismus unterstützt. Jedem Parameter der lokalen Prozeßdatenbank kann über die Applikationsschnittstelle eine Servicefunktion zugeordnet werden, welche bei allen Lese- und Schreiboperationen selbsttätig ausgeführt wird. Ein Anwendungsprogrammierer im Prozeßsystem stellt in aller Regel für jeden Parameter seiner Applikation eine solche Servicefunktion zur Verfügung. Sie bündelt alle Aktivitäten für den Parameterzugriff und definiert eine transparente und abstrahierte Schnittstelle. Dies ist besonders

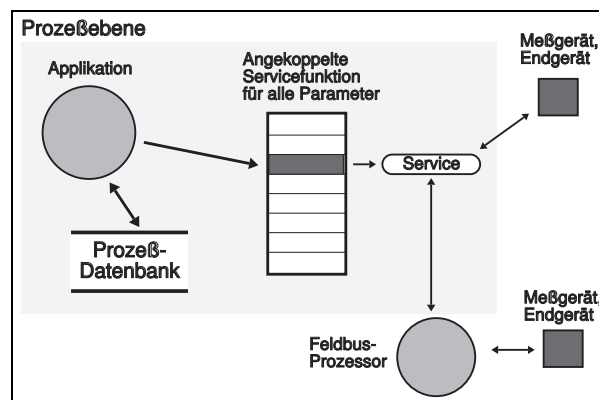


Abbildung 2.6: Servicefunktionen in der Prozeßdatenbank

für hardwarenahe Anwendungen wichtig, um so den Zugriff auf die eigentliche Hardware zu verbergen (Abb. 2.6). Durch Definition einer Servicefunktion und ihre Parameterzuordnung wird eine dynamische Erweiterung oder Einschränkung der Kontrollsystemfunktionalität vorgenommen, welche für Applikationen transparent nutzbar ist. Insgesamt erleichtert diese Konzeption die Entwicklung beschleunigerphysikalischer Anwendungen im Prozeßsystem wesentlich, da der Applikation nur Parameternamen bekannt sein müssen und eine zugeordnete Funktionsmenge zu konstruieren ist.

2.3.2 Echtzeitbetriebssystem VxWorks

Das Betriebssystem der Prozeßebene muß aus Sicht der Kontrollebene gute Kommunikationsfähigkeiten (Bandbreite) zur Kopplung beider Ebenen bereitstellen. Weiter erfordern die speziellen Aufgaben der Prozeßebene ein echtzeitfähiges Betriebssystem. Von der Wahl des Echtzeitbetriebssystems hängt die Gesamtleistungsfähigkeit der Prozeßebene entscheidend ab. Die Handhabbarkeit und das Antwortverhalten des Gesamtkontrollsystems ist in besonderer Weise von den Kommunikationseigenschaften des Echtzeitbetriebssystems bestimmt.

Die Entscheidung für VxWorks wurde zum einen durch umfangreiche Untersuchungen anderer Beschleunigerinstitute nahegelegt [10][66]. Zum anderen bestätigte eine mehrmonatige Testphase von Vxworks im Physikalischen Institut diese Untersuchungen.

Hinsichtlich der Auswahl von VxWorks für das ELSA-Prozeßsystem haben folgende Punkte die wichtigste Rolle gespielt: VxWorks unterstützt ein **Taskkonzept** (ähnlich zu einem Threadkonzept [103]) und nicht das sequentielle Prozeßkonzept von UNIX. Alle Tasks teilen sich einen gemeinsamen Adreßraum; ein hoher Grad an Parallelarbeit ist dadurch gegeben und begünstigt die Kommunikation zwischen Kontroll- und Prozeßebene. VxWorks hat einen hierarchischen Aufbau sowie einen kompakten und leistungsfähigen Echtzeitkern¹⁶. Die Entwicklungsumgebung von VxWorks ist in die UNIX-Umgebung der Kontrollebene integriert. Der Entwickler arbeitet in einer ihm bekannten Umgebung, unter Zuhilfenahme bewährter UNIX-Werkzeuge und einer Menge von GNU-Entwicklungswerkzeugen. Entwicklungsrechner ermöglichen die Fehlersuche im Prozeßsystem über einen fensterorientierten Debugger, welcher in ihre X11/Motif-Umgebung eingepaßt ist. Es ist ebenso möglich, eine Fehlersuche auf einem VME-Prozessormodul durchzuführen. Dazu wird eine Shell-Umgebung mit C-Interpreter angeboten. Die Implementierung von Treiberprogrammen für spezielle Ein-/Ausgabekarten wird gut unterstützt¹⁷. Die Anbindung an ein Netzwerk weist sich als ein Hauptmerkmal von VxWorks aus, wobei die Standardprotokolle der Internetfamilie (TCP, UDP, IP sowie höhere Protokolle wie z.B. FTP) unterstützt werden. Ein VME-Prozessormodul unter VxWorks hat über das NFS-System transparenten Zugriff auf UNIX-Dateisysteme in der Kontrollebene und braucht keine lokalen Festplatten. VxWorks ist bezüglich der Hardware herstellerunabhängig und bietet somit eine sichere Plattform für zukünftige Entwicklungen an ELSA.

2.3.3 Softwaregrundmodule auf Basis von VxWorks

Auf VxWorks aufbauend, wurde für das Prozeßsystem ein Gerüst von Softwaremodulen für den Betrieb im Kontrollsystem erstellt, welches die Bereiche Startphase, Echtzeitverarbeitung, Alarmverarbeitung und Einbindung von Meßgeräten umfaßt.

Für jede Rechereinheit im Prozeßsystem wird die Softwarekonfiguration sowie Art und Anzahl der Applikationen vom Kontrollsystem in ihrer **Startphase** zusammengestellt. Dies erforderte die Entwicklung einer einheitlichen Startsoftware für alle VME-Rechereinheiten des Prozeßsystems. Ergänzt wird diese Software auf der Kontrollebene durch einen Programmgenerator, welcher ausgehend von einer Applikationsbeschreibung ein „Start-Skript“ für einen VME-Rechner selbsttätig erzeugt und es an einer, für diesen VME-Rechner, ausgewiesenen Stelle im Dateisystem eines Kontrollrechners ablegt. Eine VME-Rechereinheit hat einen Zugriff auf diese Stelle im Dateisystem. Bestandteil des Start-Skripts sind unter anderem eine Netzwerkkarte von Kontroll- und Prozeßebene, die Definition eines Alarmrechners, die Initialisierung der Kommunikationsschicht und der Prozeßdatenbank, die Initialisierung der Alarmverwaltung, das Laden eines Parameterkontextes für die Maschinensteuerung und eine damit verbundene Sollwertbelegung dieser Parameter sowie das Starten aller notwendigen Kernprogramme und Applikationen. Wird die VME-Rechereinheit gestartet, führt die Abarbeitung des Start-Skripts zu einem konsistenten Zustand und einem arbeitsfähigen System, welches in das Prozeßsystem eingegliedert ist. Das Kommunikationssystem stellt alle Funktionen bereit, welche zur Abarbeitung der Startphase notwendig sind.

Für die **Echtzeitverarbeitung** von vier Triggersignalen wurde ein Softwaremodul erstellt. An die Echtzeitverarbeitung eines externen Triggersignals kann auf verschiedene Arten eine Bearbeitung von Funktionen in Form einer Liste angehängt werden. Sobald ein externes Triggersignal auftritt, wird diese Funktionsliste – über die Standardbehandlung durch eine Unterbrechungsroutine hinaus – abgearbeitet. Eine Applikation kann auf die Auslösung eines Triggersignals warten und so ihre Arbeit, an einem ausgezeichneten Zeitpunkt des Nachbeschleunigungsmodus (z.B. Start der Extraktion) leisten.

Grundlage für die Einbindung von **IEC-Bus-Meßgeräten** in das Kontrollsystem war die Verfügbarkeit eines universell einsetzbaren IEC-Bus-Treibers für das Echtzeitsystem VxWorks auf der Basis einer Standard IEC-Bus Ein-/Ausgabekarte. Dazu wurde ein genauer Funktionsumfang zur allgemeinen Verwendung eines solchen Moduls im ELSA-Kontrollsystem festgelegt. Für das breitbandige Monitorsystem zur Überwachung der Füllstruktur war die Entwicklung eines solchen Treibermoduls notwendig [57]. Das Treibermodul

¹⁶Der Echtzeitkern zeichnet sich durch seine positiven Eigenschaften [33] hinsichtlich Multitasking, preemptivem Scheduling mit Prioritätssteuerung, Intertaskkommunikation, Lastunabhängigkeit, deterministischem Verhalten und I/O-Durchsatz aus.

¹⁷Besonders die Entwicklungen der Treiberprogramme zur Anbindung vom Feldebussystem an die Prozeßebene und des Meßgerätebusses haben davon profitiert; siehe die Abschnitte 2.3.5 und 5.9.

ist auf Datendurchsatz optimiert und erreicht Übertragungsraten von ca. $250 \frac{kBytes}{s}$ ¹⁸. Auf Basis dieses Treibermoduls gestattet das neue Kontrollsystem den Aufbau frei kombinierbarer Meßsysteme für die Strahl-diagnose durch einen systemweiten Zugriff auf IEC-Bus-Meßgeräte. Die dazu notwendige Entwicklung ist Teil der Strahl-diagnosemaßnahmen im Rahmen der Extraktionssteuerung und wird deswegen im Abschnitt 5.9 beschrieben.

Alle VME-Rechnereinheiten im Prozeßsystem nehmen an der **Alarmverarbeitung** des Kontrollsystems teil. Ein Alarmsystem ist Teilbereich des Kommunikationssystems, das in Abschnitt 2.4.3 dargestellt ist. Eine Funktionsbibliothek regelt den Zugriff und die Teilnahme an der Alarmverarbeitung für das Prozeßsystem.

Neben diesen Standardmodulen existieren weitere Softwareteile, welche auf spezielle Applikationen¹⁹ eines VME-Prozessormoduls in Kombination mit Koprozessorkarten abgestimmt sind.

2.3.4 Schichtenmodell zur Einbindung von Ein-/Ausgabemodulen

Die Integration von Ein-/Ausgabekarten findet auf Basis eines Schichtenmodells statt, wie es Abbildung 2.7 darstellt. Die unterste Einbindung von Ein-/Ausgabemodulen in das Prozeßsystem findet auf der Ebene

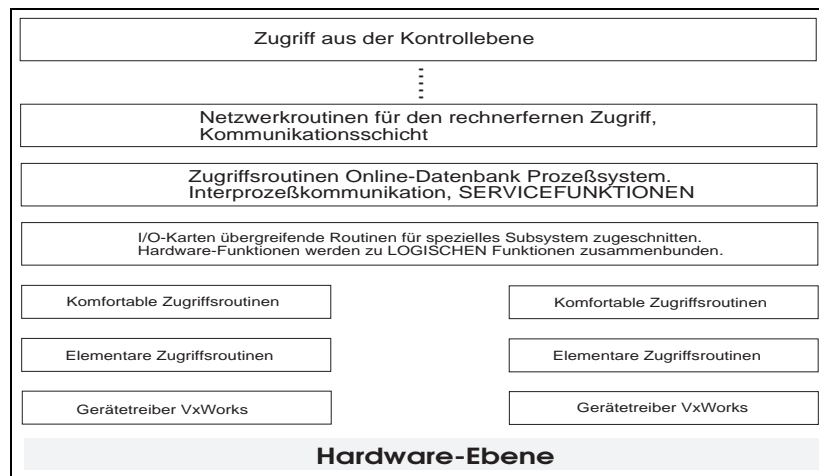


Abbildung 2.7: Schichtenmodell zur Integration von Ein-/Ausgabekarten in das Prozeßsystem

eines VxWorks-konformen Treibers [109] statt. Die Grundfunktionen des Treibers bündeln ein oder mehrere darüberliegende Softwareschichten. Mehrere Ein-/Ausgabekarten lassen sich durch Zusammenfassung ihrer Zugriffsroutinen zur Anbindung eines gesamten Subsystems konzentrieren. Daraus resultierende Servicefunktionen werden in der Prozeßdatenbank, wie in Abschnitt 2.3.1 ausgeführt, verankert. Diese Konstruktion sichert den netzwerkweiten Zugriff im Kontrollsystem auf dieses Subsystem. Mit dem Schichtenmodell wird eine Trennung in einen hardwareabhängigen Teil, und eine Menge von Servicefunktionen vollzogen, welche die Einbindung von Subsystemen ohne Detailkenntnisse des Prozeßsystems zuläßt.

Entsprechend diesem Modell wurde die Steuerung der 50 kV-Quelle zur Erzeugung polarisierter Elektronen [110] auf Grundlage von mehreren VME-Ein-/Ausgabekarten mit digitalen, bzw. analogen Ein- und Ausgängen durchgeführt. Die 50 kV-Quelle ist ein Beispiel für die Integration eines kompletten Subsystems auf der Basis von VME-Einheiten in die Kontrolle und wird in Abbildung 2.8 in einer Übersicht gezeigt. Sie kann als Leitschnur für zukünftige Entwicklungen dienen. Eine Besonderheit dieses Subsystems ist die Verwendung von Lichtwellenleitern zur Kopplung der Steuereinheit mit den Endgeräten, da diese baubedingt auf 50 kV Potential liegen, weswegen eine Potentialtrennung erfolgen mußte. Das Subsystem ist sowohl lokal von der Prozeßebene als auch durch die Kontrollebene bedienbar.

¹⁸Die Durchsatzrate hängt von der Art zu übertragender Daten, vom Meßgerät und der VME-Rechnereinheit ab. Die Angabe ist gültig für eine optimale Kombination dieser Punkte und wurde zwischen einem VME-Prozessormodul VM30 und einem Speicheroszilloskop LeCroy9424E gemessen.

¹⁹Hier sind beispielhaft für Strahl-diagnoseaufgaben das System zur Bildverarbeitung und das System zur schnellen Spektralanalyse von Lagedaten zu nennen.

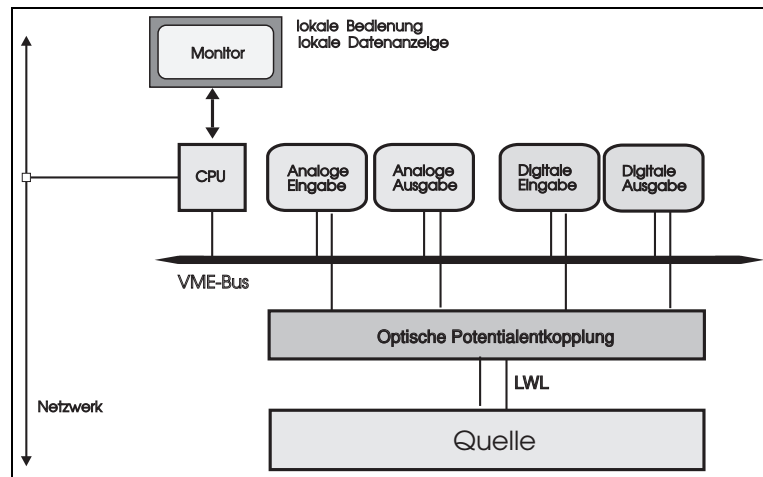


Abbildung 2.8: Steuerung der 50 kV-Quelle für polarisierte Elektronen

2.3.5 Anbindung des Feldbussystems an die Prozeßebene

Im alten Kontrollsystem waren alle Endgeräte oder Subsysteme durch das Feldbussystem in die Kontrolle eingebunden. Die autonome Istwerterfassung wurde ausschließlich vom Feldbussystem geleistet. Eine Umstrukturierung der vorhandenen Felddbus-Hardwareeinheiten in das neue Kontrollsystem erwies sich als notwendig, da höhere Bandbreitenforderungen zu erfüllen waren; zusätzlich ist eine möglichst hohe Modularität und Strukturierung nach Funktionsaufgaben angetrebt.

Die Ankopplung des Felddbusystems im alten Kontrollsystem erfolgte über ein in Eigenentwicklung entstandenes, spezielles Schnittstellenmodul („Line-Driver“ [115]) an den Peripheriebus des zentralen Kontrollrechners VAX 11/750. Die Einbindung des Felddbus in das neue Kontrollsystem erforderte die komplette Neuentwicklung einer vergleichbaren Einheit. Im neuen Kontrollsystem erfolgt die Anbindung über ein VME-Mehrprozessorsystem mit einem Kommunikationsmodul auf Basis des MC68302 [70] (siehe Abschnitt 2.2.1). Die Realisierung der Software ist Bestandteil der vorliegenden Arbeit.

Der Neuentwicklung sind durch die Funktionsweise und den Aufbau des Felddbusystems im alten Kontrollsystem Randbedingungen gesetzt [115]. In aller Regel übernimmt ein Felddbusprozessor die Ansteuerung eines Endgerätes. In besonderen Fällen steuert und überwacht ein Felddbusprozessor eine Gruppe von – hinsichtlich der Steuerungsgeschwindigkeit – langsamen Endgeräten (z.B. Vakuumpumpen). Die Istwerte der Endgeräte werden zyklisch abgefragt oder, im Fall von Schalterwertänderungen, unmittelbar erfaßt. Dieses Verfahren stellt die autonome Istwerterfassung von Parameterwerten der Endgeräte sicher. Mehrere Felddbusprozessoren sind in einen Felddbus-Überrahmen gruppiert. Alle Felddbus-Überrahmen müssen über eine gemeinsame serielle Datenübertragungsleitung (damit wird eine Bustopologie im Felddbus festgelegt) an eine Überwachungseinheit angebunden sein. Die dem Felddbusystem oder einem Felddbuszweig übergeordnete Überwachungseinheit wird im folgenden Felddbuscontroller genannt. Er fragt die angeschlossenen Stationen eines Felddbus Stationen zyklisch ab, nimmt Datenpakete der Felddbusprozessoren entgegen, dekodiert die Pakete und kann sie dann der Prozeßebene zur Verfügung stellen. Durch das Abfrageverfahren stellt er sicher, daß die Datenkommunikation mit den Felddbusprozessoren kontrolliert abläuft und jeweils nur ein Felddbusprozessor seine Datenpakete an einen zugeordneten Felddbuscontroller weitergibt. Es ist wesentlich, daß ein Felddbusprozessor nicht selbstständig Datenpakete generiert, sondern sie nur auf Anforderung der Felddbuscontroller schickt. Der Felddbuscontroller übernimmt durch den zyklischen Abfragemechanismus auch die Systemaufsicht [42][101] über den Kommunikationspfad; ein weiteres Zuteilungsverfahren zur Nutzung der gemeinsamen Datenleitung ist nicht mehr notwendig, sondern durch den Abfragezyklus gegeben. Das Zuteilungsverfahren ist aus Sicht der Felddbusprozessoren dahingehend fair, daß alle Felddbusprozessoren in gleichen Zeitintervallen abgefragt werden; eine implizite Prioritätssteuerung besteht allerdings für den Fall, daß mehrere Felddbusprozessoren in einem Überrahmen gleichzeitig Datenpakete senden wollen. Eine lokale Überwachungseinheit (der Crate-Controller) regelt dann die Vergabe des Kommunikationskanals. Der Crate-Controller ist zunächst der Kommunikationspartner des Felddbuscontrollers. Im Fall eines sendebereiten Felddbusprozessors vermittelt er die Kommunikation zwischen ihm und dem Felddbuscontroller. Der Datenfluß in der Felddbus-Kommunikation verläuft, entsprechend dem Abfrageverfahren halb-duplex. Auf

das Feldbussystem kann jederzeit schreibend Zugriff genommen werden. Ein schreibender Zugriff ist z.B. immer dann notwendig, wenn eine Parameterwerteänderung in einem Endgerät vollzogen werden soll, oder spezielle Kommandos an einen Feldbusprozessor zu übertragen sind (z.B. Reset-Kommando).

Die Datenübertragungsgeschwindigkeit zum Feldbussystem beträgt $1.25 \frac{MBit}{s} = 156.25 \frac{KByte}{s}$. Die physikalische Datenkodierung erfolgt im NRZI-Format²⁰ [42][101]. Das bitorientierte, synchrone HDLC-Protokoll²¹ wird für die Datenübermittlung und die Formation von Datenpaketen eingesetzt. Das HDLC-Protokoll hat sein Einsatzgebiet für hohe Bitraten, besonders dann, wenn zwischen Informationspaketen, im Vergleich zur Datenübertragungszeit, ein großer zeitlicher Abstand besteht. Dieser Fall ist typischerweise für das Feldbussystem der Kontrolle gegeben. Die Bereitstellung einer Einheit zur Anbindung des Feldbussystems an die Prozeßebene der neuen Kontrolle berücksichtigt folgende Punkte.

Die Datenübertragungsgeschwindigkeit $1.25 \frac{MBit}{s}$, die physikalische Datenkodierung (NRZI), das Übertragungsprotokoll (HDLC) sowie die Paketdefinitionen des alten Kontrollsystems müssen weiterhin unterstützt werden; Hardwareänderungen in allen Feldbus-Überrahmen bzw. Softwareänderungen in allen Feldbusprozessoren wären sonst notwendig. Für die Einbindung in das neue Kontrollsystem wurde vielmehr eine Lösung angestrebt, welche die alte Anordnung unberührt läßt, lediglich „Umstecken“ der Datenleitungen des Feldbussystems an VME-Einheiten ist notwendig zur Integration in die neue Kontrolle. Dies ist besonders im Hinblick auf eine kurze Inbetriebnahmephase des neuen Kontrollsystems wichtig.

Die Datenanordnung zwischen den VME-Prozessoren der Prozeßebene und den Feldbusprozessoren ist unterschiedlich und erfordert für jede Datenübertragung eine Vertauschungsprozedur („byte swapping“)²², abhängig vom Inhalt des Datenpakets. Die Feldbusprozessoren können Datenworte bis zu 16 Bit logisch zusammengehörend bearbeiten. Der Feldbuscontroller leistet die Umsetzung auf Datenformate des neuen Kontrollsystems (typischerweise eine Transformation in eine 32 Bit-Einheit).

Ein schreibender Zugriff auf das Feldbussystem muß parallel von aktiven Prozessen im Feldbuscontroller jederzeit durchführbar sein.

Zur Einbindung des ELSA-Monitorsystems in das Kontrollsystem ist eine virtuelle Punkt-zu-Punkt-Verbindung zwischen einer Applikation auf Prozeßebene und einem Feldbusprozessor des Monitorsystems notwendig. Zwischen der Übermittlung einer Anfrage oder eines Kommandos an einen „Monitor-Prozessor“ und dessen Antwortmeldung kann ein nicht näher zu spezifizierendes Zeitintervall (z.B. im Fall der Kalibrierung von Monitorstationen) vergehen. Der Abfragemechanismus läuft in dieser Zeit weiter und es müssen Vorkehrungen getroffen werden, etwaige Antwortpakete an Applikationsprozesse weiterzuvermitteln, diese aber bis zur Auslieferung der Antwort zu blockieren, damit eine Schnittstelle mit synchronem Datenfluß entsteht.

Die Zahl der Stützstellen für Steuerkurven war im alten Kontrollsystem auf 1500 begrenzt, da keine Datenpakete mit mehr als 3000 Byte übertragbar waren (Limitierung durch die Hardware und Software des Line-Drivers). Für den Nachbeschleunigungsmodus ist diese Stützstellenzahl, mit welcher Maschinenzyklen bis ca. 40 Sekunden abgedeckt sind, zu gering. Der Feldbuscontroller hat hinsichtlich dieser Datenlänge keine Beschränkung. Nach oben ist eine Grenze durch die freie Speicherkapazität der Feldbusprozessoren gegeben, welche nur Steuerkurven bis zu einer Maximallänge von 5000 Stützstellen aufnehmen können. Die Feldbusprozessoren konnten diese Stützstellenzahl allerdings erst nach einer Änderung ihrer Speicher-aufteilung und einer Softwareanpassung aufnehmen. Jede Stützstelle besitzt eine Länge von 16 Bit; der Feldbuscontroller muß also mindestens 10 kByte Datenpakete diskretisierter Steuerkurven in einem Block übertragen.

Das ausgewählte VME-Mehrprozessorsystem erfüllt die gestellten Hardwareanforderungen. Der Kommunikationsbaustein MC68302 [70] unterstützt die geforderten Datenraten, die Datenkodierung, das Übertra-

²⁰NRZI ist ein Abkürzung für „non-return-to-zero-inverted“. In dieser Kodierung wird ein logische 0 als Flankenwechsel übertragen, eine logische 1 mit konstantem Pegel. Der Übertragungstakt der Signale wird durch spezielle Taktgeneratoren erzeugt und kann aus dem Signal zurückgewonnen werden. Dies ist unbedingt notwendig, damit sich Sender und Empfänger auf diesen Takt synchronisieren können. Die Taktsynchronisierung wird durch die Flankenwechsel im Signal erzeugt. Es muß sichergestellt sein, daß ein Flankenwechsel häufig genug auftaucht, damit die Synchronisierung erfolgen kann.

²¹HDLC bedeutet „high-level data link control“. HDLC kann auf verschiedene Arten eingesetzt werden, die ausführlich in [42] erklärt sind. Für die Verwendung im ELSA-Kontrollsystem wird der NRM-Modus („normal response mode“) eingesetzt.

²²Die Motorola-Prozessoren verwenden das „big endian“-Format, Intel-Prozessoren das „little endian“-Format [100]. Im alten Kontrollsystem hatten die verwendeten Intel-Prozessoren 8085 und der Zentralrechner VAX 11/750 eine einheitliche Datenanordnung gemäß dem „little endian“-Format, so daß die angeführte Problemstellung dort nicht aufgetreten ist.

gungsprotokoll und die notwendige Paketlänge für die Steuerkurven im Nachbeschleunigungsmodus. Das „byte swapping“ wird in Software ausgeführt.

Zur Kopplung des VME-Prozessorsystems mit dem Feldbussystem wurde eine VxWorks-Treibersoftware entwickelt, welche die Grundfunktionen zur Kommunikation von VxWorks-Prozessen mit dem Feldbus bereitstellt. Durch die Treiberfunktionen kann ein Datenkanal zum Feldbus geöffnet und darauf parallel zugegriffen werden. Die Treibersoftware erlaubt die Übertragung von Datenpaketen bis zu 64 kByte, wobei für den Einsatz im Kontrollsystem zur Zeit eine Maximallänge von 16 kByte festgelegt ist, welche die Übertragung von mehr als 8000 Stützstellen gestattet. Die Steuerkurven können durch die Entwicklung des Feldbuscontrollers mehr als dreimal länger sein als im alten System.

Aufbauend auf den Treiberfunktionen wurde eine Bibliothek von Anwenderzugriffsroutinen für das Feldbussystem entwickelt, welche den Feldbus als eine logische Einheit erscheinen lassen. Bestandteil der Zugriffsbibliothek ist eine funktionale Schnittstelle, welche eine (synchrone) Punkt-zu-Punkt-Verbindung zwischen einem Anwenderprozeß und einem Feldbusprozessor simuliert. Die Einbindung des ELSA-Monitoringsystems in die Prozeßebene als logisches Subsystem wurde mit dieser Zugriffsbibliothek durchgeführt und ist im Abschnitt 5.7 beschrieben. Eine Bibliothek von Servicefunktionen für den Zugriff auf das Feldsystem ist ebenfalls ausgearbeitet. Die Servicefunktionen wickeln unter anderem den Datentransfer von Steuerkurven an die entsprechenden Feldbusprozessoren ab. Das Konzept aus Treiber, Zugriffsbibliothek und Servicefunktionen folgt der Konzeption zum Softwareaufbau in der Prozeßebene, wie sie im Abschnitt 2.3.4 an einem Beispiel erläutert wurde.

Zur zyklischen Abfrage angeschlossener Feldbus-Überrahmen wurde der Prozeß `poll`, welche die Zugriffsbibliothek verwendet, entwickelt. Der `poll`-Prozeß leistet folgende Dienste:

- Jeder an den Feldbus angeschlossene Feldbus-Überrahmen wird in einem schnellen Zyklus (100 Hz) abgefragt. Neue Feldbus-Überrahmen oder Feldbusprozessoren werden in einem langsamen Abfragezyklus erkannt und dann in den schnellen Zyklus übernommen. Somit adaptiert sich der `poll`-Prozeß immer an die aktuelle Konfiguration des Feldbussystems.
- Innerhalb eines schnellen Zyklus werden Datenpakete von Feldbusprozessoren entgegengenommen, ausgewertet und im Fall von Parameterpaketen mit Istwertdaten an Prozeß- und Kontrollebene weitergereicht. Der `poll`-Prozeß vermittelt somit die Istwernerfassung von der Feldbusebene über das Prozeßsystem in die Kontrollebene. Um die Paketraten auf den Prozeßnetzen möglichst gering zu halten werden, wenn möglich, nicht einzelne Parameterwerte übermittelt, sondern eine Gruppe von Parameterwerten zu einem „Multipaket“, zusammengestellt und in einem einzigen Datenpaket an die darüberliegenden Schichten gesendet.
- Der `poll`-Prozeß beantwortet die Sollwertanfragen von Feldbusprozessoren, indem er Sollwerte aus der lokalen Prozeßdatenbank ausliest und an die Feldbusprozessoren sendet. Der konsistente Zustand der lokalen Prozeßdatenbank wird im Rahmen der Startphase des Feldbuscontrollers bei der Kontrollebene angefragt. Diese Aufgabe übernehmen der `csattach`- und der `csimage`-Prozeß, welche auch die Prozeßdatenbank anlegen. Ihr Kommunikationspartner auf Kontrollebene ist der `psboot`-Prozeß.

Zusätzlich wurde ein Überwachungsprozeß `fbperf` entwickelt, welcher den Datenverkehr im Feldbussystem analysiert (Datenraten), eine Fehlerstatistik führt und Ergebnisse in Form von Kontrollsystemparametern an die Kontrollebene weitergibt.

Die Datenübertragungszeit T_u eines Informationspakets der Länge b Bits aus der Prozeßebene in einen Feldbusprozessor, kann durch folgende Beziehung bestimmt werden:

$$T_u = 800 \text{ ns} \cdot b + t_0, \quad t_0 = 38.4 \mu\text{s}. \quad (2.9)$$

Die Zeit t_0 läßt sich aus der Paketstruktur des HDLC-Protokolls ableiten (Protokoll-Overhead), da die Mindestpaketlänge 6 Byte beträgt.

Der Aufbau des Feldbuscontrollers und seiner Software ermöglichte eine Aufteilung des Feldbussystems in fünf Gruppen:

1. Zur Vorbereitung auf die Beschleunigung polarisierter Elektronen ist das Korrektorsystem in ein Feldbussegment gruppiert.

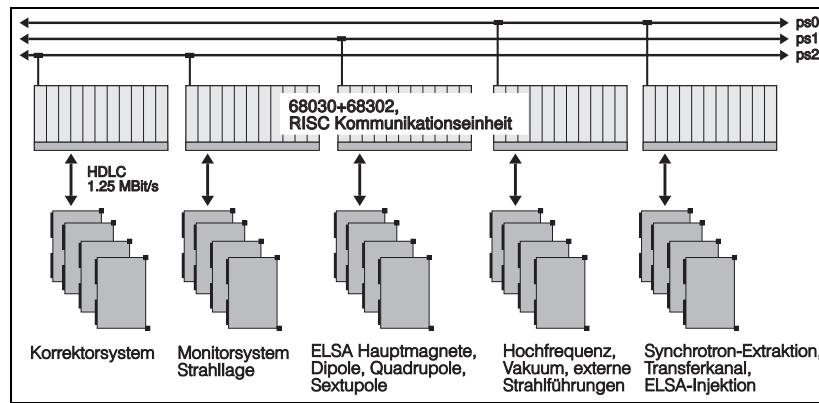


Abbildung 2.9: Feldbusarchitektur

2. Das ELSA-Monitorsystem ist durch ein Feldbussegment an die Prozezebene angekoppelt. Damit steht für Strahl diagnose und zur Erfassung der Gleichgewichtsbahn eine ausreichende Übertragungsbandbreite bereit.
3. Die ELSA-Hauptmagnete sind über ein Feldbussegment an die Prozezebene angebunden. Die angestrebten Setzgeschwindigkeiten mit den erwarteten Datenmengen für die Netzgerätesteuerkurven zur Einstellung des Nachbeschleunigungsmodus sollten sich damit einhalten lassen.
4. Die Ansteuerung des Hochfrequenzsystems, des Vakuumsystems, der Hilfsbetriebe und der externen Strahlführungen übernimmt ein weiteres Feldbussegment.
5. Die langsame Ansteuerung der Synchrotron-Extraktionselemente (Bumper, Kicker, Septummagnete), der Elemente des Transferkanals vom Synchrotron nach ELSA (Strahlschieber und Quadrupole) und der Injektionselemente von ELSA (Kicker, Septa) erfolgt über einen Feldbus.

Die gute räumliche Abdeckung des Institutsgeländes mit den Prozeßnetzen der Kontrolle minimierte die Länge der Verbindungsleitungen zum Feldbussystem; die Störanfälligkeit gegen elektromagnetische Einstrahlung wurde damit reduziert. Den Hauptteil der autonomen Istwerterfassung aller technischen Endgeräte leistet auch im neuen Kontrollsystem das Feldbussystem.

Insgesamt ist die Forderung nach hoher Bandbreite, Modularität und funktionaler Strukturierung der Feldbuseinheiten gut erfüllt. Die Gesamtkonfiguration des ELSA-Feldbussystems zeigt das Schema in Abbildung 2.9.

2.4 Kommunikationssystem

Das Kommunikationssystem der Kontrolle stellt **schnelle Interprozeßkommunikationsmechanismen** im Sinne von Abschnitt 2.2.2 bereit, welche Datenmengen unterschiedlichster Größe²³ möglichst effizient und sicher zwischen Prozessen auf einem oder verschiedenen Rechnern zu transportieren vermögen. Das Kommunikationssystem macht dabei keinen Unterschied zwischen Kontrollrechnern oder Rechereinheiten des Prozeßsystems; es stellt die **transparente** Erreichbarkeit jedes Kontrollparameters von jedem Rechner aus sicher. Dazu sieht das Kommunikationssystem eine kleine Menge von Operationen für die Kommunikation von Prozessen vor, welche eine klare Schnittstelle zwischen den Prozessen darstellt und so **Modularität** fördert.

Dieser Abschnitt beschreibt das Kommunikationssystem der Kontrolle. Zunächst werden rechnerlokale Kommunikation und rechnerferne Kommunikation unterschieden. Die rechnerlokale Kommunikation auf Basis eines Ereignissystems wird vorgestellt. Anschließend wird zur rechnerfernen Kommunikation übergegangen; sie beruht auf dem Prinzip des Botschaftenaustauschs. Dafür werden grundlegende Netzwerk begriffsbildungen erläutert und das OSI-Schichtenmodell als Vergleichsmodell für die verwendete Internetprotokollarchitektur

²³Die Datenmenge variiert zwischen einigen Byte für Verwaltungsinformationen oder z.B. Sollwertvorgaben und Megabytes für die Einbindung der Strahl diagnosesubsysteme.

angeführt. Eigenschaften von verbindungslosen und verbindungsorientierten Protokollen werden besprochen und Entscheidungen auf Grundlage diskutierter Implementierungsaspekte für die Entwicklung der rechnerfernen Kommunikation im ELSA-Kontrollsystem getroffen. Das Modell des Botschaftenaustauschs auf Basis von Datagrammen und die Verwendung rechnerferner Prozeduraufrufe („remote procedure calls“-RPC) wird ausgeführt; Leitfaden dabei ist eine „Client-Server“-Modellbildung. Das Alarmsystem der Kontrolle ließ sich auf Grundlage der ausgeführten Konzepte als Teil des Kommunikationssystems entwickeln. Das Kommunikationssystem der verteilten ELSA-Kontrolle wurde hauptsächlich im Rahmen dieser Dissertation entwickelt.

2.4.1 Rechnerlokale Kommunikation

Erster Schritt zum Aufbau eines effizienten Kommunikationssystems ist eine lokale Interprozeßkommunikation mit möglichst hoher Bandbreite. Das UNIX-Betriebssystem stellt einige Methoden für die lokale Interprozeßkommunikation bereit²⁴; die Methode mit der größten Übertragungsbandbreite ist die Kommunikation über einen gemeinsamen Speicher („shared memory“). Die Synchronisierung paralleler Zugriffe durch mehrere Prozesse auf einen gemeinsamen Speicher wird von der Kontrollsystemsoftware über Semaphore abgewickelt. Der gemeinsame Speicher ist ein Segment im Hauptspeicher eines Rechners, welcher von mehreren Prozessen gleichzeitig an deren Datenbereiche angebonden werden kann. Ein Prozeß kann unmittelbar durch Angabe einer Adresse auf ein solches Speichersegment zugreifen.

Damit der Datenfluß im Kontrollsystem ereignisorientiert arbeitet und somit das Kontrollsystem nur dann aktiv wird, falls Änderungen von Parameterwerten stattfinden, wurde ein Mechanismus geschaffen, welcher diese Änderungen („Ereignisse“) bekannt gibt und zunächst in die rechnerlokalen Kontrollsystemprozesse transportiert. Ein Teil der rechnerlokalen Prozesse nimmt die Ereignisse entgegen, bereitet sie für eine rechnerferne Verarbeitung auf und transportiert sie zu anderen Kontrollrechnern. Ein Ereignis bewirkt Aktivitäten der beteiligten Kontrollsystemprozesse. Die Weiterleitung eines Ereignis an einen Prozeß erfordert eine Softwareunterbrechung. Das UNIX-Betriebssystem stellt hierfür den Signal-Mechanismus bereit, welche den gerade aktiven Verarbeitungsfluß eines Prozesses unterbricht und die Verarbeitung in eine Unterbrechungsroutine umleitet. Die Unterbrechungsroutine behandelt das Ereignis um nach dessen Abarbeitung den Verarbeitungsfluß an der Stelle weiterzuführen, an der die Unterbrechung stattgefunden hat. Die Ereignisverarbeitung führt eine Datenflußkontrolle durch und paßt so die Rate der Ereigniserzeugungen (ausgelöst durch Änderungen von Parameterwerten) durch den Kontrollsystemkern an die Verarbeitungsgeschwindigkeit des Ereignis-Empfängers an (Abb. 2.10). Der Ereignis-Erzeuger speichert dazu Ereignisse in einem

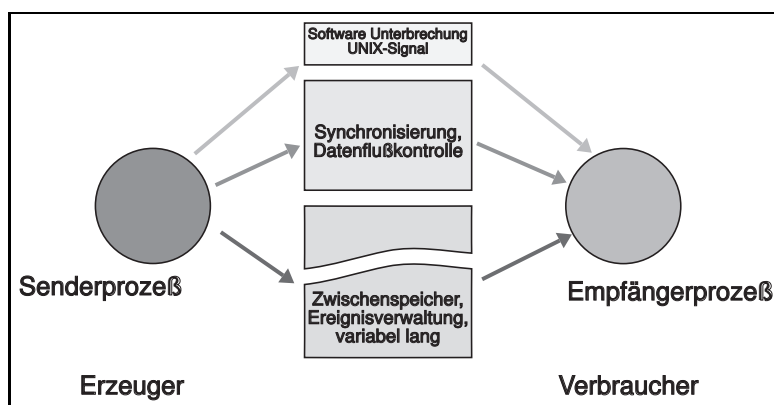


Abbildung 2.10: Datenflußkontrolle der Ereignisverarbeitung

gemeinsamen Zwischenspeicher (ein „shared memory“-Segment) solange, bis sie der Empfänger bearbeiten kann²⁵. Das beschriebene Verfahren sichert eine Ereignisverwaltung, welche somit die Ereigniserzeugung von der Ereignisverarbeitung entkoppelt. Ein Engpaß an dieser Stelle würde sich unmittelbar auf die Lei-

²⁴Darunter finden sich unter anderem der gemeinsame Speicher, Warteschlangen, Pipelines, Semaphore und Signale etc. Eine ausführliche Darstellung dazu findet sich in der UNIX-Fachliteratur z.B. [6][100].

²⁵Es handelt sich hier um das klassische Erzeuger-Verbraucher-Problem der Informatik.

stungsfähigkeit des Kommunikationssystems und somit auf die Verarbeitungsgeschwindigkeit des gesamten Kontrollsystems auswirken.

Der beschriebene, lokale Ereignismechanismus wird zur Ankopplung von Applikationen an das Kontrollsystem in Form des direkten Unterbrechungsmechanismus und des ereignisorientierten Warteschlangenmechanismus aus Abschnitt 2.2.2 angeboten. Die Verwendung des Signalmechanismus für den direkten Unterbrechungsmechanismus begründet sich durch seine Schnelligkeit, das Verfahren ist allerdings noch nicht zufriedenstellend. Der Signalmechanismus bewirkt eine direkte (harte) Kopplung zweier Prozesse, welche im allgemeinen unerwünscht ist. Er ist ein sehr einfaches Synchronisationsmittel und wird üblicherweise nur zwischen dem Rechnerbetriebssystem und einem Benutzerprozeß eingesetzt. Es sind nur zwei ausgezeichnete UNIX-Signale zur freien Verwendung verfügbar. Die Verwendung von Signalen zur Synchronisation ist mit besonderer Sorgfalt ausgeführt. Das Kontrollsystem verwendet zum Teil bereits weitergehende Konzepte, um die rechnerlokale Kommunikation abzuändern und enger mit der rechnerfernen Kommunikation zu verbinden. Ereignisse werden, wie bereits für die rechnerferne Kommunikation geschehen, durch Botschaften vermittelt. Die Bandbreitenforderung an das Kontrollsystem muß natürlich streng eingehalten werden. Zur Vermittlung des Warteschlangenmechanismus an Applikationen wird vom Kernsystem der `csnotify`-Prozeß eingesetzt. Er nimmt Ereignisse in Form des direkten Unterbrechungsmechanismus entgegen und sendet sie als Botschaften zu angekoppelten Applikationen (Abb. 2.11). Dazu werden die Konzepte der rechnerfernen

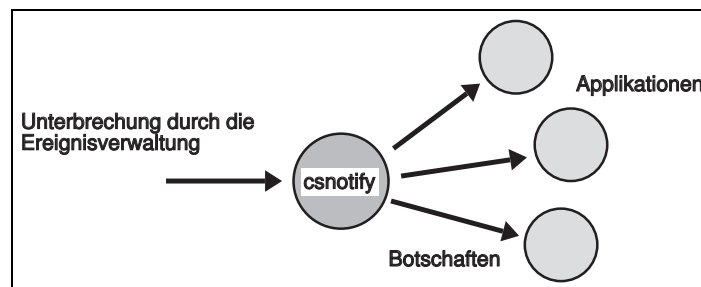


Abbildung 2.11: Lokale Ereignisverarbeitung mit `csnotify` und Botschaftenaustausch.

Kommunikation eingesetzt; es ist durch die Entwicklung von `csnotify` ein wichtiger Schritt zur Vereinheitlichung von rechnerlokaler und rechnerferner Kommunikation vollzogen.

2.4.2 Rechnerferne Kommunikation

Der wichtigste Unterschied zwischen einem verteilten System und einem zentralen System liegt darin, daß die rechnerferne Kommunikationsaufgabe in einem zentralen System nicht gegeben ist oder über einen gemeinsamen Speicher bei gleichzeitiger Koordination durch das lokale Betriebssystem ausgeführt wird. In einem verteilten System spielt die rechnerferne Kommunikation die **entscheidende** Rolle. Da die Rechnerhardware der Beschleunigersteuerung räumlich verteilt ist²⁶, kommt für die Kommunikation nur eine lose Kopplung, d.h. die Kopplung über den Austausch von Botschaften, in Frage.

Schichtenprotokolle als Leitfaden für die Implementierung

Das OSI-Modell („Open Systems Interconnection Reference Model“) [42] wurde entworfen, um Kommunikation in offenen Systemen zu ermöglichen. Ein **offenes System** ist vorbereitet für eine Kommunikation mit anderen Systemen. Dabei werden Standardregeln benutzt, welche das Format, den Inhalt und die Bedeutung von gesendeten und empfangenen Nachrichten bestimmen. Diese Regeln werden formalisiert zu **Protokollen**. Ein Protokoll ist eine grundsätzliche Übereinkunft, wie Kommunikation vonstatten zu gehen hat. Im Rahmen der Realisierung der rechnerfernen Kommunikation dient das OSI-Modell als Referenzmodell.

Es unterteilt, wie in Abbildung 2.12 links dargestellt, die Kommunikation in sieben Schichten, von denen jede einen spezifischen Kommunikationsaspekt behandelt. Auf diese Art kann das Gesamtproblem in Teilprobleme gegliedert werden, welche unabhängig voneinander einfacher zu lösen sind. Jede Schicht bietet

²⁶Die räumliche Verteilung der Rechnerhardware ist typisch für die Aufgabe einer Beschleunigersteuerung, da die zu steuernden Geräte und Subsysteme in aller Regel bereits räumlich verteilt sind, aber eine intelligente Ansteuerung durch eine Rechneinheit benötigen; die räumliche Verteilung der Hardware ist jedoch keine Notwendigkeit für ein verteiltes System.

eine Schnittstelle für die nächst höhere Schicht an. Eine Schnittstelle besteht aus einer Menge von Operationen, die zusammen einen Dienst festlegen, welcher Anwendern angeboten wird. Die Bitübertragungsschicht

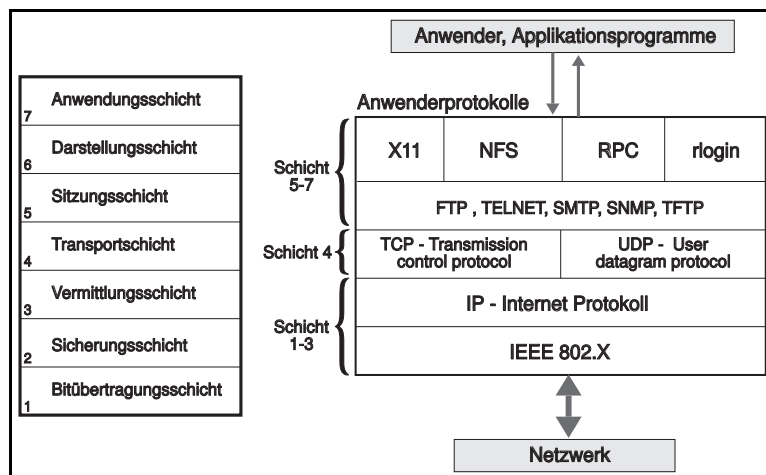


Abbildung 2.12: OSI-Referenzmodell, Internetprotokollfamilie, Protokollschichten insgesamt

legt die physikalische Datenübertragung von Bits zwischen Rechereinheiten fest. Die Sicherungsschicht faßt Bits zu Rahmen („frames“) zusammen und überprüft deren korrekte Übertragung. Die Hauptaufgabe der Vermittlungsschicht ist die Auswahl eines besten Weges zur Übertragung einer Nachricht zwischen zwei Rechnern (**Routing**). Die Aufgabe der Transportschicht ist die Bereitstellung einer gesicherten Datenübertragung. Die Sitzungsschicht erweitert die Funktionen der Transportschicht und bietet zusätzlich Synchronisationsmöglichkeiten an. Die Darstellungsschicht erlaubt einer rechnerunabhängige Übertragung strukturierter Informationen. Die Anwendungsschicht stellt komfortable Anwenderprotokolle für allgemeine Aktivitäten bereit.

Weitere ausführliche Darstellungen des OSI-Modells finden sich in [42][103]. Das OSI-Modell ist Leitfaden sowohl für die Auswahl konkreter Netzwerkprotokolle als auch für die Entwicklung rechnerferner Kommunikationsmechanismen. Beide Aspekte werden im folgenden Abschnitt besprochen.

Das OSI-Modell schreibt keine Protokolle zur Realisierung seiner verschiedenen Schichten vor. Für das Kontrollsystem muß deswegen eine möglichst weit verbreitete und standardisierte Protokollfamilie gewählt werden. Sie sollte eine offene Kommunikation zulassen und leistungsfähig genug sein, die Anforderungen des ELSA-Kontrollsystems abzudecken. Die Internetprotokollfamilie²⁷ enthält Standardprotokolle, welche in einem UNIX-Umfeld, wie es auch für das ELSA-Kontrollsystem gegeben ist, Anwendung finden. Das VxWorks-System der VME-Rechner in der Prozeßebene ist hinsichtlich seiner Unterstützung der Internetprotokollfamilie ausgewählt worden. Der Aufbau der Internetprotokolle ist in Abbildung 2.12, neben dem OSI-Modell, als Teil des Protokollblocks dargestellt und ausführlich in [15][101] beschrieben. Auf oberster Ebene, sie entspricht den Schichten 5 bis 7 des OSI-Modells, finden sich Anwenderprotokolle FTP, TELNET, SMTP, SNMP etc., welche für die engere Verwendung im Kommunikationssystem der Kontrolle geringe Bedeutung haben. Die Transportprotokolle TCP (Transmission Control Protocol) und UDP (User Datagram Protocol) sind von großer Bedeutung. Sie entsprechen im wesentlichen der Schicht 4 (Transportschicht) des OSI-Modells, wobei TCP vollkommen der Schicht 4 zuzuordnen ist und UDP zwischen Schicht 3 und Schicht 4 liegt. Beide Transportprotokolle benutzen das IP (Internet Protocol) auf Schicht 3 zur Daten-Auslieferung durch Netzwerkpakete. Auf der Basis von IP ist eine Verbindung mehrerer Netzwerke durch Router möglich, wie es für das ELSA-Kontrollsystem erforderlich ist (ELSA-Netzwerk **cs0** und die Prozeßnetze **ps0**, **ps1**, **ps2**). Die unteren beiden Schichten 1 und 2 sind durch die Verwendung von Ethernet (IEEE Standard 802.3) für das Kontrollsystem festgelegt. Neben den Internetprotokollen setzt das Kontrollsystem weitere Anwenderprotokolle ein: Für die graphische Benutzeroberfläche das X11-Protokoll, für ein systemweites Dateisystem das NFS-Protokoll, welches das Konzept des rechnerfernen Prozeduraufrufs ausnutzt und weitere Protokolle. Damit ergibt sich insgesamt der Protokollblock, den Abbildung 2.12 zeigt.

²⁷Statt der Bezeichnung Internetprotokollfamilie wird oft nur die Kurzbezeichnung TCP/IP verwendet, da es die weiteste Verbreitung gefunden hat. Es darf nicht vergessen werden, daß die Internetprotokollfamilie wesentlich umfangreicher ist und sich nicht auf das TCP/IP beschränkt.

Rechnerferne Kommunikationsmechanismen im verteilten System

Die lose Kopplung der Rechneinheiten im Kontrollsystem über Netzwerke erfordert die Implementierung eines rechnerfernen, transparenten Kommunikationssystems. Das OSI-Modell behandelt einen Teilaspekt der Kommunikationsarchitektur im verteilten Kontrollsystem, nämlich wie eine Nachricht vom Sender zum Empfänger gelangt. Es sagt nichts darüber aus, wie die Kommunikation insgesamt in einem verteilten System aufzubauen ist. Allerdings gibt das OSI-Modell einen Leitfaden zur Entwicklung der Kommunikationsmechanismen im verteilten System.

Das OSI-Modell unterscheidet für die Netzwerk-Kommunikation zwei Verbindungsmethoden [100]:

1. Ein **verbindungsorientierter** Dienst setzt voraus, daß die zwei an der Kommunikation beteiligten Prozesse zunächst eine Verbindung miteinander aufbauen, bevor die eigentliche Kommunikation erfolgt. Die Zeit für den Verbindungsaufbau kann im Vergleich zur reinen Datenübermittlungszeit lang sein. Zwischen den beiden an der Kommunikation beteiligten Prozessen scheint eine feststehende Verbindung geknüpft zu sein („virtuelle Punkt-zu-Punkt-Verbindung“). Ein verbindungsorientierter Dienst wird meist eingesetzt, wenn mehrere Meldungen auszutauschen sind oder eine große Datenmenge in einem Vorgang zu übertragen ist. Er stellt sicher, daß die Daten in der Reihenfolge beim Empfänger ankommen, in der sie gesendet wurden; zugleich findet eine Fehlerüberwachung und Fehlerkorrektur statt, so daß die Datenübertragung insgesamt fehlerfrei ist. Eine Kontrolle des Datenflusses, um den Datenempfänger durch einen zu schnellen Datentransfer nicht zu einem Datenverlust zu provozieren, findet statt. Zusammengefaßt benötigt ein verbindungsorientierter Dienst drei Schritte: Aufbau der Verbindung, Transfer der eigentlichen Nutzdaten und Abbau der Verbindung.
2. Das Gegenteil eines verbindungsorientierten Dienst ist ein **verbindungsloser** Dienst, der auch als Datagramm-Dienst bezeichnet wird. Im Fall einer solchen Verbindungsart werden lediglich Botschaften zwischen Prozessen ausgetauscht. Jede Botschaft wird dabei unabhängig von anderen übertragen und enthält eine vollständige Adressierung (Sender und Empfängerkennung). Eine Botschaft, transportiert durch einen verbindungslosen Dienst, kann von darunterliegenden Netzwerkschichten in eine Anzahl von Paketen zerstückelt werden, welche in nicht festgelegter Reihenfolge beim Empfänger ankommen müssen. Die Datenübertragung muß nicht gesichert sein, d.h. es findet für diesen Fall keine Fehlerüberwachung und keine Datenflußkontrolle statt.

Im Fall der Internet-Protokollfamilie stellt TCP einen verbindungsorientierten und UDP einen verbindungslosen Dienst bereit.

Aspekte für eine Implementierung

Die Akzeptanz eines verteilten Kontrollsystems hängt immer von seiner Leistungsfähigkeit ab. Sie ist wiederum stark von der Kommunikationsgeschwindigkeit beeinflusst, wobei diese nicht selten stärker von den gewählten Protokollen und der Implementierung, als von den zugrundeliegenden Konzepten abhängt. Der Einsatz bestimmter Protokolle im Rahmen des Kommunikationssystems ist deswegen mit Sorgfalt zu treffen.

Schreiboperationen auf Kontrollsystemparameter sind abgeschlossene Operationen und können jederzeit ausgeführt werden. Die interaktive Bedienung der Beschleunigeranlagen besitzt einen asynchronen Charakter, d.h. Abfolge und Häufigkeit von Eingaben ist nicht voraussagbar und folgt keiner genau festzulegenden Reihenfolge. Das Datenpaket für eine Schreiboperation umfaßt nicht mehr als einige 10 Bytes. Die Anzahl von Schreiboperationen pro Sekunde kann in einer Größenordnung von mehreren Hundert liegen (quasi-analoge Steuerung). Eine autonome Istwerterfassung erfolgt ebenfalls asynchron zu allen anderen Aktivitäten im Kontrollsystem. Die Vermittlung eines gemessenen Istwertes durch das Kontrollsystem erfordert ebenfalls nur die Übertragung einiger 10 Bytes. Für Schreiboperationen, wie auch den Transport von Istwerten im ELSA-Kontrollsystem empfiehlt sich der Einsatz eines verbindungslosen Dienstes.

Für die Einstellung des Nachbeschleunigungsmodus sind vom Kontrollsystem Steuerkurven in Form umfangreicher Datentabellen zu generieren, welche für alle Steuerkurven mehrere 100 kByte umfassen. Sie werden in einer Schreiboperation zu Feldbusprozessoren, bzw. Prozessormodulen und Funktionsgeneratoren im Prozeßsystem transportiert. Eine solche Operation ist verhältnismäßig selten notwendig, der damit verbundene Datentransfer hingegen jedesmal umfangreich. Für das „Laden“ des Nachbeschleunigungsmodus ist ein verbindungsorientierter Dienst angemessen.

Die Integration der Strahldiagnose kann einen umfangreichen Rohdatentransport für das Kontrollsystem bedeuten. Eine Datenmenge bis zu einer Größe von 1 MByte und mehr ist zu übertragen²⁸. Der Rohdatentransport ist eher selten, aber mit großen Datenmengen verbunden, so daß auch hierfür ein verbindungsorientierter Dienst angemessen ist.

Abbildung 2.13 zeigt eine Größenverteilung des erwarteten Datenumfangs aller ELSA-Parameter. Mehr als 90 % aller Datenbereiche haben eine Größe von weniger als 1000 Byte. Es handelt sich dabei um Schalterparameter, analoge Sollwertvorgaben oder Istwerte, Statusmeldungen und Zeichenketten, welche häufig, aber asynchron im Kontrollsystem zu transportieren sind. Der verbleibende Rest umfaßt vor allem Tabellen zur

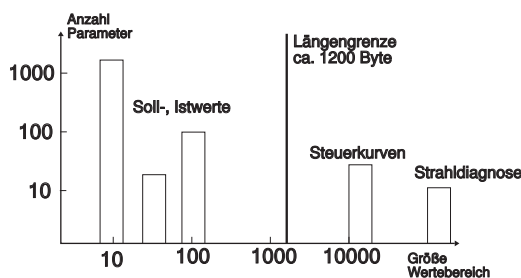


Abbildung 2.13: Größe der Parameterdatenbereiche

Aufnahme von Steuerkurven, wie auch größere Wertebereiche für Strahldiagnosesubsysteme, welche zu einem großen Teil auf Anfrage eines Anwenders, mit geringer Häufigkeit vom Kontrollsystem zu übertragen sind.

Das erwartete Parameterdatenprofil muß darin Berücksichtigung finden, ob der verbindungsorientierte oder der verbindungslose Mechanismus für einen Datentransport vom Kontrollsystem gewählt wird. Zusätzlich sollte eine Festlegung abhängig von der maximalen Paketgröße des eingesetzten Ethernet-Netzwerkes, genauer von dessen „maximum transmission unit“ MTU [101]²⁹, getroffen werden. Bleibt ein Datenpaket unterhalb dieser Paketgröße, tritt keine Fragmentierung³⁰ [15][100] durch beteiligte Netzwerkschichten in Teilpakete auf. Datenpakete werden also in einer Operation übertragen, so daß der Empfänger einer Nachricht sie nicht aus mehreren Teilpaketen mühsam und zeitaufwendig zusammensetzen muß.

Angepaßt an das diskontinuierliche Parameterdatenprofil in Abbildung 2.13 und unter Berücksichtigung der MTU des Ethernet-Netzwerkes stellt das Kommunikationssystem zwei Transportmechanismen in Abhängigkeit einer konkreten zu übertragenden Datenmenge bereit:

1. Datenpakete bis zu einer Länge von 1200 Byte werden auf der Basis des **UDP-Protokolls** übertragen. Kein expliziter Verbindungsaufbau zwischen Kommunikationspartnern ist notwendig. Vor allem quasi-analoge Schreiboperationen, wie auch die autonome Istwerterfassung sollten von dieser Festlegung profitieren, da ihre asynchrone Auslösung nur mit geringem Verzug in das Kontrollsystem hineintransportiert wird und so ein „Spiegelbild“ des Maschinenzustandes im Kontrollsystem entstehen kann.
2. Für den Transport großer Datenmengen wird das **TCP-Protokoll** verwendet. Der hierbei notwendige, explizite Verbindungsaufbau und -abbau zwischen den Kommunikationspartnern ist tolerierbar, da die Zeit für den gesamten Kommunikationsvorgang annähernd vollständig für die Übertragung der eigentlichen Nutzdaten ausgenutzt wird.

Der verbindungslose Transportmechanismus ist durch eine weitere Softwareschicht mit einer Fehlerüberwachung und einer Datenflußkontrolle ausgestattet, womit ein gesicherter Transportmechanismus auch auf der Basis von UDP verfügbar ist; er wird allerdings mit einem weitaus geringeren Aufwand erzielt als zum Beispiel in Fensterschiebverfahren [63][101], welche für das Transportprotokoll TCP Verwendung finden. Hierzu ist eine zweistufige Sicherheit eingeführt:

1. Der Empfänger einer Botschaft muß diese ausdrücklich quittieren (positive acknowledgement). Die Quittung erfolgt erst dann, wenn die damit verbundene Aktion auf der Empfängerseite erfolgreich

²⁸Zu nennen sind z.B. Rohdaten für die Bildverarbeitung und Lagedaten des Monitorsystems.

²⁹Im Fall von Ethernet ist diese MTU auf 1500 Byte festgelegt.

³⁰Statt Fragmentierung wird auch oftmals der Begriff Segmentierung benutzt.

ausgeführt wurde. Damit eine Quittung erfolgen und zurück an den Erzeuger gesendet werden kann, sind in der Botschaft Redundanzen enthalten. Ist die Quittung nach einer angemessenen Zeit (time out) nicht beim Erzeuger eingetroffen, so nimmt dieser einen Übertragungsfehler an, woraufhin er die Sendung wiederholt (retransmission). Bleibt eine gewisse Zahl von Übertragungsversuchen erfolglos, so vermutet der Sender, daß der Empfänger nicht funktionstüchtig ist bzw. die auszulösende Aktion nicht erfolgreich beendet werden konnte. In Abhängigkeit der Zahl bereits erfolgter Sendewiederholungen wird das Zeitintervall bis zum Quittungsempfang sukzessiv vergrößert. Die Maximalzahl der Sendewiederholungen kann in der Software eingestellt werden.

2. Jede Botschaft versieht der Sender mit einer Sequenznummer, welche Bestandteil der Botschaft ist. Der Empfänger muß diese Sequenznummer in der Quittung explizit benutzen, damit der Sender sie akzeptiert und keine Sendewiederholung, wie oben erläutert, einleitet.

Folgende Situation ist vorstellbar: Der Empfänger erhält eine Botschaft und kann die damit verbundene Aktion nicht sofort ausführen, so daß die Wartezeit beim Sender verstreicht und dieser annimmt, es läge ein Übertragungsfehler vor. Der Sender wiederholt daraufhin seine Botschaft. In der Zwischenzeit hat der Empfänger die Aktion auf seine empfangene Botschaft abgearbeitet. Er erhält diese Botschaft ein weiteres Mal und führt die Aktion nocheinmal aus. Das bedeutet, daß durch dieses Verfahren die Aktion auf eine Botschaft ein oder mehrmals vom Empfänger ausgeführt werden kann. Dieser Punkt stellt allerdings für Sollwertvorgaben oder die autonome Istwerterfassung kein Problem dar. Mehrfache Sollwertvorgaben ohne das sich der Sollwert ändert bewirken keine Änderung im Zustand der Beschleunigeranlage. Im Fall der autonomen Istwerterfassung ist es höchstens ineffizient wenn ein Istwert mehrfach übertragen wird.

Der verbindungsorientierte Transportmechanismus auf Basis des TCP-Protokolls wurde durch die Verwendung von rechnerfernen Prozeduraufrufen („remote procedure calls“ RPC) realisiert. Verwendet wurde dabei das Standard-RPC-System des „Open Networking Consortiums“ ONC. Das ONC-RPC-System ist sowohl für die UNIX-Workstations der Kontrollebene als auch für die VME-Rechner unter VxWorks verfügbar. Dieser Entscheidung ging eine Untersuchung hinsichtlich des Implementierungsaufwands einer eigenen Protokollentwicklung, unmittelbar auf Grundlage von TCP voraus. Die dabei gefundene Lösung wäre zwar hinsichtlich der Datenübertragung leistungsfähiger, hätte aber nur in einer unverhältnismäßig langen Entwicklungsdauer erstellt werden können. Hinsichtlich dieser Überlegung stellt das ONC-RPC-System einen akzeptablen Kompromiß dar. Eine weitergehende Untersuchung des ONC-RPC-Systems³¹ ergab, daß der Mehraufwand des ONC-RPC-Systems für einen Datentransport mit TCP gegenüber der Eigenentwicklung nur marginal ist, falls hauptsächlich nur der Funktionsumfang im ONC-RPC-System benutzt wird, welcher der Schicht 4 im OSI-Modell entspricht. Was den Ansatz mit dem ONC-RPC-System zusätzlich attraktiv macht, ist die Verfügbarkeit eines Codegenerators RPCGEN; er erzeugt auf Grundlage einer Protokollspezifikation ein Codeskelett für eine Applikation, in das die anwenderspezifischen Codeteile zu integrieren sind [9]. Bestandteil ist ebenfalls eine rechnerunabhängige Darstellung von Datenformaten („external data representation XDR“) welche den Datenaustausch vor allem zwischen den Subsystemen der Strahldiagnose und der Kontrolle erleichtert.

Client-Server-Modell

Die Verwendung eines RPC-Mechanismus setzt immer ein sog. „Client-Server“-Verhältnis zwischen den Kommunikationspartnern voraus. Das Client-Server-Modell (Abb. 2.14) beruht darauf, ein System als eine Menge von kooperierenden Prozessen – den „Servern“ – zu strukturieren. Sie stellen für Benutzer – die „Clients“ – Dienste bereit. Ein Client-Prozeß sendet eine Anfrage- oder Auftragsbotschaft, in welcher er einen Dienst nachfragt³² an einen Server (z.B. im Prozeßsystem). Der Server erfüllt den Dienst, wie in Abbildung 2.14 links dargestellt und liefert eine positive Antwort oder eine Fehlermeldung zurück. Ein Client bleibt nach seiner Anfrage solange blockiert, solange der Server die Anfrage bearbeitet. Er beantwortet die Anfrage des Clients entweder positiv oder negativ. Damit sind Client und Server durch die Kommunikation explizit miteinander synchronisiert (Abbildung 2.14 rechts).

Die Kernprozesse im Kontrollsystem haben mehrere Kontrollflüsse. Für einen bestimmten Zeitpunkt nimmt ein Prozeß aus der Menge der Kernprozesse eine Serverfunktion wahr. Eine kurze Zeit später kann dieser

³¹Die Quelltexte des ONC-RPC-Systems in Version 4.0 waren verfügbar.

³²Es kann sich dabei um das Setzen eines Parametersollwertes, aber auch um die Datennahme aus einem Strahldiagnosesubsystem handeln.

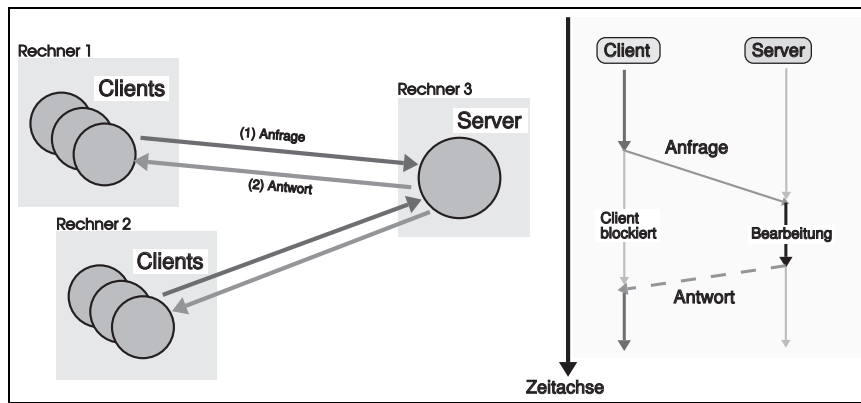


Abbildung 2.14: Client-Server-Modell

Prozeß eine andere Aktivität ausführen und dabei eine Clientfunktion annehmen. Im Rahmen der Kontrollsystemsoftware ist einem Prozeß also nicht statisch die Serverfunktion oder Clientfunktion zugeordnet, sondern jeweils nur für einen oder mehrere Verarbeitungsschritte. Jeder Verarbeitungsschritt läßt sich mit dem Client-Server-Modell beschreiben.

Der verbindungslose Transportmechanismus des Kontrollsystems ist so ausgelegt, daß er sich in das Client-Server-Modell einfügt und damit, im Sinne dieser Modellbildung, für das Kontrollsystem ein einheitlicher Transportmechanismus entsteht; dabei wird die Wahl des Transportprotokolls in Abhängigkeit der Größe der zu transportierenden Datenmenge selbsttätig vom Kommunikationssystem getroffen.

Eine Softwareschicht oberhalb der beschriebenen Transportprotokolle und der lokalen Kommunikationsmechanismen bindet alle darunterliegenden Schichten zu einer globalen (homogenen) Kommunikationsarchitektur zusammen, welche entweder einen netzwerktransparenten Zugriff oder einen rechnerlokalen Zugriff auf alle Einheiten des Kontrollsystems erlaubt. Den Aufbau der Kommunikationsarchitektur zeigt Abbildung 2.15. Die Größe der zu transportierenden Datenmenge bestimmt für die rechnerferne Kommunikation die

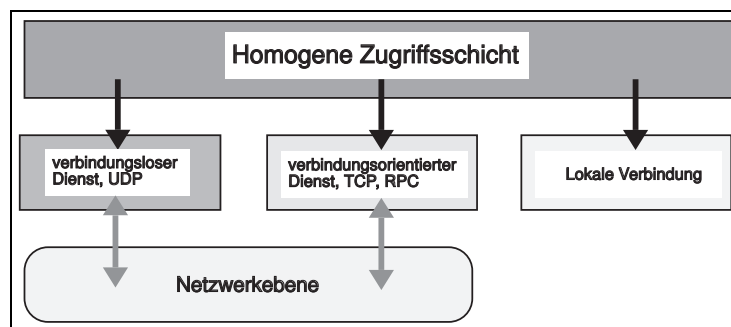


Abbildung 2.15: Kommunikationsarchitektur des ELSA-Kontrollsystems

Wahl zwischen verbindungsorientiertem oder verbindungslosem Transportmechanismus.

Instanzen der Kommunikation

Für den verbindungsorientierten und den verbindungslosen Transportdienst im Kontrollsystem werden zur Förderung der Parallelität getrennte Prozesse (Instanzen der Kommunikation) im Kernsystem etabliert. Verbindungsorientierte und verbindungslose „Daten-Kollektoren“ können Daten von allen Rechnern der Kontrolle empfangen und in eine rechnerlokale Operation umsetzen³³. Die Datenverteilung von einem Kontrollrechner an die anderen Kontrollrechner findet über einen „Daten-Distributor“ statt, welcher die Daten

³³Wird nicht explizit auf einen verbindungslosen bzw. verbindungsorientierten Daten-Kollektor hingewiesen, sind immer beide Daten-Kollektoren gemeint.

einer lokalen Interprozeßkommunikation, ausgelöst durch den ereignisgetriebenen Datenfluß, mit Hilfe rechnerferner Kommunikation an die Daten-Kollektoren der anderen Kontrollrechner weiterleitet. Ihrerseits können Daten-Kollektoren einen Daten-Distributor über rechnerlokale Kommunikation dazu veranlassen, wiederum Daten an die Kontrollrechner zu emittieren oder, über lokale Kommunikation, an angeschlossene Applikationen weiterzuleiten. Über das Gerüst der Daten-Kollektoren und Daten-Distributoren werden die lokalen Kontrollsystemkerne transparent verbunden. Die Parametermenge, welche ein Daten-Distributor an andere Kontrollrechner zu verschicken hat, richtet sich nach dem Parameterbedarf der Applikationen dieser Kontrollrechner, genauer nach deren Referenzierung von Kontrollparametern, die nichtlokal auf diesen Kontrollrechnern unterstützt werden. Sie werden dazu partiell in einer Parametercache eines Kontrollrechners repliziert. Der Cachemechanismus wird genauer im Abschnitt 2.5 im Rahmen des verteilten Datenbanksystems beschrieben. Ein Daten-Distributor sorgt dafür, daß die Wertebereiche solcher Parameter immer aktuell sind. Im Rahmen des Kommunikationssystems wird dieses Verfahren über ein Verwaltungsprotokoll abgewickelt. Eine Setzoperation im Kontrollsystem wird unmittelbar zwischen Applikation und einem Daten-Kollektor abgewickelt, welcher ein solches Ereignis gemäß der obigen Beschreibung behandelt. Rechnerferne Leseoperationen arbeiten ebenfalls zwischen Applikation und Daten-Kollektor. Das gesamte Verfahren wird im Kernsystem abgewickelt und ist für Applikationen im Kontrollsystem oder einen Anwender unsichtbar. Das Kommunikationssystem stellt sicher, daß jeder Parameter im Kontrollsystem von jedem Rechner des Kontrollsystems lesend und schreibend angesprochen werden kann.

Die Daten-Kollektoren der Kontrollebene heißen `cscollector` (verbindungsloser Dienst) und `cssyncserv` (verbindungsorientierter Dienst). Die Daten-Kollektoren der Prozeßebene zum Empfang von Daten aus der Kontrollebene heißen analog dazu `pscollector` und `pssyncserv`. Die entsprechenden Gegenstücke in der Kontrollebene zum Empfang von Daten aus der Prozeßebene tragen ebenfalls die Namen `pscollector` und `pssyncserv`. Die Instanz des Daten-Distributors der Kontrollebene heißt `csdistributor`.

2.4.3 Alarmsystem der Kontrolle

Ein verteiltes System hat eine Vielzahl von Verarbeitungselementen, welche unabhängig voneinander ausfallen können. Das Kommunikationssystem muß also nicht nur erlauben, daß diese Einheiten miteinander kommunizieren, sondern auch einen Mechanismus bereitstellen, welcher unabhängig von der restlichen Kommunikation Informations-, Fehler- oder Alarmmeldungen³⁴ an Anwender weiterleitet. Auch im Fall einer Überlastung oder eines Teilausfalls im Kommunikationssystem ist es für einen Anwender des Kontrollsystems vorteilhaft, weiterhin Meldungen zu erhalten.

Als Teil des Kommunikationssystems wurde deshalb ein Alarmsystem entwickelt, welches sowohl auf Kontroll- als auch auf Prozeßebene eine globale Erfassung, Speicherung, Weiterreichung und verteilte Anzeige von Meldungen, gemäß der Definition in Abschnitt 2.2.2 gestattet. Das Alarmsystem ist eigenständig und parallel zum restlichen Kommunikationssystem aufgebaut und hat eigene Kommunikationsinstanzen; diese Redundanz zum Kommunikationssystem gewährleistet Ausfallsicherheit. Es benutzt Kommunikationsmechanismen, welche den Verfahren, die im Rahmen der rechnerfernen Kommunikation des Kommunikationssystems eingesetzt werden, entsprechen. Es wurden entsprechende Funktionsbibliotheken auf Seiten der Prozeß- und der Kontrollebene zur Vermittlung von Meldungen aus der Prozeßebene an die Kontrollebene und zur Vermittlung von Meldungen innerhalb der Kontrollebene entwickelt.

Auf jedem Rechner der Kontrollebene befindet sich ein Alarmverwalter (Log-Manager) `cslogman`, der alle aufkommenden Meldungen sammelt, klassifiziert und in einer Protokolldatei (Logbuch) abspeichert. Das Logbuch ist in einer Ringspeicherstruktur angelegt, so daß ein unabsichtlicher Überlauf verhindert wird. Die Anzahl der Logbucheinträge ist ein konfigurierbarer Parameter.

Jeder Kontrollrechner verfügt über einen Kommunikationsprozeß `pslog` zur Entgegennahme von Meldungen aus der Prozeßebene. Anwenderapplikationen im Prozeßsystem senden ihre Meldungen an den dafür vorgesehenen `pslog`-Prozeß des zugeordneten Kontrollrechners, welcher seinerseits die Meldungen an den Log-Manager `cslogman` weiterreicht. Anwenderapplikationen auf Kontrollebene senden ihre Meldungen unmittelbar an den Log-Manager ihres Kontrollrechners. An den `cslogman`-Prozeß kann sich eine variable Zahl von Prozessen ankoppeln, welche z.B. die Anzeige der Meldungen übernehmen. Es wurden Anzeigeprozesse für eine terminalorientierte Darstellung `cslogdisp` und für eine Darstellung unter dem Fenstersystem der Kontrollrechner `cslogxdisp` entwickelt. Der Log-Manager `cslogman` versorgt alle angebundenen Anzeigeprozesse mit einlaufenden Meldungen.

³⁴Im Text wird nur die Bezeichnung Meldung gebraucht.

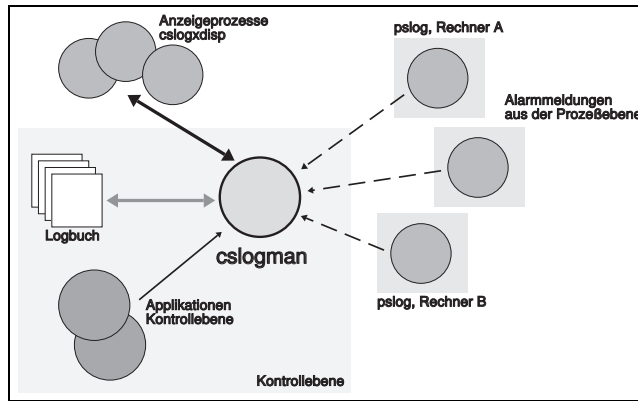


Abbildung 2.16: Alarmsystem der Kontrolle

Das Alarmsystem ist parallel ausgelegt; für das ELSA-Kontrollsystem wurde allerdings die Entscheidung getroffen, alle Meldungen an einer Stelle (auf einem ausgezeichneten) Kontrollrechner zu sammeln, damit dort eine Gesamtüberwachung stattfinden kann. Überblicksartig zeigt Abbildung 2.16 das Alarmsystem der Kontrolle. Eine entsprechende Einstellung des Alarmsystems sorgt für eine zentrale Verwaltung. Die eingestellte Konfiguration ist nicht festgeschrieben; falls in Zukunft andere Randbedingungen existieren, kann eine andere Einstellung getroffen werden.

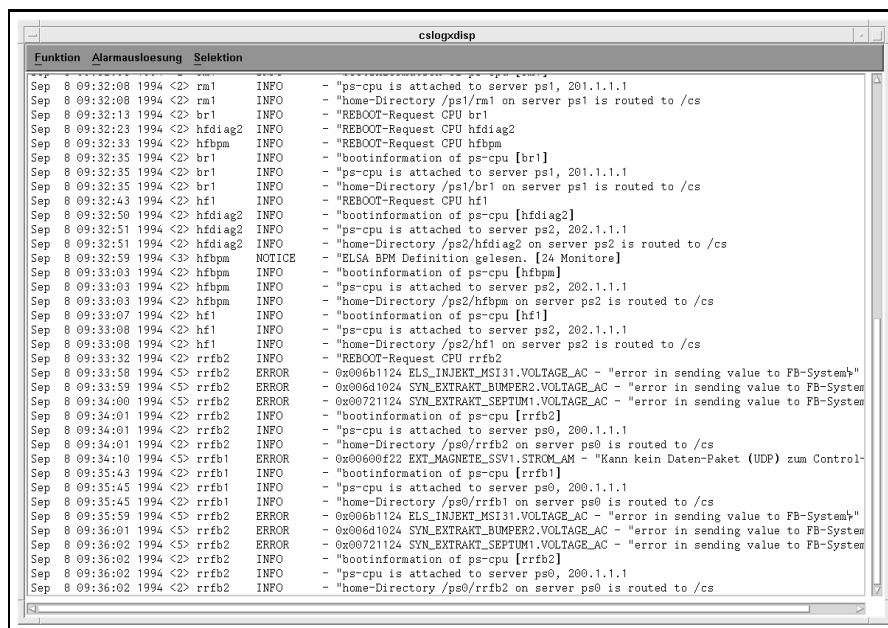


Abbildung 2.17: Alarmfenster

Abbildung 2.17 zeigt ein Alarmfenster im laufenden Betrieb des ELSA-Kontrollsystems. Es reiht sich nahtlos in die Bedienungsfläche der Kontrollrechner ein und erlaubt dem Bedienungspersonal eine ständige Überwachung. Das Programm kann Meldungen ausfiltern³⁵, so daß ein Operateur z.B. zu häufige Meldungen ausgeben unterdrücken kann. Meldungen lassen sich durch einen Warnton akustisch kennzeichnen. Die Bedienung des Programms erfolgt in der üblichen Art über eine Maus.

³⁵Es lassen sich z.B. alle Meldungen, die unterhalb einer einstellbaren Prioritätsschwelle liegen, unterdrücken.

2.5 Verteiltes Datenbanksystem

Das verteilte Datenbanksystem ist neben dem Kommunikationssystem der Hauptbestandteil der Realisierung der Interprozeßkommunikation für die Prozesse des Kernsystems und für Applikationen, welche das Kontrollsystem zur Lösung beschleunigerphysikalischer Aufgabenstellungen nutzen. Das Kommunikationssystem stellt alle Dienste bereit, um die Datenbanken der rechnerlokalen Kernsysteme zu einer verteilten Datenbank zusammenzuschließen.

Die Aufgabe des verteilten Datenbanksystems besteht sowohl in der Speicherung statischer sowie dynamischer Datenstrukturen als auch in der Bereitstellung von Zugriffsalgorithmen auf die Daten. Das Datenbanksystem muß eine logische Datenintegration durchführen, so daß für einen Anwender nach außen nur eine homogene Datenbank erscheint.

Für das Kontrollsystem wird Datenart und Datenmenge durch die Menge der Maschinenparameter definiert. Die Werte der Maschinenparameter sind im Betrieb dynamisch veränderlich. Neben dieser dynamischen Datenmenge müssen zusätzlich statische Daten vorgehalten werden, welche z.B. den Zugriff auf die Maschinenparameter beschreiben. Die statischen wie auch die dynamischen Bestandteile im verteilten Datenbanksystem erfordern jeweils eine spezielle Behandlung. Die jeweiligen Konzepte und Algorithmen sind hinsichtlich möglichst großer Zugriffsgeschwindigkeit auf die Daten und möglichst niedrigem Speicherplatzbedarf an die Problemstellung angepaßt. Eine große Zugriffsgeschwindigkeit wird dadurch erreicht, daß für die Speicherung der Daten das Konzept des gemeinsamen Speichers („shared memory“) eingesetzt wird. Damit ein synchronisierter Datenzugriff von mehreren Prozessen parallel auf den gemeinsamen Speicher erfolgen kann, werden kritische Bereiche, die zu einem Zugriffskonflikt führen können, durch Semaphore verriegelt und damit eine Sequenzialisierung des Datenzugriffs erzwungen. Im System werden für die verschiedenen Datenarten mehrere gemeinsame Speichersegmente mit jeweils einer Gruppe von Semaphoren angelegt und geführt. Eine gute Zugriffsgranularität ist damit sichergestellt.

Die statischen Strukturinformationen werden für den Betrieb des Kontrollsystems in einem Struktursegment gehalten. Es ist im laufenden Betrieb auf allen Rechner der Kontrollebene identisch verteilt. Aller Erwartung nach ist die Abfrage von Informationsblöcken aus dem Struktursegment viel häufiger als eine Veränderung ihrer Gesamtstruktur oder ihres Inhalts. Deswegen wurde beschlossen, die Strukturdaten gemäß dem Konzept der **Replikation** [36][103] auf alle Kontrollrechner redundant zu verteilen. Ein solcher Ansatz minimiert die erforderliche Netzwerkbandbreite zwischen den Rechnern der Kontrollebene, da keine zentrale Instanz (z.B. Server) bzgl. einer Strukturinformation nachgefragt werden muß. Breitbandige Zugriffsmöglichkeiten auf das Struktursegment ergeben sich durch Implementierung in einem gemeinsamen Speicherbereich der Kontrollrechner. Das Struktursegment im ELSA-Kontrollsystem hat mehrere Aufgaben.

Es stellt eine eindeutige Namensgebung und Verwaltung von Objektamen des Kontrollsystems (insbesondere Geräte- und Parameternamen) sowie die Verwaltung einer eindeutigen Liste aller Geräte und Parameter im Kontrollsystem sicher. Die Bereitstellung von Übersetzungsfunktionen („mapping“) von Geräte-, Parameternamen in interne, eindeutige Identifikationsnummern erfolgt ebenfalls. Die Verwaltung einer Netzwerkkarte aller Rechner im Kontrollsystem sowie die Bereitstellung einer Funktionsbibliothek zur Übersetzung von Geräte-, Parameternamen und internen Identifizieren in Zugriffswege auf Maschinenparameter („routing“) wird ausgeführt. Die Festlegung möglicher Kommunikationsarten zum Prozeßsystem (verbindungsorientierter/verbindungsloser Dienst) sowie Verwaltung von Bindungsinformationen zum Prozeßsystem legt das Struktursegment fest. Die Übersetzungsfunktionen von Geräte-, Parameternamen in Identifikationsnummern und umgekehrt sowie die Übersetzungsfunktionen von Geräte-, Parameternamen und Identifizieren in Zugriffswege sind auf möglichst hohe Geschwindigkeit und parallelen Zugriff ausgelegt (Verwendung von internen Cachefunktionen). Diese Maßnahmen sind notwendig, da **jede** Zugriffsoperation auf Maschinenparameter zunächst über das Struktursegment führt.

Aus dem Struktursegment wird der Arbeitskontext aller VME-Prozessormodule definiert. Meldet sich ein VME-Prozessormodul aus dem Prozeßsystem beim Kernsystem, so wird aus dem Struktursegment die genaue Parametermenge mit allen notwendigen beschreibenden Datenstrukturen ermittelt und als Arbeitskontext an den VME-Rechner transferiert; diesen Dienst stellt der `psbootserv`-Prozeß in der Kontrollebene für das Prozeßsystem bereit. In Abhängigkeit dieser Informationen wird die Prozeßdatenbank im VME-Prozessormodul in dessen Startphase automatisch angelegt. Auf der Prozeßsystemseite übernehmen der `csattach`- und der `csimage`-Prozeß diese Aufgabe.

Die Gesamtmenge der im Kontrollsystem geführten Maschinenparameter ist in disjunkte Teilmengen gegliedert und auf die Rechner des Kernsystems verteilt, um Parallelarbeit zu erreichen (**Konzept der Auf-**

teilung) [36][103]. Es ist somit sichergestellt, daß Wertedaten eines Kontrollsystemparameters nur einen Ursprung besitzen; davon leiten sich Kopien zur Verwendung im verteilten System ab. Auf jedem Rechner wird dafür ein gemeinsames Speichersegment fester Größe angelegt sowie der parallele Zugriff durch Semaphore synchronisiert („on line“-Segment). Die Maschinenparameter werden dabei durch feste Deskriptoren beschrieben und die Parameterwerte in einem separaten Datenteil mit variablem Inhalt gehalten; er ist wesentlich durch den Zustand der Beschleunigeranlage bestimmt (Istwert) oder er legt den Zustand der Beschleunigeranlage fest (Sollwert).

Um von einem Rechner den Zugriff auf alle Maschinenparameter sicherzustellen, wird ein Parametercache in einem gemeinsamen Speichersegment auf jedem Rechner der Kontrollebene geführt. Nicht lokal auf einem Rechner der Kontrollebene referenzierbare Maschinenparameter werden über den Parametercache verfügbar gemacht. Dazu findet eine **partielle Replikation** [36][103] von Teildatenstrukturen eines Maschinenparameters aus dem „on line“-Segment eines Kontrollrechners, zu dessen Parametermenge der angesprochene Maschinenparameter gehört, in den Parametercache des lokalen Systems statt. Die Größe des Parametercaches wird der aktuellen Häufigkeit von nicht lokalen Parameterreferenzen dynamisch angepaßt; dazu werden gewichtsbilanziert binäre Bäume eingesetzt [17][35]. Das gewählte Verfahren kann dazu führen, daß sich alle nichtlokalen Parameter im Parametercache wiederfinden und damit die eingestellte Größe des Cachesegments überschritten wird. Um das zu verhindern, verfügt das Cachesystem über die Möglichkeit überalterte Einträge oder die am seltensten referenzierten Einträge aus dem Cache zu entfernen, um so Platz für neue Einträge zu schaffen. Durch diese Konstruktion ergibt sich für die Realisierung des Parametercaches das sog. **Cache-Kohärenz-Problem** [102]. Das Kommunikationssystem leistet einen wesentlichen Beitrag zur Lösung des Cache-Kohärenz-Problems durch die enge Kopplung der Daten-Kollektoren und Daten-Distributoren.

Die Datenspeicherung im verteilten Datenbanksystem in mehreren gemeinsamen Speichersegmenten erlaubt eine Konfigurierbarkeit, da in der Startphase des Kontrollsystems auf Grundlage der globalen Strukturinformationen entschieden werden kann, welche Teile davon für einen bestimmten Rechner der Kontrollebene notwendig sind. Für jeden Rechner wird immer nur die Mindestmenge an Speichersegmenten angelegt und damit der Speicherbedarf beschränkt. Das Struktursegment und der Parametercache müssen allerdings auf jedem Rechner der Kontrollebene angelegt werden; sie sind die minimale Voraussetzung für einen systemweit transparenten Parameterzugriff.

In der Startphase des Kontrollsystems werden mit den Daten des Struktursegments der Dateninhalt der „on line“-Segmente aller Kontrollrechner abgeleitet. Deswegen ist der Definitionsprozeß des Dateninhalts im Struktursegment von großer Bedeutung und wird im nächsten Abschnitt beschrieben.

Definition des verteilten Datenbanksystems

Die gesamte statische Struktur des ELSA-Kontrollsystems (Rechnereinheiten, Rechneradressen, Prozeßrechner, Feldbusrechner, Netzwerke, Endgeräte etc.) ist vorab festgelegt und bekannt. Die Gesamtmenge dieser Daten muß für den Gebrauch im Kontrollsystem formalisiert und anschließend dem Kontrollsystem bekannt gemacht werden. Dazu ist ein, von allen anderen Bestandteilen des Kontrollsystems, unabhängiges Datenbanksystem, bestehend aus einer Datenbankdatei und einer Menge von Zugriffsfunktionen, entwickelt worden; es übernimmt Speicherung und Verwaltung dieser Daten. Diese Strukturdatenbank ist die **einzige konsistente Referenz** für alle Kontrollsystem-Definitionen.

Jeder Kontrollrechner liest in seiner Startphase die für ihn relevanten Daten aus der Strukturdatenbank, bewertet sie und konfiguriert automatisch seinen lokalen Kontrollsystemkern gemäß den gefundenen Vorgaben. Danach wird das Struktursegment des verteilten Datenbanksystems auf allen Kontrollrechnern mit den statischen Strukturdaten gefüllt. Im Anschluß daran werden weitere Informationen aus der Plattendatei der Strukturdatenbank gelesen und in die dafür vorgesehenen Datenstrukturen verschiedener Speichersegmente im verteilten Datenbanksystem geschrieben. Der rechnerlokale Kontrollsystemkern ist nun funktionstüchtig und stellt eine Kopplung mit allen anderen Kontrollsystemkernen her (Abb. 2.18). Dazu wird auf jedem Kontrollrechner der **csbroker**-Prozeß aktiviert, der im wesentlichen noch offene Referenzen der lokalen Datenbanken auflöst.

Die Strukturen des Kontrollsystems werden in Strukturdefinitionsdateien (RDF-Dateien) in Form einer dafür entwickelten blockorientierten, an der Programmiersprache C angelehnten Definitionssprache abgelegt. Es handelt sich dabei um ASCII-Dateien, welche die Definition dieser Daten in einer benutzerfreundlichen

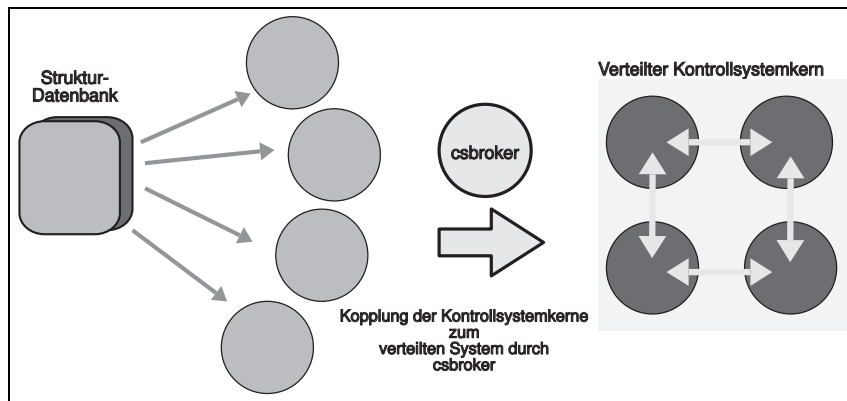


Abbildung 2.18: Import der Strukturdaten in das Kontrollsystem und Kopplung der Kernsysteme

Art erlauben. Die Syntax der Definitionssprache ist der Problemstellung wegen umfangreich, aber so flexibel gehalten, daß auch ungeübtes Personal eine Erweiterung des Kontrollsystems vornehmen kann. Die Generierung der Strukturdatenbank übernimmt ein Übersetzerprogramm („Resource-Compiler“) [1]. Das Übersetzerprogramm erlaubt – auf Basis von Strukturdateien – die Generierung einer komplett neuen Strukturdatenbank, die Modifizierung bereits existierender Strukturen und die Neugenerierung der Strukturdatenbank unter Berücksichtigung einer bereits existierenden Strukturdatenbank.

Im allgemeinen Fall liest das Übersetzerprogramm zunächst Definitionen einer bereits vorhandenen Strukturdatenbank und eine oder mehrere Strukturdateien (RDF-Dateien), analysiert diese, prüft dabei den Inhalt der Strukturdateien auf Konsistenz mit den bereits vorhandenen Informationen und erzeugt im letzten Schritt eine erweiterte oder nur modifizierte, neue Strukturdatenbank. Bevor eine neue Strukturdatenbank erzeugt wird, legt das Übersetzungsprogramm eine Kopie der alten Strukturdatenbank an. Den Definitionsprozeß zeigt Abbildung 2.19. Das Übersetzungsprogramm wurde unter Mithilfe des lexikalischen Analysators lex

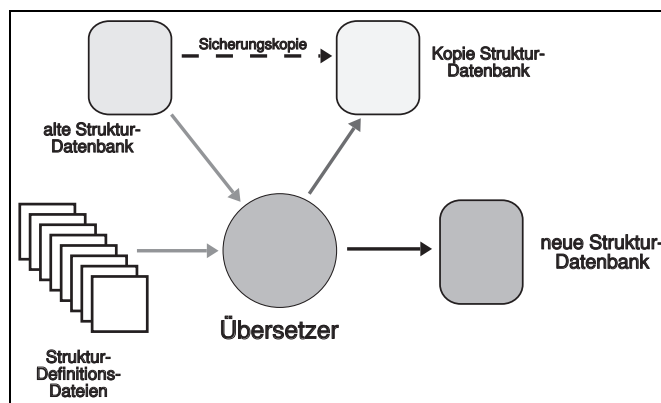


Abbildung 2.19: Strukturdefinition für das Kontrollsystem

[64][58] in Kombination mit dem Parsergenerator yacc entworfen³⁶ [1][58][64]. Beide Werkzeuge sind im UNIX-Betriebssystem verfügbar. lex ist ein lexikalischer Analysator, der einen Zeichenstrom auf der Basis von regulären Ausdrücken in Symbole - sie stellen eine Folge von Zeichen einer bestimmten Bedeutung dar - und assoziierte Attribute zerlegt. yacc generiert auf Grundlage einer vorgegebenen kontextfreien Sprachgrammatik einen Parser und verwendet zur Aufbereitung des Eingangszeichenstroms den lexikalischen Analysator lex. Die Verwendung beider Programmierwerkzeuge lex und yacc machte zunächst einen größeren Einarbeitungsaufwand notwendig. Im Lauf der Entwicklungsarbeiten konnte die Einarbeitungszeit durch gewonnene

³⁶Mit der Hilfe dieser Programmierwerkzeuge konnte innerhalb kurzer Zeit der äußere Rahmen des notwendigen Übersetzerprogramms entwickelt werden. Der Einbau notwendiger Intelligenz zur Verwendung im Kontrollsystem bedurfte einer nicht unerheblichen Entwicklungszeit. Der Resource-Compiler übersetzt alle Strukturdefinitionen für das ELSA-Kontrollsystem (ca. 4000 Parameter) in weniger als 30 Sekunden. Die Angabe gilt für einen HP 9000/750-Rechner mit lokal verfügbarer Strukturdatenbank.

Flexibilität wieder ausgeglichen werden. In das generierte Parser-Skelett wurde der anwenderspezifische Programmcode für die Verwendung im Kontrollsystem eingesetzt.

Das Einlesen von Strukturdefinitionen und eine Strukturierung der Eingangsdaten wird in einem ersten Übersetzungslauf vorgenommen. Gegenseitige Verweise von Parametern werden in einem zweiten Übersetzungslauf aufgelöst. Neben der eigentlichen Parsertätigkeit ist die Verwaltung von Symboltabellen der aufwendigste und anspruchsvollste Teil des Programms. Das schnelle Suchen und Finden von Parameternamen im Rahmen eines Übersetzerlaufs wird auf Basis gewichtsbalanzierter binärer Bäume [17][35] ausgeführt. Diese Datenstruktur wird durch eine Anordnung der Parameternamen in einer doppelt verketteten Liste erweitert. Eine Kombination beider Datenstrukturen ermöglicht die Vergabe eindeutiger Bezeichner (Schlüssel) für alle Parameter im Kontrollsystem. Das Übersetzerprogramm ist die **einzige Instanz** im Kontrollsystem, welche interne Bezeichner für Kontrollparameter vergibt. Neben den Symboltabellen der Kontrollparameter, werden auch Tabellen der eingebundenen Kontrollrechner, VME-Prozeßrechner und Feldbusprozessoren, einschließlich Adressenvergabe für diese Einheiten geführt. Auf Grundlage dieser Informationen werden z.B. Netzwerkkarten generiert und gespeichert sowie die Adressierungswege für den Zugriff auf Parameter festgelegt. Sie werden im laufenden Kontrollsystem für den transparenten Zugriff auf Parameter benötigt. Die komplette Konsistenz der Strukturdefinitionen stellt das Übersetzerprogramm während eines Übersetzungslaufs sicher. Das Übersetzerprogramm generiert am Ende eines Übersetzungslaufs eine konsistente Strukturdatenbank **RESOURCEBASE.DAT**. Dazu verwendet er die entsprechenden Zugriffsroutinen des entwickelten Datenbanksystems.

Die Erweiterung des Kontrollsystems um weitere Rechneinheiten bzw. neue Endgeräte – sie werden durch ihre Parameter im Kontrollsystem repräsentiert – muß in einer Strukturdefinitionsdatei aufgenommen und in einem anschließenden Übersetzungslauf in die Strukturdatenbank eingebunden werden. Danach besteht die neue Einheit als ein Teil des Kontrollsystems. Die Wart- und Erweiterbarkeit des Kontrollsystems ist somit durch wenige Verarbeitungsschritte sichergestellt.

2.6 Transaktionsformen im Kontrollsystem

Unter einer Transaktion versteht diese Arbeit eine aus Teiloperationen zusammengesetzte Gesamtoperation, die einen Vorgang im Kontrollsystem (z.B. das Setzen eines Parametersollwertes) zur einer logisch abgeschlossenen Gesamthandlung zusammenfaßt. In den Transaktionsformen spiegelt sich die Dynamik der Kontrollsystemsoftware wider; sie sind deswegen von wesentlicher Bedeutung für das Gesamtsystem. Mit ihnen ist die Applikationsschnittstelle des Kontrollsystems aufgebaut.

Die Beschreibung des Kommunikationssystems im Abschnitt 2.4.2 hat dargestellt, daß an nur zwei Punkten im Kontrollsystem aktiv Transaktionen ausgelöst werden:

1. Ein Anwender kann z.B. über eine interaktive Kontrollsystembedienung auf oberster Ebene Sollwertvorgaben generieren oder Parameterwerte aus dem Kontrollsystem erfragen. Statt eines Anwenders kann auch eine Applikation diese Vorgänge auslösen. Eine Setzoperation läßt sich auch auf der Ebene des Prozeßsystems anstoßen. Sie wird in die Kontrollebene transportiert und hat dann den Charakter der schon dargestellten Sollwertvorgaben. Der beschriebene Datenweg aus der Prozeßebene in die Kontrollebene ist erforderlich, damit die Kontrollebene einen konsistenten Sollwertzustand der Beschleunigeranlagen hat.
2. Durch das Feldbussystem oder das Prozeßsystem werden auf unterster Kontrollsystemebene entweder periodisch oder unterbrechungsgesteuert Daten erfaßt und an darüberliegende Ebenen im Kontrollsystem übergeben. Eine Generierung von Alarm- oder Fehlermeldungen läßt sich ebenfalls auf dieser Ebene einleiten.

Die Auslöser von Transaktionen sind in der Hardwareinteilung des Kontrollsystems „ganz oben“ bzw. „ganz unten“ angesiedelt, beiden gemeinsam ist ihr asynchroner Charakter, da Transaktionen zu beliebiger Zeit angestoßen werden und eine Reaktion des Kontrollsystems erforderlich machen. Durch diese Gleichartigkeit der Anforderungen sind die dazu entwickelten Transaktionen des Kontrollsystems vollkommen symmetrisch ausgelegt.

Eine „Vorzugsrichtung“ für Transaktionen ist im Kontrollsystem nicht vorgesehen (siehe Abschnitt 2.4.2), d.h. Transaktionen können auf der Ebene der Kontrollrechner, von der Kontrollebene zur Prozeßebene oder

umgekehrt oder innerhalb der Prozeßebene ablaufen. Verkürzt gesagt, baut das Kontrollsystem zwischen einem Datensender und einem Datenempfänger ein Erzeuger-Verbraucher-Verhältnis [101] auf.

Nach Aktivierung des lokalen Kernsystems und Formierung zum verteilten Kern kooperieren Prozesse miteinander. Dabei tauschen sie Parameterwerte und Verwaltungsinformationen untereinander aus, welche entweder Transaktionen einleiten oder innerhalb einer Transaktion übertragen werden. Die Transaktionsverarbeitung im Kontrollsystem stützt sich wesentlich auf das Kommunikationssystem. Das Kontrollsystem unterscheidet drei Transaktionsformen.

Elementare Transaktionen umfassen Schreib- oder Leseoperationen von Parameterwerten. Elementare Transaktionen können Auslöser anschließender ereignisgesteuerter Transaktionen sein. **Transiente Transaktionen** umfassen das Lesen und Schreiben von Parameterwerten ohne daß dabei Speicherbereiche in den Datenbanken des Kontrollsystems vorhanden sind. Nach der Transaktion sind die Daten für das System verschwunden. **Ereignisgesteuerte Transaktionen** laufen im Fall der Werteänderung eines Parameters ab, die eine Benachrichtigung einer Applikation bewirkt, ohne daß sie dazu selbst aktiv nachfragen muß.

Die Initiatoren einer Transaktion sind immer Prozesse (z.B. Applikationen) und die Kommunikationspartner innerhalb einer Transaktion ebenso. In Abhängigkeit einer Transaktionsform wird eine Menge von Prozessen im Kontrollsystem zur Transaktionsbehandlung aktiv. Eine Applikation ist in der Lage, alle drei Transaktionstypen gleichzeitig zu benutzen. Im Fall der ereignisgesteuerten Transaktion ist es erforderlich, dem Kernsystem die Parametermenge mitzuteilen, für welche, im Fall einer Werteänderung, eine Benachrichtigung erfolgen soll. Außerdem müssen im Kontext der Applikation bestimmte Maßnahmen getroffen werden, um zu beliebiger Zeit auf einlaufende Ereignisse zu reagieren und sie entsprechend zu behandeln. Das Kontrollsystem stellt dafür die notwendigen Funktionen bereit. Die drei Transaktionstypen werden mit ihren wichtigsten Teiloperationen dargestellt.

2.6.1 Elementare Transaktionsform

Elementare Transaktionen können sowohl von der Kontrollebene, als auch von der Prozeßebene ausgehen. Der dafür unterschiedliche Aufwand richtet sich danach, ob Daten lokal erreichbar sind oder auf einer entfernten Rechneinheit unterstützt werden. Für die Kontrollebene ergeben sich folgende Varianten:

1. Lokale Elementartransaktion initiiert von der Kontrollebene

Eine lokale Transaktion setzt ein, wenn ein Parameter zu der **lokalen** Menge von Kontrollparametern eines Kontrollrechners gehört. Die Operation findet dann auf der lokalen Datenbank unter Benutzung der dafür vorgesehenen lokalen Zugriffsoperationen statt. Hierbei können schreibende von lesenden Operationen unterschieden werden.

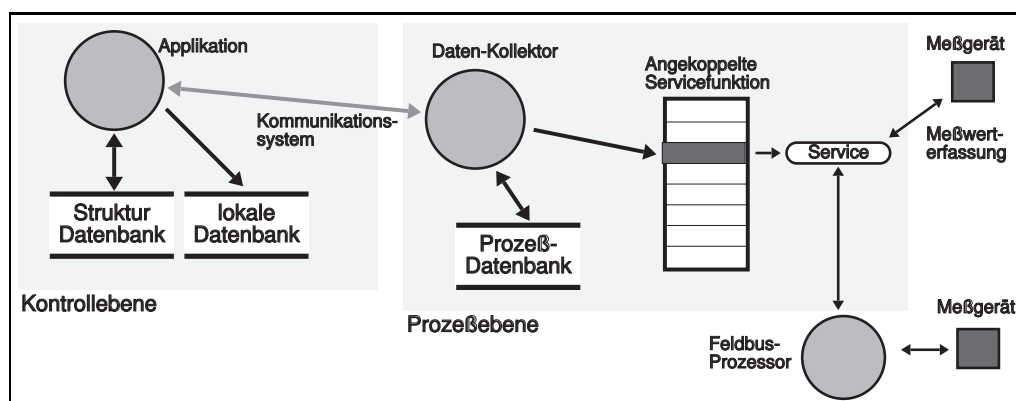


Abbildung 2.20: Lokale Schreibtransaktion in der Kontrollebene

Im Fall einer Schreiboperation wird der betreffende Parameterwert in der lokalen Datenbank abgelegt. Die Strukturdatenbank wird nach der Erreichbarkeit des Parameters im Prozeßsystem befragt. In Abhängigkeit dieser Adressierungsinformation geht ein Datenpaket an den pscollector der VME-Rechneinheit im Prozeßsystem. Der pscollector dekodiert das Paket und aktiviert eine Zugriffsfunktion in die lokale Prozeßdatenbank. Dabei wird die Servicefunktion für den angesprochenen Parameter

aktiviert, welche z.B. einen weiteren Informationstransfer zu einem Feldbusprozessor bewirkt. Der Feldbusprozessor seinerseits wirkt über eine Schnittstellenkarte auf ein Gerät oder ein Subsystem ein. Ebenso kann die Servicefunktion den Zugriff auf eine VME-Schnittstellenkarte enthalten, so daß direkt von der Prozezebene aus ein Endgerät oder Subsystem angesteuert wird.

Die Leseoperation findet unmittelbar auf der lokalen Datenbank mit größtmöglicher Zugriffsgeschwindigkeit statt.

2. Rechnerübergreifende Elementartransaktion initiiert von der Kontrollebene

Eine rechnerübergreifende Transaktion führt das Kontrollsystem dann aus, wenn ein Zugriff auf einen Parameter erfolgt, der Element der Parametermenge eines anderen Kontrollrechners ist. Wie im Fall einer lokalen Transaktion werden schreibende und lesende Operationen unterschieden.

Vor der Schreiboperation wird die Strukturdatenbank nach der Erreichbarkeit des Kontrollrechners gefragt, zu dessen Parametermenge der betreffende Parameter gehört. Ein Datenpaket wird an den `cscollector` dieses Kontrollrechners gesendet. Der `cscollector` interpretiert das Datenpaket und schreibt den Parameterwert in einer lokale Transaktion – wie oben beschrieben – in die lokale Datenbank.

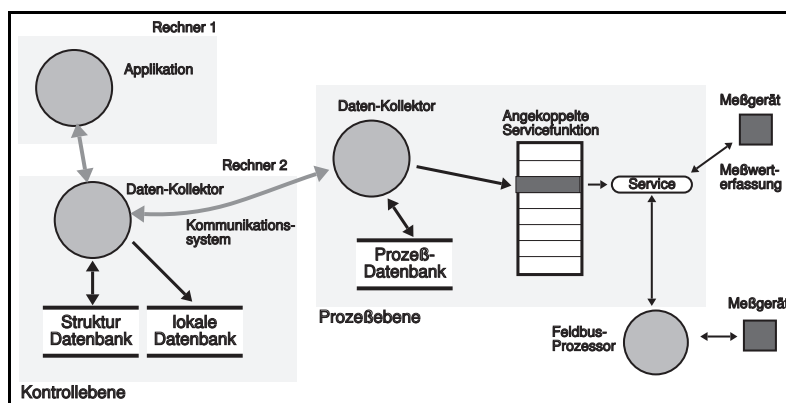


Abbildung 2.21: Rechnerübergreifende Schreibtransaktion initiiert von der Kontrollebene

Im Fall einer Leseoperation wird in einem ersten Schritt der Parametercache untersucht. Befindet sich der Parameterwert darin und wird von der Cacheverwaltung kein Veto erzeugt, so werden diese Werte gelesen. Sind die Daten im Parametercache veraltet oder nicht vorhanden, so wird die Strukturdatenbank nach der Erreichbarkeit des Parameters befragt. Danach wird ein Anfragepaket an den `cscollector` des betreffenden Kontrollrechners abgesetzt, welcher eine lokale Lesetransaktion auslöst. Die gelesenen Daten werden in einem Antwortpaket zurückgesendet. Enthält der Parametercache einen Deskriptor des aktuellen Parameters, dann werden die Werte der Leseoperation im Parametercache abgelegt und als aktuell markiert.

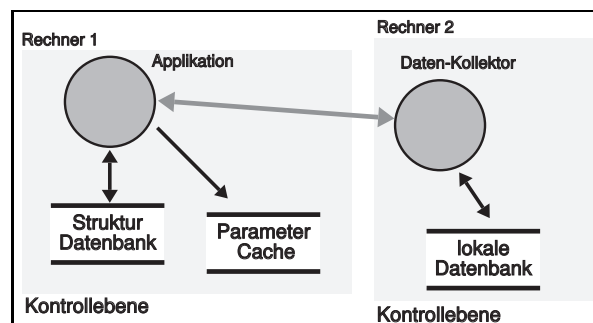


Abbildung 2.22: Rechnerübergreifende Lesetransaktion von der Kontrollebene

Transaktionen können ebenfalls von der Prozezebene initiiert werden; auch hier können lokale Transaktionen von rechnerübergreifenden Transaktionen unterschieden werden.

1. Lokale Elementartransaktion initiiert von der Prozeßebene

Gehört ein Parameter dem lokalen Kontext einer Rechneinheit im Prozeßsystem an, so kann unter Benutzung der lokalen Zugriffsmechanismen eine Operation auf der Prozeßdatenbank erfolgen. Zusätzlich ist aber zu berücksichtigen, daß die Kontrollebene immer ein **konsistentes Spiegelbild** des gesamten Soll- und Istzustandes der Beschleunigeranlagen darstellen muß. Deswegen kann eine lokale Transaktion im Prozeßsystem nicht isoliert betrachtet werden, sondern die Kontrollebene muß zwingend von einer Parameteränderung unterrichtet werden. Die Einteilung in schreibende und lesende Operationen ist auch hier sinnvoll.

Die Menge lokaler Schreiboperationen ist vor allem durch die autonome Istwerterfassung bestimmt. Dabei werden Meßdaten der Feldbusebene über die Prozeßebene in die Kontrollebene, bzw. unmittelbar in der Prozeßebene erfaßte Meßdaten in die Kontrollebene transportiert. Dazu werden Datenpakete direkt von den Prozessen einer Rechneinheit der Prozeßebene an den `pscollector` des zugeordneten Kontrollrechners geschickt. Eine Kopie des Datenwertes wird in der Prozeßdatenbank abgelegt, damit auch sie ein konsistentes Spiegelbild des lokalen Arbeitskontextes darstellt. Der `pscollector` auf Kontrollebene nimmt das Datenpaket entgegen und legt es in der Datenbank des Kontrollrechners ab. Je nach Funktion eines Gerätes oder Subsystems und der Änderungsgeschwindigkeit eines Wertes wird ein einzelner Meßwert mit einer Wiederholrate zwischen ca. 0.1 Hz und etwa 20 Hz gesendet. Um den Datenverkehr auf dem Netzwerk zu minimieren besteht die Möglichkeit im Fall von Meßwerten auch „Multidatenpakete“, an den `pscollector` zu senden, welche in einem Block die Werte mehrerer Parameter enthalten. Dieses Verfahren ist effizient, da es die Netzwerkbandbreite wesentlich besser ausnutzt als ein einzelnes Datenpaket.

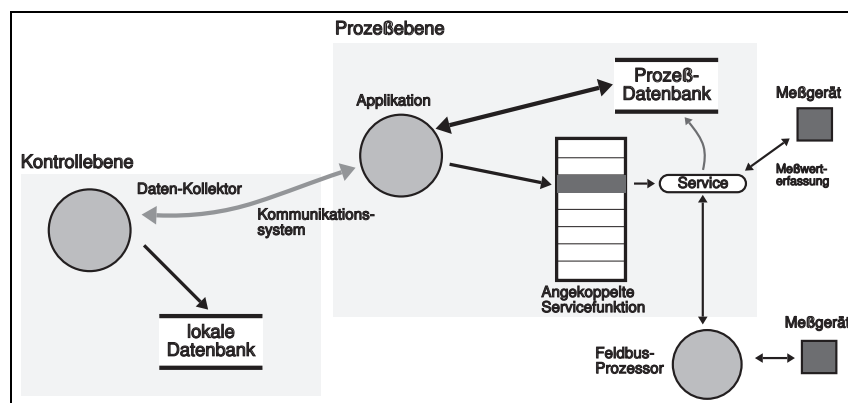


Abbildung 2.23: Schreibtransaktion initiiert vom Prozeßsystem

Die lokale Prozeßdatenbank ist ein konsistentes Spiegelbild des Arbeitskontextes der VME-Rechneinheit. Lokale Leseoperationen können deswegen auf Grundlage der lokalen Zugriffsroutinen der Prozeßdatenbank abgearbeitet werden. Ein Anwenderprozeß arbeitet in dieser Situation nur mit der lokalen Prozeßdatenbank zusammen.

2. Rechnerübergreifende Elementartransaktion initiiert von der Prozeßebene

Wird auf Parameter zugegriffen, die nicht zum lokalen Parameterkontext eines VME-Prozessormoduls gehören, sind Schreib- und Leseoperation rechnerübergreifend auszuführen. In jedem Fall ist der Zugriff auf einen nichtlokalen Parameter – wegen oben angeführter Konsistenzforderung an die Kontrollebene – nur unter Einschaltung der Kontrollebene ausführbar. Die lokale Prozeßdatenbank beteiligt sich nicht an einer rechnerfernen Transaktion; ein Anwenderprozeß ist ihr Urheber und direkt beteiligt.

Die Ausführung einer Schreiboperation erfordert zwei getrennte Schritte. In einem ersten Schritt wird ein Anfragepaket nach der Erreichbarkeit des Parameters an den `pscollector` des zugeordneten Kontrollrechners geschickt. Auf Basis dieser Adressierungsinformation wird dann im zweiten Schritt ein Datenpaket an den `pscollector` oder den `psyncserv` des Kontrollrechners geschickt, in dessen Parametermenge sich der betreffende Parameter befindet. Der `pscollector` interpretiert das Datenpaket und legt es in der dortigen lokalen Datenbank durch eine lokale Schreibtransaktion ab. Wichtig ist hierbei, daß keine Parameterdaten unmittelbar zwischen Rechneinheiten der Prozeßebene ausgetauscht werden.

Die Umgehung der Kontrollebene ist unzulässig, da die Umgehung die konsistente Sichtweise auf die Beschleunigeranlage korrumpiert.

Die Leseoperation erfordert, ebenso wie die Schreiboperation, ein zweistufiges Verfahren unter Einbeziehung der Kontrollebene. In diesem Fall werden allerdings Datenwerte nachgefragt und nicht gesetzt. Der in die Transaktion eingebundene `pcollector` führt also eine Leseoperation aus und schickt das Resultat zurück an den Anwenderprozess.

2.6.2 Transiente Transaktionsform

Transiente Transaktionen sind vor allem für den Transport großer Rohdatenmengen konzipiert, die nicht im Kontrollsystem abgelegt werden müssen. Es kann sich dabei z.B. um Meßdaten der Strahldiagnosesubsysteme handeln, welche nur für die konkrete Analyse eine Bedeutung haben und deren Kenntnis auf die unmittelbar an der Kommunikation beteiligten Prozesse beschränkt bleiben kann. Das Kontrollsystem stellt für transiente Transaktionen keinerlei Speicherplatz bereit; es werden dadurch also keine Betriebsmittel des Kontrollsystems verschwendet. Im Fall einer transienten Transaktion wird ein direkter Kommunikationsweg zwischen zwei beteiligten Prozessen aufgebaut, die Daten werden übertragen und sind danach für das Kontrollsystem nicht mehr vorhanden. Die Namensgebung „transiente“ Transaktion wurde ursprünglich gewählt, um den Transport transienter Lagedaten vom ELSA-Monitoringsystem³⁷ in das Kontrollsystem zu beschreiben.

Im Fall einer Setzoperation werden Daten von einer Applikation an einen Kontrollrechner gesendet, welcher diese ohne weitere Interpretation an einen Rechner der Prozeßebene weiterreicht; dieser verarbeitet sie entweder unmittelbar oder reicht sie an einen Feldbusprozessor weiter.

Eine Leseoperation wird durch ein Anfragepaket an einen Kontrollrechner eingeleitet. Er reicht die Anfrage an einen Rechner der Prozeßebene weiter, welcher entweder Daten direkt auf Prozeßebene verfügbar macht oder Daten aus einer möglicherweise angeschlossenen Feldebene beschafft. In einem Antwortpaket an den Kontrollrechner werden die Ergebnisdaten zurücksendet; er seinerseits generiert wiederum ein Antwortpaket auf das ursprüngliche Anfragepaket.

Abbildung 2.24 zeigt die transiente Transaktionsform; besonders die beiden Transportdienste des Kommunikationssystems sowie beteiligte Kommunikationsinstanzen `pcollector`, `pssyncserv` sind hier einmal explizit verdeutlicht. An den Grundoperationen sind ausschließlich die Strukturdatenbank, die Applikationsschnittstelle und das Kommunikationssystem beteiligt.

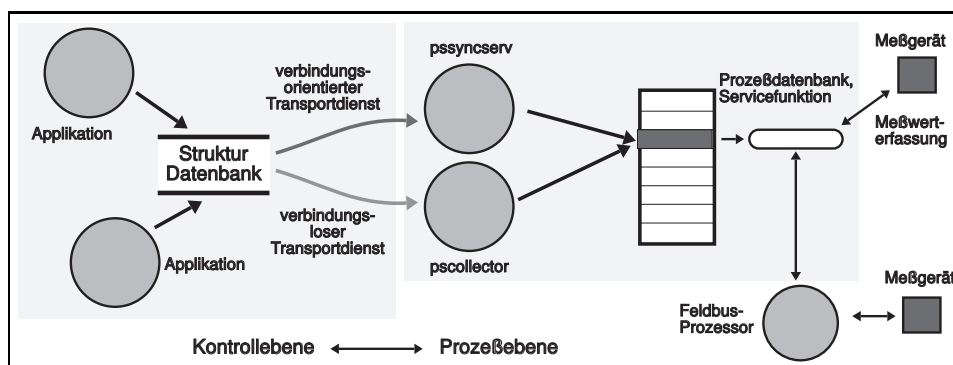


Abbildung 2.24: Transiente Schreib- oder Lesetransaktion im Kontrollsystem

2.6.3 Ereignisgesteuerte Transaktionsform

Intressiert sich eine oder mehrere Applikationen für die Werteänderungen eines Parameters oder einer Gruppe von Parametern, so kann das Kernsystem beauftragt werden, diese Werteänderungen in Form von „Ereignissen“ an die Applikationen weiterzuleiten. Applikationen bleiben dabei passiv, solange keine Werteänderungen

³⁷Die Messung erfolgt über einen Transientenrecorder.

geschehen, also auch keine Ereignisse vom Kernsystem ausgeliefert werden. Auf Basis ereignisgesteuerter Transaktionen sind die beiden ereignisgetriebenen Ankoppelvarianten der **direkten Unterbrechung** und des **Warteschlangenmechanismus** (Abschnitt 2.2.2 und 2.4.1) einer Applikation an das verteilte Kernsystem realisiert.

Die Applikationen müssen aus ihrer Aufgabenstellung ableiten, welche Parametermenge einer ereignisgesteuerten Transaktion bedarf und diese Parametermenge anschließend dem Kernsystem in einer Anmeldeoperation bekanntmachen. Das Kernsystem erzeugt dann für jede Werteänderung eines Parameters ein einzelnes Ereignis. Ereignisse werden durch einen Wertevergleich für jede Schreiboperation in der Parameterdatenbank des Kontrollrechners erzeugt, zu dessen Parametermenge ein bestimmter Parameter der angemeldeten Parametergruppe zugeordnet ist. Innerhalb der Setzoperation eines Parameterwertes bekommt der schreibende Prozeß mitgeteilt, daß sich der Parameterwert geändert hat, woraufhin er das Ereignis generiert. Das Ereignis wird nun vom Kernsystem entweder im Fall des Unterbrechungsmechanismus direkt an eine oder mehrere Applikationen weitergeleitet oder im Fall des Warteschlangenmechanismus durch die Einschaltung des Kommunikationssystems zu allen angemeldeten lokalen oder rechnerfernen Empfängern transferiert. Für die Applikation erscheint das Ereignis als "Trigger,,", welcher eine Bearbeitung im Rahmen der Applikation durch eine vorher ausgezeichnete Servicefunktion bewirkt. Besteht hinsichtlich einer Applikation kein Interesse mehr an Werteänderungen eines Parameters oder einer Parametergruppe, muß sie diese explizit abmelden. Die ereignisgesteuerte Transaktion erfordert drei Grundoperationen:

1. Eine Parametergruppe muß für eine ereignisgesteuerte Benachrichtigung angemeldet werden. Die Applikation muß vorher dem Kernsystem erklärt haben, welche Art des Benachrichtigungsmechanismus verwendet werden soll.
2. Es erfolgt eine Benachrichtigung durch das Kontrollsystem im Fall einer Werteänderung eines oder mehrerer Parameter der im ersten Schritt angemeldeten Gruppe. Die Benachrichtigung erfolgt entweder durch eine zum restlichen Datenfluß der Applikation asynchrone Unterbrechung oder durch den Warteschlangenmechanismus. Im Fall des Warteschlangenmechanismus werden die Ereignisse durch den `csnotify` an die Applikationen vermittelt (Abschnitt 2.4.1), die Applikation wartet nur auf einlaufende Ereignisse.
3. Soll eine Parametergruppe nicht mehr an der ereignisgesteuerten Benachrichtigung teilnehmen, ist sie explizit abzumelden.

Die drei Hauptschritte einer ereignisgesteuerten Transaktion werden nacheinander aufgeschlüsselt:

1. Die Anmeldung einer Parametergruppe zerfällt in mehrere Teiloperationen.

Die Applikation entscheidet, ob sie am Unterbrechungsmechanismus oder am Warteschlangenmechanismus teilnehmen möchte und teilt dies dem Kernsystem mit.

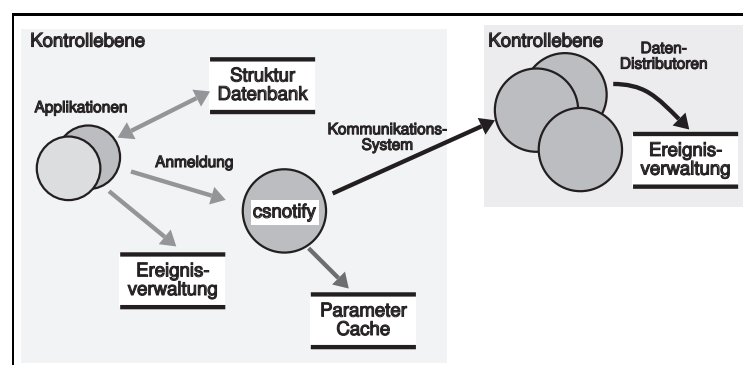


Abbildung 2.25: Anmeldung zum Benachrichtigungsverfahren

Sie stellt die Parameter zusammen, für welche der beschriebene Benachrichtigungsmechanismus erfolgen soll. Sie generiert im Fall des Warteschlangenmechanismus ein Anmeldepaket an den lokalen `csnotify`. Der `csnotify` merkt sich diese Parameter, einen Identifizierer der Applikation und einen Kommunikationsweg, über den die Applikation erreichbar ist. Im Fall des direkten Unterbrechungsmechanismus wird die Parametermenge dem lokalen Ereignissystem (Abschnitt 2.4.1) unmittelbar übergeben.

Der `csnotify` unterscheidet die angemeldete Parametermenge in einen Teil, welcher zur lokalen Parametermenge eines Kontrollrechners gehört und in einen Teil, welcher Element der lokalen Parametermengen anderer Kontrollrechner ist. Die lokale Parametermenge wird vom `csnotify` an das lokale Ereignissystem weitergereicht, welches nun Ereignisse durch den Unterbrechungsmechanismus in den `csnotify` hineinträgt. Für die verbleibenden nicht lokalen Parameter untersucht `csnotify`, ob sich ein Deskriptor im Parameter-Cache befindet. Wird ein Deskriptor gefunden, findet ein Vermerk statt, daß der Parameter an Ereignistransaktionen teilnimmt. Enthält der Parameter-Cache keinen Eintrag, wird ein Deskriptor erzeugt. Im Fall einer Ankopplung über den direkten Unterbrechungsmechanismus führt die Applikation selbst Operationen aus, welche analog zu den Operationen des `csnotify` sind.

Daraufhin erzeugt der `csnotify` Datenpakete und schickt sie an den `csdistributor` der Kontrollrechner, dessen Parametermenge der betreffende Parameter angehört. Der `csdistributor` merkt sich diese Parametermenge und einen Kommunikationsweg zum Kontrollrechner, welcher die Anmeldung abgesetzt, meldet diese Parameter im lokalen Ereignissystem der jeweiligen Kontrollrechner und kann – von diesem Zeitpunkt an – mit Ereignissen versorgt werden.

Das Verfahren unterstützt Mehrfachanmeldungen eines Parameters durch eine bzw. mehrere Applikationen. Das Verfahren stellt sicher, daß Applikationen unabhängig vom Kontrollrechner auf dem sie gestartet sind und unabhängig vom Speicherort eines Parameters, jeweils eine Benachrichtigung für jede Werteänderung eines Parameters erhalten. Es ist hervorzuheben, daß von einem Parameterwert nur eine gültige Referenz in der lokalen Parameterdatenbank eines Kontrollrechners existiert.

- Im Rahmen des Anmeldevorgangs wurde herausgearbeitet, daß Applikationen unmittelbar oder über einen lokalen `csnotify` eine Benachrichtigung erhalten können. Für den Transport rechnerferner Ereignissen über das Netzwerk müssen die `csdistributoren` anderer Kontrollrechner eingeschaltet werden. Der Hauptteil der ereignisgesteuerten Transaktion verläuft in mehreren Schritten.

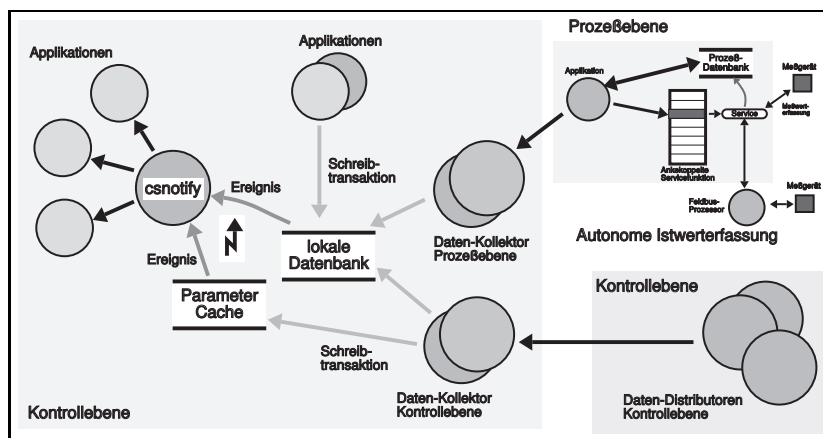


Abbildung 2.26: Ereignisorientierte Transaktionsform

Nur eine Schreibtransaktion kann ein lokales Ereignis auslösen. Schreibtransaktionen sind elementare Transaktionen und können in der Weise wie in Abschnitt 2.6.1 beschrieben initiiert werden. Schreibtransaktionen auslösen kann ein Anwender, z.B. über eine interaktive Eingabe, jede Applikation auf Kontrollebene, Applikationen in der Prozeßebene vermittelt durch den `pscollector` und den `pssyncserv` eines Rechners der Kontrollebene sowie die Kommunikationsprozesse `cscollector` und `cssyncserv`.

Im Rahmen eines Schreibvorgangs wird von den Zugriffsroutinen der lokalen Parameterdatenbank festgestellt, ob sich ein Parameterwert geändert hat. Der schreibende Prozeß erzeugt über das lokale Kommunikationssystem lokale Ereignisse für die angemeldeten Applikationen sowie für den `csnotify` und den `csdistributor` zur Weitervermittlung an andere Kontrollrechner.

Im Fall des direkten Unterbrechungsmechanismus wird der `csnotify` nicht eingeschaltet und die Applikation führt das Anmeldeverfahren selbst aus – es wurde für den `csnotify` beschrieben –, übergibt die Daten entweder an das lokale Ereignissystem oder an die rechnerfernen `csdistributoren` und berücksichtigt dabei den Parameter-Cache.

Die benachrichtigten Applikationen werden in ihrem Datenfluß asynchron unterbrochen, eine Servicefunktion nimmt das Ereignis entgegen und leitet eine Behandlung ein.

Der `csdistributor` nimmt ein Ereignis asynchron entgegen, liest die Parameterwerte aus der lokalen Parameterdatenbank und leitet die Ereignisse mit den Parameterwerten an die `cscollectoren` oder `cssyncserver` der Kontrollrechner weiter, welche an der Benachrichtigung teilnehmen. Ein `cscollector`, bzw. ein `cssyncserv` dekodiert die Ereignisse und schreibt die Parameterwerte in den lokalen Parameter-Cache. Im Fall einer Werteänderung generiert der `cscollector` oder `cssyncserv` über das lokale Ereignissystem direkte Benachrichtigungen an alle beteiligten Applikationen, welche am unmittelbaren Unterbrechungsmechanismus teilnehmen. Unter anderem gehört dazu auch eine Benachrichtigung eines lokalen `csnotify`, welcher seinerseits Ereignisse an die Applikationen weiterreicht, die durch den Warteschlangenmechanismus an das Kernsystem angekoppelt sind.

Der lokale `csnotify` wird asynchron durch das lokale Kommunikationssystem unterbrochen und nimmt die Benachrichtigung in einer Serviceroutine entgegen. `csnotify` durchsucht seine Datenstrukturen nach Einträgen für den gerade aktiven Parameter und generiert Ereignispakete für alle Applikationen, welche Interesse an diesem Parameter haben. Die Applikationen dekodieren das Ereignispaket und lesen den Parameterwert aus der lokalen Datenbank oder dem Parametercache aus.

Das beschriebene Transaktionsschema stellt sicher, daß die Reihenfolge von Werteänderungen und daran gekoppelter Ereignisse nicht umgeordnet wird und ein **konsistenter Gesamtzustand** sichergestellt ist. Insbesondere wird durch die Beibehaltung der Ereignisreihenfolge die **Kausalität** des Systems gewährleistet (z.B. wird die Änderung eines Sollwertes erst dann weitergegeben wenn diese Werteänderung im fehlerfreien Fall auch im Endgerät ausgeführt wurde).

3. Die Abmeldung einer vorher angemeldeten Parametergruppe durchläuft mehrere Teilschritte.

Die Applikation generiert ein Abmeldepaket an den lokalen `csnotify`, welche die Parameter enthält für die keine Benachrichtigung mehr erfolgen soll. Dieser dekodiert das Datenpaket, durchsucht seine Datenstrukturen entsprechend den Parametervorgaben und entfernt sie aus seiner Verwaltung. Sind allerdings noch weitere Applikationen an einem Parameter der vorgegebenen Parametermenge interessiert, so werden nur die speziellen Vermerke der Applikation gelöscht, welche gerade die Abmeldeanforderung stellt. Ist die Applikation über den direkten Unterbrechungsmechanismus an das Kernsystem angekoppelt, übergibt sie die Abmeldeanforderung an die lokale Ereignisverwaltung.

Im Fall des Warteschlangenmechanismus separiert `csnotify` die Parametermenge in lokale und nichtlokale Parameter (wie im Anmeldevorgang) und übergibt die lokale Parametermenge der lokalen Ereignisverwaltung. Für die nichtlokalen Parameter generiert `csnotify` Abmeldepakete an die `csdistributoren` der betreffenden Kontrollrechner, welche diese Parameter an die Ereignisverwaltung ihres lokalen Kernsystems weitergeben. Die `csdistributoren` durchsuchen ebenfalls ihre Datenstrukturen und entfernen die Parametereinträge, welche von keinem anderen Kontrollrechner mehr gebraucht werden. Das lokale Ereignissystem untersucht den Parametercache nach Einträgen betreffender Parameter und löscht diese, falls keine Applikation mehr Interesse an den Parametern bekundet; anderenfalls wird nur der spezielle Vermerk für eine Applikation gelöscht. Für nichtlokale Parameter werden Abmeldepakete an die `csdistributoren` anderer Kontrollrechner generiert.

Die Applikation gibt dem Kernsystem im letzten Schritt bekannt, ob weiterhin an der Ereignisverarbeitung teilgenommen werden soll. Sieht die Applikation dafür keinen Bedarf mehr, meldet sie sich beim Kernsystem ab.

Die Abmeldetransaktion berücksichtigt, daß Mehrfachanmeldungen eines Parameters durch verschiedene Applikationen aktiv sein können. Nur im Fall, daß keine weitere Applikation mehr für einen Parameter benachrichtigt werden will, wird der Anmeldeeintrag komplett gelöscht. Im anderen Fall wird nur die Anmeldung der betreffenden Applikation aus den Verwaltungsstrukturen entfernt, alle anderen Applikationen werden weiterhin mit Benachrichtigungen versorgt.

Für alle Operationen stellt die Applikationsschnittstelle auf Grundlage des Kommunikationssystems im verteilten Kontrollkern die erforderlichen Funktionen bereit. Das Kernsystem sichert Synchronisation und Vermittlung der Ereignisse. Die Hauptschwierigkeit im gesamten ereignisorientierten Transaktionsschema besteht darin, Ereignisse, die nur rechnerlokal an der Stelle erzeugt werden, an der Parameter ihren Speicherplatz haben, über das Kommunikationssystem an alle Kontrollrechner konsistent zu transportieren. Die

Ereignisbehandlung geschieht unsichtbar für einen Applikationsentwickler; er kann sich auf die Lösung einer beschleunigerphysikalischen Aufgabenstellung konzentrieren, welche dadurch unabhängig vom verteilten Kernsystem angegangen werden kann.

Die Beschreibung der ereignisgesteuerten Transaktionsform zeigt, daß Art und Umfang der Applikationen im Kontrollsystem dessen Kommunikationsbedarf bestimmen. Ist eine Menge von Applikationen im Kontrollsystem aktiv, stellt das beschriebene Ereignisschema sicher, daß nur soviel Kommunikationsaufwand betrieben wird, wie zur Weiterleitung der Ereignisse bis zu den Applikationen notwendig ist, ohne daß diese aktiv werden müssen. Das Konzept, den Parameterzustand der Kontrolle als **Spiegelbild** des realen Maschinenzustandes zu sehen, wird durch das Kommunikationssystem und die angegebenen Transaktionsformen realisiert. Es sorgt dafür, daß die überwiegende Anzahl von Leseoperationen im Kontrollsystem lokal stattfindet und deswegen mit größtmöglicher Geschwindigkeit abläuft.

2.7 Kooperierende Prozeßmenge des Kernsystems

Gemäß der Softwarearchitektur des Kernsystems, wie sie in Abschnitt 2.2.2 beschrieben ist, besteht das Kernsystem aus einem System kooperierender und kommunizierender Prozesse, welche kohärent die Beschleunigerkontrolle ausführen. In diesem Abschnitt wird die entwickelte Prozeßmenge zusammengestellt. Die Kooperation der Prozeßmenge sowie die Verarbeitungsdynamik in der Zusammenarbeit lokaler Kerne im verteilten System wurde für die Kernprozesse am Beispiel typischer Transaktionsformen des Gesamtsystems in Abschnitt 2.6 beschrieben. Das Kernsystem der Kontrolle stellt für jeden Kontrollrechner eine Menge von Prozessen bereit, welche sich in drei Bereiche gliedern läßt:

1. Ein Teil der Prozesse verrichtet ihren Dienst innerhalb der Kontrollebene.

`cskernel` legt alle Kontrollsysteminfrastrukturen für einen Kontrollrechner an und sichert die lokalen Datenbanken periodisch. Die Prozesse `cscollector` und `cssyncserv` sind „Daten-Kollektoren“, der Kontrollebene. `cscollector` stellt die Instanz für den verbindungslosen Dienst dar, `cssyncserv` für den verbindungsorientierten Dienst des Kommunikationssystems (Abschnitt 2.4.2). `csdistributor` bezeichnet den „Daten-Distributor“ (Abschnitt 2.4.2). Der Prozeß `csnotify` stellt den ereignisorientierten Warteschlangenmechanismus zur Ankopplung von Applikationen an das Kontrollsystem bereit (Abschnitt 2.6.3 und 2.4.1). Ein Zugriff externer Benutzer (z.B. Experimente an ELSA) auf das Kontrollsystem ermöglicht `csextconnect`. Er wurde als Erweiterung des Kommunikationssystems im Rahmen der Inbetriebnahme des Kontrollsystems entwickelt (Abschnitt 6.3). Der `csbroker`-Prozeß verkoppelt das parallele System der Kontrollrechner zu einem verteilten System (Abschnitt 2.5). `cslogman` verwaltet, speichert und verteilt Alarmmeldungen (Abschnitt 2.4.3).

2. Die Kommunikation zwischen Kontrollebene und Prozeßebene stellt eine Anzahl von Prozessen sicher. Die Prozesse `pscollector` und `pssyncserv` sind „Daten-Kollektoren“ auf Kontrollebene, die Botschaften aus dem Prozeßsystem entgegennehmen (Abschnitt 2.4.2). `pslog` empfängt Alarmmeldungen aus der Prozeßebene (Abschnitt 2.4.3). Der `psbootserv`-Prozeß stellt den Arbeitskontext eines VME-Prozessormoduls der Prozeßebene in dessen Anlaufphase zusammen. Das VME-Prozessormodul fragt diesen Service explizit in seiner Startphase an (Abschnitt 2.3.5 und Abschnitt 2.5).

3. Weitere Prozesse arbeiten innerhalb der Prozeßebene. Sie stellen unter anderem die Ankopplung der Prozeßebene an die Kontrollebene sicher. Der `csattach`-Prozeß fragt in der Startphase eines VME-Prozessormoduls beim `psbootserv` des zugeordneten Kontrollrechners den lokalen Arbeitskontext ab und legt mit diesen Daten die Prozeßdatenbank an (Abschnitt 2.5). `csimage` fragt die aktuellen Werte aller Kontrollparameter eines VME-Prozessormoduls beim `psbootserv` an und füllt damit die von `csattach` angelegte lokale Prozeßdatenbank (Abschnitt 2.3.5 und Abschnitt 2.5). Die Prozesse `pscollector` und `pssyncserv` sind „Daten-Kollektoren“ auf Prozeßebene, welche Botschaften aus der Kontrollebene entgegennehmen (Abschnitt 2.4.2). Die beiden Prozesse `psperf` und `fbperf` überprüfen den Datenverkehr zwischen Kontroll- und Prozeßebene sowie zwischen Prozeß- und Feldebene und stellen Leistungsdaten zusammen, welche als Kontrollparameter geschrieben werden (Abschnitt 2.3.5).

Die Prozesse werden in der Startphase des Systems aktiviert und kooperieren im laufenden Betrieb miteinander. Die beschriebene Prozeßmenge stellt das Grundgerüst der aktiven Komponenten des Kontrollkerns dar; die Prozesse sind frei von beschleunigerphysikalischen Codeteilen.

2.8 System verteilter Regelexperten

Bis hierhin wurde ein verteiltes Kernsystem mit universellem Verwendungsprofil beschrieben. Anwendern und besonders Applikationen bietet es eine **konsistente Gesamtsicht** auf die Parametergesamtheit der Maschinenkontrolle. Die Softwaremittel zur Erreichung einer konsistenten Gesamtsicht sind im einzelnen vorgestellt und zum verteilten Kernsystem zusammengesetzt worden. Die für das Kernsystem wesentlichen Transaktionsformen wurden im Abschnitt 2.6 in ihren wichtigsten Einzelheiten und in ihrer Dynamik erläutert. Auf ihrer Basis ist jede Applikation in der Lage, **transparent** mit der Parametermenge des Kontrollsystems zu arbeiten.

Die beschleunigerphysikalische Gesamtaufgabenstellung des Kontrollsystems bearbeiten eine Menge von Experten; sie stellen eigenständige Applikationen dar, welche ein auf ELSA zugeschnittenes Regelwerk bearbeiten. Sie sind zunächst gegenüber anderen Applikationen im Kontrollsystem nicht ausgezeichnet. Experten benutzen, wie jede andere Applikation, die Zugriffsmechanismen des Kernsystems und sind über den **ereignisorientierten Warteschlangenmechanismus** an das Kontrollsystem angekoppelt. Ihre besondere Eigenschaft zur Lösung der beschleunigerphysikalischen Anforderungen an das Kontrollsystem besteht darin, daß sie alle damit verbundenen Berechnungen in einzelnen Modulen bündeln und sie unmittelbar an den ereignisorientierten Datenfluß des Kernsystems ankoppeln. Neue Erkenntnisse, Methoden, Analyseverfahren oder Kontrollkonzepte für einen Teilbereich (z.B. Injektion, Extraktion, Zeitsteuerung oder Strahldiagnose) der Beschleunigeranlage führen jeweils nur zur Erweiterung bzw. Abänderung eines dedizierten Experten. Das Kernsystem der Kontrolle bleibt davon unberührt. Das Kontrollsystem läßt sich insgesamt Schritt für Schritt in seinem Angebot beschleunigerphysikalischer Funktionen, auf Basis bestehender oder noch zu entwickelnder Experten, erweitern. Im laufenden System können Experten ausgetauscht, geändert oder neue Experten im System eingeführt werden, so daß die Gesamtkontrolle unmittelbar danach auf einen verbesserten Funktionsumfang zugreifen kann. Zur Förderung der Modularität und der Parallelarbeit im Kontrollsystem wurde entschieden, eine möglichst große Menge von Experten im laufenden Betrieb zu etablieren³⁸. Die Menge von Experten ist im laufenden Betrieb auf die Kontrollrechner verteilt, um so eine gleichmäßige Auslastung aller Rechner sicherzustellen. Die Verteilung wird zur Zeit noch manuell vorgenommen. Sie richtet sich nach dem Parameteraufkommen für einen Experten, dem Umfang zu erwartender Transaktionen, dem erwarteten Datenaufkommen, der Komplexität des Regelwerkes der einem Kontrollrechner zugeordneten Parametermenge und der Gesamtleistungsfähigkeit des betreffenden Kontrollrechners³⁹. Die Berücksichtigung aller Randbedingungen erfordert detailliertes Abwägen, die individuelle Bewertung und Entscheidung für einen speziellen Kontrollrechner. Für das verteilte Kontrollsystem wurde versucht, eine Aufteilung hinsichtlich der besten Ausnutzung gegebener Betriebsmittel zu treffen.

2.8.1 Regelsystem

Für die Generierung der Experten wird ein Konzept verwendet, das Erweiterbarkeit, Modularität, Flexibilität und eine einfache Benutzbarkeit für einen Experten-Programmierer sicherstellen soll. Zusätzlich soll das Konzept einsichtig sein und den Einbau komplexester Berechnungen ermöglichen. Entsprechend der Motivation in Abschnitt 2.1 wurde beschlossen, daß Experten ihren Funktionsumfang durch eine **Menge von Regeln** mitgeteilt bekommen. Eine Regel ist definiert durch eine Menge von Eingabeparametern $\mathcal{P}_{in} = \{p_{in}^1, p_{in}^2, \dots, p_{in}^n\}$, eine Menge von Ausgabeparametern $\mathcal{P}_{out} = \{p_{out}^1, p_{out}^2, \dots, p_{out}^m\}$, sowie eine Transformationsvorschrift oder **Regelfunktion**⁴⁰ \mathcal{R} , welche angibt, wie die Eingabeparametermenge in die Ausgabeparametermenge zu überführen ist:

$$\mathcal{P}_{in} \xrightarrow{\text{Regel}} \mathcal{P}_{out}.$$

Ein einfaches Beispiel verdeutlicht diese Konzeption: Der Arbeitspunkthub ΔQ_x^{ext} für die langsame Resonanzextraktion, welcher durch Erregung der schnellen Extraktionsquadrupole von ELSA bewirkt wird,

³⁸Die Konzentration der beschleunigerphysikalischen Berechnungen in ein einziges Programm wäre sicherlich möglich gewesen. Wegen der erwarteten Unübersichtlichkeit, fehlender Modularität und behinderter Parallelarbeit wurde dieser Ansatz verworfen.

³⁹Darin enthalten sind unter anderem Speicherausbau, Rechengeschwindigkeit und Netzwerkverhalten.

⁴⁰Der Begriff Regelfunktion wird hier im Sinne einer Abbildungsvorschrift verwendet.

soll durch das Kontrollsystem einstellbar sein. Dazu muß der Arbeitspunkthub ΔQ_x^{ext} in die Ströme der Netzgeräte für die Extraktionsquadrupole transformiert werden. Als Eingabeparameter dienen dafür der gewünschte Arbeitspunkthub ΔQ_x^{ext} , die Teilchenenergie in ELSA E_0 , als Ausgabeparameter die Ströme I_{Q16} und I_{Q32} für die Extraktionsquadrupole. Die Transformationsvorschrift hat die Gestalt $I = k\Delta Q_x^{ext} E_0$, wobei k eine experimentell ermittelte Konstante darstellt. Im vorgestellten Regelkonzept ergibt sich folgendes Schema:

$$\begin{aligned} \mathcal{P}_{in} &= \{\Delta Q_x^{ext}, E_0\}, \\ \mathcal{P}_{out} &= \{I_{Q16}, I_{Q32}\}, \\ \mathcal{R} : I_{Q16, Q32} &= k\Delta Q_x^{ext} E_0. \end{aligned}$$

Für jede Änderung von ΔQ_x^{ext} oder E_0 würde ein Experte die Regel ausführen und die Ströme für die Extraktionsquadrupole durch eine Schreibtransaktion im Kontrollsystem setzen.

Die Menge aller Regeln $\mathcal{R}_\alpha = \{R_1, R_2, \dots, R_p\}$ eines Experten α , die Menge seiner Eingabeparameter \mathcal{P}_{in} und die Menge aller seiner Ausgabeparameter \mathcal{P}_{out} legt seine Tätigkeit für das Kontrollsystem fest. Den Transport der Eingabeparameter in den Experten und der Ausgabeparameter zurück in das Kontroll-

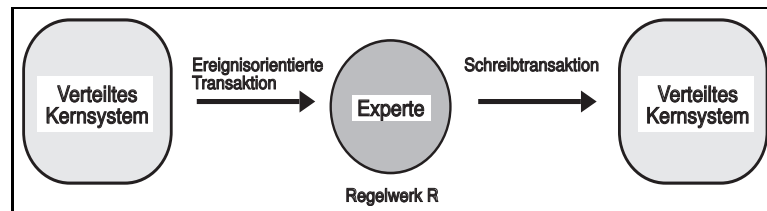


Abbildung 2.27: Kontrollsystem und Experte

system übernimmt das universelle Kernsystem. Das gesamte **Regelwerk** oder die **Regelbasis** für die ELSA-Kontrolle stellt die Gesamtmenge sämtlicher Regeln aller Experten \mathcal{R}_{elsa} , die Gesamtmenge aller Eingabeparameter \mathcal{E}_p und die Gesamtmenge sämtlicher Ausgabeparameter \mathcal{A}_p dar:

$$\mathcal{R}_{elsa} = \bigcup_{i=1}^L \mathcal{R}_i, \quad \mathcal{E}_p = \bigcup_{e=1}^M \mathcal{P}_{in,e}, \quad \mathcal{A}_p = \bigcup_{a=1}^N \mathcal{P}_{out,a}.$$

Hierbei bezeichnet L die Gesamtzahl aller Regeln, M bezeichnet die Gesamtzahl der Eingabeparameter und N die Zahl aller Ausgabeparameter des Regelwerks.

Da die Experten den Warteschlangenmechanismus zur Ankopplung an das Kontrollsystem benutzen, müssen sie dem Kontrollsystem mitteilen, für welche Werteänderung eines Parameters sie eine Benachrichtigung durch den ereignisorientierten Transaktionsmechanismus wünschen. Damit eine Benachrichtigung durch das Kernsystem ausgelöst wird, meldet ein Experte einige Parameter seiner Eingabemenge für den ereignisorientierten Transaktionsmechanismus an. Diese Parameter übernehmen dann eine **Triggerfunktion**; eine Werteänderung dieser Parameter führt zur Auslösung und Abarbeitung angekoppelter Regelfunktionen. Die Eingabeparametermenge einer Regel zerfällt damit in eine Teilmenge mit Triggerfunktion \mathcal{T}_{in} (sie sind mit einem * gekennzeichnet) und den Rest der Eingabeparametermenge ohne Triggerfunktion \mathcal{I}_{in} :

$$\begin{aligned} \mathcal{P}_{in} &= \{p_{in}^{*1}, p_{in}^{*2}, p_{in}^3, \dots, p_{in}^n\} \\ &= \mathcal{T}_{in} \cup \mathcal{I}_{in}. \end{aligned}$$

Die Menge der Eingabeparameter kann für eine Regel relativ groß sein, die Teilmenge \mathcal{T}_{in} mit Triggerfunktion dagegen klein. In jedem Fall **muß** im Eingabebereich einer Regel **mindestens ein** Parameter als Trigger ausgezeichnet sein. Selbst mit nur einem „Triggerparameter“ lassen sich komplexe Aktionen einleiten. Im Vorgriff auf einen späteren Teil der Arbeit (Abschnitt 4.5 im Kapitel 4) sei hier nur auf das System zur zeitlichen Ablaufsteuerung des Maschinenzyklus verwiesen, das über einen einzigen Triggerparameter per „Knopfdruck“ durch das Regelwerk eines dedizierten **timing-Experten** einstellbar ist. Der **timing-Experte** interpretiert den Trigger als Aufforderung, alle Komponenten der zeitlichen Ablaufsteuerung in einen konsistenten Zustand – z.B. für den Strecher- oder den Nachbeschleunigungsmodus – zu setzen. Er liest die

Werte aller Eingabeparameter (unter anderem die Anzahl der Injektionsschüsse, Rampzeiten, Extraktionszeiten etc.), führt die notwendigen Berechnungen aus und wirkt auf die Beschleunigeranlage zurück.

Es ist nicht explizit untersagt, daß alle oder eine Teilmenge der Ausgangsparametermenge \mathcal{P}_{out}^a einer Regel \mathcal{R}_a wieder Element der Eingabemenge \mathcal{P}_{in}^b einer anderen Regel \mathcal{R}_b sind (auch $a = b$ ist zulässig):

$$\mathcal{D}_{ab} = \mathcal{P}_{out}^a \cap \mathcal{P}_{in}^b \neq \emptyset.$$

Die Ausgangsparameter \mathcal{P}_{out}^b der Regel \mathcal{R}_b können wiederum im Eingabebereich \mathcal{P}_{in}^c einer weiteren Regel \mathcal{R}_c liegen. Diese Kette läßt sich beliebig fortsetzen, und es ist offensichtlich, daß sich damit Rückkopplungen ergeben, welche ein instabiles Verhalten des Regelsystems erzeugen können. Eine solche Eigenschaft kann nützlich sein, um z.B. iterative Berechnungen auszulösen; im allgemeinen muß aber ein Mechanismus dafür sorgen, daß Rückkopplungen weder zu instabilem Verhalten, noch zu Endlosschleifen der Verarbeitungskette führen. Abbildung 2.28 zeigt die allgemeine Situation, wie die Arbeitsweise eines Experten durch das Kernsystem rückgekoppelt wird. Das Kernsystem vermittelt ein Ereignis – im Fall einer Werteänderung eines

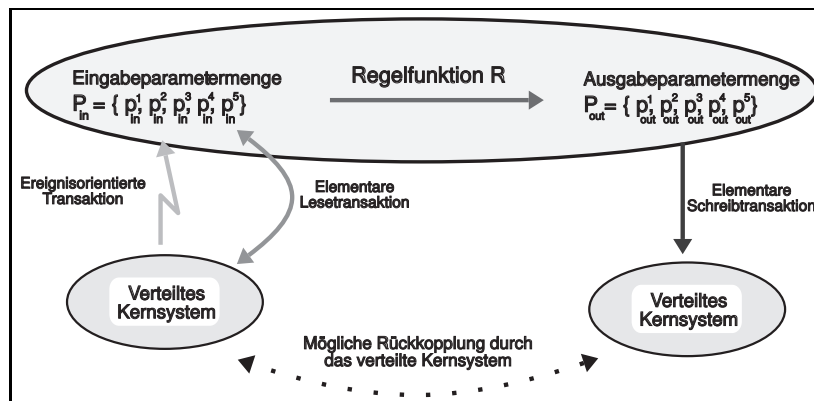


Abbildung 2.28: Rückkopplung eines Experten durch das Kernsystem

Triggerparameters einer Regel – an den entsprechenden Experten. Der Experte akzeptiert die Benachrichtigung und liest seine Eingabewerte aus dem Kernsystem. Er führt seine Berechnungen aus und schreibt die Ausgangswerte in das Kernsystem zurück. Durch die Arbeit anderer Experten und die Definition der Regeln kann zeitlich versetzt durch das Kernsystem eine Rückkopplung an den Experten, in Form eines Ereignis, vermittelt werden. Aus Abbildung 2.28 wird unmittelbar klar, daß entweder nur das Kernsystem selbst, oder der Regelexperte die Rückkopplung aufheben und einen Zyklus terminieren kann. Das Kernsystem geht folgendermaßen vor:

Unterscheiden sich zwei aufeinanderfolgende Werteänderungen eines Parameters nur um einen Minimalwert ϵ – er ist im Kontrollsystem für jeden Parameter festgelegt – macht es keinen Sinn mehr, ein weiteres Ereignis auszulösen. Das Kernsystem unterbindet in diesem Fall die Generierung von Ereignissen und hebt damit den Rückkoppelzweig in Abbildung 2.28 auf. Die Auflösung einer Rückkopplung kann ein Experte selbst nur durch Verhinderung der Ausführung einer Regelfunktion im Rahmen seines Kontextes bewirken. Ein einfacher Weg besteht darin, bestimmte Parameterwerte auszuzeichnen, die der Regelexperte akzeptiert, die aber keine weitere Aktivität – in Form der Abarbeitung einer Regelfunktion – bewirken. Allgemein kann hierfür kein Rezept angegeben werden, sondern sie muß zur Zeit noch individuell im Experten gelöst werden.

Ein weiteres Problem stellt Gültigkeit und Konsistenz der Eingabeparameterwerte dar. Werden Eingabeparameter vom Experten zu beliebigen Zeitpunkten nacheinander gelesen, kann eine Inkonsistenz entstehen, da andere Applikationen den aktuellen Parameterzustand wieder abgeändert haben könnten⁴¹ und somit ein undefinierter Gesamtzustand der Eingabeparametermenge entsteht. Deswegen wurde sichergestellt, daß die Werte aller Eingabeparameter in einer einzigen Lesetransaktion – zu einem Zeitpunkt – genommen werden. Das Kernsystem sieht dafür den „Schnappschußmechanismus“ vor. Das gesamte Regelnetzwerk der ELSA-Kontrolle läßt sich als gerichteter Graph auffassen, welcher Rückkopplungen enthalten kann, wobei die Eingabeparameter einer Regel die Knoten des Graphen darstellen. In diesem gerichteten Graphen ist die gesamte beschleunigerphysikalische „Intelligenz“ des Kontrollsystems eingebracht. Abbildung 2.29 zeigt diese Interpretation des Regelwerkes in anschaulicher Weise.

⁴¹Der parallele Zugriff auf Parameter des Kontrollsystems ist wegen Nebenläufigkeitstransparenzforderung explizit erlaubt.

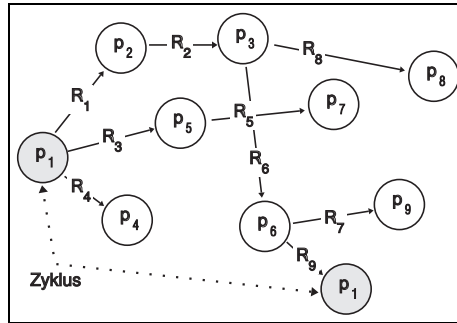


Abbildung 2.29: Interpretation des Regelsystems als gerichteter Graph

Implementierungsaspekte

Am Anfang der Entwicklung des Systems verteilter Regelexperten wurden zwei Ansätze für Implementierung und Ausführung der Regelfunktionen diskutiert:

1. Die erste Möglichkeit bestand darin, die Regelfunktionen mit Hilfe einer Interpreter-Sprache abzu- arbeiten. Die Abarbeitung der Regelfunktionen kann im Kontext eines Experten stattfinden. Die Anweisungen einer Regel hätte man Befehl für Befehl interpretieren müssen, was erhebliche Geschwin- digkeitseinbußen bedeutet. Die Regeln selbst wären allerdings einfach in Textdateien abzulegen und jederzeit änderbar gewesen, was den Ansatz in dieser Hinsicht wartungs- und benutzerfreundlich ge- macht hätte.
2. Das komplette Kontrollsystem ist in der Programmiersprache C entwickelt, die auch Basis für die Ent- wicklung der Regelfunktionen sein kann. Der Programmtext muß dann Bestandteil eines Experten sein und mit ihm zusammen in ein lauffähiges Programm übersetzt werden, bevor eine Ausführung stattfin- den kann. Der Programmcode einer Regelfunktion wird in diesem Fall mit maximaler Geschwindigkeit ausgeführt.

Beide Alternativen wurden eingehend geprüft; folgende Ergebnisse gaben den Ausschlag zur Wahl der zweiten Methode:

- Der Funktionsumfang der anvisierten Interpreter-Sprache hätte sich an der Sprache C orientieren müssen⁴² und nach Berücksichtigung notwendiger Algorithmen für die beschleunigerphysikalische Steue- rung auch die Komplexität der Sprache C angenommen. Die Nachbildung des prozeduralen Konzepts der Sprache C wäre erforderlich und umfangreiche Entwicklungen für eine Laufzeitbibliothek zu leisten gewesen. Der Entwicklungsaufwand dafür war nicht zu rechtfertigen.
- Die quasi-analoge Steuerung einzelner Parameter oder Parametergruppen hätte durch die interpreta- tive Abarbeitung der Regelfunktionen nicht garantiert werden können.

Alle Regelfunktionen werden mit einem einheitlichen Aufrufschema versehen, damit eine möglichst einfa- che Integration in einen Experten vorgenommen werden kann. Es wurde festgelegt, daß ein Regelexperte aus einem Teil besteht, der die beschleunigerphysikalischen Berechnungen umfaßt und einem zweiten Teil, welcher die notwendigen Infrastrukturen zur Kopplung an das Kontrollsystem bündelt. Der Anteil, welcher die Kopplung an das Kontrollsystem vornimmt stellt bereits einen „Standard-Experten“ dar, welcher al- lerdings keine weiteren Berechnungen ausführt (Experten-Skelett). Der beschleunigerspezifische Teil ist im konkreten Fall vom Entwickler eines Experten mit den nötigen Regelfunktionen zu füllen. Nur dieser Teil ist für den Entwickler eines Experten zu berücksichtigen und erlaubt die Konzentration auf eine Lösung der beschleunigerphysikalischen Fragestellung.

⁴²Eine Reihe von Algorithmen in der Quellsprache C waren verfügbar und wären mit geringem Aufwand in die Interpreter- Sprache übersetzbar gewesen.

2.8.2 Generierung der Regelbasis und der Experten

Zur Generierung des Regelwerkes und der Experten wurde ein Regelcompiler [1] und Programmgenerator `csrule` entwickelt. Mit Hilfe des lexikalischen Analysators `lex` und des Parsergenerators `yacc` – sie wurden bereits im Rahmen der Entwicklung der Strukturdatenbank eingesetzt –, konnte das Gerüst des Programms `csrule` erstellt werden. Die Regeldefinitionen werden in einer eigenen Sprache in Textdateien („`experte definition file`“ EDF) abgelegt. Die Sprache erlaubt die Definition der Ein- und Ausgabeparameter von Regeln, den Namen einer Regel, die Auszeichnung der Triggerparameter einer Regel, die Definition des Kontrollrechners auf der die Regeln abgearbeitet werden, wie auch den Namen des Experten, der die Regel ausführen soll. Das folgende Beispiel zeigt eine einfache Definition zur Berechnung von Strömen der ELSA-Extraktionsquadrupole aus der Teilchenenergie und einem gewünschten Arbeitspunkthub.

```
/* Berechnung der Stroeme der Extraktionsquadrupole
 * bei Vorgabe eines gewuenschten Arbeitspunkthubs.
 */
engine extraction {
    name extraction;
    host elsahp1;
    rule q_c {
        input {
            *ELS_MAGNETE_DIPOL.ENERGIE_AC; /* beide Parameter haben */
            *ELS_LQ_MODEL.QDELTA_AC;      /* Triggerfunktion      */
        }
        output {
            ELS_EXTRAKT_QUAD16.STROM_AC;
            ELS_EXTRAKT_QUAD32.STROM_AC;
        }
    } /* end rule */
} /* end engine */
```

Die Regeldefinition enthält nicht den Text der Regelfunktion, welche im Beispiel die Berechnung der Ströme der Extraktionsquadrupole vornimmt. Allerdings ist durch den Namen des Regelexperten (**extraction**), den zugeordneten Kontrollrechner (**elsahp1**) und den Namen der Regel (**q_c**) eine eindeutige Benennung der Regelfunktion gegeben: **extraction_elsahp1_q_c**. Abgeleitet von diesem Namen hat der Entwickler die Dateien `extraction_elsahp1_q_c.support` und `extraction_elsahp1_q_c.rule` mit den C-Quelltexten der Regelfunktion zu programmieren. Dabei enthält `extraction_elsahp1_q_c.rule` den eigentlichen Quelltext und `extraction_elsahp1_q_c.support` optional Unterstützungsfunktionen.

Das `csrule`-Programm erzeugt aus allen Regeldateien einen gerichteten Regelgraphen und legt ihn in der Regeldatenbank `CSRULEBASE.DAT` ab. `csrule` zerlegt den Regelgraphen in der Regeldatenbank bereits in Teilgraphen für jeden Kontrollrechner, so daß der Prozeß `csbroker` in der Startphase des Kontrollsystems die jeweiligen Teilgraphen für den betreffenden Rechner einfach in eine speicherresidente, rechnerlokale Regeldatenbank importieren kann. Die speicherresidente Regeldatenbank hat drei Hauptaufgaben zur Unterstützung von Experten.

Sie identifiziert für jeden Triggerparameter alle Regeln, für welche der betreffende Parameter im Eingabebereich liegt. Für alle identifizierten Regeln ermittelt sie die Gesamtmenge aller Ein- und Ausgabeparameter. Sie ermittelt für jeden Triggerparameter sämtliche Eingabeparameter aller durch diesen Triggerparameter aktivierbaren Regeln.

Die speicherresidente Regeldatenbank ist darauf ausgelegt, diese Operationen mit möglichst hoher Geschwindigkeit auszuführen; dabei wird die Parametermenge, welche einem Experten zugeführt wird, minimiert, da Parameter im Eingabe- und Ausgabebereich mehrerer Regeln liegen können, der Parameter aber nur einmal transportiert werden muß.

`csrule` erzeugt den Rahmen für alle Regelfunktionen und integriert darin das entwickelte Regelwerk. Zusätzlich generiert `csrule` eine Menge von Header-Dateien mit Datenstrukturen der Eingabe- und Ausgabeparameter aller Regeln, Vermerke im Experten-Skelett (s.o.) für den jeweils konkreten Experten und die Quelltexte, welche die eigentlichen Regeln enthalten, Kommandodateien für die automatische Generierung eines Experten, ein UNIX Shell-Skript zur Generierung aller Experten (`csrulegen`) und ein UNIX Shell-Skript zur automatischen Aktivierung aller Regelexperten in der Startphase des Kontrollsystems (`csrulestart`). Abbildung 2.30 verdeutlicht die Arbeitsweise von `csrule`. Nach Ablauf des UNIX Shell-Skript zur automatischen Generierung aller Regelexperten sind sie konsistent erzeugt und auf den Kontrollrechnern verfügbar.

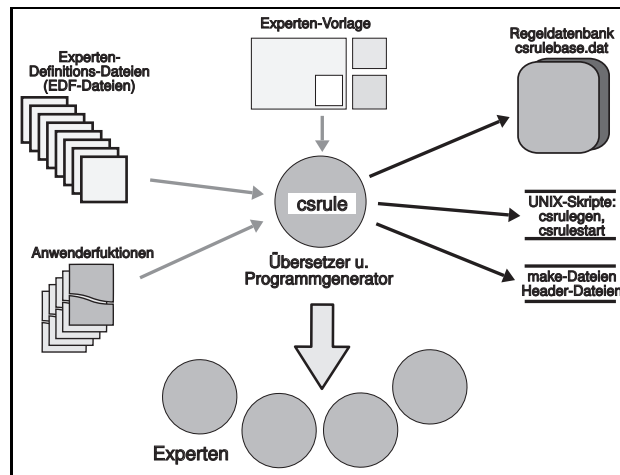


Abbildung 2.30: Arbeitsweise von csrule

2.8.3 Arbeitsweise eines Experten

Im Rahmen der Expertenaktivierung werden mehrere Schritte vom Experten abgearbeitet.

Der Experte koppelt sich über den ereignisorientierten Warteschlangenmechanismus (siehe Details im Abschnitt 2.6.3) an das Kontrollsystem an. Er definiert eine Servicefunktion zur Behandlung von Ereignissen. Es folgt das Lesen aller Regeln für diesen Experten aus der speicherresidenten Regeldatenbank und Ablage in Datenstrukturen, welche von csrule im Rahmen der Generierung des Experten angelegt wurden. Die Menge dieser Regeln definiert das Regelwerk des Experten. Der Experte stellt alle Eingabeparameter des Regelwerkes fest und führt eine Extraktion der Triggerparameter (die notwendigen Datenstrukturen wurden von csrule bereits vorher selbsttätig angelegt) aus. Er meldet alle Triggerparameter zur Teilnahme am ereignisorientierten Transaktionsmechanismus an. Das Kernsystem benachrichtigt den Experten ab diesem Zeitpunkt über Werteänderungen der Triggerparameter.

Die Ausführung von Regelfunktionen im Fall einer Werteänderung eines Triggerparameters und des damit verbundenen Ereignis läuft nach folgendem Schema ab.

Die Servicefunktion zur Behandlung des Ereignisses wird gestartet. Für den Triggerparameter p^* wird die Menge aller Regeln \mathcal{R}^p festgestellt, für welche p^* Element der Eingabeparametermenge ist. Für alle Eingabeparameter der Regelmenge \mathcal{R}^p wird ein konsistenter Schnappschuß der zu diesem Zeitpunkt aktuellen Werte in einer Operation gelesen. Für jede Regel $r \in \mathcal{R}^p$ wird die Regelfunktion zusammen mit dem ermittelten Schnappschuß der Eingabeparameterwerte aufgerufen. Die Regelfunktion führt ihre Berechnungen unter ausschließlicher Benutzung des Schnappschusses aus und erzeugt Ergebnisswerte, die durch eine Schreibtransaktion in das Kontrollsystem eingebracht werden. Wird während der Ausführung einer Regelfunktion eine Fehlerbedingung festgestellt, so wird vom Experten eine Meldung an das Alarmsystem (Abschnitt 2.4.3) der Kontrolle generiert, welche den Namen der Regel, den Namen des Kontrollrechners und den Namen des Triggerparameters enthält. Durch diese wichtige Verbindung von Experten zum Alarmsystem der Kontrolle ist eine Fehlerüberwachung möglich.

3. Die graphische Bedienungsoberfläche

Dieses Kapitel behandelt die Softwarewerkzeuge zur Erstellung der graphischen Bedienungsoberfläche des ELSA-Kontrollsystems. Sie ist eine eigenständige, vom verteilten Kernsystem unabhängige Entwicklung und benutzt deren Fähigkeiten wie alle anderen Applikationen im Kontrollsystem. Sie ist hinsichtlich dieser Tatsache also nicht ausgezeichnet, besitzt aber eine herausgehobene Bedeutung für die Akzeptanz des Kontrollsystems durch die Anwender.

Das Konzept der graphischen Benutzeroberfläche wird beschrieben. Daran schließt sich eine Darstellung verschiedener Verfahrensweisen zur Erstellung von Bedienungsbildern an. Das im laufenden Betrieb aktive Bedienungssystem wird erläutert. Maschinendatensätze lassen sich im Rahmen der Bedienungsoberfläche durch ein eigenständiges System verwalten.

3.1 Konzeption der Benutzeroberfläche

Die physikalische Gesamtsicht der Beschleunigeranlagen wird durch das verteilte Kernsystem und das System der verteilten Regelexperten sichergestellt. Sie formieren das **Beschleunigerbetriebssystem** zur Integration der **Kontroll-, der Strahldiagnose- und der Simulationsaufgaben**. Die physikalische Gesamtsicht wird den Anwendern der Beschleunigeranlage durch eine interaktive graphische Bedienungsfläche optisch vermittelt bzw. erhält dadurch eine Interpretation. Sie ist **die** interaktive Schnittstelle zwischen dem Anwender und dem Kontrollsystem, welches den Zugriff zur Beschleunigeranlage sicherstellt. Für die Konstruktion des verteilten Kontrollsystems hat die Verwendung einer Benutzeroberfläche nur geringe Bedeutung. Dieser Tatsache wurde Rechnung getragen und die Konzeption so ausgelegt, daß innerhalb der erstellten Bedienungsfläche keine Bezüge auf das Kernsystem – bis auf die Verwendung von Parameternamen – vorkommen. Die graphische Bedienungsfläche ist damit allgemein einsetzbar; sie kann auch in der Zukunft zugunsten eines anderen Bedienungswerkzeugs aufgegeben oder ein anderes Bedienungswerkzeug parallel zur realisierten Benutzeroberfläche eingesetzt werden.

Die graphische Benutzeroberfläche muß einem unterschiedlichen Anforderungsprofil gerecht werden, das durch verschiedene Benutzergruppen (Techniker, Operateure, Experimentatoren, Beschleunigerphysiker) und deren Anforderungen an die Nutzung einer Beschleunigeranlage begründet ist. Anpassungsfähigkeit ist somit eine entscheidende Forderung. Die graphische Benutzeroberfläche wird sowohl für die Steuerungs- als auch die Überwachungsaufgabe eingesetzt; beides ist gleichermaßen gut abzudecken.

Durch Beteiligung an Kontrollsystementwicklungen sowie an Kontrollsystemkonzeptionen anderer Beschleunigerlaboratorien [116][29] und den Erfahrungen mit dem alten Kontrollsystem [115], konnte ein Erfahrungsschatz zur Entwicklung einer Bedienungsfläche gesammelt werden¹, welcher Berücksichtigung findet.

Die grundlegenden Elemente der Bedienung sind graphische Objekte, die entweder einen statischen (z.B. Linien, Kreise, Rechtecke, Texte etc.) oder einen dynamischen (z.B. simulierte Potentiometer, Zeigerinstrumente sowie Schalter etc.) Charakter haben. Die graphischen Objekte mit dynamischem Charakter werden an Parameter der Kontrolle **gekoppelt** und können im laufenden Betrieb für den Zugriff auf ELSA-Komponenten oder die Werteanzeige benutzt werden. Analoge Größen werden z.B. über simulierte Potentiometer angesteuert; die Interaktionsgeschwindigkeit macht eine quasi-analoge Steuerung möglich. Die graphischen Objekte sind frei kombinierbar und werden zu Bedienungsfenstern (oder „Menüs“) zusammengestellt. Sie sind untereinander aufrufbar, so daß eine Bedienungsstruktur bzw. ein Menübaum erstellt werden kann. Die Bedienungsfenster werden so strukturiert, daß sie ein Endgerät, ein Subsystem oder einen Bereich von ELSA in natürlicher Weise zusammenfassen. Die Anordnung der statischen Graphikobjekte muß ihre Strukturierung betonen; die dynamischen Objekte sind an die entsprechenden Parametermengen angekoppelt.

¹Das Kontrollsystem des Injektorsynchrotrons am Speicherring SPEAR des SSRL-Instituts [116] an der Universität Stanford verwendet eine Bedienungsfläche, die eine Weiterentwicklung der Bedienungsfläche des alten ELSA-Kontrollsystems darstellt. Erfahrungen aus diesen beiden Entwicklungen sind hauptsächlich in die Bedienungsfläche des neuen ELSA-Kontrollsystems eingeflossen. Die Entwicklungsarbeiten für das neue Kontrollsystem umfassen erhebliche Erweiterungen des Funktionsumfangs dieser Systeme. Sie können als Fortentwicklung dieser Linie angesehen werden.

Das Erscheinungsbild von Bedienungsbildern wird in Menübeschreibungsdateien gespeichert („Metafiles“). Die Erfahrungen der Vergangenheit begründen zwei wesentliche Verallgemeinerungen:

1. Eine Referenz auf Kontrollsystemparameter erfolgt nur über den systemweit eindeutigen Parameternamen. Die wesentliche Bedeutung des vereinbarten, eindeutigen Namenraums für das Kontrollsystem wird hierdurch noch einmal unterstrichen.
2. Menübeschreibungsdateien werden in einem lesbaren Textformat abgelegt, so daß sie mit üblichen Textverarbeitungswerkzeugen bearbeitet werden können. Diese Text-Metafiles (MDF-Dateien) können nicht direkt ausgeführt werden, sondern müssen zuvor in eine äquivalente und ausführbare Binärdatei übersetzt werden.

In der Vergangenheit hat sich darüberhinaus eine Zweiteilung bei der Erstellung der Bedienungsfläche bewährt; dieser Weg wurde auch für das neue ELSA-Kontrollsystem eingeschlagen. Grundlage zur Entwicklung der Bedienungsfläche sind folgende Softwarewerkzeuge:

1. Die Erstellung der Bedienungsbilder wird mit Hilfe eines interaktiven graphischen Menüeditors `csmd` ausgeführt. Im Laufe der Entwicklung des ELSA-Kontrollsystems zeigte sich, daß dieser Menüeditor günstig durch einen Menügenerator `csngen` zu ergänzen war. Der Menügenerator `csngen` kann vor allem für die automatische Generierung von Bedienungsbildern eingesetzt werden, welche die rein technische Sichtweise von Geräten und deren Parametern oder auch frei zusammenstellbaren Parametergruppen zeigt. Alle Bedienungsbilder, welche die physikalische Sichtweise auf die Beschleunigeranlage für die Anwender anbieten, setzen weiterhin eine interaktive Erstellung durch Beschleunigerphysiker mit dem graphischen Menüeditor `csmd` voraus.

Die Erstellung von Bedienungsbildern mit Hilfe der Werkzeuge `csmd` und `csngen` erfolgt ohne eine Programmierung.

2. Zur Laufzeit des Kontrollsystems kann das Ablaufprogramm `csmenu` aktiviert werden. Es lädt die durch den Menüeditor `csmd` und den Menügenerator `csngen` erstellten Bedienungsbilder in seinen Arbeitsspeicher, interpretiert sie und bringt sie zur Darstellung. `csmenu` vermittelt alle Änderungen von Parameterwerten im Kontrollsystem, die auf Bedienungsbildern dargestellt sind. Damit `csmenu` an den Änderungen von Parameterwerten teilhaben kann, koppelt es sich in seiner Aktivierungsphase an das Kernsystem durch die Auswahl des **ereignisorientierten Warteschlangensmechanismus**. Das Kernsystem versorgt das Ablaufprogramm `csmenu` mit den notwendigen Ereignissen, welche Werteänderungen von Parametern signalisieren.

Diesen zweigeteilten „Standardweg“ wählen auch andere Beschleunigerlaboratorien der neueren Generation zur Erstellung ihrer Kontrollsystembedienungsflächen [67][51].

Für die Implementierung graphischer Werkzeuge zur Erzeugung der Bedienungsfläche fand das X-Window-System² [77] in Zusammenarbeit mit dem darauf aufbauenden OSF/Motif-System [79] Verwendung. Diese Kombination hat sich als Standard für die Verwendung in Beschleunigerkontrollsystemen [67][84] durchgesetzt. Die Farbgraphikworkstations der Kontrollebene unterstützen beide Systeme.

Das X-Window-System ist darauf optimiert, eine einheitliche Arbeitsoberfläche für vernetzte Graphik-Workstations zu schaffen³; es stellt dafür die notwendigen rechnerübergreifenden Infrastrukturen bereit. Applikationen können darauf aufbauen und diese Infrastrukturen für ihre eigenen Aufgaben einsetzen. Das X-Window-System bietet verschiedene Zugriffsmöglichkeiten auf die Graphikfähigkeiten der verwendeten Rechnerhardware⁴. Auf niedrigster Ebene können über Xlib-Aufrufe einfache Graphikoperationen (z.B. Linie oder Rechteck zeichnen) schnell ausgeführt werden. Eine Stufe darüber bieten X-Toolkit-Routinen komfortable Aufrufe an, welche in aller Regel mehrere Xlib-Grundoperationen in sinnvoller Weise kombinieren. Auf der nächsten Schicht ist das OSF/Motif-System angesiedelt, welches X-Toolkit- sowie Xlib-Funktionalität nutzt und wiederum zu komplexeren Operationen bündelt. Die entwickelte Software des ELSA-Kontrollsystems ist diesen drei Bestandteilen übergeordnet; sie werden unter der strikten Zielsetzung, einen möglichst hohen Gesamtdurchsatz zu erreichen, zur Realisierung der Bedienungsfläche der ELSA-Kontrolle eingesetzt.

²Dieses System wird auch mit der Kurzform X11 bezeichnet.

³Tatsächlich war gerade diese konkrete Aufgabenstellung der Auslöser zur Entwicklung des X-Window-Systems am Massachusetts Institut of Technology MIT [77].

⁴Die Farbgraphikworkstations der Kontrollebene, welche für die interaktive Bedienung eingesetzt werden, haben eine Auflösung von 1280x1024 Punkten und können 256 Farben gleichzeitig darstellen.

Die Xlib-Funktionalität wird zum Zeichnen der statischen und dynamischen Graphikobjekte benutzt. Besonders die graphische Aktualisierung dynamischer Bedienungselemente muß sich so zügig gestalten, daß die Scheinwirkung einer quasi-analogen Steuerung für einen Anwender gegeben ist. Die Ereignisverarbeitung von X-Window wird im wesentlichen durch Xlib-Funktionalität bereitgestellt.

X-Toolkit und OSF/Motif Funktionalität wird für die Programmierung einer allgemeinen Infrastruktur der graphischen Werkzeuge benutzt. Das Anlegen von Fenstern, die Farbverwaltung und die Dekoration von Fenstern fallen darunter. Für diverse Standardaufgaben einer Bedienungsfläche (z.B. die Bereitstellung einer Auswahlbox für eine Dateiselektion) stellt das OSF/Motif-System vorgefertigte Graphikobjekte bereit („Widgets“), deren Verwendung die Entwicklungsarbeit stark fördert. In aller Regel werden notwendige Verwaltungsstrukturen für die genannten Graphikobjekte nur einmal angelegt und sind dann wiederverwendbar. Der sich hieraus ergebende Aufbau der Graphiksoftware im Kontrollsystem verdeutlicht Abbildung 3.1.

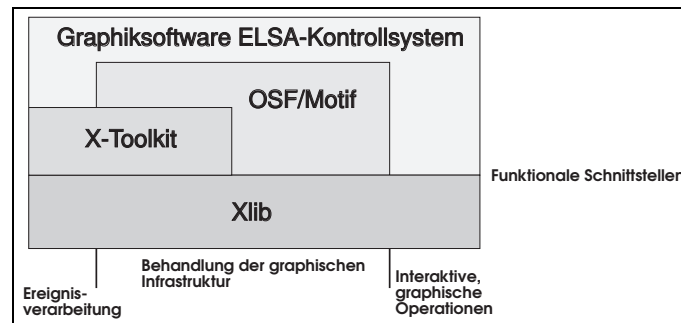


Abbildung 3.1: Aufbau der Graphiksoftware

3.2 Erstellung von Bedienungsbildern

Zur Erstellung von Bedienungsbildern wurden im Rahmen des Kontrollsystems die Werkzeuge `csmd` sowie `csmgcn` entwickelt, welche jeweils ein bestimmtes Anforderungsspektrum abdecken und sich dadurch ergänzen.

Graphischer Menüeditor

Der graphische Menüeditor `csmd` ist für die manuelle und interaktive Erstellung von neuen Bedienungsbildern oder die Modifikation existierender Menüs vorgesehen. Er stellt dafür Operationen für Auswahl, Positionierung und Zusammenstellung von graphischen Objekten bereit. Im Fall dynamischer Graphikobjekte unterstützt er die Ankopplung eines Kontrollparameters an ein solches Graphikobjekt (z.B. Potentiometer). Folgende Merkmale des Menüeditors `csmd` fördern die interaktive Menüentwicklung wesentlich.

Graphische Objekte können, einzeln oder in Gruppen zusammengefaßt, in Bibliotheken abgespeichert werden. Aus diesen Bibliotheken sind sie jederzeit abrufbar und in Menüs integrierbar. In der jetzigen Ausbaustufe werden an Bibliotheksobjekten z.B. Lagepläne, verschiedene Magnetsymbole für Dipole, Quadrupole und Sextupole, Hochfrequenzresonatoren vom DORIS- und PETRA-Typ, Vakuumrohre und anderes Bestandteile unterstützt. Die konsequente Verwendung dieser Objekte fördert ein einheitliches Erscheinungsbild der Bedienungsfläche. Der graphische Menüeditor gibt ein Eingabetextformat für Beschreibung und Definition von Bedienungsfenstern vor, welche auch zur Speicherung in den Metafiles (MDF-Dateien) verwendet wird. Die Überführung der Metafiles in ausführbare Binärmodule wird durch einen Benutzerbefehl im `csmd`-Programm erreicht. In das definierte Eingabetextformat lassen sich Graphikformate anderer Programme abbilden und auf dieser Basis in die Bedienungsfläche integrieren. Der Menüeditor unterstützt verschiedene Möglichkeiten zum Importieren externer Graphikformate. Darunter fällt z.B. das DXF-Format, das von den gängigsten kommerziellen Graphikprogrammen exportiert werden kann (z.B. AutoCad). Damit lassen sich z.B. für Dokumentationszwecke schon vorhandene technische Zeichnungen in die Kontrolle aufnehmen. Auf diese Weise finden sich die geographischen Lagepläne der Beschleunigeranlagen in der Bedienungsfläche wieder. Zusätzlich können X11-Bitmaps in den Menüeditor eingebunden werden, auf

deren Basis ein ikonenhaftes Erscheinungsbild der Bedienungsoberfläche aufbaubar ist (siehe den entsprechenden Abschnitt zur Ausgestaltung der Bedienungsoberfläche im Ergebnisteil der Arbeit). Auf der Basis von X11-Bitmaps sind auch digitalisierte Photographien für Dokumentationszwecke oder als Bedienungshilfe integrierbar. Die Unterstützung des Bitmap-Konzeptes durch `csmd` gestattet Zugriffsmöglichkeiten auf kommerziell vorhandene Bitmap-Bibliotheken, welche für fast jeden Darstellungszweck ein passendes Symbol enthalten. Außerdem lassen sich Spezialsymbole für die ELSA-Steuerung mit anderen Graphikprogrammen komfortabel erstellen. Bedienungsbilder des alten Kontrollsystems können über eine weitere Importmöglichkeit in die neue Bedienungsoberfläche einfließen.

Neben diesen Hilfsmitteln zur Förderung der Entwicklungsgeschwindigkeit und des -komforts unterstützt `csmd` die für ein Graphikprogramm üblichen Grundoperationen wie Löschen, Verschieben, Kopieren etc. von Graphikobjekten. Eine besondere Hilfe ist die Verfügbarkeit einer Positionierhilfe für graphische Objekte in Form eines Gitters verschiedener Feinheitsstufen, welche eine Rasterung der Arbeitsfläche von `csmd` einführt (Abb. 3.2). Zur Integration von Hilfsinformationen lassen sich Textdateien, die mit üblichen Texteditoren erstellt sind, in Menübilder aufnehmen. Die Arbeit von `csmd` an einer Bilderstellung für die Bedienung

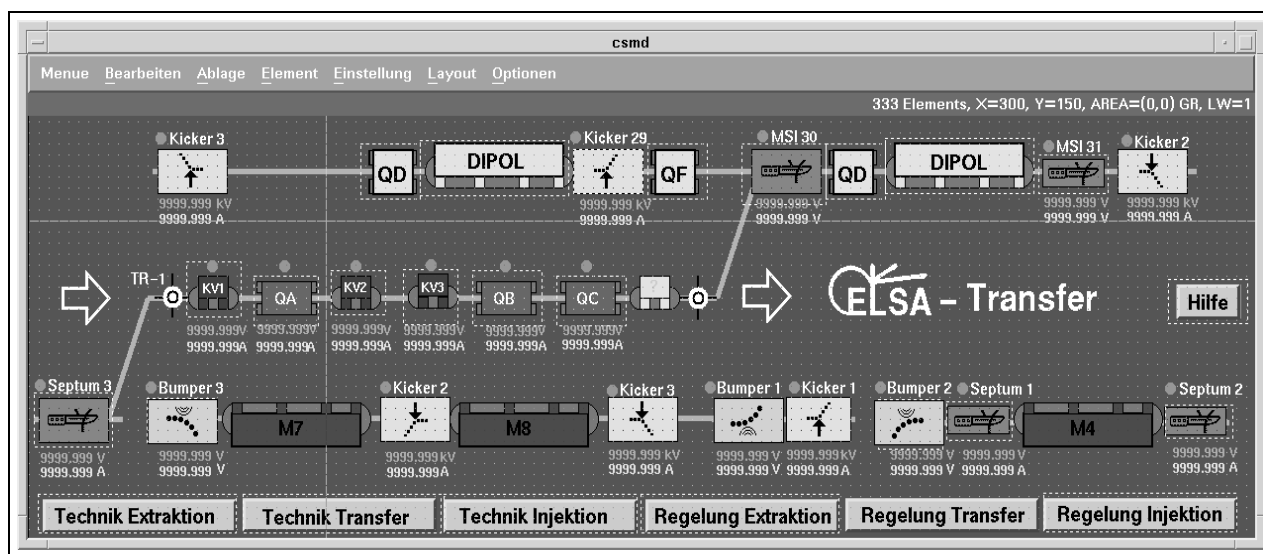


Abbildung 3.2: Erstellung eines Bedienungsbilds mit `csmd`

des Transferkanals zwischen dem 2.5 GeV-Synchrotron und ELSA zeigt Abbildung 3.2. Der Einsatz von Magnetsymbolen wird dabei deutlich. Die Abbildung 3.3 zeigt die erstellte Graphik im laufenden Betrieb. Die dargestellten Zahlenwerte in Abbildung 3.2 symbolisieren Parameterwerte des Kontrollsystems, welche zur Laufzeit des Kontrollsystems die aktuellen Parameterwerte anzeigen, wie es Abbildung 3.3 darstellt. Die interaktive Kopplung von Parameterwerten der Kontrolle an graphische Objekte der Bedienungsoberfläche erlaubt das `csmd`-Programm. Dazu wurden verschiedene graphische Ein- und Ausgabeformen entwickelt (z.B. Zahlen, Balkendiagramme, Polygonzüge etc.).

Menügenerator

Die umfangreiche Anzahl von Kontrollsystemparametern (mehrere Tausend) gestaltet die manuelle Erstellung von Menübildern, welche alle Parameter verfügbar machen, aufwendig und praktisch im Rahmen dieser Arbeit aus Zeitgründen nicht durchführbar. Ebenso kann nicht erwartet werden, daß eine durch mehrere Entwickler manuell erstellte Menge von Geräte- oder Subsystembildern ein einheitliches Aussehen haben. Selbst für einen einzigen Entwickler kann es oftmals mühsam sein, hunderte von Graphikobjekten in einem Menübild so aufeinander abzustimmen, daß ein einheitliches Aussehen entsteht, denn die Entwicklung von Bedienungsbildern besteht zu einem Teil aus immer wiederkehrenden Schritten. Die Erstellung eines optisch ansprechenden Potentiometers für die quasi-analoge Steuerung erfordert z.B. die Zusammenstellung von mehreren graphischen Grundelementen zu einer Gruppe. Alle diese Erstellungsarbeiten von Bedienungsbildern sind bis zu einem gewissen Grad automatisierbar und haben im Lauf der Entwicklung des Kontrollsystems zu der Entscheidung geführt, einen Menügenerator `csngen` zu implementieren.

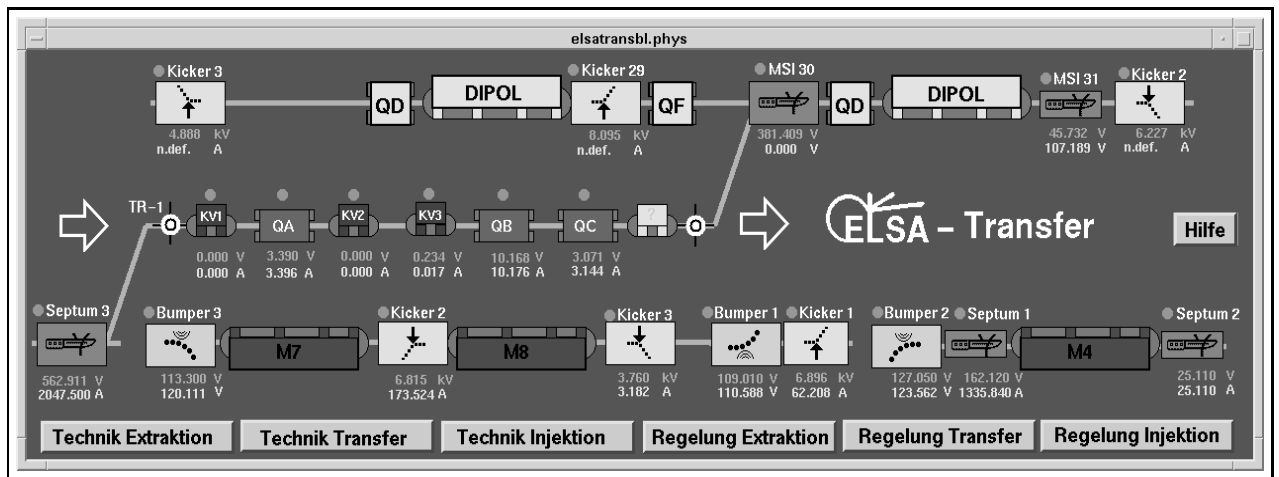


Abbildung 3.3: Bedienungsbild des Transferkanals zwischen Synchrotron und ELSA im laufenden Betrieb

Ausgehend von einer Menge von Kontrollparametern – sie ist entweder frei zusammenstellbar oder stellt die Parametermenge eines Gerätes dar – erzeugt der Menügenerator ein technisches Standardbedienungs bild, wie es z.B. Abbildung 3.4 zeigt. Alle generierten Elemente eines Menüs sind nach einer festgelegten Ordnung

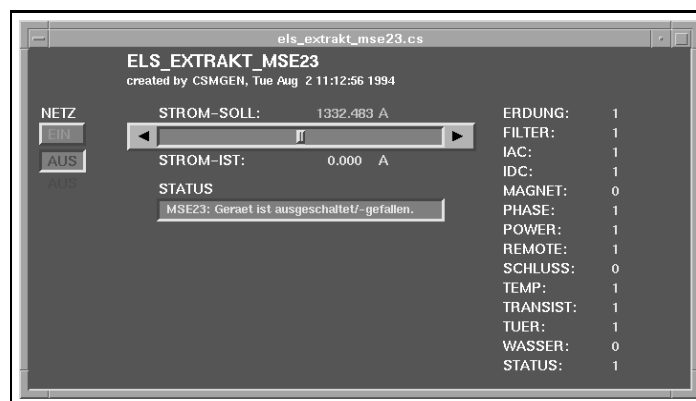


Abbildung 3.4: Gerätebedienungs Menü (durch csmgen automatisch erzeugt)

(Sollwerte werden z.B. blau und Istwerte gelb dargestellt) positioniert, wobei eine einheitliche Farbgebung sowie aufeinander abgestimmte Größe und Aussehen (z.B. für Potentiometer wichtig) eingehalten werden. Die Größe eines generierten Menüs richtet sich nach der Parametermenge, welche dargestellt wird; csmgen nimmt selbsttätig eine Anpassung vor. Für Schaltknöpfe, die Eingabemöglichkeiten digitaler Parameter, und für Potentiometer, die Eingabemöglichkeiten analoger Parameter darstellen, werden Soll- und Istwerte identifiziert. Im Fall der Schaltknöpfe wird ein Schalterpaar erzeugt, im Fall des Potentiometers ist der Sollwert einstellbar und der Istwert als Zahlenwert dazugeordnet. Statustexte werden in einer eigenen Leiste angezeigt. Die Zuordnung von Soll- zu Istwerten ermöglicht die einheitliche Namensgebung des Kontrollsystems für Parameter (Abschnitt 2.2.2). Das Aussehen bestimmter graphischer Elemente legen heuristische Regeln fest, welche sich an die Benennung entsprechender Parameter anlehnen. Ein weiteres hilfreiches Merkmal des csmgen-Programms ist die Möglichkeit, einen kompletten Menübaum, bzwäuch Teilbaum aller Geräte und damit verbundener Kontrollsystemparameter auf Basis der Parameternamenskonvention zu generieren. Dabei wird die Strukturierung eines Parameternamens dazu benutzt, eine entsprechende Strukturierung des generierten Menübaums herbeizuführen. Einen auf dieser Basis mit dem csmgen-Programm erzeugten Menübaum zeigt Abbildung 3.5. Dieser stellt eine selbsttätig erstellte Kette von Bedienungs bildern bis zum Endgerät dar. Der Menügenerator erzeugt sowohl Binärdaten kompletter Menüs als auch MDF-Dateien, welche dann vom csmd-Programm geladen werden können und dort für eine Weiterbehandlung bereitstehen. Dadurch ergänzen sich beide Programme für die Entwicklung.

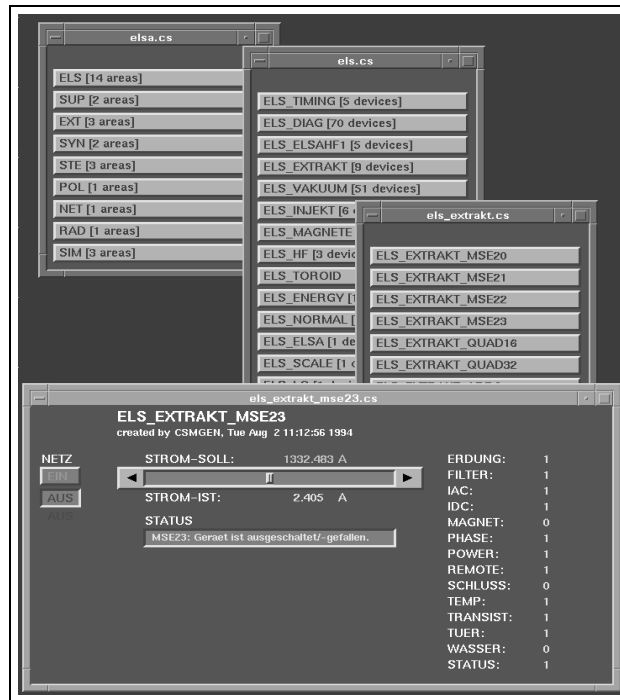


Abbildung 3.5: Menübaum mit Bereichen und einem Endgerät (automatisch erzeugt durch csmgen)

3.3 Bedienungssystem

Für den laufenden Kontrollsystembetrieb wurde das Programm `csmenu` entwickelt, welches die von `csmcmd` und `csmgen` erzeugten Bedienungsbilder einlädt, interpretiert und zur Darstellung bringt. Das `csmenu`-Programm koppelt sich über den ereignisorientierten Warteschlangensmechanismus an das verteilte Kontrollsystem an. Die dynamischen Elemente, welche eine Bindung an Kontrollparameter enthalten, werden für die ereignisorientierte Transaktionsform an das Kontrollsystem angebunden. Im Fall von Werteänderungen der Parameter, welche auf Fenstern des Menüprogramms dargestellt sind, wird `csmenu` vom verteilten Kernsystem durch ein Ereignis benachrichtigt und kann entsprechende Graphikmanipulationen von Objekten bewirken, welche an diese Parameter gekoppelt sind.

Nach Aktivierung akzeptiert das Programm Benutzereingaben über eine Maus oder die Tastatur. Mit angebotenen Potentiometern kann ein Operateur die quasi-analoge Steuerung ausführen, indem er den Zeiger in das Potentiometerelement führt und durch einen Mausklick die Eingabe aktiviert. Die Bewegung der Maus wird dann in Werteänderungen des entsprechenden Parameters umgesetzt. Die Ansteuerung eines Analogparameters ist auch über die Tastatur (Pfeiltasten) möglich. Durch „Drücken“ eines simulierten Knopfes läßt sich ein Schaltvorgang auslösen.

Eine aktive Handlung des `csmenu`-Programms wird nur durch einen Anwender oder das Kontrollsystem selbst – zum weitaus überwiegenen Teil durch die autonome Istwerterfassung in der Prozeß- und Feldebene – eingeleitet. Die autonome Istwerterfassung sorgt dafür, daß sich die Bedienungsfläche als **Spiegelbild** des Beschleunigerzustandes zeigt. Das Ablaufprogramm `csmenu` übernimmt damit eine wesentliche Hilfestellung für die Ausführung der Kontrollfunktion der Beschleunigeranlage durch das Betriebspersonal. Für alle Setz- und Leseoperationen im Rahmen dynamischer Objekte werden die entsprechenden Transaktionsformen des Kontrollsystems verwendet (siehe Abschnitt 2.6). Die interaktive Manipulation von dynamischen Graphikobjekten wird auf Lese- und Schreibtransaktionen des Kontrollsystems abgebildet.

Von einem Bedienungsfenster können weitere Bedienungsfenster über ein graphisches Eingabelement aktiviert werden. Die Bedienungsfenster sind untereinander gleichberechtigt. Abbildung 3.6 zeigt eine typische Konfiguration der Bedienungsfläche im laufenden Betrieb. Die Konfiguration besteht aus mehreren Bedienungsbildern, die in einzelne Fenster eingeordnet sind. Das grundsätzliche Erscheinungsbild der Fenster (Fensterrand, Beschriftung und Schaltsymbole im oberen Fensterrand) und deren Handhabung (z.B. Schließen eines Fensters) wird durch das OSF/Motif-System bestimmt (präziser durch den verwendeten

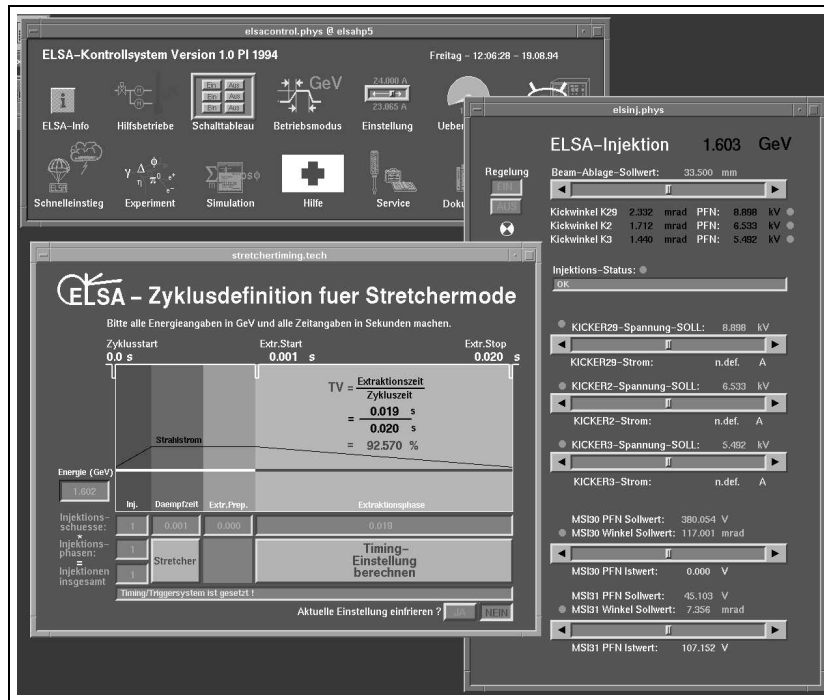


Abbildung 3.6: Aussehen der Bedienungsfläche im laufenden Betrieb

„Motif-Window-Manager“). Der Inhalt der Bedienungsfenster liegt in der Verantwortung des `cmenu`-Programms. Nach Verlassen von `cmenu` wird der Zustand einer Arbeitskonfiguration individuell für jeden Anwender und jeden Kontrollrechner abgespeichert; so wird eine „persönliche“ Einstellung bewahrt, bzw. der „letzte“ Zustand der Bedienungseinstellung gesichert.

Die Bedienungsbilder lassen sich entweder gegenseitig aufrufen oder können in einer Auswahlbox, wie sie Abbildung 3.7 darstellt, durch einen Mausklick auf den Fensterhintergrund aktiviert werden. Die Auswahlbox zeigt in der Grundeinstellung alle aktiven Bedienungsfenster in einer Liste an. Die Liste kann erweitert werden, so daß insgesamt alle verfügbaren Bedienungsfenster erscheinen. Ein Bedienungsfenster aus der

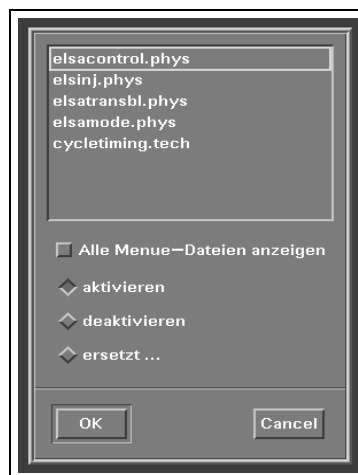


Abbildung 3.7: Bedienungsfenster Auswahlbox

Liste ist jetzt entweder aktivierbar oder seine Darstellung kann beendet werden (`deaktivieren`). Im Rahmen der Auswahlbox kann ein Bedienungsfenster durch ein anderes ersetzt werden (Feld `ersetzt...`). Die Ersetzung eines Bedienungsfensters ist auch unmittelbar bei Aktivierung eines anderen Bedienungsfensters durch einen ausgezeichneten Mausknopf möglich. Auf diese Weise kann ein Anwender dafür sorgen, daß nur die

Menge an Fenstern aktiv ist, welche für die momentane Einstellung gebraucht wird; eine Überhäufung des Bedienungsbildschirms mit nebeneinanderliegenden, sich verdeckenden Fenstern kann vermieden werden.

Die Wahl einer Standarddarstellung der für einen Anwender wichtigsten Eingabeelemente Potentiometer und Schalter, wurden nach einer Reihe von Versuchen und daraus resultierenden Erfahrungen auf die Erscheinungsform in Abb.3.8 festgelegt⁵. Dabei wurde in der graphischen Gestaltung darauf geachtet, daß sie ihre

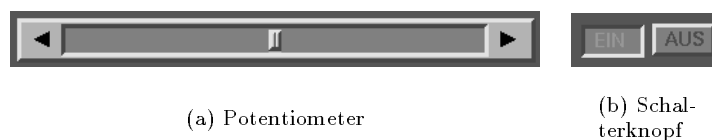


Abbildung 3.8: Die wichtigsten Eingabeelemente des csmenu-Programms

Verwendungsweise intuitiv klarmachen. Das Potentiometer erfüllt zwei Funktionen:

1. Die quasi-analoge Eingabe ermöglicht der Potentiometerschieber, indem sein Schiebeknopf über eine Interaktion des Anwenders nach links oder rechts bewegt wird. Die quasi-analoge Eingabe ist auch über die Pfeiltasten der Tastatur ausführbar; hiermit wird eine schrittweise Veränderung von Werten erreicht. Die Ansteuerung über Tastatur ist immer dann sinnvoll, wenn die Bauweise des angesteuerten Endgerätes nur eine langsame Ansteuerung erlaubt. Für die auf Geschwindigkeit ausgelegte Bewegung des Schiebers werden Funktionen des X-Window-Systems zum Löschen, Verschieben und Kopieren des graphischen Elements ausgenutzt. Sie werden fast ausschließlich durch die Graphikhardware abgearbeitet.
2. Eine „quantisierte“ Eingabe in der minimalen Auflösung des Endgerätes kann durch die „Ticker“ links (Dekrement-Ticker) und rechts (Inkrement-Ticker) neben dem Potentiometer-Schieber erreicht werden. Durch einmalige Betätigung der „Ticker“ kann ein Operateur sicher sein, daß sich der Sollwert nur um einen **Auflösungsschritt** verändert. Die Feineinstellung sensitiver Parameter soll damit erleichtert werden.

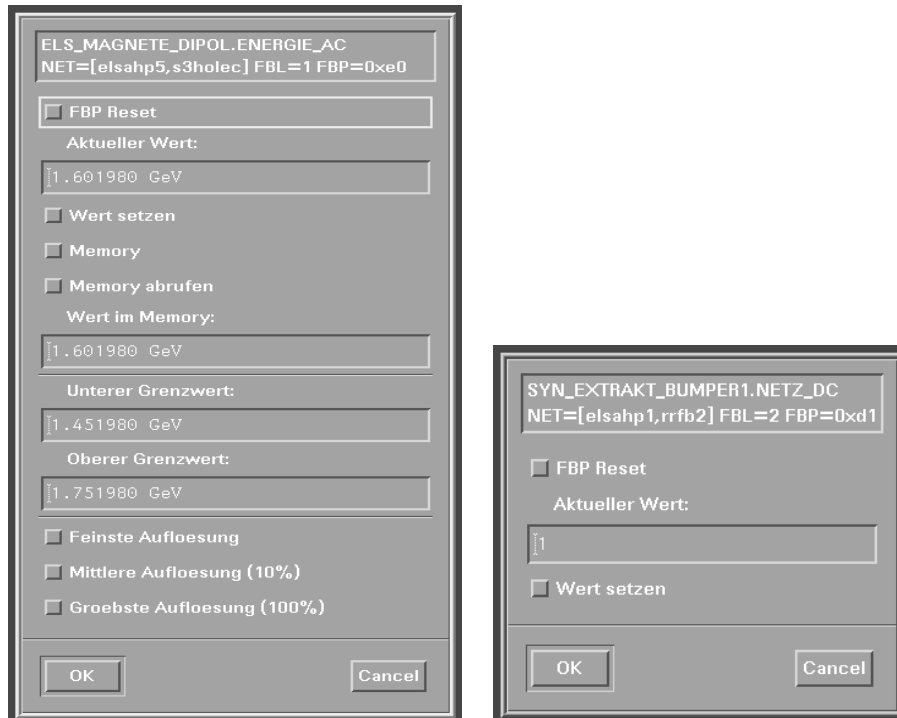
Das Aussehen des Potentiometers läßt sich in vielfältiger Weise verändern, da der zentrale Teil (der Potentiometerschieber) ein wahlfreies, graphisches Element sein kann⁶. Ein Schalterknopf hat ein dreidimensionales Aussehen und ist als gedrückter Schalter für einen Anwender erkennbar.

Die beiden wichtigsten Eingabeelemente sind mit Sekundärinformationen versehen, welche zum Teil durch das csmenu-Programm im Betrieb abgeändert werden können. Durch Fahren des Mauszeigers auf das Element und Betätigen der rechten Maustaste werden die Darstellungsboxen in Abbildung 3.9 aufgeblendet. Im oberen Teil der Darstellungsboxen wird für Informationszwecke der Parameternamen in Klartext und seine Erreichbarkeit im Kontrollsystem angezeigt. Das Feld **FBP Reset** erlaubt die Rücksetzung des Feldbusprozessors, der diesen Parameter unterstützt⁷. Diese Funktion ist für den praktischen Betrieb eine wichtige Unterstützung. Für Parameter, die nicht durch einen Feldbusprozessor unterstützt werden, wird dieses Feld nicht dargestellt. Der aktuelle Parameterwert wird in einem eigenen Feld angezeigt und kann darin modifiziert werden. Durch das Feld **Wert setzen** wird eine Schreibtransaktion im Kontrollsystem ausgelöst und der Parameter gesetzt. Die Sekundärinformationen für einen Schalterparameter sind damit aufgeführt, für das Potentiometer existieren weitere Einstellmöglichkeiten. Eine untere und obere Wertschranke kann für ein Potentiometer interaktiv angegeben und damit die aktuelle Auflösung definiert werden. Der Einfachheit wegen sind bereits drei Voreinstellungen für die Auflösung des Parameters durch das csmenu-Programm konfiguriert; sie lassen sich durch eine Anwahl des entsprechenden Feldes aktivieren. Die **feinste Auflösung** erlaubt jeweils fünf Schritte mit kleinster Auflösung symmetrisch zum eingestellten Wert. Die **mittlere Auflösung** definiert ein Werteintervall von 10 % um den aktuellen Parameterwert. Die **maximale Auflösung** erlaubt die

⁵Das Standardpotentiometer und der Standardschalter sind aus mehreren Graphikelementen aufgebaut. Sie können variabel groß sein und entweder mit dem csmd- oder mit dem csmgen-Programm erstellt werden.

⁶In der gegenwärtigen Ausbaustufe können Dreiecke in verschiedenen Orientierungen, Linien und der im Standardpotentiometer verwendete Knopf als Schieber ausgewählt werden.

⁷Diese Funktion wurde im Rahmen der Entwicklung des Feldbuscontrollers (Abschnitt 2.3.5) entwickelt und wird über das Kommunikationssystem der Kontrolle transportiert.



(a) Analog-Parameter

(b) Schalter-Parameter

Abbildung 3.9: Darstellungsboxen zur Einstellung von Sekundärinformationen

Steuerung des Wertes über seinen gesamten Wertebereich. Der aktuelle Parameterwert läßt sich in einen Speicher (**Memory**) übernehmen bzw. ein Parameterwert im Speicher kann abgerufen werden (**Memory abrufen**). Das Feld **Wert im Memory** zeigt den aktuellen Parameterwert des Speichers an. Eine Vorbelegung des Speicherfeldes wird vom `csmenu`-Programm in der Startphase mit den zu diesem Zeitpunkt aktuellen Parameterwerten ausgeführt. Die Verwendung des **Memory**-Feldes soll die Fehlertoleranz im Rahmen der interaktiven Bedienung durch Operateure verbessern, da sich der Ausgangszustand nach einer Manipulation wieder herstellen läßt.

Komplette Maschineneinstellungen können über das Bedienungssystem gespeichert, geladen und archiviert werden. Dazu wurde ein Datenbankprogramm `cspvsdb` entwickelt, das im laufenden Betrieb, wie in Abbildung 3.10 dargestellt, im Rahmen des Bedienungssystems erscheint. Aus einer Liste von Maschinendatensätzen (**SaveSets**) kann ein Datensatz ausgewählt werden. Der Name dieses Datensatzes erscheint dann im Feld **Selection**. Entsprechend der Namenskonvention für das Kontrollsystem lassen sich Bereiche durch einen Knopf auswählen. Es lassen sich ebenfalls alle **Bereiche** auswählen. In aller Regel werden nur **Analoge Sollwertvorgaben** aktiviert, für bestimmte Zwecke können alle Parameter ausgewählt werden, wobei **Schaltwert-Vorgaben** explizit unterdrückbar⁸ sind. Durch Aktivierung eines **Zusatzprotokolls** kann die Operation von `cspvsdb` überwacht werden. `cspvsdb` speichert einen Datensatz, wie oben ausgeführt, in einer Textdatei, welche sich mit Textverarbeitungswerkzeugen weiterverarbeiten und analysieren läßt. Die Verarbeitungsgeschwindigkeit des Kontrollsystems stellt sicher, daß Laden sowie Speichern einer kompletten Maschineneinstellung in wenigen Sekunden ausführbar ist. Das Werkzeug `cspvsdb` nutzt diese Eigenschaft und hat sich als wertvolles Hilfsmittel für die Einstellung der Beschleunigeranlage erwiesen.

Zur Anzeige eines Datensatzinhaltes wurde das Programm `cspvsbrowse` entwickelt. Ein Datensatz läßt sich selektieren; sein Inhalt wird in einem Fenster dargestellt. Suchoperationen nach Parametern oder Blättern in der Datensatzdatei werden ebenfalls unterstützt.

⁸Die Sicherheitsmaßnahme verhindert, daß nicht alle Geräte der Beschleunigeranlage ein- oder ausgeschaltet werden.

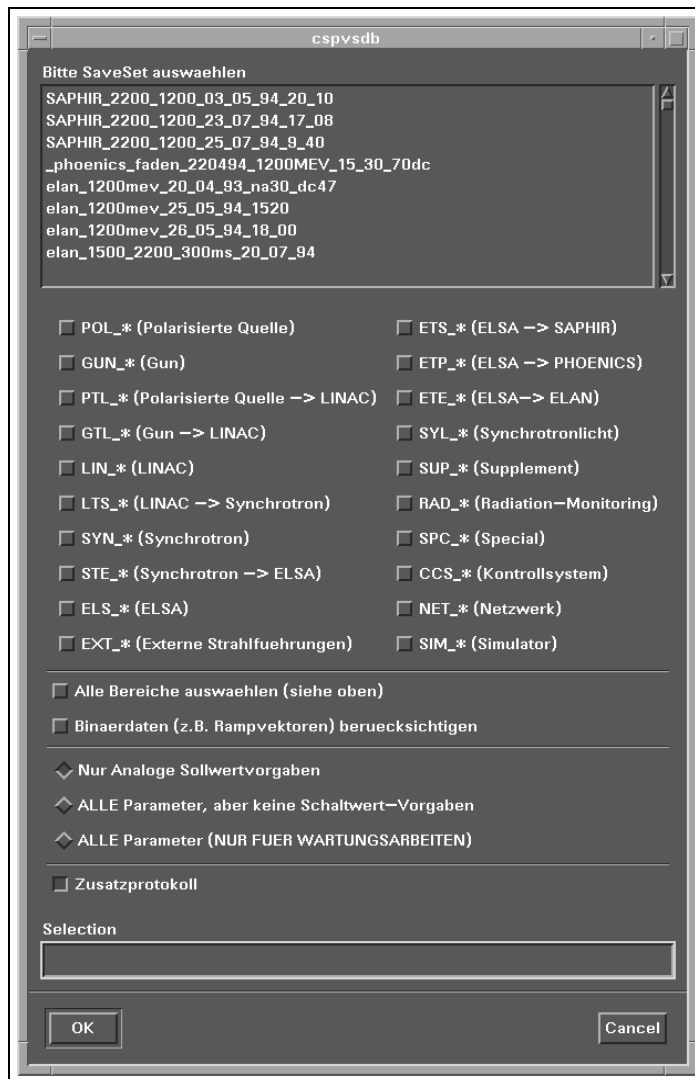


Abbildung 3.10: Das Datenbankprogramm zum Speichern und Laden von ELSA-Maschinenzuständen

In diesem Kapitel wurden die Softwarewerkzeuge zur Erstellung von Bedienungsbildern und das Ablaufprogramm zur Interpretation von erstellten Bedienungsbildern vorgestellt. Das konkrete Aussehen und die Ausgestaltung der Bedienungsoberfläche sowie darin eingeflossener Ideen und Überlegungen werden im Ergebnisteil der Arbeit im Kapitel 6 beschrieben, da sie zum Teil erst nach der Inbetriebnahme des Kontrollsystems festgelegt wurden.

4. Zeitablaufsteuerung im Nachbeschleunigungsmodus

Das Kapitel beschreibt die Zeitablaufsteuerung des ELSA-Nachbeschleunigungszyklus¹ sowie die Integration aller Hardware- und Softwarebestandteile in das ELSA-Kontrollsystem. Dazu werden ausgehend von einer allgemeinen Definition des ELSA-Maschinenzyklus das System zur Zykluszeitsteuerung (Zyklustimingsystem) und das von der ELSA-Hochfrequenz abgeleitete System zur Injektionszeitsteuerung (Injektionstimmingsystem) beschrieben. Zur Integration der Strahldiagnose in das Kontrollsystem stellt die Zeitablaufsteuerung einen Diagnostetriggergenerator bereit. Die Zeitablaufsteuerung ist in allen Komponenten durch das Kontrollsystem einstellbar, so daß auch für zukünftige Aufgaben Anpassungsmöglichkeiten bestehen. Berechnungen zur Einstellung der Zeitablaufsteuerung werden von verschiedenen Regelexperten ausgeführt.

4.1 Definition des ELSA-Maschinenzyklus

Im alten Kontrollsystem wurden Elemente der Beschleunigeranlage mit zwei gekoppelten Triggersignalen versorgt [115]. Das Synchrotrontriggersignal, der S-Trigger, wurde direkt aus dem B_{min} -Signal² des Synchrotrons abgeleitet. Das ELSA-Triggersignal, der E-Trigger, konnte relativ dazu im Verhältnis n Pulse zu m Pausen untersetzt und variabel verzögert werden. Entsprechend dem netzsynchronen Synchrotronbetrieb hat der S-Trigger eine Wiederholrate von 50 Hz, der E-Trigger ist durch die Puls-Pausen-Wahl auf dem Zeitraster des Synchrotrons ein- und ausschaltbar und wurde hauptsächlich zur Aktivierung der ELSA-Injektionselemente eingesetzt. Die Verzögerungszeit t_b zwischen S- und E-Trigger betrug ca. 10 ms und entsprach der Beschleunigungszeit des Synchrotrons. Abbildung 4.1 zeigt die Situation an einem Beispiel aus 3 Pulsen zu 4 Pausen. S- und E-Trigger wurden den Subsystemen mit unterschiedlichen Verzögerungen zugeführt.

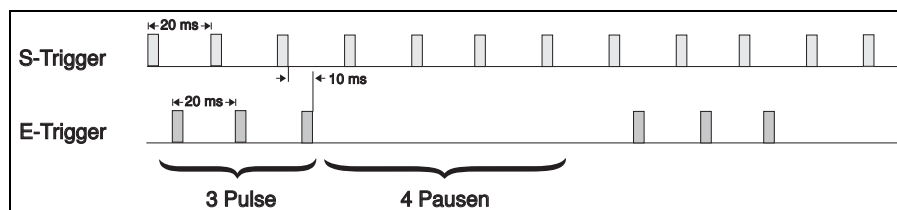


Abbildung 4.1: S-Trigger und E-Trigger im alten Kontrollsystem

Im 50 Hz-Stretchermodus schließt sich an eine Injektion unmittelbar (ca. 300 μ s nach Injektionsende [75]) die Extraktion an. Injektion und Extraktion sind aneinander gekoppelt und, durch Verwendung des E-Triggers zur Aktivierung der Extraktionselemente (besonders der Extraktionsquadrupole [28]), mit dem alten System nicht zu trennen. Im Nachbeschleunigungsmodus sind mehrere Injektionen notwendig, um eine genügend hohe Ausgangsintensität für eine lange Extraktionsperiode zur Erreichung eines akzeptablen makroskopischen Tastverhältnis sicherzustellen (Abschnitt 1.3.3). An die Injektion schließen sich eine Rampphase von der Injektionsenergie auf die Extraktionsenergie sowie die Extraktion an. Jede Injektion hätte im alten System gleichzeitig Rampphase und Extraktion eingeleitet, da für Haupt- und Extraktionsmagnete jeweils nur der E-Trigger zur Verfügung stand. Die selektive, von der Injektion unabhängige, Ansteuerung und Aktivierung von Subsystemen (z.B. Extraktionselemente erst zum Startzeitpunkt der Extraktion) im Rahmen eines Nachbeschleunigungszyklus war auf der Basis vorhandener Triggersignale mit vertretbarem Aufwand nicht zu realisieren³. Die Triggergenerierung im alten Kontrollsystem war nur rudimentär ausgebildet und ausschließlich für den 50 Hz-Stretchermodus geeignet.

¹Für dieses System wird ebenfalls der im angelsächsischen Sprachgebrauch übliche Begriff des Timing- und Triggersystems verwendet.

²Das B_{min} -Signal wird von einem „Peaking-Strip-Monitor“ nahe dem Nulldurchgang des Synchrotronmagnetfeldes erzeugt.

³Eine Analyse der Software der Feldbusprozessoren, welche die Ansteuerung der ELSA-Hauptmagnete in der Rampphase übernehmen, deckte eine besondere Eigenschaft auf. Erhielten die Feldbusprozessoren einen 50 Hz-Trigger, so wurde die Steuerkurvenausgabe mit jedem Trigger wieder auf den Ausgangszustand zurückgesetzt. Erst der letzte Trigger einer Kette

Für die neue Zeitablaufsteuerung wurde eine ELSA-Maschinenzyklusdefinition vorgenommen, welche alle Betriebsmodi unterstützt und keinen Unterschied zwischen 50 Hz-Stretcherbetrieb und Nachbeschleunigungsbetrieb macht. Die **Separation des Maschinenzyklus in mehrere, voneinander unabhängige und abgetrennte Teilphasen** gestattet die Einstellung bisher unmöglicher Betriebsarten und erweitert somit das Verwendungsspektrum von ELSA. In Abschnitt 1.3.3 wurde bereits ein vereinfachtes Schema des Nachbeschleunigungsmodus zur Erklärung der Tastverhältnisproblematik eingeführt; dieses Schema diente der Verdeutlichung und wird in diesem Abschnitt präzisiert. Ein ELSA-Maschinenzyklus zerfällt in sechs Teilphasen (Abb. 4.2):

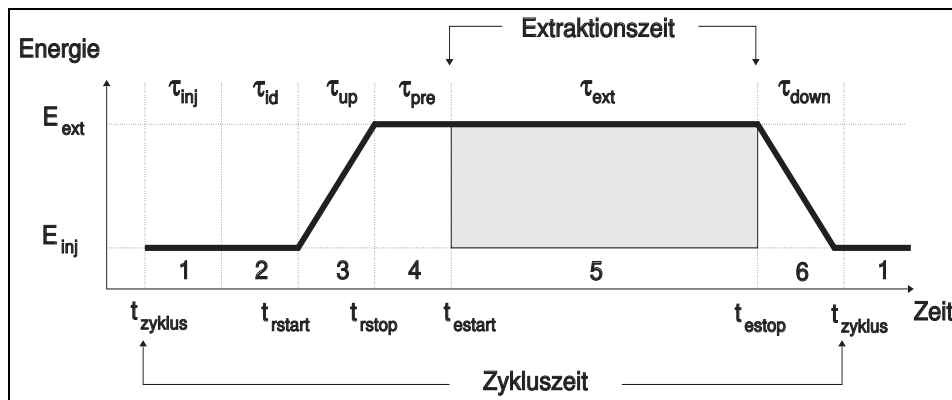


Abbildung 4.2: Der ELSA-Maschinenzyklus

1. **Injektionsphase:** In der Injektionsphase wird ELSA durch einen oder mehrere Schuß/Schüsse des Synchrotrons im zeitlichen Abstand von 20 ms gefüllt. Im 50 Hz-Stretchermodus dauert die Injektionsphase ca. 300 μ s [75]. Ansonsten benötigt sie im Fall n -facher Injektion mindestens $(n - 1) \cdot 20$ ms. Innerhalb der Injektionsphase kann die Korrektur der ELSA-Füllstruktur durchgeführt werden.
2. **Injektionsdämpfungsphase:** Diese Phase wird eingeschoben, damit sowohl transversale als auch longitudinale Teilchenschwingungen im injizierten Teilchenstrahl abdämpfen können, bevor die Nachbeschleunigungsphase einsetzt. Für ELSA können Dämpfungszeiten der transversalen Teilchenschwingung $\tau_{x,z}$ und der longitudinalen Teilchenschwingung τ_s , gemäß den Beziehungen in 4.10 für typische Injektionsenergien E_0

$$\tau_x \approx \tau_z \approx 2 \frac{E_0 T_0}{U_0}, \quad \tau_s \approx \frac{E_0 T_0}{U_0} \quad (4.10)$$

abgeschätzt werden [91]. Dabei bedeutet T_0 die Umlaufzeit in ELSA und $U_0 = C_\gamma \frac{E_0^4}{\rho}$ die mittlere abgestrahlte Energie pro Umlauf eines Elektrons, mit ρ dem Biegeradius der Dipolmagnete und der Konstanten $C_\gamma = 8.85 \cdot 10^{-5} \frac{m}{GeV^3}$. Es ergibt sich daraus Tabelle 4.1. Die Dämpfungszeiten liegen im

Injektionsenergie	$\tau_{x,z}$	τ_s
1.0 GeV	134 ms	67 ms
1.2 GeV	78 ms	39 ms
1.6 GeV	34 ms	17 ms

Tabelle 4.1: Dämpfungszeiten der Teilchenschwingung in transversaler und longitudinaler Bewegungsrichtung

Bereich von mehreren 10 ms bis ca. 130 ms; im Betrieb wird die Länge der Dämpfungsphase in der Größenordnung dieses Zeitintervalls eingestellt. Neben der Dämpfung der Teilchenschwingung wird

startete die eigentliche Steuerkurvenausgabe und erfuhr dadurch eine spezielle Markierung unter allen vorangegangenen Triggern. Diese Eigenschaft wurde ausgenutzt, die Rampphase startete unmittelbar nach dem letzten Injektionstrigger und erste Experimente mit einem vereinfachten Nachbeschleunigungsmodus konnten im Rahmen des alten Kontrollsystems mit Softwaremodulen des neuen Kontrollsystems, integriert in EPOS, ausgeführt werden. Ein reproduzierbarer Betrieb der schnellen Extraktionsquadrupole für die langsame Resonanzextraktion ließ sich im Nachbeschleunigungsmodus nicht einstellen.

auch eine gute „Durchmischung“ der Teilchen im Phasenraum durch Diffusion erzielt und reproduzierbare Anfangsbedingungen für die anschließende Nachbeschleunigung ermöglicht, da die entstandene Phasenraumverteilung weitgehend unabhängig von der injizierten Phasenraumverteilung ist.

3. **Nachbeschleunigungsphase von Injektions– auf Extraktionsenergie:** Die Länge dieser Phase ist nach unten limitiert durch den Betrag der maximalen Änderungsgeschwindigkeit der Ströme $\frac{dI}{dt}$ in den ELSA–Hauptmagneten, welche durch die versorgenden Netzgeräte gegeben ist. Die Sollenergie der Teilchen wird durch Vergrößerung des Dipolfeldes angehoben. Die Sollenergieerhöhung ändert die Phasenlage des synchronen Teilchens, definiert über $U_0 = U_c \sin \psi_s$. Dabei bezeichnet U_c die Spitzenspannung der Beschleunigungsstrecke und ψ_s die Sollphase bzgl. des beschleunigenden Hochfrequenzfeldes in der Beschleunigungsstrecke. Die Synchrotronschwingung sorgt über viele Umläufe dafür, daß die Energie realer Teilchen der Magnetfeldänderung folgt. Die Fokussierungsstärke der Quadrupolfamilien muß entsprechend der Dipolfeldänderung angepaßt werden, damit die Teilchen auch transversal stabil bleiben.

Übersteigt die Rampgeschwindigkeit einen Wert von $1.0 \frac{GeV}{s}$, muß aus technischen Gründen ein Zusatznetzgerät in der Stromversorgung der ELSA–Dipolmagnete durch ein Freigabesignal mindestens 5 ms vor dem Rampstart aktiviert werden (Abschnitt 1.3.3). Das Zyklustimingsystem stellt dafür einen Pulsgenerator bereit.

4. **Extraktionsvorbereitungsphase:** In der Extraktionsvorbereitungsphase wird die Maschineneinstellung vom Zustand der Nachbeschleunigungsphase in den Zustand der Extraktionsphase geändert. Abhängig vom gewählten Extraktionsverfahren werden die Magnetoptik und die Hochfrequenzansteuerung gewählt. Die Länge der Extraktionsvorbereitung wird hauptsächlich bestimmt durch die maximale Stromänderungsgeschwindigkeit $\frac{dI}{dt}$ des Extraktionssextupolnetzgerätes.
5. **Extraktionsphase:** Abhängig von der gewählten Extraktionsmethode werden die Extraktionselemente zeitlich variabel angesteuert. Hauptpunkte dabei sind sowohl die Sicherstellung eines maximalen mikroskopischen Tastverhältnisses für die Mittelenergieexperimente als auch die Maximierung der Extraktionszeit, damit ein möglichst großes makroskopisches Tastverhältnis erzielt wird.
6. **Rampphase von Extraktions– auf Injektionsenergie:** Die Länge dieser Phase richtet sich nach der maximalen Stromänderungsgeschwindigkeit $\frac{dI}{dt}$ in den Netzgeräten der ELSA–Hauptmagnete. Diese Phase wird vom Kontrollsystem als Vorbereitung für die kommende Injektionsphase genutzt. Einige Extraktionselemente im Synchrotron sind auf einen 50 Hz–Betrieb optimiert, werden aber zum Teil (Extraktionsbumper und –septummagnete) deaktiviert, wenn kein Strahltransfer vom Synchrotron nach ELSA stattfindet. Die Ladekreise der pulsformenden Netzwerke werden in diesen Perioden nicht getriggert und deren Istspannung sinkt langsam ab. Die Sollspannung der pulsformenden Netzwerke wird erst nach ca. fünf– bis zehnmalem Pulsen in der Injektionsphase erreicht. Diese Schüsse gehen der eigentlichen Injektionsphase verloren, da sie nicht im horizontalen Akzeptanzbereich von ELSA liegen⁴. Um die Ladekreise der pulsformenden Netzwerke vor der nächsten Injektion wieder auf Sollspannung zu bringen, werden die Extraktionselemente in der Rampphase von Extraktionsenergie auf Injektionsenergie mehrmals vorgepulst. Dafür wurde ein Pulsgenerator zur Verfügung gestellt.

Die drei Hauptbetriebsmodi von ELSA sind mit dem vorgestellten Schema des Maschinenzyklus einstellbar:

1. Der 50 Hz–Stretcherbetrieb arbeitet mit der Injektionsphase, woran sich dann unmittelbar die Extraktionsphase anschließt.
2. Der Nachbeschleunigungsmodus ist aus allen Teilphasen zusammengesetzt.
3. Der Speicherbetrieb besteht aus der Injektionsphase und der anschließenden Nachbeschleunigung. Nach Erreichen der Endenergie wird dieser Zustand so lange gehalten, bis der Strom in ELSA unter eine bestimmte Schwelle sinkt. Danach wird auf Injektionsenergie zurückgefahren.

Mit dem vorgestellten Maschinenzyklus sind Erweiterungen der genannten Betriebsmodi oder auch komplett neue Betriebsarten vorstellbar.

Für den 50 Hz–Stretchermodus läßt sich die Extraktionsvorbereitungsphase nutzen. Die schnellen Extraktionsquadrupole zur Steuerung der langsamen drittelzahligen Resonanzextraktion, werden erst nach Ablauf

⁴Zusätzlich findet eine unnötige und unerwünschte radioaktive Aktivierung eines Teils der ELSA–Injektionselemente statt (vor allem der erste Injektionsseptummagnet in Halbzelle 30).

einer kurzen Extraktionsvorbereitungsphase (z.B. 1 ms) aktiviert und so die Injektion etwas entfernt vom Resonanzarbeitspunkt $Q_R = \frac{14}{3}$ ermöglicht. Das Heranfahren an den resonanten Arbeitspunkt von Q_R erfolgt erst nach Injektionsende und somit ist eine gewisse Entkopplung von Injektions- und Extraktionsphase erreicht (allerdings auf Kosten des makroskopischen Tastverhältnisses, das dabei etwas reduziert wird). Mit diesem Verfahren wird, wie bisher, aus dem nicht abgedämpften Strahl extrahiert.

Ein Stretchermodus mit abgedämpften Strahl ist bei Injektionsenergie möglich. Dazu läßt sich die Injektionsdämpfungsphase so einstellen, daß die Zeiten der Strahlungsdämpfung (Tabelle 4.1) berücksichtigt werden. Damit eine Extraktion über einen längeren Zeitraum möglich wird, kann in dieser Betriebsart mehrmals injiziert werden. Der Stretchermodus mit abgedämpfem Strahl entspricht dem Nachbeschleunigungsmodus ohne Rampphasen, allerdings mit Strahlbedingungen, welche denen im Nachbeschleunigungsmodus ähnlich sind. Dieser neue Betriebsmodus kann somit z.B. zur Untersuchung der Extraktion mit abgedämpfem Strahl eingesetzt werden, ohne den komplizierteren Nachbeschleunigungsmodus einzustellen.

Die Teilphasen eines Maschinenzyklus und der Maschinenzyklus selbst werden durch ein dediziertes Trigger-signal individuell eingeleitet und sind somit voneinander entkoppelt. Das Startsignal einer Teilphase wird als Stoppsignal der vorangegangenen Phase verstanden.

Die Maßnahmen der Strahldiagnose erfordern ein Signal, das sehr genau im gesamten Maschinenzyklus positionierbar ist und als Vortrigger für das System zur Strahldiagnosezeitsteuerung⁵ (Abschnitt 4.4) seinen Einsatz findet. Dadurch wird die Diagnosezeitsteuerung fest an einen Maschinenzyklus angebunden. Relativ zu diesem Vortrigger erzeugt die Diagnosezeitsteuerung eine Kette von Pulsen für Strahldiagnosesubsysteme.

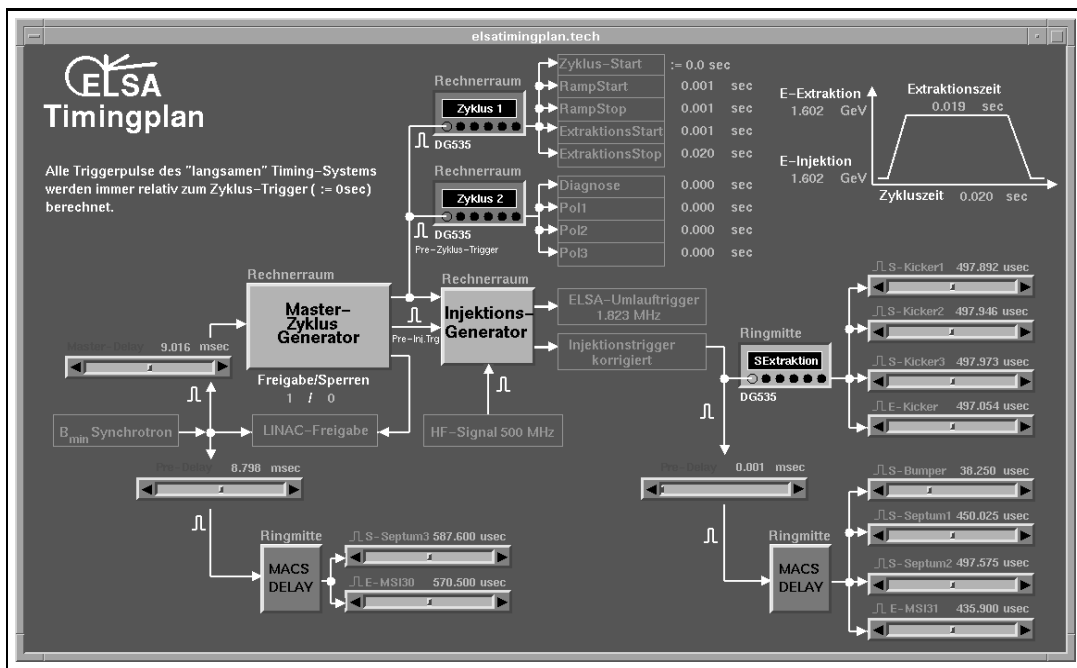


Abbildung 4.3: Schemazeichnung der Zeitablaufsteuerung als Teil der Bedienungsoberfläche

Abbildung 4.3 zeigt ein Übersichtsbild der Zeitablaufsteuerung (Timingsystem), wie es für die Benutzer in der Bedienungsoberfläche bereitgehalten wird. Die folgenden Abschnitte beschreiben dessen Bestandteile.

Zeitsignalplan eines ELSA-Maschinenzyklus

Um den Verkabelungsaufwand möglichst gering zu halten, wurde eine Minimalzahl von Triggersignalen angestrebt. Auf ein separates Signal zur Einleitung der Injektionsdämpfungsphase wurde verzichtet, da sie logisch zur Injektionsphase gehört und ihre Lage im Gesamtzyklus exakt durch die Anzahl der Injektionen und den Start der Rampphase festgelegt ist. Signale erscheinen zu einem Zeitpunkt t relativ bezogen auf

⁵Das System zur Strahldiagnosezeitsteuerung wird im Text auch nur als Diagnosezeitsteuerung oder Diagnosetimingssystem bezeichnet.

den Startzeitpunkt eines ELSA-Maschinenzyklus t_{zyklus} . Die Länge von Teilphasen wird jeweils mit τ und einem Index bezeichnet. Der Zeitsignalplan in Abb. 4.4 zeigt das Schema der Zyklusablaufsteuerung in der Übersicht. Er zeigt die eingeführte Zeitachse des Maschinenzyklus, eingeleitet durch den Zyklustrigger t_{zyklus} zum Zeitpunkt 0. Das erste Injektionssignal t_{inj} ist identisch mit dem Zyklussignal t_{zyklus} ; das Zeitraster der Injektion entspricht dem Zeitraster des Synchrotrons von $\tau_{sync} = 20$ ms. Die Rampphase wird durch das Rampstartsignal t_{rstart} eingeleitet. Die zeitliche Lage des Rampstartsignals t_{rstart} im Maschinenzyklus richtet sich nach der Anzahl der eingestellten Injektionen n und der gewählten Injektionsdämpfungszeit τ_{id} , es ergibt sich: $t_{rstart} = (n - 1) \cdot \tau_{sync} + \tau_{id}$. Das Rampstoppsignal t_{rstop} beendet die Rampphase von Injektionsenergie auf Extraktionsenergie und startet gleichzeitig die Phase der Extraktionsvorbereitung. Die Länge der Rampphase τ_{up} ergibt sich aus der Zeitdifferenz $t_{rstop} - t_{rstart}$. Die Extraktion wird durch das Extraktionsstartsignal t_{estart} eingeleitet und durch das Extraktionsstoppsignal t_{estop} beendet. Damit ergibt sich für die Dauer der Extraktionsvorbereitung $\tau_{pre} = t_{estart} - t_{rstop}$ und die Extraktionszeit ist bestimmt durch $\tau_{ext} = t_{estop} - t_{estart}$. Die Vorbereitungsphase für den folgenden Injektionsabschnitt startet mit t_{estop} . Für

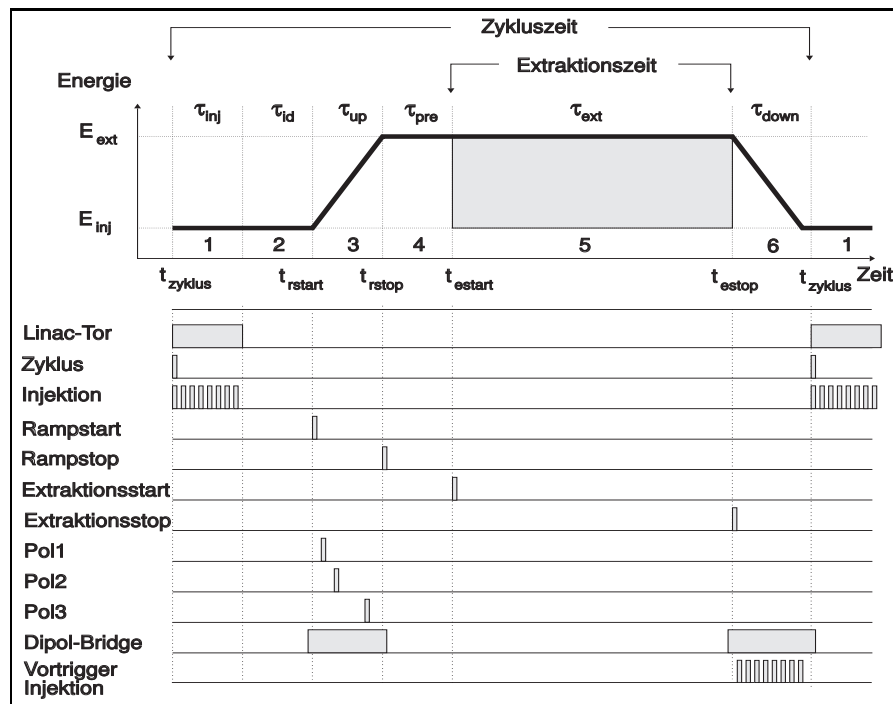


Abbildung 4.4: Signalplan der Zyklusablaufsteuerung

die Aktivierung eines Zusatznetzgerätes in der Stromversorgung der ELSA-Dipolmagnete wird das Dipol-Bridge-Signal generiert. Für zukünftige Korrekturmaßnahmen zur Beschleunigung polarisierter Elektronen in ELSA sieht die Zeitsteuerung drei Signale (Pol1 bis Pol3) vor. Die Implementierung der Ablaufsteuerung eines ELSA-Maschinenzyklus erfolgt in einem in das Kontrollsystem integrierten Zyklustimingsystem, das im nächsten Abschnitt vorgestellt wird. Ein eigener Abschnitt behandelt das Injektionstimingsystem zur Homogenisierung der ELSA-Füllstruktur.

4.2 System zur Zykluszeitsteuerung

Das Zyklustimingsystem generiert die Triggersignale zur Ablaufsteuerung des Maschinenzyklus. Bestandteil ist ein Vortrigger für die Injektion, welcher im Injektionstimingsystem zum eigentlichen Injektionstrigger verarbeitet wird. Abbildung 4.5 zeigt die am Zyklustimingsystem beteiligten Komponenten in der Übersicht.

Der **Zyklusgenerator** erzeugt einen Vortrigger für den Maschinenzyklus und eine Vortriggerkette für die Injektion sowie ein Torsignal zur Freigabe des Linearbeschleunigers. Die Vortriggerkette der Injektion wird dem Injektionstimingsystem zugeführt. Die drei Signale sind abgeleitet aus dem B_{min} -Signal des Synchrotrons. Ein spezieller Feldbusprozessor wird mit dem B_{min} -Signal getriggert und erzeugt dann die beschriebenen

Signale. Er wird durch einen VME-Feldbuscontroller angesteuert (Abschnitt 2.2.1 und 2.3.5). Zwei miteinander synchronisierte Verzögerungseinheiten DG535⁶ [24] übernehmen die Signalgenerierung für die zeitliche Zyklusablaufsteuerung. Sie werden durch den Vortrigger des Maschinenzklus aus dem Zyklusgenerator angestoßen und erzeugen dann acht variabel verzögerbare Signale und das Zyklussignal:

Das **Zyklussignal** t_{zyklus} startet den Maschinenzklus. Es wird aus dem Vortrigger des Maschinenzklus ohne Verzögerung abgeleitet, ist aber wie alle folgenden Signale um die Laufzeit in der DG535-Elektronik verzögert. Das **Rampstartsignal** t_{rstart} markiert den Startzeitpunkt der Nachbeschleunigungsphase von Injektionsenergie auf Extraktionsenergie. Das Erreichen der Extraktionsenergie zeigt das **Rampstoppsignal** t_{rstop} an. Die eigentliche Extraktion leitet das **Extraktstartsignal** t_{estart} ein, deren Ende markiert das **Extraktionstoppsignal** t_{estop} . Für die Strahldiagnosezeitsteuerung wird ein Vortrigger t_{diag} erzeugt. Die drei verbleibenden Signale sind für Korrekturzwecke im Nachbeschleunigungsbetrieb mit polarisierten Elektronen vorgesehen.

Für die typischen Verzögerungszeiten an ELSA ergibt sich eine Auflösung von wenigen Nanosekunden, wobei Auflösung und Stabilität der Verzögerungsgeneratoren DG535 von der gewählten Verzögerungszeit abhängt [24]. Die Länge der Ausgangssignale wird durch Signalformer (Pulsformer) auf die an ELSA übliche Normlänge von 200 μs pulsgeformt⁷, nachverstärkt und dem ELSA-Triggernetzwerk zugeführt. Alle Triggersignale genügen der TTL-Konvention. Die Triggersignale werden in Gruppen von sechs bis acht Ko-

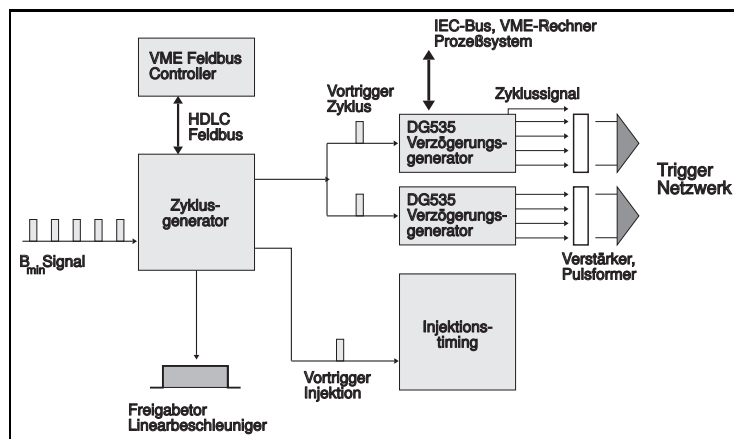


Abbildung 4.5: Komponenten der Zykluszeitsteuerung

axialkabeln sternförmig über das Gelände der Beschleunigeranlage zu Endpunkten verteilt, von denen eine weitere Verzweigung ausgeht. Die Auswahl der Endpunkte wurde so getroffen, daß alle Feldbusprozessoren und VME-Rechnereinheiten, welche die zyklussynchronisierte Ansteuerung von Subsystemen durchführen, und alle Endgeräte, die einer externen Synchronisierung bedürfen, mit möglichst geringen Kabellängen an die zeitliche Ablaufsteuerung angeschlossen sind. Zusammen mit den Triggerkabeln wurden auch die Ethernetkabel für die Prozeßnetzwerke an die entsprechenden Endpunkte geführt. An den Auskoppelpunkten werden die Triggersignale optisch entkoppelt und erst dann den Rechnereinheiten oder Endgeräten zugeführt.

4.3 System zur Injektionszeitsteuerung

In Abschnitt 1.3.1 wurde dargelegt, daß das mikroskopische Tastverhältnis des extrahierten ELSA-Strahls durch die ELSA-Füllstruktur nach oben begrenzt ist. Da im Nachbeschleunigungsmodus in jedem Fall mehrere Schüsse aus dem Synchrotron zur Erreichung des Extraktionsausgangsstroms (bis zu 100 mA) notwendig sind, sollen diese in ELSA so definiert hintereinander positioniert werden, daß ein Tastverhältnis der Füllung von nahezu 100 % erreicht wird. Dazu wird der Strahl aus dem Synchrotron zur Maximierung der Transfereffizienz n -mal (Zeitraster 20 ms) über einen Umlauf extrahiert und jeweils so in die bereits umlau-

⁶Die Verzögerungsgeneratoren sind über den IEC-Bus durch eine VME-Rechnereinheit und eine entsprechende Schnittstellenkarte ansteuerbar. Die Verzögerungen können zwischen 5 ps und ca. 10000 s gewählt werden.

⁷Die Normpulslänge von 200 μs ist notwendig, da die Feldbusprozessoren nur diese Signalform verarbeiten können [115].

fende Füllstruktur eines gespeicherten ELSA-Strahls eingefügt, daß nach einer bestimmten Mindestzahl die Füllstruktur homogenisiert ist.

Für dieses Verfahren ist eine enge zeitliche Kopplung von Synchrotron-Extraktion und ELSA-Injektion mit einer zeitlichen Genauigkeit notwendig, welche das Schaltverhalten der Extraktionskicker des Synchrotrons und der ELSA-Injektionskicker⁸ berücksichtigt. Ein in ELSA umlaufender Strahl muß zeitlich markiert werden, damit ein weiterer Elektronentransfer aus dem Synchrotron genau an eine ELSA-Füllstruktur anschließt. Dazu ist die gesamte Transferzeitsteuerung auf die 500 MHz-Hochfrequenz von ELSA synchronisiert, da sich nur daraus eine HF-stabile **Umlaufuhr** zur Markierung einer ELSA-Füllstruktur ableiten läßt. Das Injektionstimingsystem hat dabei zwei Aufgaben:

1. Die Hauptaufgabe des Injektionstimingsystems ist die Erzeugung eines HF-synchronen und bezüglich des ELSA-Umlaufs markierten Injektionstriggers, welcher die Grundlage zur Homogenisierung der ELSA-Füllstruktur darstellt.
2. Eine weitere Aufgabe des Injektionstimingsystems besteht in der Überwachung der akkumulierten ELSA-Intensität innerhalb der Injektionsphase. Im Fall der Überschreitung einer vom Kontrollsystem einstellbaren Stromschwelle greift diese Überwachung in die Injektionszeitsteuerung ein und verhindert weitere Injektionen; sie soll die Anfangsbedingungen für den Nachbeschleunigungsmodus reproduzierbar machen.

Voraussetzung zur Lösung der Hauptaufgabenstellung ist die Entwicklung einer Umlaufuhr für ELSA. Die Umlaufzeit $T_0 = 548$ ns des Strahls in ELSA und die Periodendauer der Hochfrequenz $T_{hf} = 2$ ns sind über die Harmonischenzahl h miteinander verknüpft: $h = \frac{T_0}{T_{hf}} = 274$. Liegen aufeinanderfolgende Injektionen in ELSA um ganzzahlige Vielfache n der ELSA-Umlaufzeit auseinander $n \cdot T_0$, wird ELSA nur in einem Teilsegment gefüllt, bzw. der Strahl immer nur in diesem Teilsegment akkumuliert; der Rest des ELSA-Rings bleibt leer. Verschiebt man jede Injektion zu ganzzahligen Vielfachen der ELSA-Umlaufzeit zusätzlich um eine individuelle Verzögerung τ_i , können aufeinanderfolgende Injektionen in ELSA hintereinander positioniert werden und ELSA gleichmäßig über die gesamte Ringlänge mit Elektronen bevölkern. Zwei aufeinanderfolgende Injektionsvorgänge haben insgesamt einen zeitlichen Abstand von $\Delta t_i = n \cdot T_0 + \tau_i$, wobei n eine ganze Zahl darstellt⁹. Das Injektionstimingsystem muß dafür sorgen, daß für die Positionierung einer Synchrotronfüllung in ELSA nur die τ_i bestimmend sind. Dann haben aufeinanderfolgende Füllungen des Synchrotron in ELSA einen Zeitversatz $\Delta\tau(i, i-1) = \tau_i - \tau_{i-1}$. Die τ_i können z.B. äquidistant ansteigend gewählt werden: $\Delta\tau = \tau_i - \tau_{i-1}$ ist dann konstant.

Das Verhältnis der Umlaufzeiten von Synchrotron (232 ns) und ELSA (548 ns) beträgt etwa $\frac{3}{7}$, so daß eine Zahl von sieben Synchrotron-schüssen ELSA für den hier betrachteten Fall einer Einumlaufextraktion aus dem Synchrotron homogen füllen kann. Abbildung 4.6 zeigt im oberen Teil die zeitliche Abfolge von sieben

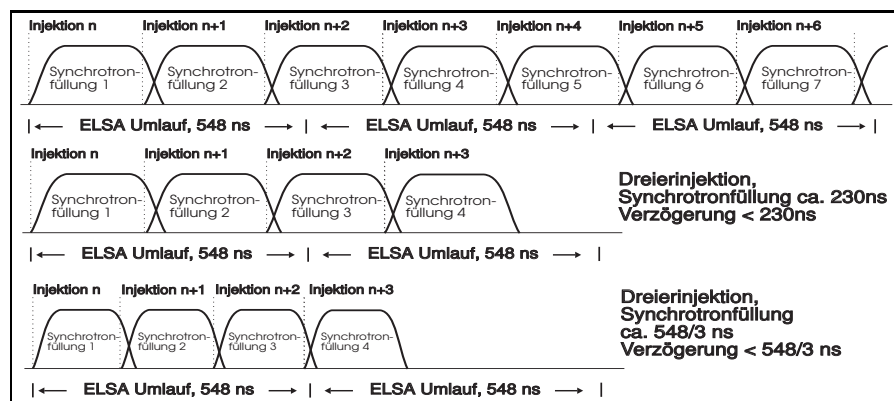


Abbildung 4.6: Füllstruktur von ELSA für sieben, bzw. drei Injektionen

Schüssen des Synchrotrons, drei ELSA-Umläufe sind insgesamt dargestellt. Für die Betrachtung sei die

⁸Es handelt sich um einige Nanosekunden auf dem zeitlichen Transferraster von 20 ms des Synchrotrons.

⁹Da zwei aufeinanderfolgende Injektionen wegen des Synchrotronzeitrasters mindestens einen zeitlichen Abstand von 20 ns haben, beträgt n ungefähr 36500 Umläufe in ELSA. Die individuelle Verzögerung τ_i liegt dagegen in der Größenordnung von 100 ns.

Synchrotronfüllungslänge mit ca. 230 ns angenommen¹⁰. Der Zeitversatz $\Delta\tau$ zwischen aufeinanderfolgenden Injektionen in ELSA ist im Beispiel kleiner als 230 ns gewählt; somit überlappen sich die einzelnen Füllungen. Schwankt die Synchrotronfüllungslänge, sind davon die Überlappungszonen unmittelbar betroffen und die ELSA-Füllstruktur schwankt insgesamt in ihrer Gleichmäßigkeit. Diese Konfiguration ist also anfällig gegen Schwankungen der Synchrotronfüllungslänge. Abbildung 4.6 zeigt im mittleren Teil eine Dreierinjektion, wobei Synchrotronfüllungslänge und Verzögerung dem vorangegangenen Beispiel entsprechen. Offensichtlich läßt sich damit keine gute ELSA-Füllstruktur erzeugen, da immer ein Teilsegment mit Elektronen überbevölkert ist. Eine Verbesserung könnte durch Verkürzung der Synchrotronfüllungslänge auf etwa ein Drittel der ELSA-Umlaufzeit $\frac{548}{3}$ ns und eine Anpassung des Zeitversatzes $\Delta\tau < \frac{548}{3}$ ns erfolgen; Abbildung 4.6 zeigt diesen Fall im unteren Teil. Insgesamt nähert sich dieser Fall der beschriebenen Siebenerinjektion an. Auch jetzt ist die sich einstellende ELSA-Füllstruktur in besonderem Maß von der zeitlichen Konstanz der Synchrotronfüllungslänge abhängig.

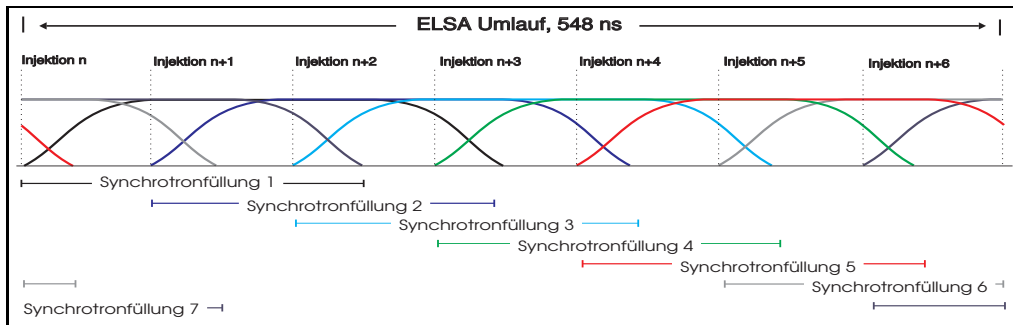


Abbildung 4.7: Füllstruktur von ELSA für sieben stark überlappende Injektionen

Eine starke Abhängigkeit der ELSA-Füllstruktur von der Reproduzierbarkeit und der zeitlichen Länge der Synchrotronfüllung ist nicht erwünscht. Ihr Einfluß auf die ELSA-Füllstruktur läßt sich reduzieren, falls die Injektionen in ELSA nicht genau hintereinander gesetzt werden, sondern weit überlappen. Abbildung 4.7 zeigt die zeitliche Abfolge einer Siebenerinjektion, als Zeitskala ist ein ELSA-Umlauf gewählt. Der Zeitversatz $\Delta\tau$ beträgt jetzt $\frac{548}{7}$ ns ≈ 78 ns, die Synchrotronfüllungslänge bleibt unverändert. Injizierte Füllungen, die über den rechten Rand hinaustreten, sind links wieder in das Bild geklappt. ELSA ist im Bild über seine ganze Ringlänge relativ gleichmäßig mit Elektronen angefüllt; durch Abzählen findet man, daß jedes Teilsegment dreimal von einer Füllung getroffen wird.

Die sieben Injektionen formieren einen **Injektionszug**, der sich innerhalb einer Injektionsphase mehrmals wiederholen läßt. Die bisher unabhängigen k **Elementarinjektionen** werden innerhalb der Injektionsphase durch das beschriebene Schema in **Injektionszüge** gruppiert, wobei die Gesamtzahl k der Injektionen und die Anzahl von Injektionen in einem Injektionszug in einem ganzzahligen Verhältnis stehen.

An dem ausgeführten Beispiel kann ein **Injektionsschema** abgelesen werden. Die Schußlänge des Synchrotrons T_s und die Umlaufzeit von ELSA T_0 müssen näherungsweise in einem rationalen Verhältnis stehen, $\frac{T_s}{T_0} = \frac{n}{m}$ mit natürlichen Zahlen n, m , um eine gute Füllung in ELSA zu erreichen. Zusätzlich muß für die Verzögerungen τ_i gelten: $\tau_i = i \cdot \frac{T_0}{m}$ ns, mit $i = 0, 1, \dots, m$, wobei ein Injektionszug m Elementarinjektionen umfaßt. Die Gesamtzahl der Elementarinjektionen k muß $k = l \cdot m$ gewählt werden, wobei l eine natürliche Zahl ist. Für diesen Fall wird in jedes Teilsegment von ELSA mit jeweils m Schüssen des Synchrotrons näherungsweise n -mal injiziert und dieser Vorgang l -mal wiederholt. Durch dieses Verfahren sollte sich die ELSA-Füllstruktur „treppenförmig“ aufbauen, wobei jeder Injektionszug eine „Treppenstufe“ formiert und sich insgesamt l Treppenstufen herausbilden. Kann die treppenförmige Füllstruktur durch eine Messung nachgewiesen werden, ist sie selbst wieder Indikator für eine gut eingestellte Injektionszeitsteuerung.

Das beschriebene Injektionsschema setzt voraus, daß sich die Akzeptanz von ELSA während des Injektionsverlaufs nicht wesentlich ändert, das gilt besonders für die Teilbereiche von ELSA in denen aufeinanderfolgende injizierte Füllungen überlappen. In diesen Bereichen befinden sich jeweils mehr Elektronen als in daran angrenzenden Bereichen. Demgegenüber stellt das erste Beispiel (sieben Injektionen mit einem Zeitversatz von kleiner als 230 ns) keine besondere Forderung an die Akzeptanz von ELSA, da sich hierbei die einzelnen injizierten Füllungen nur wenig überlappen.

¹⁰Die Synchrotronfüllungslänge wird als Breite auf der halben Höhe der angenähert trapezförmigen Füllung aufgefaßt.

Die Einstellung der individuellen Verzögerung τ_i einzelner Injektionen ist durch Zeitfehler („Jitter“) in der Ansteuerelektronik und dem Schaltverhalten der Injektionskicker nach unten begrenzt und wird mit ca. 5 ns abgeschätzt [112]. Um diesen Zeitfehler nicht noch weiter zu vergrößern, muß die Einstellgenauigkeit des Kontrollsystems unterhalb von 5 ns bleiben. Damit sind aufeinanderfolgende Injektionen in ELSA bis auf eine Ungenauigkeit von kleiner als 1 % hintereinander positionierbar (entspricht einer Ortsauflösung von ca. 1.5 m).

Injektionsgenerator

Zur Realisierung des beschriebenen Verfahrens wurde ein Injektionsgenerator entwickelt, dessen Aufbau in Abbildung 4.8 dargestellt ist. Dem Muttergenerator der HF-Systeme vom Synchrotron und von ELSA wird ein HF-Signal ($f_{hf} = 499.673$ MHz) entnommen und dem programmierbaren HF-Teilerbaustein Q3036 zugeführt. Er teilt die Frequenz des angelegten Eingangssignals durch die Harmonischenzahl von ELSA $h = 274$ und generiert am Ausgang die ELSA-Umlaufuhr mit einer Frequenz von $f_{elsa} = 1.823$ MHz; sie wird einem nachfolgenden Umlaufselektor (Torschaltung) zugeführt. Der Umlaufselektor erhält seine Freigabe mit dem Injektions-Vortriggersignal aus dem Zyklusgenerator. Er selektiert im Zeitfenster eines ELSA-Umlaufs von 548 ns den nächsten Puls aus dem Teilerbaustein Q3036. Das Ergebnissignal des Umlaufselektors wird pulsgeformt den Triggereingängen zweier DG535-Verzögerungsgeneratoren [24] zugeführt. Beide Verzögerungseinheiten sind über den IEC-Bus programmierbar und liefern an ihren Ausgängen jeweils vier einstellbare, gegenüber dem Triggersignal (Vortrigger der Injektion, der bereits auf den ELSA-Umlauf korrigiert ist) verzögerte Ausgangssignale. Beide DG535-Einheiten sind extern miteinander synchronisiert, so daß eine feste Beziehung zwischen allen eingestellten Verzögerungen besteht. Die für ELSA erwarteten Verzögerungszeiten liegen im Bereich bis ca. $2.0 \mu s$ ¹¹; in diesem Bereich haben die Verzögerungsgeneratoren eine Genauigkeit von < 1 ns. Die acht Ausgangssignale beider Einheiten werden in eine Multiplexereinheit ($n \rightarrow 1$) eingespeist, welche, abhängig von einem angelegten Eingangsbitmuster, einen der acht Eingänge auf den Ausgang durchschaltet. Das Eingangsbitmuster wird durch eine 4 bit Zählereinheit erzeugt, welche von einlaufenden Vortriggerpulsen der Injektion getaktet wird¹². Die Zählereinheit wird entweder nach Erreichen eines programmierbaren Endwertes oder durch den Start eines neuen Maschinenzyklus (Verwendung des Zyklussignals t_{zyklus}) zurückgesetzt. Damit wird eine **Modulobildung** der Zahl der Elementarinjektionen mit dem Endwert der Zählereinheit vorgenommen, welcher die Länge eines Injektionszugs bestimmt. Somit erfolgt die geforderte Gruppierung von Elementarinjektionen innerhalb der Injektionsphase. Das Ausgangssignal der Multiplexereinheit – ein korrigierter und verzögerter Injektionstrigger – wird auf eine Veto-Einheit geleitet, die das Triggersignal nur dann passieren läßt, wenn eine Freigabe durch die Überwachungseinheit der ELSA-Intensität erfolgt. Die Freigabe erfolgt, solange der umlaufende ELSA-Strom einen einstellbaren Schwellenstrom nicht überschritten hat. Der Schwellenstrom wird durch einen 12 bit Digital-Analog-Wandler (DAC) mit einem Wandlerbereich von 0-10 Volt vorgegeben. Eine Komparatoreinheit führt den Vergleich mit einem, dem Strom in ELSA streng proportionalen Spannungssignal zwischen 0-10 Volt (entspricht einem ELSA-Strom von 0-250 mA) aus, das an einem Toroidmonitor mit nachgeschalteter Elektronikeinheit abgegriffen wird [8][107]. Die Freigabe wird gesperrt und damit eine weitere Injektion unterbunden, sobald der aktuelle ELSA-Strom den Schwellenstrom überschreitet. Zusätzlich wird die Überschreitung des Schwellenstroms durch einen Signalimpuls angezeigt, der z.B. für Diagnosezwecke Verwendung finden kann. Die freigegebenen, auf den Umlauf von ELSA korrigierten und verzögerten Injektionssignale werden einem weiteren Verzögerungsgenerator DG535 zugeführt, welcher die Kicker der Synchrotron-Extraktion individuell und alle Kicker der ELSA-Injektion gemeinsam ansteuert¹³.

Alle Komponenten des Injektionstimingsystems, bis auf die Verzögerungsgeneratoren DG535, sind auf eine VME-Karte integriert. Der überwiegende Anteil der digitalen Gatterfunktionen für Zähler, Verzögerungen und die Multiplexereinheit konnte in einem programmierbaren Logikbaustein („ASIC“) untergebracht werden, welcher den Gesamtaufwand für die Entwicklung stark vereinfachte. Der HF-Teilerbaustein Q3036 ist zusammen mit verschiedenen Treiberbausteinen ein weiterer Hauptbestandteil des entwickelten Moduls.

¹¹ Angenommen, es würde siebenmal injiziert, die Synchrotronfüllung wäre genau 232 ns lang, alle Injektionen würden genau hintereinander gesetzt, so ergibt sich eine maximale Verzögerung von ca. $1.85 \mu s$.

¹² Die Zählereinheit kann insgesamt 16 Eingänge selektieren. Der Injektionsgenerator ist darauf ausgelegt, ist aber zur Zeit nur mit zwei Verzögerungseinheiten DG535 bestückt.

¹³ Die individuellen Trigger für die ELSA-Injektionskicker sind durch eine Verkabelung fest gegeneinander verzögert [27] und deswegen durch ein Triggersignal aktivierbar.

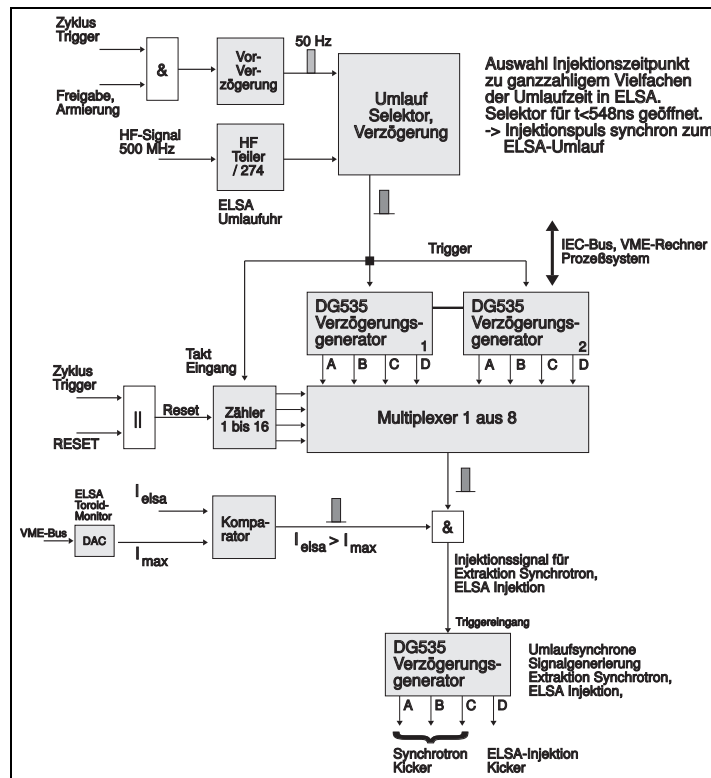


Abbildung 4.8: Aufbauschema des Injektionsgenerators

Das Injektionstimmingsystem ist in allen Teilen durch das Prozeßsystem der Kontrolle programmierbar, der Injektionsgenerator wird über den VME-Bus und die DG535-Einheiten über eine Schnittstellenkarte sowie den IEC-Bus eingestellt. Die Software der Zeitsteuerung in der Prozeßebene übernimmt die selbsttätige und individuelle Konfiguration der DG535-Verzögerungsgeneratoren hinsichtlich Signalpegel, Signalflanken, Signalschwellen, Ausgangsimpedanzen, Eingangsimpedanzen etc. Alle Einstellmöglichkeiten der Zeitablaufsteuerung sind auf Kontrollsystemparameter abgebildet und werden über das Prozeßsystem, durch Einbindung von Servicefunktionen in der Prozeßdatenbank, im laufenden Betrieb eingestellt.

4.4 System zur Strahldiagnosezeitsteuerung

Die Überprüfung aller Einstellungen im Nachbeschleunigungsmodus und die Erfassung von Strahlparametern zur Verbesserung der Betriebsbedingungen, erfordert eine Strahldiagnose zu frei wählbaren Zeitpunkten im gesamten Maschinenzyklus. Dazu ist ein, durch das Kontrollsystem frei programmierbarer, Diagnostriggergenerator notwendig, der zu beliebigen Zeitpunkten ein Diagnosesignal oder eine Diagnosesignalkette erzeugt.

Die Erfassung von Lagedaten zur Diagnose der Betatronbewegung des Strahls mit kapazitiv arbeitenden Knopfmonitoren des ELSA-Monitor-systems setzt einen kohärent angeregten Elektronenstrahl voraus, da dieser Monitortyp nur die Schwerpunktbewegung des Teilchenstrahls erfaßt. Die kohärente Anregung des Elektronenstrahls wird üblicherweise durch Diagnosekicker-magnete, individuell für die horizontale und vertikale Bewegungsrichtung der Teilchen, geleistet. ELSA verfügt zur Zeit nicht über solche Kicker-magnete und deswegen wurde die Triggerelektronik eines ELSA-Injektionskickers, welcher außerhalb der Injektionsphase nicht benötigt wird, modifiziert¹⁴. Seine Eingangstriggerstufe wurde um einen Triggereingang für

¹⁴Der ELSA-Injektionskicker baut sein Feld in ca. 450 ns, hält es für ca. 1000 ns konstant und fährt es in ca. 500 ns auf seinen Ausgangswert zurück. Insgesamt wird dadurch der Teilchenstrahl mehrfach angeregt. Eine angeregte kohärente Schwingung kann damit auch wieder gedämpft werden. Möglich ist auch eine nicht gleichmäßige Anregung von Teilchenensembeln in unterschiedlichen Teilsegmenten von ELSA. Eine kohärente Strahlanregung ist damit nicht optimal zu leisten. Ein dedizierter Diagnosekicker sollte sein Feld möglichst schnell auf- und abbauen und für weniger als einen ELSA-Umlauf konstant halten; in Zukunft ist für die Strahldiagnose an ELSA ein solcher Diagnosekicker vorgesehen.

den Diagnosepuls erweitert, welcher, wie der Injektionstrigger, die Aktivierung des Kickers auslöst. Die Injektionskicker von ELSA sind auf eine maximale Wiederholrate von 50 Hz ausgelegt; deswegen müssen zwei aufeinanderfolgende Trigger mindestens 20 ms auseinanderliegen. Eine entsprechende elektronische Verriegelung wurde in der Eingangstriggerstufe des Injektionskickers angebracht.

Der Einsatz des Injektionskickers bedeutet für die Strahldiagnose, daß Diagnosesignale nur auf dem Injektionszeitraster von 20 ms erzeugt werden dürfen und damit aufeinanderfolgende Diagnosemessungen mindestens 20 ms auseinanderliegen. Die Abbildung 4.9 zeigt den Aufbau des Diagnosetrigger-Generators in der Übersicht.

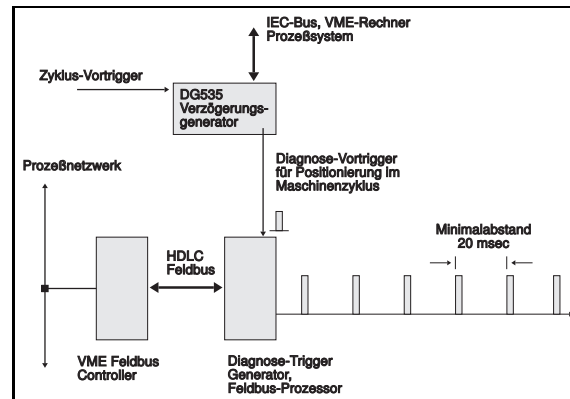


Abbildung 4.9: Aufbau des Diagnosezeitsteuerung

Die Positionierung des ersten Diagnosetriggers im Maschinenzklus erfolgt durch eine DG535-Verzögerungseinheit mit einer Genauigkeit von 10 ns. Die Genauigkeit ist abhängig von der absolut eingestellten Verzögerung; für ELSA wurde die Konfiguration so gewählt, daß die Genauigkeit immer besser als 10 ns ist. Dazu wird der Diagnosevortrigger aus der Zyklusablaufsteuerung eingesetzt und einem modifizierten Feldbusprozessor zugeführt, welcher die Generierung einer vorher programmierten Kette von Diagnosepulsen relativ zum Diagnosevortrigger auslöst. Die Datenübermittlung an den Feldbusprozessor leistet ein VME-Feldbuscontroller (Abschnitt 2.3.5). Die Festlegung der Pulsabfolge wird auf Kontrollebene über die Bedienungsfläche getroffen.

Anzahl und Abstand der Diagnosepulse ist in einem großen Bereich frei wählbar und kann vom Anwender vorgegeben werden. Die Genauigkeit, mit der Diagnosepulse relativ zum Vortrigger positionierbar sind, ist durch den verwendeten Feldbusprozessor gegeben und beträgt 651 ns. Der gesamte Nachbeschleunigungszyklus läßt sich mit Diagnosetriggern überdecken. Zur Erfassung von Strahlparametern in ausgezeichneten

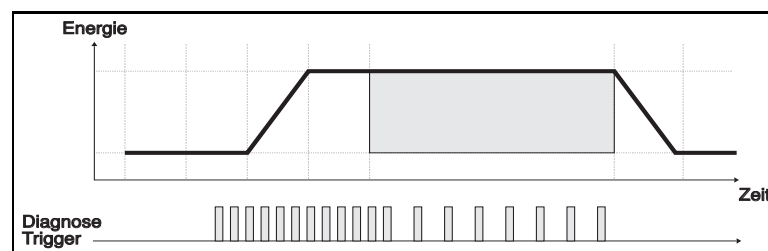


Abbildung 4.10: Diagnosekette zur Erfassung der Schnittstellenphasen im Nachbeschleunigungsmodus

Abschnitten des Nachbeschleunigungsmodus, z.B. die Übergangsbereiche von Injektionsphase zur Rampphase oder in der Extraktionsvorbereitungsphase, können diese Phasen dicht mit Diagnosepulsen versehen werden¹⁵, während die restlichen Teile des Maschinenzylusses nur grob mit Diagnosepulsen überdeckt sind (Abb. 4.10). Die Diagnosepulse vermittelt ein Verteiler an alle Strahldiagnosesubsysteme über das ELSA-Triggernetzwerk.

¹⁵Wie bereits ausgeführt, ist der Minimalabstand von Diagnosepulsen auf 20 ms beschränkt.

4.5 Software und Experten der Zeitablaufsteuerung

Die Systeme zur Zykluszeit-, Injektionszeit- und Strahldiagnosezeitsteuerung sind in das Kontrollsystem integriert. Für alle Einstellmöglichkeiten sind Kontrollsystemparameter definiert, so daß über die verschiedenen Transaktionsmechanismen des Kontrollsystems auf die Systeme eingewirkt werden kann. Das im Abschnitt 2.8 beschriebene System von Regelexperten wird zur Berechnung und Einstellung der Zeitablaufsteuerung angewendet. Eine Menge von Regeln legt alle Berechnungen sowie Eingabe- und Ausgabemenge von Kontrollparametern für die Zeitablaufsteuerung fest. Das Regelwerk wird von zwei Regelexperten bearbeitet:

1. Der **timing**-Experte behandelt die Regeln für das Zyklustiming- und das Injektionstimingssystem. Die Menge von Eingabeparametern sind Parametrisierungen eines Timingmodells, das dem timing-

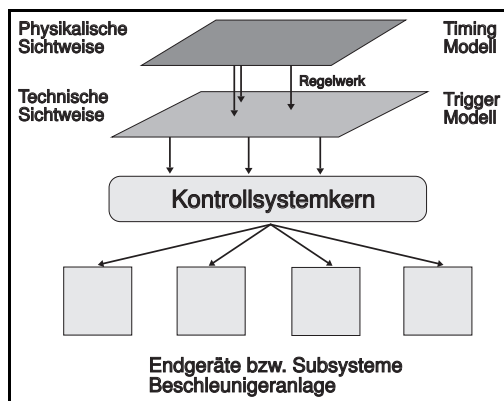
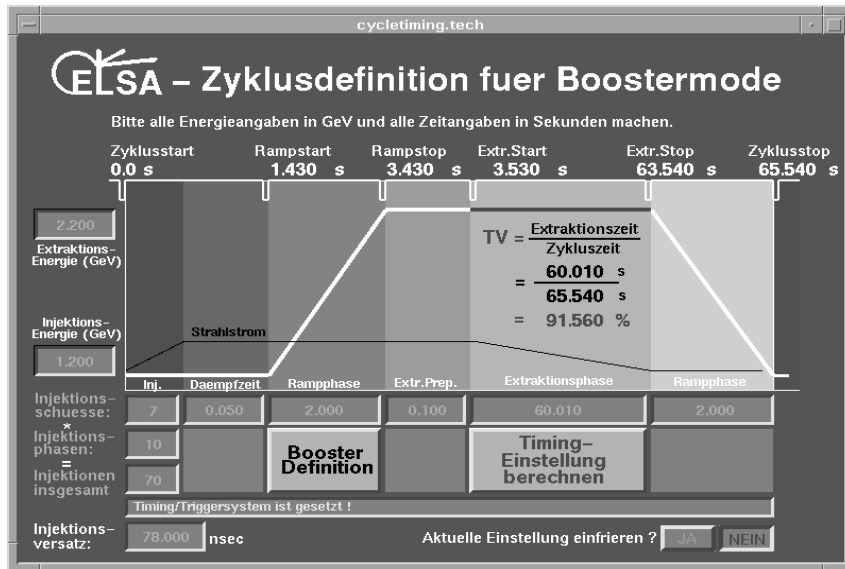


Abbildung 4.11: Modellbildung der Zeitablaufsteuerung

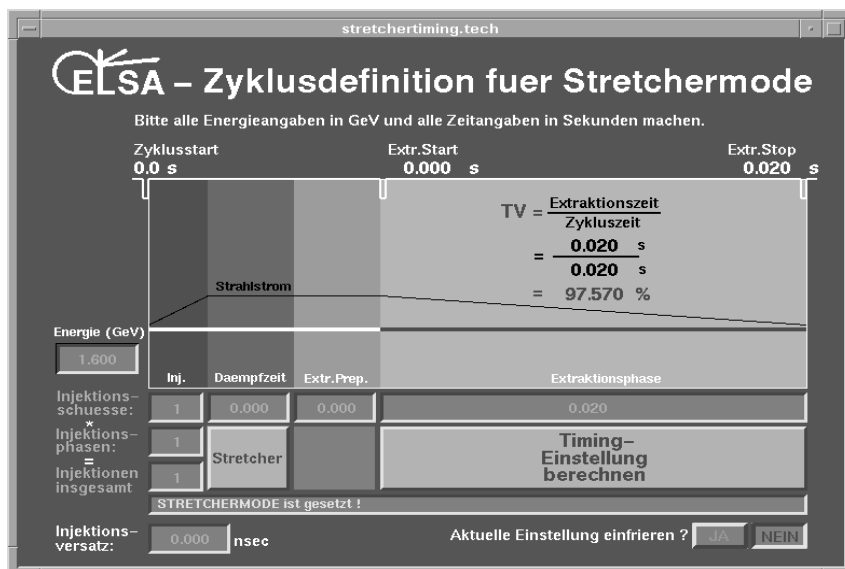
Experten zugrunde liegt. Es handelt sich z.B. im Fall des Zyklustimings um Periodenlängen einzelner Teilphasen im Nachbeschleunigungsmodus, das Injektionsschema sowie Injektions- und Extraktionsenergie. Das Timingmodell ist eine Abstraktion der technischen Aufgabenstellung und realisiert die physikalische Sichtweise. Das Regelwerk für Zyklustiming- und Injektionstimingssystem bildet Modellparameter auf das technische Triggermodell (Triggerparameter) ab. Die Verteilung berechneter Trigger- und Timingsetzungen an beteiligte Subsysteme vermittelt das Kern-Kontrollsystem. Die Konzeption, in Abbildung 4.11 verdeutlicht, hat Beispielcharakter für andere Aufgabenstellungen im Kontrollsystem (z.B. Magnetberechnungen). Die Einstellung des Injektionstimingsystems wird durch den timing-Experten vorgenommen, insbesondere die Verzögerungswerte für den Injektionsversatz können entweder individuell vorgegeben werden oder der Experte leitet für die einzelnen Verzögerungskanäle aufsteigende Verzögerungen mit äquidistantem zeitlichem Abstand aus der Vorwahl eines angegebenen Injektionsversatzes ab. Die letzte Methode ist für die Injektions-Einstellung und die Optimierung der ELSA-Füllstruktur hilfreich, da nur ein einziger Parameter zu verändern ist und die Bedienung damit übersichtlich bleibt.

2. Der **diaggen**-Experte berechnet, in Abhängigkeit eines eingestellten Betriebsmodus durch den timing-Experten und durch interaktive Eingaben, die Signalketten für die Strahldiagnosesubsysteme; er vermittelt sie - über das Kontrollsystem - an den Diagnosetriggergenerator und die DG535-Einheit zur Positionierung im Maschinenzyklus.

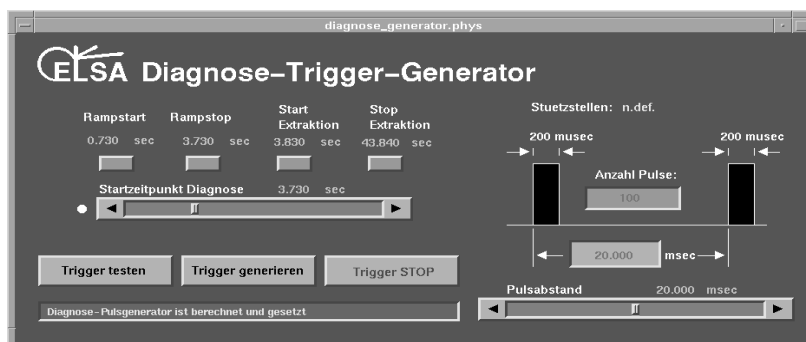
Der timing-Experte ist oberste Instanz zur Definition eines Maschinenzyklus. Er stellt sowohl die Zykluszeitsteuerung, als auch die Injektionszeitsteuerung entsprechend den Vorgaben für einen ELSA-Betriebsmodus ein. Abbildung 4.12 (a) zeigt das Bedienungs Menü für die Zyklusdefinition im Nachbeschleunigungsmodus. Ein ähnliches Bedienungs Menü existiert für den reinen Stretchermodus und ist in Abbildung 4.12 (b) dargestellt. Ein Anwender kann durch wenige Einstellungen das Timingmodell des Nachbeschleunigungsmodus festlegen: Das Injektionsschema wird durch die Anzahl der Schüsse in einem Injektionszug n (im Bild 7 Injektionen) und die Anzahl der Wiederholungen dieses Injektionszugs m (10 Wiederholungen in diesem Beispiel) festgelegt. Der timing-Experte berechnet die Anzahl der Elementarinjektionen $n \cdot m$ (Beispiel 70) und setzt die entsprechenden Parameter des Injektionsgenerators, damit dieser die Injektionen gemäß den Vorgaben gruppiert. Durch Setzung von Zeitperioden einzelner Teilphasen im Nachbeschleunigungsmodus



(a) Nachbeschleunigungsmodus



(b) Stretchermodus



(c) Diagnosesteuerung

Abbildung 4.12: Bedienungsfenster für den Nachbeschleunigungsmodus, den Stretchermodus und die Diagnosesteuerung

wird dieser eindeutig festgelegt. Teilphasen können ausgeblendet werden, wenn als Länge eine 0 angegeben wird. Die Rampphasen können nur dann aktiviert werden, wenn sich die Extraktionsenergie von der Injektionsenergie unterscheidet. Die Vorgabe beider Energien wird im gesamten Kontrollsystem berücksichtigt und z.B. für die Berechnung der Magnetrampen für die Rampphase durch einen eigenen Experten verwendet. Die Verzögerungszeit für den Injektionsversatz im beschriebenen Injektionsschema läßt sich einstellen.

Der **timing**-Experte ist so aufgebaut, daß zunächst alle Randwerte des Timingmodells konsistent vom Anwender eingestellt sein müssen, bevor eine Berechnung per „Knopfdruck“ auf das Feld **Timing-Einstellung berechnen** erfolgen kann. Der Zustand des Timingmodells kann „eingefroren“ werden, damit ein versehentliches, manuelles Eingreifen nicht zum Abbruch des aktuell eingestellten Nachbeschleunigungsbetriebs führt. Abbildung 4.12 (c) zeigt das Bedienungsfenster des **diaggen**-Experten. Durch Schalter kann der Diagnosestartzeitpunkt auf den Startzeitpunkt einer Teilphase der Nachbeschleunigung eingestellt werden; der Startzeitpunkt läßt sich auch quasi-analog wählen. Abstand und Anzahl der Diagnosepulse können in optisch herausgehobenen Feldern eingegeben werden. Der Experte ist so eingestellt, daß Diagnosepulse einen Mindestabstand von 20 ms haben. Triggerketten werden nach Abschluß der Benutzervorgaben durch Knopfdruck auf das Feld **Trigger generieren** berechnet und an den Diagnosetriggergenerator transferiert. Alle Triggerpulse haben eine Länge von 200 μ s und entsprechen der ELSA-Norm. Die Ausgabe von Triggerpulsen läßt sich durch das Feld **Trigger STOP** beenden. Den Zustand des Experten und des Diagnosetriggergenerators zeigt eine Statusmeldung an. Im EPOS-System wurde zusätzlich der Operator **triggen** implementiert, der gegenüber dem **diaggen**-Experten eine noch flexiblere Generierung von Diagnosepulsen erlaubt. Zur einfachen Handhabung des Operators **triggen** wurde das EPOS-Programm **triggen.epf** entwickelt.

Timingereignisse im Kontrollsystem

Die Software der Zeitablaufsteuerung gestattet die Verarbeitung externer Triggersignale aus der Zykluszeit- und Strahldiagnosezeitsteuerung. Dies gilt sowohl für die Echtzeitbehandlung in der Prozeßebene als auch für eine nichtdeterministische Weiterverarbeitung in der Kontrollebene. Dazu wird ein VME-Unterbrechungsgenerator im Prozeßsystem eingesetzt, der bis zu vier externe Triggersignale aufnehmen kann und eine Unterbrechung an eine zugeordnete VME-Rechnereinheit weiterleitet. Die VME-Rechnereinheit wertet die Unterbrechung in Echtzeit aus und aktiviert für jedes Triggersignal individuelle Unterbrechungsroutinen. Über die Unterbrechungsroutinen können angekoppelte Benutzerapplikationen in der Prozeßebene in Echtzeit von externen Ereignissen unterrichtet werden und entsprechende Reaktionen einleiten. Eine Benutzerapplikation kann auch auf mehrere externe Triggersignale reagieren. Die Zeit zwischen der Triggererfassung und dem Startzeitpunkt einer Reaktion ist determiniert und liegt im Bereich von etwa $15 \mu\text{s} \pm 1 \mu\text{s}$ ¹⁶.

In Abhängigkeit von externen Triggern werden in der Prozeßebene Kontrollsystemparameter beschrieben, die eine Transaktion des Kontrollsystems einleiten und so das Ereignis bis in die Kontrollebene hineintragen. Jedes spezielle Ereignis ist dabei durch einen separaten Kontrollsystemparameter repräsentiert (z.B. für Zyklusstart-, Rampstart-, Extraktionsstart- und Extraktionsstoppsignal). Ein Experte in der Kontrollebene leitet sie bei Bedarf an einen Teil oder alle Rechner der Prozeßebene weiter¹⁷. In der Kontrollebene können sich Applikationen über den ereignisorientierten Transaktionsmechanismus an Wertänderungen der „Timing-Parameter“ ankoppeln und auf „Timing-Ereignisse“ reagieren. Alle aktiven Softwareteile in Kontroll- und Prozeßebene können durch diesen Mechanismus mit „Timing-Ereignissen“ versorgt werden und ihren Arbeitstakt daran koppeln. Die Auslieferung von „Timing-Ereignissen“ an Applikationen der Kontrollebene ist zwar nicht determiniert, kann aber, im Fall langer Maschinenzyklen, für eine grobe Abstimmung aller aktiven Softwarekomponenten zur Lösung rechnerübergreifender Aufgabenstellungen, die gleichzeitig die Kontroll- und Prozeßebene betreffen, dienlich sein.

¹⁶Die Angabe ist typisch für die FORCE-CPU-FRC30ZBE mit einem Prozessor Motorola 68030/25 MHz.

¹⁷Werden Triggersignale relativ schnell erzeugt (z.B. mit 50 Hz), unterdrückt die Software deren Auslieferung, um eine Überlastung des Kontrollsystems zu vermeiden. Es wird nur jedes n -te Triggersignal, wobei n ein einstellbarer Parameter ist, an das Kontrollsystem weitergegeben.

5. Kontrolle, Strahldiagnose und Simulation für die Extraktion im Nachbeschleunigungsbetrieb

Die vorangegangenen Kapitel stellen die Hardware- und Softwaremittel zur Realisierung des verteilten Kontrollsystemkerns und des Systems zur Zeitablaufsteuerung aller ELSA-Betriebsmodi vor. Zur Komplettierung der Gesamtkontrolle sind weitere Bestandteile mit engem Bezug zur Beschleunigerphysik notwendig; sie ermöglichen die Realisierung des Nachbeschleunigungsmodus mit hohem makroskopischem Tastverhältnis, sowie Modellierung und Steuerung der Teilchenextraktion mit ebenfalls hohem mikroskopischem Tastverhältnis. Gemäß der in der Einleitung dargelegten Aufgabenteilung ist der Gegenstand dieser Arbeit die Entwicklung von Methoden zur Realisierung der Teilchenextraktion mit den Mitteln des neuen Kontrollsystems, wie auch deren Überprüfung durch experimentelle Untersuchungen.

Zunächst werden die an ELSA angewendeten Extraktionsmethoden besprochen, woraus sich die Steuerungsgrößen der Teilchenextraktion ergeben. Damit ein optimiertes mikroskopisches Tastverhältnis im Nachbeschleunigungsmodus erreichbar ist, bedarf es Korrekturmaßnahmen vor und während der Extraktionsphase. Die Korrekturen sind mit experimentellen Untersuchungen zu überprüfen. Verfahren und Methoden finden sich in diesem Kapitel. Die Problematik der Teilchenextraktion erfordert zusätzlich zur Überprüfung durch strahldiagnostische Untersuchungen, auch Unterstützung durch den ELSA-Simulator. Zur Unterstützung beider Punkte wurde ein System zur Messung des transversalen Phasenraums in das Kontrollsystem integriert.

Um ein gutes makroskopisches Tastverhältnis im Nachbeschleunigungsbetrieb zu erreichen, muß möglichst lange mit einer vom Experiment gewünschten Intensität extrahiert werden. Der Länge einer Extraktionsperiode ist durch den Ausgangsstrom in ELSA am Anfang der Extraktion eine Grenze gesetzt. Für eine lange Extraktionsperiode muß ein möglichst hoher Ausgangsstrom - typischerweise 50 mA bis 100 mA - bereitstehen. Ein Nachbeschleunigungsmodus mit hohem Strom ist eine Aufgabe des neuen Kontrollsystems. Aus diesem Grund wurde ein bildverarbeitendes Meßsystem für einen Synchrotronlichtmonitor als ergänzendes Instrument zur Überwachung des Hochstromverhaltens von ELSA entwickelt.

Das Zusammenwirken der Kontrollsystemkomponenten zur Einstellung der Extraktion im Nachbeschleunigungsmodus wird beschrieben.

5.1 Extraktionsverfahren

Die Extraktionszeiten im Nachbeschleunigungsmodus können eine Zeitdauer zwischen mindestens 500 msec bis ca. eine Minute (Abschnitt 1.3.3) betragen. Die Länge der Extraktionszeiten hängt von der Intensitätsanforderung der Experimente an den extrahierten Strahl ab. ELSA verwendet zwei Varianten einer grundlegenden drittelzahligen Resonanzmethode zur langsamen Strahlextraktion, welche bezüglich ihrer Steuerungsmöglichkeiten durch das Kontrollsystem beschrieben werden. Für kurze Extraktionszeiten mit hohen extrahierten Strömen wird eine langsame Resonanzextraktion verwendet, für lange Extraktionszeiten (ca. eine Minute) mit geringen extrahierten Strömen eine stochastische Resonanzextraktion eingesetzt.

5.1.1 Langsame drittelzahlige Resonanzextraktion

Die Anwendung der langsamen, drittelzahligen Resonanzextraktion auf die Verhältnisse an ELSA wurde von A.Dreist [26] durch Simulationsrechnungen geprüft. Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Verbesserung der Zeitstruktur des extrahierten Elektronenstrahls führte M.Neckenig im Rahmen seiner Dissertation [75] durch. Sie lieferte einen wesentlichen Beitrag zur Etablierung dieses Extraktionsverfahrens für den 50 Hz-Stretchermodus an ELSA. Ergebnisse aus beiden Arbeiten werden für die folgende Darstellung benutzt.

Im Fall einer langsamen Extraktion darf pro Umlauf nur ein kleiner Teil der gespeicherten Teilchen extrahiert werden. Die meisten Teilchen im Strahl sollen von der Extraktion unbeeinflusst bleiben und weiter stabil im Ring umlaufen. Die Verwendung einer Extraktionstechnik auf Grundlage einer linearen Resonanz kommt

für den Fall der sehr langsamen Extraktion nicht in Betracht, da eine lineare Resonanz den gesamten Strahl in kurzer Zeit anregt und instabil werden läßt. Damit lassen sich keine langen Extraktionszeiten erreichen. Für eine langsame Extraktion haben sich vielmehr folgende Punkte bewährt:

1. Die Resonanz wird nichtlinear gewählt, damit der Phasenraum der Bewegung in einen für die Teilchen stabilen und einen instabilen Bereich zerfällt. Separatrizen grenzen die beiden Teile des Phasenraums gegeneinander ab.
2. Ein Mechanismus wird dazu eingesetzt, Teilchen aus dem stabilen Bereich gezielt in den instabilen Bereich zu überführen.
3. Die instabil gewordenen Teilchen bewegen im Phasenraum entlang fester Bahnen (in Nähe der Separatrizen). Durch ihre Ortsänderung laufen sie auf einen Extraktionsmagneten (Septummagnet) zu, welcher die Teilchen aus dem Ring befördert, die verbleibenden Teilchen aber ungestört läßt.

Für große extrahierte Ströme im Bereich von 10 nA und darüber, wie sie das Experiment ELAN benötigt, wird die horizontale Teilchenbewegung nahe des drittelzahligen Arbeitspunkts $Q_R = \frac{14}{3}$ durch Sextupolmagnete (nichtlinear) resonanzartig angeregt. Die Teilchenbewegung, für eine feste Stelle s_0 im Ring, im normalisierten Phasenraum $(\eta(s_0), \dot{\eta}(s_0))$, in der Darstellung eines Poincaré-Schnitts, zeigt eine für diesen Fall charakteristische Dreieckstruktur (Abb. 5.1)¹, welche drei instabile Fixpunkte festlegen. Die Verbindungslinien zwischen den instabilen Fixpunkten der Bewegung heißen Separatrizen; sie begrenzen den stabilen Phasenraumbereich. Ein weiterer stabiler Fixpunkt der Bewegung befindet sich im Nullpunkt von Abbil-

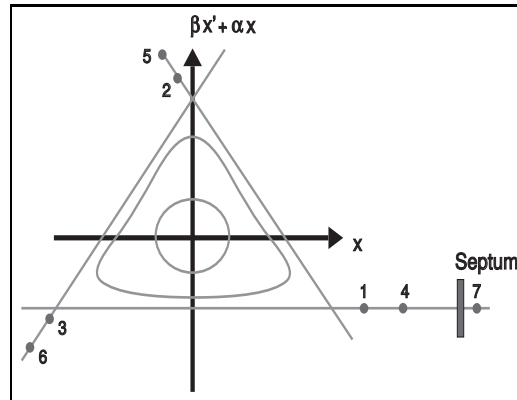


Abbildung 5.1: Normalisiertes Phasenraumbild in der Nähe der drittelzahligen Resonanz

dung 5.1 und charakterisiert ein ideales Teilchen der Emittanz Null. Im inneren Bereich der Dreiecksstruktur in Abbildung 5.1 sind die Teilchenbahnen geschlossen und bleiben stabil; die Bewegung von Teilchen mit entsprechenden Anfangsbedingungen ist gebunden. Außerhalb des Dreiecks sind die Trajektorien offen und die Teilchenbewegung ist instabil.

Die Fläche des Dreiecks F_D ist proportional zu:

$$F_D \approx \frac{\epsilon^2}{g^2}, \quad (5.11)$$

wobei $\epsilon = Q_R - Q$ den Abstand des eingestellten Arbeitspunktes Q zum Resonanzarbeitspunkt Q_R und g die eingestellte Sextupolstärke bezeichnet.

Die Wirkung nichtlinearer Magnetfelder auf ein Elektron der Ladung q in einem Beschleuniger läßt sich in einer Kicknäherung berechnen, wobei das relativistische Elektron mit Energie E von seiner ungestörten Bahnkurve durch einen Multipol der Länge L , mit $0 < l < L$, sowie dem Magnetfeld B eine Winkeländerung

¹Die lineare Bewegung eines Teilchens erscheint im normalisierten Phasenraum in der Darstellung des Poincaré-Schnitts als Kreislinie. Im Fall einer nichtlinearen Bewegung ist diese Kreislinie deformiert. Die Darstellung des Phasenraums im Poincaré-Schnitt ist diskret. Für jeweils einen Umlauf im Beschleuniger ergibt sich ein Punkt in der Figur. Die Trajektorien sind also keine zusammenhängenden Kurven, sondern stroboskopartig aus einzelnen Punkten zusammengesetzt. Nach vielen Umläufen reihen sich die Punkte im inneren Bereich der Figur so dicht aneinander, daß der Eindruck einer geschlossenen Kurve entsteht.

$dx' = \frac{dx}{dt}(L) = \frac{qc}{E}BL$ erfährt. Speziell für das Magnetfeld eines Sextupols gilt: $B_z(x) = \frac{1}{2} \frac{d^2 B_z}{dx^2} |_{z=0} x^2$, denn in einem synchrotronartigen Beschleuniger kann in guter Näherung die Abhängigkeit des Magnetfeldes von der z -Koordinate vernachlässigt werden. Damit ergibt sich für die Winkeländerung $dx' = \frac{1}{2} \frac{qc}{E} L \frac{d^2 B_z}{dx^2} |_{z=0} x^2$. Für die Sextupolstärke $g = \frac{qc}{E} \frac{d^2 B_z}{dx^2} |_{z=0}$ folgt somit:

$$dx' = \frac{1}{2} g L x^2, \quad \text{bzw. in normalisierten Koordinaten} \quad d\eta = \frac{1}{2} \beta^{\frac{3}{2}} g L \eta^2. \quad (5.12)$$

Die Wirkung eines Sextupols der Stärke g auf ein umlaufendes Teilchen mit Arbeitspunkt Q in der Nähe eines drittelzahligen Arbeitspunktes $\frac{2}{3}$ resultiert in einer periodischen Amplitudenänderung da sowie einer Phasenverschiebung $d\psi$ der Teilchenschwingung, welche eine Arbeitspunktstörung dQ bewirkt [26]:

$$da = \frac{a^2}{4} \beta^{\frac{3}{2}} g L [\sin(2\pi Q) + \sin(3 \cdot 2\pi Q)], \quad (5.13)$$

$$d\psi = \frac{a}{4} \beta^{\frac{3}{2}} g L [3 \cdot \cos(2\pi Q) + \cos(3 \cdot 2\pi Q)], \quad (5.14)$$

$$2\pi dQ = d\psi = \frac{a}{4} \beta^{\frac{3}{2}} g L \cos(3 \cdot 2\pi Q). \quad (5.15)$$

Der zweite Term in Gleichung 5.14 mittelt sich nahe einem drittelzahligen Arbeitspunkte heraus, so daß er im Ausdruck 5.15 nicht mehr auftaucht.

Der Arbeitspunkt variiert also in einem Bereich $Q_0 - \frac{a}{8\pi} \beta^{\frac{3}{2}} g L < Q < Q_0 + \frac{a}{8\pi} \beta^{\frac{3}{2}} g L$.

Ist die Störung der Teilchenbewegung durch einen Sextupol groß genug, kann die damit verbundene Arbeitspunktvariation Teilchen in den resonanten, drittelzahligen Arbeitspunkt treiben und sie instabil werden lassen. Die Bewegung von Teilchen mit bestimmten Anfangsbedingungen ist somit instabil; die auslaufenden Bahnen dieser Teilchen liegen in Nähe der Separatrixäste, Teilchen mit anderen Anfangsbedingungen bleiben stabil. Damit werden ein stabiler und ein instabiler Bereich im Phasenraum ausgezeichnet.

Das Prinzip der langsamen Resonanzextraktion wird ersichtlich: Der stabile Bereich des horizontalen Phasenraums wird kontrolliert verkleinert und die Teilchenbewegung instabil gemacht. Die Teilchen laufen entlang der Separatrixäste der charakteristischen Phasenraumfigur nach außen und werden durch einen geeignet positionierten Septummagneten extrahiert. Gemäß Beziehung 5.11 kann der stabile Phasenraumbereich sowohl durch Verringerung des Arbeitspunktabstandes zum resonanten Arbeitspunkt, als auch durch eine Vergrößerung der Sextupolstärke eingeschränkt werden.

Ein instabiles Teilchen läuft, pro Umlauf betrachtet, auf allen drei Separatrixästen nach außen. In Abbildung 5.1 ist dies durch die Abfolge der Punkte 1 bis 6 verdeutlicht. Für jeden dritten Umlauf (z.B. die Punkte 1 und 4 in Abbildung 5.1) kommt es wieder auf ein und demselben Separatrixast zu liegen. Die Änderung seiner Ortskoordinate (Sprungweite), für jeden dritten Umlauf betrachtet, muß am Septum größer sein als die Dicke des Septums, da es sonst verloren gehen würde. Die Ortsänderung zwischen Punkt 4 und Punkt 7 in Abbildung 5.1 muß also so groß sein, daß das Septum vom Teilchen „übersprungen“ werden kann. Das Verhältnis aus Sprungweite am Septum zur Dicke des Septums bestimmt die Extraktionseffizienz. Um hier die besten Resultate zu erzielen, muß einer der auslaufenden Separatrixäste relativ zum Septum möglichst einen rechten Winkel einnehmen, damit die volle Sprungweite genutzt wird (Abb. 5.1), d.h. das Septum ist entsprechend auszurichten. Durch Einengung des stabilen Phasenraumbereichs verlagern sich die auslaufenden Separatrixäste, wodurch der Emittanz des extrahierten Strahls eine untere Schranke gesetzt ist. Sie ist im wesentlichen gegeben durch die Sprungweite und den Separatrixabstand zum Anfang und Ende der Extraktion. Emittanz und Extraktionseffizienz verhalten sich also umgekehrt proportional zueinander. Ziel des Extraktionsverfahrens ist es, die Sprungweite am Septum über die gesamte Extraktionszeit möglichst klein und konstant zu halten, da für diesen Fall die Emittanz des externen Strahls am geringsten ist. Damit verbindet sich allerdings eine nur niedrige Extraktionseffizienz. Für die Einstellung der Extraktion ist also stets ein Kompromiß zwischen einer guten Extraktionseffizienz bei noch akzeptabler Emittanz des extrahierten Strahls zu suchen.

Während der Extraktion vergrößert eine Variation der Sextupolstärke die Sprungweite am Septum und bewirkt eine starke Zeitabhängigkeit der Emittanz des extrahierten Strahls über eine Extraktionsperiode. Außerdem kann die Maschine nur für den Fall einer unendlichen Sextupolstärke vollkommen geleert werden. Verkleinert man den Arbeitspunktabstand zum Resonanzarbeitspunkt, bleibt die Sprungweite davon in erster Näherung unbeeinflusst.

Deswegen wird der stabile Bereich des horizontalen Phasenraums im Fall von ELSA durch gezielte Veränderung des horizontalen Arbeitspunktes² kontrolliert eingeschränkt und die Teilchenbewegung instabil gemacht. Die Sextupolstärke wird bei diesem Verfahren konstant gehalten. Der zu überfahrende Arbeitshub ΔQ , mit dem ELSA komplett geleert wird, ist experimentell zu ermitteln.

In der Realität liegt im Beschleuniger eine Teilchenverteilung mit gaußförmiger Energiebreite um die Sollenergie E_0 vor. Die Arbeitspunktverschiebung ΔQ eines Teilchens mit einer Energieabweichung ΔE gegenüber der Sollenergie E_0 wird durch die Chromatizität C vermittelt. In linearer Näherung gilt:

$$\Delta Q = C \frac{\Delta E}{E_0}. \quad (5.16)$$

Für die Betrachtungen hier ist nur die horizontale Chromatizität C_x von Bedeutung. Die gaußförmige Energieverteilung der Teilchen wird durch eine nicht verschwindende Chromatizität in eine entsprechende Arbeitspunktverteilung überführt. Teilchen mit unterschiedlicher Energie E haben also unterschiedliche Arbeitspunkte und die Größe des stabilen Phasenraumbereichs für ein Teilchen hängt von seiner Energie ab. Im Fall einer chromatischen Maschine – wenn die Chromatizität also nicht verschwindet – kann eine Arbeitspunktänderung also auch durch Energievariation erfolgen. Um den zeitlichen Ausfall von Teilchen aus dem stabilen Bereich des Phasenraums zu steuern, besitzt man also die Möglichkeit der Arbeitspunktvariation, der Veränderung der Sextupolstärke und der Energievariation der Teilchenverteilung.

Die Chromatizität läßt sich durch spezielle Sextupolmagnetfamilien in ELSA für die horizontale und vertikale Bewegungsrichtung korrigieren.

Kopplungen

Im allgemeinen Fall können Kopplungen der drei Bewegungsrichtungen in einem Beschleuniger nicht vermieden werden. Die allgemeine Bedingung dafür lautet:

$$lQ_x + mQ_z + nQ_s = p, \quad l, m, n, p \in \mathcal{Z}. \quad (5.17)$$

Die Arbeitspunkte für die transversale und die longitudinale Bewegung sind dabei mit $Q_{x,z,s}$ bezeichnet. Die Indizes l, m, n durchlaufen ganze Zahlen und die Summe $|l| + |m| + |n|$ gibt die Ordnung der Resonanz an. Die Stärke einer Koppelresonanz nimmt mit zunehmender Ordnung stark ab, so daß im praktischen Betrieb nur die Resonanzen bis zur 5. Ordnung nennenswerten Einfluß haben [120]. Im Fall der Resonanzbedingung

$$lQ_x + mQ_z = p, \quad l, m, p \in \mathcal{Z}, \quad (5.18)$$

spricht man von reinen Betatron–Resonanzen. Kopplungen der horizontalen und der vertikalen Bewegungsrichtung sind nicht unmittelbar durch die Erfüllung der Resonanzbedingung gegeben, sondern sie werden durch unvermeidliche Justier– und Stellfehler der Magnete (besonders der Sexupole) erzeugt. Zusätzlich erzeugen auch die nichtlinearen Feldanteile der Magnete Kopplungen der Bewegungsrichtungen. Die Sextupole in einem Beschleuniger haben Feldanteile, welche eine Kopplung der horizontalen und der vertikalen Bewegungsrichtung bewirken. Die Wahl der Arbeitspunkte muß entsprechend so sein, daß die Resonanzbedingung 5.18 für den Fall einer Kopplung beider transversaler Bewegungsrichtungen nicht erfüllt ist. Insbesondere gilt dies für Q_z , da Q_x durch Einstellung der Extraktionsanfangsbedingungen festgelegt ist. Eine Bedeutung für ELSA haben auch Synchro–Betatron–Resonanzen [26][75], wie sie bei Erfüllung der Resonanzbedingung

$$lQ_x + nQ_s = p, \quad l, n, p \in \mathcal{Z}, \quad (5.19)$$

auftreten können. Synchro–Betatron–Resonanzen können z.B. durch einen nicht verschwindenden Wert der Dispersionsfunktion in den Beschleunigungsstrecken hervorgerufen werden [83]. Diese Art der Kopplung sollte im Fall von ELSA durch die Wahl der Magnetstruktur weitgehend vermieden sein, der Wert der Dispersionsfunktion beträgt in den Beschleunigungsstrecken nur ca. 2 cm.

Kandidaten für eine Synchro–Betatron–Kopplung gibt die Bedingung $3Q_x \pm nQ_s = 14$ vor. Für kleine longitudinale Energieschwingungen einer Amplitude ΔE um die Sollenergie E_0 mit der Synchrotronfrequenz

²Die Variation des horizontalen Arbeitspunktes erfolgt durch eisenlose Quadrupole [28].

f_s ergibt sich eine zeitliche Variation des Arbeitspunktes, falls die Chromatizität des Beschleunigers nicht korrigiert ist:

$$Q_x(t) = Q_{x0} + C_x \frac{\Delta E}{E_0} \sin 2\pi f_s t. \quad (5.20)$$

Das Produkt aus Arbeitspunkt Q_x und Umlauffrequenz f_0 in ELSA resultiert in der Frequenz der Betatronschwingung $f_\beta = Q_x f_0$. Die momentane Phase $\phi_\beta(t)$ der Betatronschwingung ergibt sich damit zu [75]:

$$\phi_\beta(t) = \int f_\beta dt = \int Q_x(t) f_0 dt = Q_{x0} f_0 t - C_x \frac{f_0}{2\pi f_s} \frac{\Delta E}{E_0} \cos 2\pi f_s t. \quad (5.21)$$

Die Betatronschwingungen sind also mit der Amplitude $A_s = C_x \frac{f_0}{2\pi f_s} \frac{\Delta E}{E_0}$ und der Synchrotronfrequenz f_s frequenzmoduliert, da der Phasenhub von der Modulationsfrequenz abhängt.

Für den Fall einer nicht verschwindenden Chromatizität während der Extraktion ist der horizontale Arbeitspunkt Q_x energieabhängig, d.h. die Größe des stabilen Phasenraumbereichs für ein einzelnes Teilchen hängt dann von dessen Energie ab und es sind Synchro-Betatron-Resonanzen zu erwarten. Für ELSA wird der horizontale Sollarbeitspunkt Q_x in der Nähe von $\frac{14}{3}$ eingestellt, ein typischer Synchrotronarbeitspunkt ist $Q_s = 0.01$, also nur etwa $\frac{2}{1000}$ von Q_x . Der Synchrotronarbeitspunkt Q_s ist also klein gegenüber dem horizontalen Arbeitspunkt Q_x , so daß bereits kleine Arbeitspunktänderungen von Q_x zur Erfüllung der Resonanzbedingung 5.19 führen können. Für die langsame drittelzahlige Resonanzextraktion (Arbeitspunktänderung durch Extraktionsquadrupole) wird ELSA deswegen achromatisch eingestellt, d.h. die Chromatizität wird annähernd auf Null korrigiert.

Im Fall einer achromatischen Maschine wird die Gaußverteilung der horizontalen Teilchenarbeitspunkte, welche über die Chromatizität aus der gaußförmigen Impulsverteilung entsteht, schmaler. Die Teilchenarbeitspunkte gruppieren sich enger um den Sollarbeitspunkt. In einer idealen Maschine (nur lineare Felder) hätten alle Teilchen den gleichen Arbeitspunkt und würden alle zu einem Zeitpunkt extrahiert, nämlich genau dann, wenn der resonante Arbeitspunkt eingenommen wird. Eine langsame Teilchenextraktion wäre in diesem Fall unmöglich. In der nichtlinearen Maschine, im Fall der drittelzahligen Resonanz, wird die Phasenraumverteilung der Teilchen in eine Arbeitspunktverteilung abgebildet, da die Schwingungsfrequenz abhängig von der Amplitude der Teilchenschwingung ist. In diesem Fall werden Teilchen also zeitlich nacheinander nicht mehr wegen ihrer unterschiedlichen Arbeitspunkte aufgrund der Energieverteilung, sondern nur noch wegen ihrer unterschiedlichen Emittanzen (ihrer Koordinaten im Phasenraum) extrahiert. Will man nicht den gesamten Strahl verlieren, muß die Positionierung des Extraktionsanfangsarbeitspunktes für diesen Fall besonders genau erfolgen, da sich einige Teilchen an der Stabilitätsgrenze des Phasenraums aufhalten müssen, so daß eine Arbeitspunktverteilung aufgrund der Nichtlinearität entsteht. Betriebserfahrungen zeigen, daß eine Anfangsarbeitspunktvariation von 10^{-3} die Extraktion deutlich beeinflusst.

Für die Extraktion im 50 Hz-Stretchermodus spielt die injizierte Phasenraumverteilung eine besondere Rolle, da sie die Startbedingungen der Teilchen und insbesondere die Anfangsverteilung der Teilchenarbeitspunkte $\frac{dN}{dQ}$ festlegt. Hiermit bestimmt sie allein, im Fall der achromatischen Maschine, die Zeitstruktur des extrahierten Elektronenstrahls. Die Rate der extrahierten Teilchen $\frac{dN}{dt}$ wird durch eine Arbeitspunktvariation $Q(t)$ in der Extraktion möglichst gleichmäßig gehalten. Die Arbeitspunktvariation $\frac{dQ}{dt}$ „glättet“ die Arbeitspunktverteilung $\frac{dN}{dQ}$ injizierter Teilchen und schränkt gleichzeitig den phasenstabilen Bereich ein. Die Rate der extrahierten Teilchen kann angegeben werden:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{dN}{dQ} \frac{dQ}{dt}. \quad (5.22)$$

Die Extraktionsproblematik im reinen Stretchermodus sowie die Generierung einer angepaßten Steuerkurve $Q(t)$ ist in der Dissertation von M.Neckenic ausgeführt [75].

Arbeitspunktvariation in der Extraktionsphase durch die zeitliche Ansteuerung

Die Variation des horizontalen Arbeitspunktes $Q(t)$, welche einen gleichmäßigen Teilchenausfall und damit eine konstante Teilchenrate $\frac{dN}{dt}$ am Experiment bewirken soll, wird durch zwei Paare schneller eisenloser Quadrupole [28] erreicht. Sie haben keinen Eisenkern und erzeugen die gewünschte Feldform nur aufgrund ihrer Stromverteilung. Der Maximalstrom der Netzgeräte beträgt 150 A, der maximale Stromanstieg $\frac{dI}{dt} =$

$1.5 \frac{A}{\mu s}$. Die Stromrichtung ist umkehrbar, damit sowohl fokussierende als auch defokussierende Wirkung erzielt werden kann. Auf Steigungsbeträge unterhalb von $\pm 0.5 \frac{A}{\mu s}$ reagieren die Netzgeräte ohne Verzögerung. Die beiden Paare schneller Quadrupole bewirken zusammengenommen einen maximalen Arbeitspunkthub von $\Delta Q_{lq} = 0.03$, im Fall einer Energie von 1.0 GeV. Für höhere Energien ist der maximale Arbeitspunkthub entsprechend geringer und kann durch Skalierung mit der Energie E gewonnen werden: $\Delta Q_{lq}(E) = 0.03 \cdot \frac{1.0 \text{ GeV}}{E [\text{GeV}]}$. Die Sprungantwortzeit der Luftquadrupole für eine rechteckförmige Erregung wurde gemessen; sie liegt im Bereich von ca. $100 \mu s$. Es existieren kleine Unterschiede zwischen beiden Quadrupolpaaren, welche auf unterschiedliche Kabellängen (d.h. unterschiedliche Induktivität) zwischen den Netzgeräten und den Magneten zurückzuführen sind.

Der Arbeitspunkthub ΔQ_g einer Steuerkurve $\frac{dQ}{dt}$ während der Extraktionsphase zur Leerung von ELSA wird experimentell ermittelt. Der gesamte Arbeitspunkthub ΔQ_g und die Extraktionszeit T_{ext} legen die mittlere Steigung m der Steuerkurve $\frac{dQ}{dt}$ fest: $m = \frac{\Delta Q_g}{T_{ext}} = \frac{\Delta Q_g}{T_{ext}}$. Die Steuerkurven werden in diskretisierter Form durch Steuerkurvengeneratoren appliziert. Für eine festgelegte Extraktionszeit T_{ext} kann im Fall eines minimalen Stützstellenabstandes Δt_{min} – diesen legen die verwendeten Steuerkurvengeneratoren fest – eine Steuerkurve insgesamt $n = \frac{T_{ext}}{\Delta t_{min}}$ Stützstellen enthalten. Für m gilt:

$$m = \frac{\frac{\Delta Q_g}{n}}{\Delta t_{min}} = \frac{\Delta Q_g}{n \cdot \Delta t_{min}} \quad (5.23)$$

Vom gesamten Arbeitspunkthub ΔQ_{gesamt} wird pro Stützstelle ein $\delta Q = \frac{\Delta Q_g}{n}$ gefahren. Der Arbeitspunkthub pro Stützstelle δQ ist um so geringer, je größer die Stützstellenanzahl n ist. Für zwei Stützstellenzahlen n_1 und n_2 ergibt sich folgendes Verhältnis bei gleichen Arbeitspunkthüben ΔQ_1 und ΔQ_2 :

$$\frac{\delta Q_1}{\delta Q_2} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (5.24)$$

Bleibt der Arbeitspunkthub pro Stützstelle (bzw. der entsprechende Stromhub) unterhalb der Schwelle, bei der das Netzgerät noch instantan folgen kann ($\frac{dI}{dt}_{max} = \pm 0.5 \frac{A}{\mu s}$), so wird die mittlere Steigung $m = \frac{\Delta Q_g}{T_{ext}}$ über die gesamte Extraktionszeit gut einhalten. Anderenfalls kann das Netzgerät wegen seiner begrenzten Sprungantwortzeit nicht instantan folgen und die Steigung der Arbeitspunktkurve variiert zwischen jeweils zwei Stützstellen, was zu einer Modulation im extrahierten Elektronenstrom führt³. Abbildung 5.2 zeigt

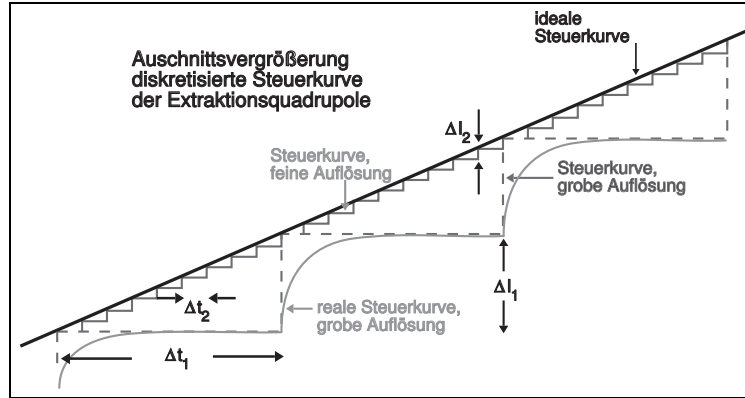


Abbildung 5.2: Ansteuerung der schnellen Extraktionsquadrupole

diese Situation für zwei unterschiedliche Stützstellenabstände Δt_1 (grobe Auflösung), $\Delta t_2 = \frac{\Delta t_1}{l}$ (feine Auflösung) und damit verbundener Stromänderungen $\Delta I_1, \Delta I_2 = \frac{\Delta I_1}{l}$, wobei l eine ganze Zahl darstellt. Δt_1 liegt im Bereich der Sprungantwortzeit der Netzgeräte; der geforderten rechteckförmigen Stromänderung ΔI_1 kann das Netzgerät nicht unmittelbar folgen. Δt_2 ist gegenüber Δt_1 untersetzt, das Netzgerät kann unmittelbar folgen und die mittlere geforderte Steigung m somit gut einhalten. Der Stützstellenabstand Δt_s sollte sich also so minimal wie möglich gestalten. Zur Vermeidung des beschriebenen Effektes werden besondere Steuerkurvengeneratoren eingesetzt, die im Abschnitt 5.4 beschrieben sind.

³Die Modulation aufgrund der Ansteuerung läßt sich im Spillsignal des Experiments ELAN nachweisen.

5.1.2 Stochastische Resonanzextraktion

Für niedrige extrahierte Ströme, wie sie für das Experiment SAPHIR notwendig sind, wird eine HF-unterstützte stochastische Resonanzextraktion verwendet, welche lange Extraktionszeiten bis zu einer Minute ermöglicht. Für den Fall nicht verschwindender Chromatizität kann eine Variation der Teilchenenergie eine Arbeitspunktverschiebung bewirken und Teilchen instabil werden lassen. Die bisherige Erklärung läßt den Prozeß in zwei Stufen ablaufen⁴. Zunächst wird der longitudinale Phasenraum durch Verkleinerung der Hochfrequenzamplitude eingeschränkt, so daß Elektronen einer Energie E_0 , die durch Synchrotronlichtabstrahlung eine ausreichende Impulsänderung $\Delta p = \frac{\Delta E}{c}$ erhalten, den stabilen Teil des Phasenraums zu verlassen. Die relative Energieänderung $\frac{\Delta E}{E_0}$ eines Elektrons wird durch die Chromatizität C_x in den horizontalen Phasenraum transportiert und bewirkt dort eine Arbeitspunktänderung

$$\Delta Q_x = C_x \frac{\Delta E}{E_0}. \quad (5.25)$$

Finden viele Emissionsakte schneller als eine Synchrotronerschwingung hintereinander statt, kann die Schwingungsamplitude eines Teilchens, sowie seine Abweichung von der Sollenergie und somit seine Arbeitspunktabweichung, abgebildet über die Chromatizität, so groß werden, daß es in die horizontale, drittelzahlige Resonanz befördert wird. Der horizontale Arbeitspunkt Q_x und die Chromatizität C_x müssen so gewählt sein, daß die durch Energieänderung und Chromatizität vermittelte Arbeitspunktänderung ΔQ_x Elektronen in die drittelzahlige Resonanz laufen läßt. Die Extraktion aus ELSA erfolgt im horizontalen Phasenraum. Damit die extrahierte Teilchenrate aus den Hochfrequenzbuckets möglichst konstant während der gesamten Extraktionsphase bleibt, muß dessen stabile Fläche beeinflusst werden. Die Teilchenbewegung im longitudinalen Phasenraum läßt sich durch einen Satz von Gleichungen beschreiben:

$$\psi_s = \pi - \arcsin \left(\frac{U_0}{V_c} \right) \quad (5.26)$$

$$\left(\frac{\Delta E}{E_0} \right)_{max} = \sqrt{\frac{2eV_c}{\pi\alpha h} \left(\cos \psi_s + \left(\psi_s - \frac{\pi}{2} \right) \sin \psi_s \right)} \quad (5.27)$$

$$Q_s = \frac{\omega_{s0}}{\omega_0} = \sqrt{\frac{eV_c\alpha h \cos(\psi_s)}{2\pi E_0}} \quad (5.28)$$

Die Gleichungen zeigen den Zusammenhang zwischen den Parametern der Hochfrequenz, die Resonatorspannung V_c sowie die Frequenz f_{hf} über die Harmonischenzahl $h = \frac{f_{hf}}{f_0}$ und der Strahlenergie E_0 . Daraus ergeben sich korrespondierende Größen: der Phasenwinkel des synchronen Teilchens ψ_s , die Buckethöhe $\left(\frac{\Delta E}{E_0} \right)_{max}$ und der Synchrotronarbeitspunkt Q_s .

Für die Nachbeschleunigung wird das HF-System mit den zwei Resonatoren vom PETRA-Typ, welche aus einem Klystron gespeist werden, eingesetzt. Die Resonatorspitzenspannung V_c wird indirekt über eine Ansteuergröße am vorhandenen Klystron variiert. Die Kennlinie zwischen Ansteuergröße und tatsächlich vorhandener Resonatorspitzenspannung verhält sich nichtlinear. Die konkrete Kennlinie hängt an weiteren Faktoren (z.B. der Versorgungsspannung des Klystrons, Wirkungsgrad des Klystrons, Shuntimpedanz der Resonatoren etc.) und ist für das HF-System mit den PETRA-Resonatoren nicht genau bekannt. Die Klystronansteuerung wird so reduziert, daß ein möglichst gleichmäßig extrahierter Elektronenstrahl beobachtet werden kann.

Die Reduzierung der Resonatorspitzenspannung bewirkt eine Schrumpfung der longitudinalen Separatrix, was einen Teilchenausfall aus dem Bucket bewirkt. Dieser Vorgang ist nicht stochastisch, sondern die Teilchen, welche sich im Bereich außerhalb der stabilen Restbucketfläche befinden, werden „abgeschält“ und extrahiert.

Die Reduzierung der Resonatorspitzenspannung darf also nur langsam geschehen, damit die Teilchen im Randbereich überwiegend aufgrund des Energieverlustes durch die Synchrotronlichtabstrahlung extrahiert werden und nicht wegen der Schrumpfung des Hochfrequenzbuckets. Die Rate ausgefallener Teilchen $\frac{dN}{dt}$ wird durch die Teilchendichte im Randbereich bestimmt. Durch die Extraktion nimmt die Teilchendichte

⁴Im Vorgriff auf den Ergebnisteil der vorliegenden Arbeit und Untersuchungen in [114] soll hier bemerkt werden, daß die folgende Erklärung nur eine Näherung sein kann und vorläufigen Charakter hat.

im Randbereich des Buckets ab. Die Entvölkerung des Randbereichs wird zum Teil durch Diffusion aus dem Bereich höherer Teilchendichte ausgeglichen. Reicht dies nicht aus, um einen konstanten extrahierten Strom sicherzustellen, wird zusätzlich die Resonatorspitzenspannung langsam reduziert. Das bedeutet, daß diese Extraktionsmethode nicht vollständig sondern nur zum überwiegenden Teil stochastisch verläuft.

5.1.3 Allgemeine Problematik der Extraktion im Nachbeschleunigungsmodus

Im reinen Stretchermodus existieren theoretische und experimentelle Untersuchungen zur drittelzahligen Resonanzextraktionsmethode bis zu einer Energie von 1.8 GeV; die Extraktionszeiten betragen hier rund 20 ms [75]. In dieser Betriebsart spielt vor allem die in ELSA injizierte Phasenraumverteilung im Zusammenspiel mit dem horizontalen Anfangsarbeitspunkt Q_x , der Sextupolstärke und dem Arbeitspunkthub ΔQ der schnellen Extraktionsquadrupole die entscheidende Rolle. Die Extraktionsperiode T_{ext} ist klein im Vergleich zur Dämpfungszeit der Teilchenschwingung in den drei Bewegungsrichtungen τ_x, τ_z, τ_s ; in guter Näherung gilt: $2\tau_s = \tau_x = \tau_z$. (siehe Gleichungen 4.10 und Tabelle 4.1 in Abschnitt 4.1). Die Teilchenextraktion erfolgt im wesentlichen aus dem nicht abgedämpften Strahl heraus. In guter Näherung kann die Extraktionseffizienz konstant für eine Extraktionsperiode von 20 ms angesehen werden. Das mikroskopische Tastverhältnis des extrahierten Strahls wird im wesentlichen durch das Tastverhältnis der ELSA-Füllstruktur vorgegeben. Stromabhängige Effekte (z.B. der Arbeitspunkte von der Intensität) sind für die reine Stretcherbetriebsart nicht zu berücksichtigen.

Im Nachbeschleunigungsbetrieb ist der Strahl zu Anfang der Extraktion abgedämpft. Unter Vernachlässigung aller Wechselwirkungen des Strahls mit der umgebenden Kammerwand und der Elektronen untereinander, entsprechen die Emittanzen der drei Bewegungsrichtungen den natürlichen Emittanzen, welche sich aus dem Gleichgewicht von Strahlungsdämpfung und Strahlungsanregung aufgrund der Synchrotronlichtabstrahlung ergeben. Die Extraktionsanfangsbedingungen im Nachbeschleunigungsbetrieb sind, hinsichtlich der Anfangsverteilung der Teilchen im horizontalen Phasenraum, im Vergleich zum reinen Stretchermodus unterschiedlich. Da die Schwingungsamplituden der Teilchen abgedämpft sind, läßt dies erwarten, daß der Extraktionsanfangsarbeitspunkt näher am resonanten Arbeitspunkt liegen kann.

Die anvisierten Extraktionszeiten im Nachbeschleunigungsbetrieb liegen im Fall des Experiments ELAN um ca. zwei Größenordnungen und im Fall von SAPHIR sogar um drei Größenordnungen über den Verhältnissen im reinen Stretchermodus. Das Verhalten der Extraktionseffizienz über lange Extraktionsperioden (im Sekundenbereich) ist eine Fragestellung, die experimentell zu untersuchen ist.

Die Mittlere Energiephysikexperimente benötigen einen externen Elektronenstrom I_{ext} bestimmter Intensität, so daß in begrenzter Meßzeit eine geforderte Ereignisstatistik zur Festlegung einer Reaktion erreicht werden kann. Wie in Abschnitt 1.3.3 ausgeführt, erweist sich dazu ein entsprechender Anfangsstrom I_{start} für die Extraktion als notwendig. Für eine vorgegebene Extraktionszeit T_{ext} und eine mittlere Extraktionseffizienz ϵ kann der Strom zum Extraktionsanfangszeitpunkt angegeben werden:

$$I_{start} = \frac{1}{\epsilon} \frac{T_{ext}}{T_{elsa}} I_{ext}.$$

T_{elsa} bezeichnet dabei die Umlaufzeit der Teilchen in ELSA. In Abschnitt 1.3.3 zeigte eine Beispielrechnung, daß Anfangsströme I_{start} bis zu 100 mA akkumuliert, gespeichert, nachbeschleunigt und über lange Zeiten zur Extraktion gebracht werden müssen. Dieses ist zusammen mit einem großen makroskopischen Tastverhältnis zu erreichen. Im Nachbeschleunigungsbetrieb mit hohen Strömen müssen stromabhängige Effekte erwartet werden, welche durch Wechselwirkung elektromagnetischer Felder des Strahls mit der leitenden Kammerwand entstehen. Besonders ist mit kohärenten Arbeitspunktverschiebungen ΔQ_I in Abhängigkeit vom gespeicherten Strahlstrom I

$$\Delta Q_I \approx I \frac{\overline{\beta(s)}}{\gamma},$$

welche defokussierend wirkt, zu rechnen [46][82]. Dabei bezeichnet $\overline{\beta(s)}$ den über die Ringlänge gemittelten Wert der Betafunktion. Die Extraktionsbedingungen, besonders der Anfangsarbeitspunkt Q_{start} , sind für eine bestimmte Anfangsstromstärke optimiert. Variiert der Strom I_{start} am Anfang der Extraktion von Zyklus zu Zyklus, bedeutet das eine Variation des Anfangsarbeitspunktes ΔQ_{start} . Die Extraktionsanfangsbedingungen sind dann nicht mehr optimal und es könnte zu einem Strahlausfall kommen oder der Extraktionsvorgang setzt erst zu spät ein, wodurch sich das makroskopische Tastverhältnis verschlechtert. Weiter

würde die Stromstärke im Lauf der Extraktionsperiode abnehmen und damit auch die Wirkung auf den Arbeitspunkt. Der Arbeitspunktverlauf während der Extraktion wäre demnach abhängig von der noch in ELSA gespeicherten Stromstärke: $Q = Q(I)$. Der durch stromabhängige Arbeitspunktverschiebungen überfahrene Arbeitspunktbereich kann die allgemeine Resonanzbedingung 5.17 für eine gekoppelte Bewegung erfüllen und einen unkontrollierten Strahlausfall bewirken sowie die Extraktionsbedingungen insgesamt ändern, so daß ein reproduzierbarer Extraktionsbetrieb nur schwer möglich wäre.

Der in ELSA umlaufende Elektronenstrom induziert eine Spannung in den Beschleunigungsstrecken, welche der angelegten Beschleunigungsspannung entgegenwirkt („beam loading“). Die Stromabnahme innerhalb der Extraktionsperiode verringert das „beam loading“ in den Beschleunigungsstrecken, so daß die effektive Beschleunigungsspannung anwächst, was wiederum eine Vergrößerung der Synchrotronfrequenz und damit ein Anwachsen des Synchrotronarbeitspunktes Q_s bewirkt. Im Fall der stochastischen Resonanzextraktion ist die Chromatizität nicht kompensiert und Synchro-Betatron-Resonanzen können dadurch angeregt werden. Die Situation ist dadurch noch erschwert, daß die Beschleunigungsspannung V_c in der Extraktionsphase reduziert werden muß, um einen gleichmäßigen Teilchenausfall herbeizuführen. Die Reduzierung der Beschleunigungsspannung V_c erniedrigt den Synchrotronarbeitspunkt $Q_s \propto \sqrt{V_c}$ (Gleichung 5.28) und arbeitet der Synchrotronarbeitspunkterhöhung durch Intensitätsverlust in der Extraktionsphase entgegen.

Eine implizite Arbeitspunktvariation durch die dynamische Ansteuerung der schnellen Extraktionsquadrupole – wie oben beschrieben – muß vermieden werden. Das erfordert eine möglichst feine Auflösung der Ansteuerkurve, welche durch besondere Funktionsgeneratoren geleistet wird, die in Abschnitt 5.4 beschrieben sind.

5.1.4 Konzeption der Extraktionssteuerung im Nachbeschleunigungsmodus

Die Zeitablaufsteuerung definiert die Extraktionsphase im Gesamtzyklus. Die Extraktionsvorbereitungsphase ist Schnittstelle zwischen Rampphase und Extraktionsphase; hier findet die Übergabe des Strahls an die Extraktion statt. Die stabile Maschineneinstellung der Rampphase, wie sie für einen verlustfreien Transport des Strahls von der Injektionsenergie auf die Extraktionsenergie notwendig ist, wird hier gezielt verändert und in einen Bereich überführt, der bereits nahe an den Extraktionsanfangsbedingungen liegt⁵.

Die neue Injektionszeitsteuerung, welche im Abschnitt 4.3 ausgeführt wurde, sorgt in der Injektionsphase für eine homogene ELSA-Füllstruktur; hiermit sollte die Füllstruktur keine Limitierung des mikroskopischen Tastverhältnis für die Extraktion im Nachbeschleunigungsbetrieb mehr darstellen.

Zur Einstellung der Maschinenoptik in der Rampphase und zur Generierung von Steuerkurven für die ELSA-Hauptmagnete dient der **booster-Experte** [38]. Das Bedienungsfenster des **booster-Experten** zeigt Abbildung 5.3. Anfangs- und Endbedingungen der Rampphase lassen sich konfigurieren. Bestimmende Parameter für den Start der Extraktion stellen die Anfangsarbeitspunkte, die Stärke der Extraktionssextupole sowie die horizontale Chromatizität dar. Im Fall der langsamen Resonanzextraktion wird ELSA nahezu achromatisch gefahren; die horizontale Chromatizität ist entsprechend in der Nähe von Null einzustellen. Im Fall stochastischer Resonanzextraktion wird ELSA mit natürlicher Chromatizität betrieben. Die Stärke der Chromatizität in der Extraktionsphase wird durch die Steuerkurve für die F-Sextupole festgelegt. Eine entsprechende Einstellung des **booster-Experten** ist vom Anwender vorzunehmen.

Die Festlegung des horizontalen Extraktionsanfangsarbeitspunktes Q_{start} geschieht in zwei Schritten:

1. Die fokussierenden Quadrupole von ELSA werden am Ende der Rampphase auf einen Wert gefahren, welcher den horizontalen Arbeitspunkt Q_x bereits in die Nähe des resonanten Arbeitspunktes Q_R positioniert. Q_x muß so gewählt werden, daß kein direkter Strahlausfall stattfindet. Der vertikale Arbeitspunkt Q_z wird so eingestellt, daß die Bedingung 5.18 für eine Koppelresonanz nicht gegeben ist.
2. Zur Feinjustierung werden die schnellen Extraktionsquadrupole hinzugezogen. Deren Wirkung ist jedoch begrenzt. Für $E = 2.3$ GeV z.B. kann ein Gesamtarbeitspunkthub von etwa 0.013 abgedeckt werden, wobei der größte Teil dieses Bereichs für die Extraktionsphase selbst zur Verfügung stehen muß⁶.

⁵Die Gesamteinstellung muß noch experimentell gefunden werden.

⁶Der verfügbare Arbeitspunkthub für höhere Energien ist entsprechend geringer. Gegebenenfalls müßten in Zukunft weitere schnelle Quadrupole zur Vergrößerung des effektiven Arbeitspunkthubs in ELSA eingebaut oder die vorhandenen Quadrupole mit stärkeren Netzgeräten ausgerüstet werden. Die experimentellen Untersuchungen im Einstellbetrieb des Nachbeschleunigungsmodus müssen dies zeigen.

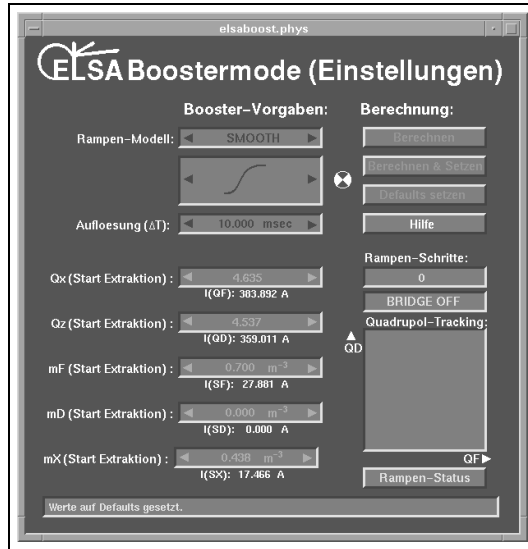


Abbildung 5.3: Bedienungsfenster des booster-Experten

Umso wichtiger ist die genaue Positionierung des Anfangsarbeitspunktes durch die fokussierenden Quadrupole von ELSA. Die Genauigkeit muß im Bereich 10^{-3} liegen, damit die Extraktionsquadrupole nur noch kleine Korrekturen des Arbeitspunktes ΔQ_{corr} leisten müssen.

Der Startarbeitspunkt Q_{start} ergibt sich als Summation beider Einstellungen: $Q_{start} = Q_x + \Delta Q_{corr}$.

Die Stärke der Extraktionssextupole wird in der Extraktionsvorbereitungsphase vom Wert Null auf den Extraktionswert gefahren und dann für die Extraktionszeit konstant gehalten. Am Ende der Extraktionsphase werden sie in ihrer Wirkung zurückgenommen, damit die nachfolgende Injektionsphase unbeeinflusst bleibt.

Die Ansteuerung der Extraktionsquadrupole für die langsame Resonanzextraktion sowie die Spitzenspannung der Beschleunigungsstrecken für die stochastische Resonanzextraktion werden durch das Rampstoppsignal t_{rstop} der Zeitablaufsteuerung aktiviert (Abschnitt 4.2).

Resonanzextraktion:

Die schnellen Extraktionsquadrupole brauchen nur in der Extraktionsvorbereitungsphase und der Extraktionsphase selbst aktiv zu sein. In der Extraktionsvorbereitungsphase fahren sie den Extraktionsstartarbeitspunkt Q_{start} an. In der eigentlichen Extraktionsphase wird der Kurvenverlauf so gewählt, daß ein gleichmäßiger Teilchenausfall am Experiment zu beobachten ist. Nach Abschluß der Extraktionsphase werden sie in ihrer Wirkung auf den Wert Null zurückgefahren.

Die Ansteuerung der Hochfrequenz ist entweder konstant oder so gewählt, daß das schwächere „beam loading“ in den Resonatoren aufgrund des Strahlverlustes ausgeglichen wird und der Synchrotronarbeitspunkt Q_s in etwa konstant gehalten werden kann.

Stochastische Resonanzextraktion:

Die Ansteuerung der Hochfrequenz erstreckt sich vom Rampstoppsignal ausgehend über den gesamten Maschinenzyklus. Es wird nicht nur die Extraktion beeinflusst, sondern auch in der Rampphase von Injektionsenergie auf Extraktionsenergie werden Maßnahmen zur Stabilisierung der longitudinalen Strahldynamik ausgeführt. Die damit verbundene Problematik in der Rampphase und die Verhältnisse an ELSA beschreibt T.Götz in seiner Arbeit [38].

Zur Festlegung des Anfangsarbeitspunktes Q_{start} werden – wie im Fall der langsamen Resonanzextraktion – die schnellen Extraktionsquadrupole eingesetzt.

Die Wahl der Beschleunigungsspannung wird in der Nachbeschleunigungsphase so gewählt, daß ein Strahlverlust vermieden werden kann. Im allgemeinen wird dieser Wert höher sein, als er für die stochastische Resonanzextraktion gebraucht wird. In der Extraktionsvorbereitungsphase wird die Ansteuerung soweit reduziert, daß dem Experiment beim Extraktionsstart eine genügend hohe Strahlintensität zur Verfügung gestellt werden kann.

In der Extraktionsphase muß die Hochfrequenzansteuerung langsam reduziert werden, so daß ein gleichmäßiger Teilchenausfall erfolgen kann.

Zur Stabilisierung des horizontalen Arbeitspunktes in der Extraktionsphase werden die Extraktionsquadrupole eingesetzt, da ein Wandern des horizontalen Arbeitspunktes in Abhängigkeit des noch zirkulierenden Strahlstroms erwartet wird. Die Maßnahme erweist sich als notwendig, damit die Grundvoraussetzung für eine gleichmäßige Extraktionsrate gegeben ist und nicht durch Arbeitspunkt wandern Resonanzbedingungen für Kopplungen erfüllt werden.

Die Injektionsphase muß für den Nachbeschleunigungsmodus darauf optimiert sein, einen bestimmten akkumulierten Strom mit einer festgelegten Schußzahl des Synchrotrons zu erreichen. Dies setzt voraus, daß ELSA vor der Injektionsphase vollständig geleert ist. Eine nicht vollständig geleerte Maschinen am Ende eines Zyklus bedeutet einen zusätzlichen Anfangsstrom, auf den in der Injektionsphase akkumuliert wird. Das kann einen erhöhten Gesamtstrom für den nächsten Zyklus bewirken. Davon sind sowohl Rampphase als auch Extraktion negativ betroffen, da sie für eine bestimmte ELSA-Intensität optimiert sind. Besonders die Extraktionsanfangsbedingungen können, wegen vermuteter stromabhängiger Effekte, variieren. Das Kontrollsystem sieht dafür zwei Korrekturmaßnahmen vor, welche den Gesamtbetrieb stabilisieren und die Reproduzierbarkeit erhöhen sollen:

1. Die Hochfrequenzansteuerung läßt sich nach der Extraktionsphase soweit reduzieren, daß der Teilchenstrahl nicht mehr in ELSA gehalten werden kann; die Anfangsbedingungen für den nächsten Zyklus sind somit präpariert.
2. Der entwickelte Injektionsgenerator enthält eine Stromüberwachung, welche den akkumulierten Strom in der Injektionsphase nicht über ein bestimmte Schwelle ansteigen läßt. Die Stromüberwachung unterbricht in diesem Fall die laufende Injektion. Eine genaue Funktionsbeschreibung der Stromüberwachung als Bestandteil des Injektionsgenerators ist im Abschnitt 4.3 zu finden.

In der Injektionsphase ist vorgesehen, die Hochfrequenzanlage mit einem einstellbaren, aber konstanten Pegel anzusteuern. In der Nachbeschleunigungsphase kann die Ansteuerung der Hochfrequenzanlage entweder konstant oder linear ansteigend erfolgen. Physikalisch gestaltet sich die lineare Ansteuerung in der Nachbeschleunigungsphase problematisch, da die longitudinale Teilchendynamik nur zum Teil stabilisierbar ist. Es kommt zu Schwankungen des Synchrotronarbeitspunktes Q_s , dadurch kann die allgemeine Resonanzbedingung 5.17 erfüllt sein.

Einen beispielhaften Verlauf der dynamischen Ansteuerung der Extraktionselemente zeigt Abbildung 5.4. Den Energieverlauf beschreibt $E(t)$, die Injektionsenergie E_{inj} sowie die Extraktionsenergie E_{ext} sind markiert. Den Steuerkurvenverlauf der Extraktionsquadrupole beschreibt $Q_{ex}(t)$, den Verlauf der Hochfrequenzansteuerung A_{hf} . Die dynamische Ansteuerung der fokussierenden Quadrupole ist mit Q_x bezeichnet, die Ansteuerung der Extraktionssextupole mit m_{ex} . Die damit verbundenen Steuerkurven werden von

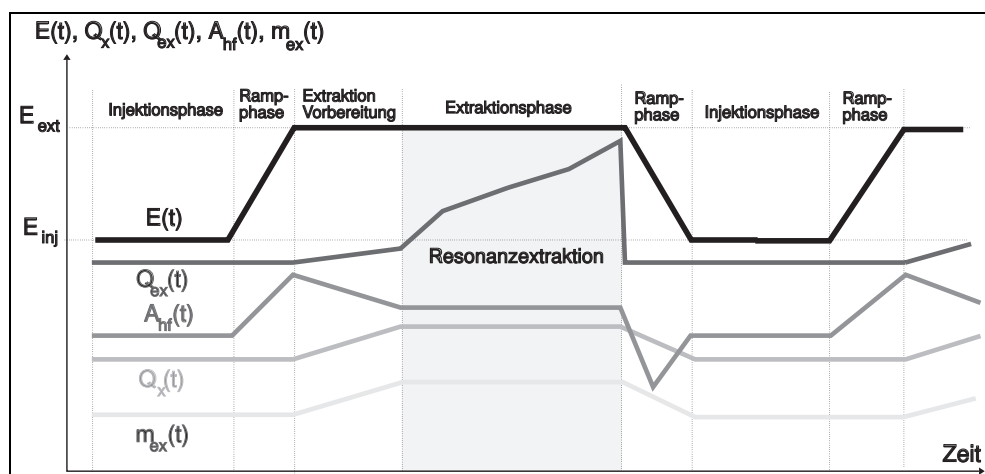


Abbildung 5.4: Beispielhafter Verlauf der dynamischen Ansteuerung der Extraktionselemente

Funktionsgeneratoren ausgegeben. Zur Berechnung von Steuerkurven für die Extraktionsquadrupole und die

Ansteuerung der Hochfrequenz, wurde das EPOS-Programm `accmenu.epf` entwickelt, das nach interaktiver Eingabe die Berechnung der Steuerkurven ausführt und deren Übermittlung – durch Schreibtransaktionen des Kontrollsystems – an die vorgesehenen Funktionsgeneratoren vornimmt. Zur Generierung von Steuerkurven sind alle EPOS-Werkzeuge zur digitalen Signalverarbeitung, Glättungsalgorithmen etc. verwendbar.

Zur erleichterten Einstellung von Standardsteuerkurven durch die Anwender wurden zwei Experten konstruiert, welche die wichtigsten Werkzeuge kapseln und die Generierung notwendiger Steuerkurven vornehmen:

1. Der `lqcycle`-Experte generiert die Steuerkurven für die schnellen Extraktionsquadrupole. Sein Bedienungsfenster zeigt Abbildung 5.5. Zur Zeit sind für die Extraktionsvorbereitungsphase sowie für die Extraktion eine lineare und eine arcuskosinusförmige Steuerkurve einstellbar. Die Arbeitspunkthübe in der Extraktionsvorbereitungsphase sowie der Extraktionsphase sind konfigurierbar.
2. Die Steuerkurven zur Variation der Resonator-Spitzenspannung V_c in den Beschleunigungsstrecken berechnet der `hfcycle`-Experte, dessen Bedienungsfenster entsprechend dem Bedienungsfenster des `lqcycle`-Experten aufgebaut ist. Zur Zeit wird noch an der Komplettierung des Funktionsumfangs des `hfcycle`-Experten und seines Bedienungsfensters entwickelt.

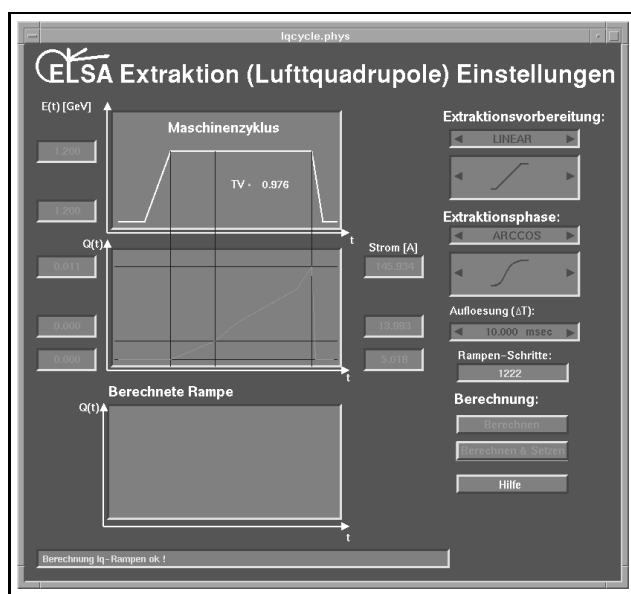


Abbildung 5.5: Bedienungsfenster des `lqcycle`-Experten

Durch die drei Experten `booster`, `lqcycle` und `hfcycle` stellt das Kontrollsystem die Werkzeuge zur Einstellung des Nachbeschleunigungsmodus bereit. Der Nachbeschleunigungsmodus läßt sich mit diesen Werkzeugen durch die Bedienungsfläche interaktiv konfigurieren und aktivieren.

Zukünftige Ideen und Verfahrensweisen, die z.B. durch theoretische Untersuchungen und Vorhersagen auf Grundlage des ELSA-Simulators entstehen, können unmittelbar in das vorhandene Instrumentarium eingebaut werden.

5.2 Generierung von angepaßten Extraktionssteuerkurven

Die Extraktionszeiten im Nachbeschleunigungsmodus überstreichen eine Zeitdauer zwischen 500 msec und ca. einer Minute. Die reproduzierbare Einstellung, wie auch die zeitgenaue Ansteuerung und Kontrolle des physikalischen Extraktionsmodells muß sichergestellt sein, damit für hohe Anfangsströme im Bereich von 100 mA ein gleichmäßiger Primärstrahl an die Experimente abgegeben werden kann.

Für eine Extraktion mit diesen Anfangsströmen und über lange Extraktionszeiten werden störende Effekte (siehe Abschnitt 5.1.3) erwartet, welche die Stabilität des Extraktionsverfahrens einschränken können. Wird für die Steuerung der Extraktion eine feste Steuerkurve (z.B. eine lineare Kurve für die Steuerung der Beschleunigungsspannung im Fall der stochastischen Resonanzextraktion) vorgegeben, so kann sie mit großer

Wahrscheinlichkeit nicht für alle Bereiche der Extraktionsphase optimal sein, d.h. es sind Intensitätsmodulationen im extrahierten Strahl zu erwarten. Die Intensitätsmodulationen können die Strahlintensität am Experiment über eine bestimmte Schwelle anwachsen lassen, was dann zum Ausfall einer Detektorkomponente (z.B. die zentrale Driftkammer des SAPHIR-Detektors) oder einer Übersteuerung der Tagging-Anordnung führen kann. Wünschenswerter wäre hier die unmittelbar an den Extraktionsvorgang gebundene Generierung der Steuerkurve durch einen Regler. Dem Regler könnte ein Spillsignal des Experiments zugeführt werden, woraus er dann „on line“ die entsprechende Ansteuerkurve erzeugt.

Die Generierung eines „on line“-Modells der Extraktion durch einen Simulator, aus dem dann die Steuergrößen unmittelbar für die Extraktion abgeleitet werden, scheidet sicherlich aus, da die notwendigen Berechnungen eine zu große Zeit benötigen. Aber angenommen, die Berechnungen würden schnell genug ausgeführt, so kann ein Simulator nur bekannte Phänomene berücksichtigen, noch nicht berücksichtigte physikalische Phänomene, welche die Extraktion stören, verfälschen das Modell. Klassische Reglerverfahren haben den Nachteil, daß ihre Parameter aus der Sprungantwort des zugrundeliegenden Systems zu bestimmen sind. Dieser Fall ist für die Extraktion nicht ausführbar.

Am günstigsten ist ein Verfahren, welches nur minimale Annahmen über den zu steuernden Prozeß macht sowie sein Reglerverhalten unmittelbar aus dem Verlauf der Extraktion ableiten kann, sich somit an schwankende Extraktionsverhältnisse (bzw. Störungen) anpaßt und sich dabei selbst durch Anpassung seiner Parameter optimiert. Ein selbstoptimierender oder adaptiver Regler kann die Kontrolle des Extraktionsvorgangs

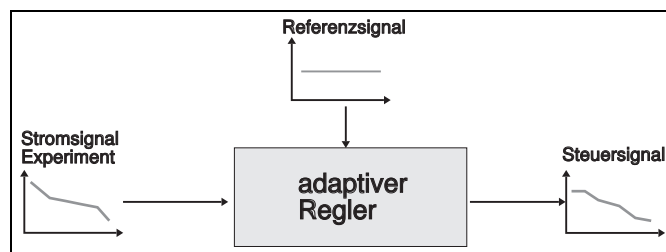


Abbildung 5.6: Kontrolle der langsamen Extraktion

übernehmen, indem ihm ein dem Spillsignal des Experiments proportionales Gleichspannungssignal zugeführt wird und er mit dieser Angabe „on line“ die Generierung der notwendigen Ansteuerkurven übernimmt. Der Gedankengang ist in Abbildung 5.6 dargestellt. Als Referenzgröße wird dem adaptiven Regler ein konstantes Signal zugeführt. Die Steuerkurve paßt der Regler so an, daß das gemessene Spillsignal und das Referenzsignal übereinstimmen – also vom Regler ein glattes Spillsignal erzeugt wird. Für den Fall der stochastischen Resonanzextraktion würde auf diese Weise die Ansteuerkurve der Hochfrequenzanlage generiert, für den Fall der Resonanzextraktion würde der Regler die schnellen Extraktionsquadrupole steuern.

Die Implementierung eines Reglerverfahrens für die Extraktion wurde auf der Basis linearer zeitinvarianter Systeme ausgeführt. Die dazu notwendigen Methoden der digitalen Signalverarbeitung werden im anschließenden Abschnitt 5.3 dargestellt. Diese Methoden werden auch für die Bearbeitung und die Analyse der Meßdaten aus den Strahldiagnosesubsystemen eingesetzt. Ausgangspunkt sind diskrete, lineare Systeme, welche die Grundlage für die Realisierung digitaler Filter mit konstanten Koeffizienten sind. Adaptive Regler lassen sich auf Basis von adaptiven, digitalen Filtern entwickeln, welche eine Verallgemeinerung der digitalen Filter mit konstanten Koeffizienten darstellen.

5.3 Methoden der digitalen Signalverarbeitung

Alle Meßdaten aus den Strahldiagnosesubsystemen im ELSA-Kontrollsystem werden durch Analog-Digital-Wandlung aus kontinuierlichen Signalen gewonnen und mit Methoden der digitalen Signalverarbeitung in den Subsystemen selbst oder im EPOS-System, analysiert und weiterverarbeitet.

Für Untersuchungen zur Verifikation der ELSA-Füllstruktur und für Untersuchungen zur Bewertung einer Extraktionseinstellung mit Hilfe von Experimente-Spillsignalen wurden Werkzeuge zur digitalen Signalverarbeitung im Zeit- und Frequenzraum erstellt. Die eingesetzten Methoden zur digitalen Signalverarbeitung sollten nicht von vornherein auf eine bestimmte Aufgabenstellung festgelegt sein, sondern universell kombinierbare Werkzeuge zur Lösung von typischen Aufgabenstellungen darstellen. Sie sollen somit ein breites

Spektrum von Anwendungsfällen abdecken, indem sie auf eine allgemeine Klasse von digitalen Signalen anwendbar sind.

Die Theorie diskreter Systeme ist Grundlage der digitalen Signalverarbeitung. Einführungen, die neben der Systemtheorie auch den Entwurf von digitalen Filtern beinhalten, werden z.B. in [50][55][85][98][99] gegeben. Speziell die Problematik von digitalen Filtern ist in [44][89] ausführlich behandelt; umfassende Darstellungen zur Systemtheorie finden sich in [32][106]. Auf diesen Grundkonzepten aufbauend wurden für das ELSA-Kontrollsystem Werkzeuge zur adaptiven, digitalen Signalverarbeitung entwickelt; Darstellungen dazu finden sich in [55][99] und besonders in [86][118][117]. Auf Grundlage adaptiver Signalverarbeitung werden Verfahren zur Echtzeitgenerierung von Steuerkurven für die Extraktionselemente angegeben. Der Aufbau selbstoptimierender Regler zur Erzeugung von Extraktionssteuerkurven in Abhängigkeit eines Experimente-Spillsignals ist ebenso möglich. Dieser Abschnitt liefert eine überblicksartige Beschreibung der verwendeten Methoden.

5.3.1 Diskrete, lineare, zeitinvariante Systeme

Gegeben sei ein diskretes System H , welches eine Eingangsfolge $x(k)$ auf die Ausgangsfolge $y(k)$ abbildet (Abbildung 5.7). Formal schreibt man:

$$y(k) = H \{x(k)\}. \quad (5.29)$$

Statt von einer Folge $x(k)$ spricht man auch von einem diskreten Signal, welches z.B. aus der Abtastung

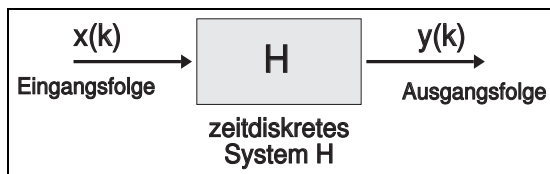


Abbildung 5.7: Diskretes System H mit Eingangsfolge $x(k)$ und Ausgangsfolge $y(k)$

eines kontinuierlichen Signals X mit der Abtastperiode T zu den Zeitpunkten $k \cdot T$ mit $k = 0, 1, 2, \dots$ hervorgegangen ist: $x(k) = X(k \cdot T)$. H ist linear, falls

$$H \{a_1 x_1(k) + a_2 x_2(k)\} = a_1 H \{x_1(k)\} + a_2 H \{x_2(k)\} \quad (5.30)$$

und zeitinvariant, falls

$$y(k) = H \{x(k)\} \Leftrightarrow y(k - k_0) = H \{x(k - k_0)\} \quad (5.31)$$

gilt. Lineare zeitinvariante Systeme werden als LTI-Systeme bezeichnet, von engl. „Linear Time Invariant“. Die zu einer Impulsfolge

$$\delta(k) = \begin{cases} 1 & : k = 0 \\ 0 & : k \neq 0 \end{cases} \quad (5.32)$$

gehörige Ausgangsfolge

$$h(k) := H \{\delta(k)\} \quad (5.33)$$

wird als Impulsantwort des Systems H bezeichnet. Für jede Folge $x(k)$ gilt:

$$x(k) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} x(i) \delta(k - i). \quad (5.34)$$

Benutzt man die vorausgesetzte Linearität sowie die Zeitinvarianz, so folgt:

$$y(k) = H \{x(k)\} = \sum_{i=-\infty}^{\infty} x(i) H \{\delta(k - i)\} = \sum_{i=-\infty}^{\infty} x(i) h(k - i). \quad (5.35)$$

Damit sind LTI-Systeme durch ihre Impulsantwort eindeutig bestimmt. Die Gleichung 5.35 ist die direkte Faltung der Folge $x(k)$ mit der Folge $h(k)$:

$$x(k) * h(k) := \sum_{i=-\infty}^{\infty} x(i) h(k - i). \quad (5.36)$$

Die Faltungssumme ist kommutativ,

$$x(k) * h(k) = h(k) * x(k), \quad \text{denn} \quad \sum_{i=-\infty}^{\infty} x(i)h(k-i) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} h(i)x(k-i). \quad (5.37)$$

Die Folge $x(i)$ kann man sich in Gleichung 5.35 als Ursache und $y(k)$ als Wirkung veranschaulichen; $h(k-i)$ überträgt dann die Ursache auf die Wirkung. Damit von einem kausalen System gesprochen werden kann, muß die Ursache der Wirkung vorausgehen. Es können nur die $x(i)$ zu $y(k)$ beitragen, für die $i \leq k$ gilt. In kausalen LTI-Systemen gilt deshalb $h(k-i) = 0$ für $k < i \Leftrightarrow h(k) = 0$ für $k < 0$.

Ein LTI-System verhält sich stabil, wenn für die Impulsantwort gilt:

$$\sum_{k=-\infty}^{\infty} |h(k)| < \infty. \quad (5.38)$$

Die Bedingung ist entweder dadurch erfüllt, daß $h(k)$ nur endlich lang ist, oder $h(k)$ mit steigendem k gegen Null geht.

Die diskrete z -Transformierte einer Folge $x(n)$ ist definiert als:

$$x(n) \rightarrow X(z) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)z^{-n}, \quad (5.39)$$

wobei z eine komplexe Variable darstellt. In einem kausalen System, indem $x(n)$ für $-\infty < n < 0$ identisch gleich Null ist, reduziert sich die Gleichung 5.39 zu der einseitigen z -Transformation:

$$X(z) = \sum_{n=0}^{\infty} x(n)z^{-n}. \quad (5.40)$$

Die z -Transformierte stellt eine Reihenentwicklung mit einer unendlichen Zahl von Termen dar und muß nicht für alle Werte von z konvergieren. In der angegebenen Literatur finden sich ausführliche Konvergenzuntersuchungen für verschiedene Klassen von Folgen $x(n)$. Strenggenommen muß die z -Transformierte immer zusammen mit dem Konvergenzbereich der Reihenentwicklung angegeben werden. Für die prinzipielle Darstellung in diesem Abschnitt wird nur angenommen, daß die Reihenentwicklung für einen bestimmten Bereich der komplexen Zahlenebene konvergiert und $X(z)$ damit endlich ist.

Die z -Transformierte hat einen engen Zusammenhang mit der diskreten Fouriertransformierten $X(\omega)$ einer Folge $x(n)$:

$$X(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)e^{-i\omega nT}. \quad (5.41)$$

Für den speziellen Fall $z = e^{i\omega T}$ geht die z -Transformierte $X(z)$ einer Folge $x(n)$ in die Fouriertransformierte $X(\omega)$ über. Interpretiert man $z = e^{i\omega T}$ mit $|z| = 1$ in der komplexen Zahlenebene, entspricht das einem Punkt auf dem Einheitskreis. Die z -Transformation, ausgewertet auf dem Einheitskreis, korrespondiert also mit der Fouriertransformation.

Die z -Transformation für diskrete Signale ist das Gegenstück zur Laplacetransformation für kontinuierliche Signale. Die Laplacetransformation läßt sich als verallgemeinerte Fouriertransformation auffassen, genauso wie die diskrete z -Transformation eine Verallgemeinerung der diskreten Fouriertransformation darstellt. z - und Laplacetransformation lassen sich auf eine breitere Klasse von Signalen anwenden als die speziellere Fouriertransformation.

Die z -Transformation hat Eigenschaften, die im wesentlichen den Eigenschaften der Fouriertransformation entsprechen [85]. Insbesondere läßt sich ein Faltungstheorem angeben, so daß die allgemeine Darstellung 5.35 des LTI-Systems durch die z -Transformation übergeht zu:

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)}. \quad (5.42)$$

Darin sind $X(z)$ die z -Transformierte der Eingangsfolge, $Y(z)$ die z -Transformierte der Ausgangsfolge. Die Größe $H(z)$ wird Systemfunktion oder z -Übertragungsfunktion genannt. Für $z = e^{i\omega T}$ ergibt sich

der verallgemeinerte Frequenzgang $H(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} h(n)e^{-i\omega nT}$. Der Frequenzgang $H(\omega)$ ist über die Fouriertransformation mit der Impulsantwort $h(n)$ des Systems verknüpft. Dabei wurde angenommen, daß die drei z -Transformierten $X(z)$, $Y(z)$, $H(z)$ auf dem Einheitskreis der komplexen z -Ebene konvergieren, was bei stabilen und kausalen Systemen stets gilt.

Für ein LTI-System bildet die Angabe der Impulsantwort $h(k)$ im Zeitraum, die Angabe der Fouriertransformierten der Impulsantwort $H(\omega)$ im Frequenzraum sowie die Angabe der z -Transformierten $H(z)$ eine äquivalente Beschreibung.

Die komplexwertige Übertragungsfunktion $H(\omega)$ als zeitdiskrete Fouriertransformierte der Impulsantwort $h(k)$ läßt sich in einen Betrag und einen Phasenwinkel aufspalten:

$$H(\omega) = |H(\omega)| e^{i\angle H(\omega)}. \quad (5.43)$$

Sie werden mit Betragsfrequenzgang und Phasenfrequenzgang bezeichnet. Eine wichtige Implikation der Beziehung 5.43 ist, daß Frequenzkomponenten des Eingangs am Ausgang unterdrückt werden, wenn $H(\omega)$ klein für diese Frequenzen ist.

5.3.2 Digitale Filter

Mit Hilfe diskreter LTI-Systemen, gemäß Abbildung 5.7, lassen sich Filterfunktionen wie Tiefpaß, Hochpaß, Bandpaß oder Bandsperre realisieren. Solche Systeme werden deshalb als digitale Filter bezeichnet. Für die algorithmische Realisierung digitaler Filter und deren Ausführung durch Digitale Signalprozessoren (DSP) [104][105] wird nicht die allgemeine Darstellung eines LTI-Systems benutzt, sondern eine Spezialisierung vorgenommen. Eine spezielle Unterklasse kausaler LTI-Systeme sind solche, welche die Eingangsfolge $x(n)$ und die Ausgangsfolge $y(n)$ durch eine lineare Differenzgleichung mit konstanten Koeffizienten der Form⁷:

$$\sum_{n=0}^L a_n x_{k-n} = \sum_{n=0}^M b_n y_{k-n} \quad (5.44)$$

verbinden. Differenzgleichungen spielen für diskrete Systeme die gleiche Rolle wie Differentialgleichungen für kontinuierliche Systeme. Oftmals wird der Koeffizient b_0 vor y_k auf 1 normiert, so daß sich daraus eine spezielle Repräsentierung eines LTI-Systems ergibt:

$$y_k = \sum_{n=0}^L a_n x_{k-n} - \sum_{n=1}^M b_n y_{k-n}. \quad (5.45)$$

Die korrespondierende z -Systemfunktion $H(z)$ ergibt sich durch z -Transformation von Gleichung 5.45 zu:

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} \quad (5.46)$$

$$= \frac{A(z)}{1 - B(z)} \quad (5.47)$$

$$= \sum_{n=0}^L a_n z^{-n} / \left(1 - \sum_{n=1}^M b_n z^{-n} \right), \quad (5.48)$$

wobei $X(z)$ und $Y(z)$ die z -Transformierten der Eingangsfolge $x(n)$ und der Ausgangsfolge $y(n)$ darstellen. Für diese spezielle Unterklasse zur Repräsentierung eines LTI-Systems ergibt sich die z -Systemfunktion als komplexwertige, gebrochene rationale Funktion⁸.

Anhand der Gleichung 5.45 können zwei wichtige Klassen von Systemen unterschieden werden, nämlich die rekursiven und die nichtrekursiven Systeme. Ist ein Koeffizient b_n in Gleichung 5.45 ungleich Null, so hängt y_k nicht nur von den Vergangenheitswerten der Eingangsgrößen $x_n, x_{n-1}, \dots, x_{n-L}$ ab, sondern auch von den Vergangenheitswerten der Ausgangsgrößen $y_{n-1}, y_{n-2}, \dots, y_0$, und man spricht von einem rekursiven

⁷Es werden tiefstehende Indizes benutzt, da das LTI-System explizit in der Darstellung als Differenzgleichung benutzt wird.

⁸Zu deren Behandlung läßt sich die Funktionentheorie auf die Problematik diskreter Signale und Systeme anwenden.

System. Existiert ein von Null verschiedener Wert x_n , z.B. durch Erregung mit einem Impuls, so ist die Ausgangsfolge unendlich lang. Ein rekursives System hat daher eine unendlich lange Impulsantwort und wird auch IIR-System genannt (von „infinite impulse response“). Bei einem nichtrekursiven System hängt die Ausgangsgröße y_k nur von der Eingangsgröße x_n und von den Vergangenheitswerten $x_n, x_{n-1}, \dots, x_{n-L}$ der Eingangsgröße ab:

$$y_k = \sum_{n=0}^L a_n x_{k-n}. \quad (5.49)$$

Ein FIR-System (von „finite impulse response“) besitzt eine endlich lange Impulsantwort $h(0), h(1), \dots, h(L)$. Aus der Beziehung 5.37 und einem Vergleich mit Beziehung 5.49 ist ersichtlich, daß ein FIR-System ein nichtrekursives System darstellt, wobei die Koeffizienten a_n der Differenzgleichung, durch die Koeffizienten $h(n)$ der Impulsantwort gegeben sind. Ein FIR-System hat als Übertragungsfunktion

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \sum_{n=0}^L a_n z^{-n}, \quad (5.50)$$

also ein Polynom in z^{-1} , dessen Koeffizienten identisch sind mit den Koeffizienten der Differenzgleichung 5.49 und damit auch mit den Koeffizienten der Impulsantwort. FIR-Filter haben die besondere Eigenschaft, daß sie mit einem linearen Phasenfrequenzgang konstruierbar sind und deswegen kein Äquivalent im Bereich analoger Filtern haben, welche immer einen nichtlinearen Phasenfrequenzgang aufweisen. FIR-Filter lassen sich also nur digital realisieren und sind deswegen von besonderer Bedeutung. IIR-Filter können im Gegensatz dazu direkt als Gegenstück zu analogen Filtern aufgefaßt werden. Für deren Konstruktion sind entsprechende Methoden anzuwenden, die auch für den Entwurf analoger Filter eingesetzt werden.

Für die konkrete Realisierung der Verfahren zum Entwurf digitaler Filter wurden die Darstellungen in [31][99] als Leitfaden verwendet. Die dort angegebenen Fortran- und C-Routinen wurden für den Einsatz im EPOS-System modifiziert und eine einheitliche Funktionsbibliothek zur digitalen Signalverarbeitung erstellt. Auf der Basis dieser Funktionsbibliothek wurden eine Menge von EPOS-Operatoren entwickelt, die sich modular kombinieren lassen.

Sowohl für den Entwurf und die Anwendung von IIR-Filtern, als auch von FIR-Filtern wurden im EPOS-System Operatoren entwickelt, welche unmittelbar zur Bearbeitung von Meßdaten der Strahldiagnose-Subsysteme eingesetzt sind. Zum Entwurf von IIR-Filtern existiert der Operator `iirdesign`, für den Entwurf von FIR-Filtern der Operator `firdesign`. Eine Berechnung der Differenzgleichung 5.45 wird für FIR-Systeme vom Operator `fircalc`, für reine IIR-Systeme vom Operator `iircalc` und allgemein vom Operator `lticalc` ausgeführt. Die Berechnung von Frequenzgang und Phasengang von FIR-Filtern bzw. IIR-Filtern übernehmen die Operatoren `firgain`, `iirgain` bzw. `ltigain`.

Die diskrete Faltung von Signalen wird in EPOS durch den Operator `convolution` abgedeckt. Eng verbunden mit der diskreten Faltung ist die diskrete Korrelation zweier Folgen, welche zur Berechnung von Kreuzkorrelationsfolgen bzw. Autokorrelationsfolgen von stochastischen Signalen eingesetzt wird. Dazu existiert in EPOS der Operator `correlation`. Die entwickelten Operatoren bilden zusammen mit dem Operator `fft` – er führt die Berechnung einer diskreten Fouriertransformation aus – die Basis für Bearbeitung und Analyse digitaler Signale in EPOS.

5.3.3 Adaptive, digitale Signalverarbeitung

Aufbauend auf den beschriebenen digitalen Filtern mit konstanten Koeffizienten, die als Realisierung von LTI-Systemen begriffen werden, existieren Anwendungen der digitalen Signalverarbeitung, in denen die Filterkoeffizienten nicht a priori bestimmbar sind, sondern erst durch Messungen am System selbst festgelegt und kontinuierlich, gemäß einem Optimierungskriterium (Zielfunktion), angepaßt werden. Digitale Filter mit justierbaren Koeffizienten werden adaptive Filter genannt. Adaptive Filter finden eine breite Anwendung in Kommunikationssystemen und insbesondere in Regelsystemen zur Konstruktion selbstoptimierender Regler, in denen die statistischen Eigenschaften eines Signals, welches gefiltert werden soll, entweder a priori nicht bekannt oder in einigen Fällen zeitabhängig sind (nichtstationäre und nichtlineare Systeme). Sowohl IIR- als auch FIR-Filter sind für den Einsatz als adaptive Filter vorgeschlagen, untersucht und benutzt worden; im praktischen Einsatz wird aus Stabilitätsgründen ein FIR-Filter gegenüber dem IIR-Filter bevorzugt. Ein FIR-Filter besitzt nur justierbare Nullstellen, was ihn von Stabilitätsproblemen frei macht;

im Gegensatz zu adaptiven IIR-Filtern, die sowohl justierbare Pole, als auch Nullstellen besitzen. Im Rahmen dieser Arbeit wurden nur FIR-Filter der direkten Struktur betrachtet. Ein wichtiger Gegenstand der Betrachtung zur Verwendung eines adaptiven Filters stellt das Kriterium zur Optimierung der justierbaren Koeffizienten (Filterparameter) dar. Dieses Kriterium hat zwei Anforderungen zu genügen: Es muß eine aussagekräftige Bewertung der Filterleistungsfähigkeit bieten und in einen praktisch anwendbaren Algorithmus, gekennzeichnet durch kurze Ausführungszeit und eine realisierbare Rechenvorschrift, umzusetzen sein. Ein vielfach eingesetztes Bewertungskriterium für einen adaptiven Filter, welches einen Kompromiß zwischen diesen Eigenschaften bietet, ist das Kriterium des kleinsten mittleren Fehlerquadrats („Least-Mean-Square“ (LMS) Kriterium) und sein Gegenstück in einer statistischen Formulierung der Problemstellung, das „Mean-Square-Error“ (MSE) Kriterium. Das LMS-Kriterium resultiert in einer quadratischen Leistungsfunktion als Funktion der Filterkoeffizienten und besitzt damit ein globales Minimum (Optimum). Die daraus resultierenden Algorithmen zur Adaption der Filterkoeffizienten sind einfach zu implementieren und durch eine kurze Ausführungszeit charakterisiert.

Abbildung 5.8 zeigt die Struktur eines adaptiven FIR-Filters. Es wird das Eingangssignal x_n ⁹ zugeführt und das Ausgangssignal y_n geliefert. Zusätzlich wird von außen ein gewünschtes Signal (Referenzsignal)

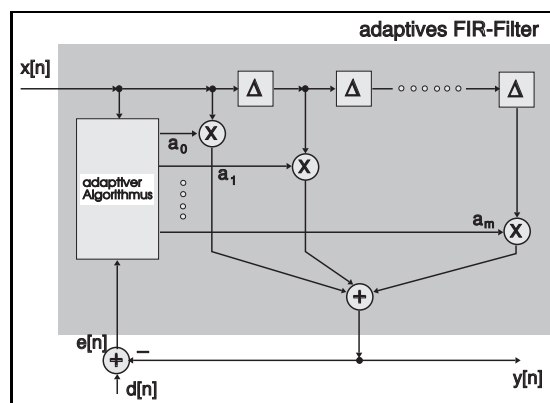


Abbildung 5.8: Struktur eines adaptiven FIR-Filters

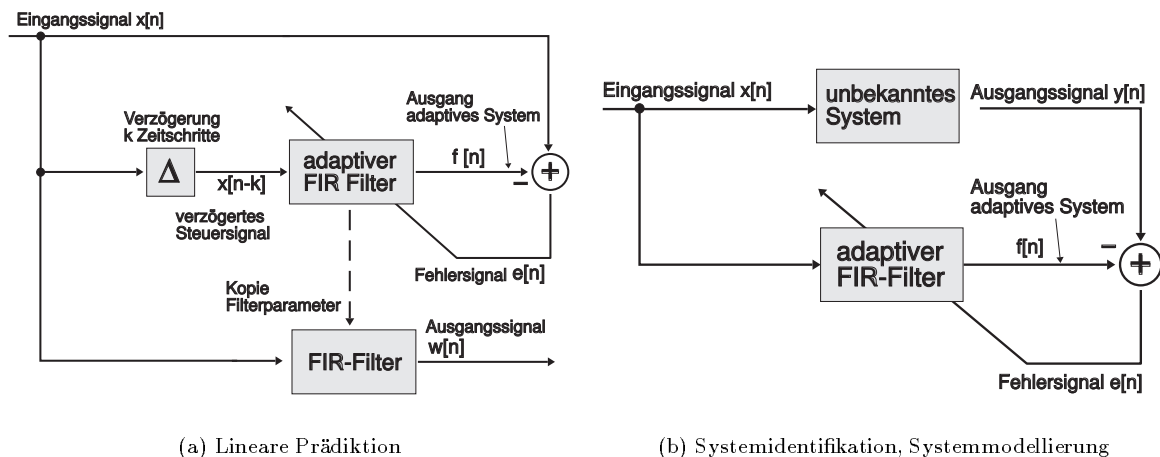
d_n zugeführt. Aus dem Differenzsignal $e_n = y_n - d_n$ (Fehlersignal) und dem Eingangssignal x_n erzeugt ein installierter adaptiver Algorithmus die aktuellen Filterkoeffizienten a_0, a_1, \dots, a_m des Systems. Sie beeinflussen ihrerseits das Ausgangssignal. Ziel der Adaption ist es, ein aus dem Fehlersignal e_n abgeleitetes Fehlerkriterium (Optimierungskriterium) möglichst klein zu halten.

Es wurde der Algorithmus des kleinsten mittleren Quadrats („Least-Mean-Square“ (LMS) Algorithmus) in das EPOS-System integriert und auch eine Echtzeitvariante zur Verwendung im Prozeßsystem der Kontrolle entwickelt. Der LMS-Algorithmus basiert auf einem modifizierten Gradientensuchverfahren (eine Modifikation der Methode des steilsten Abstiegs) zur Bestimmung der Filterkoeffizienten. Für eine genaue Darstellung des Algorithmus, Konvergenzbetrachtungen, und Einsatzgebiete sei auf [117][86][118][99] verwiesen.

Es werden nun kurz Verwendungsbeispiele eines adaptiven Filter vorgestellt, die verdeutlichen, welche Problemstellungen sich damit lösen lassen. Der adaptive Filter spielt dabei als Ganzes eine Rolle; er wird als Blockstruktur verwendet.

Künftige Werte eines zeitlich korrelierten (z.B. eines periodischen) Signals lassen sich aus den vergangenen und den gegenwärtigen Signalwerten schätzen. Eine Möglichkeit bietet die adaptive Filterung. Abbildung 5.9 (a) zeigt die Vorhersage (**Prädiktion**) eines Signals mit einem adaptiven Filter. Das Eingangssignal x_n wird um k Zeiteinheiten verzögert x_{n-k} einem adaptiven Filter zugeführt. Das unverzögerte Signal x_n dient als Referenzsignal für den adaptiven Filter. Die Filterkoeffizienten stellen sich durch Minimierung des Kriteriums von e_n so ein, daß sich f_n als Näherung von x_n ergibt. f_n , das Ausgangssignal des adaptiven Filters, läßt sich als Schätzung seines um k Zeiteinheiten vorausseilenden Eingangssignals auffassen. Die gefundenen (optimierten) Filterparameter werden in ein Hilfsfilter gleicher Struktur kopiert, dessen Eingangssignal x_n ist. Das Ausgangssignal w_n des Hilfsfilters stellt die Prädiktion des um k Zeiteinheiten in die Zukunft verschobenen Eingangssignals x_n dar.

⁹In den Abbildungen wird kein tiefstehender Index benutzt, sondern wegen der besseren Lesbarkeit eine Klammerschreibweise $[\]$ verwendet.



(a) Lineare Prädiktion

(b) Systemidentifikation, Systemmodellierung

Abbildung 5.9: Lineare Prädiktion und Systemidentifikation

Zur Ermittlung der Impulsantwort eines vorliegenden Systems kann ein adaptiver Filter verwendet werden. Diese **Systemidentifikation** bzw. **Systemmodellierung** ist in Abbildung 5.9 (b) gezeigt. Das Eingangssignal x_n und das Ausgangssignal y_n werden als bekannt vorausgesetzt. Als Fehlersignal e_n wird die Differenz aus dem Ausgangssignal des adaptiven Filters f_n und dem System-Ausgangssignal y_n benutzt: $e_n = f_n - y_n$. Ein aus dem Fehlersignal abgeleitetes Bewertungskriterium wird im Rahmen der Adaption minimiert, so daß beide Systeme bei gleichen Eingangssignalen gleiche Ausgangssignale zeigen – also die Impulsantwort des adaptiven Systems dem unbekanntem System angenähert wird.

Die Verwendungsarten **Systemidentifikation** und **Prädiktion** sind in EPOS durch die Operatoren **adaptive** bzw. **predictor** abgedeckt. Sie lassen sich mit den anderen Werkzeugen zur digitalen Signalverarbeitung kombinieren.

Adaptiver digitaler Regler für die Extraktion

Die innere Struktur eines adaptiven Reglers für die Generierung von Steuerkurven während der Extraktion demonstriert Abbildung 5.10. Der Regler arbeitet gleichzeitig als Prädiktor und Systemidentifizierer. Er versucht den, bei der Extraktion bestimmenden Steuerkurvenverlauf nachzubilden; dabei ist die Verzögerungseinheit zu beachten. Sie kann die unterschiedliche Signalausbreitung in beiden Teilzweigen des Reglers aneinander angleichen. An seinem Eingang liegt das Stromsignal des Experiments, er generiert damit das Steuersignal und führt somit eine inverse Systemidentifikation (Entfaltung, Entzerrung) durch. Gleichzeitig bestimmt er damit den Steuerkurvenverlauf. Die identifizierten Systemparameter werden in einen FIR-Filter kopiert, welcher eine dem adaptiven Filter entsprechende Struktur besitzt. Der FIR-Filter generiert dann mit dem Referenzsignal am Eingang die Steuergröße für die Extraktionselemente. Am Eingang des adaptiven Filters kann zusätzlich noch ein Rauschsignal angelegt werden, um eine ausreichende Systemerregung sicherzustellen.

Im beschriebenen Verfahren werden zur Identifizierung des Prozeßmodells ein Eingangssignal und das Ausgangssignal gemessen. Das Identifizierungsverfahren berechnet „on line“ das Prozeßmodell. Danach werden die Reglerparameter neu berechnet und im Regelalgorithmus entsprechend geändert. Das angegebene Verfahren arbeitet dann besonders gut, falls das Identifizierungsmodell für ELSA (bzw. der Extraktionsvorgang) als System mit Übertragungsfunktion:

$$H_{elsa}(z) = a_0 / \left(1 - \sum_{n=1}^M b_n z^{-n} \right), \quad (5.51)$$

zu beschreiben ist (siehe Beziehung 5.48); man spricht von einem AR-System (autoregressives System). Ihm

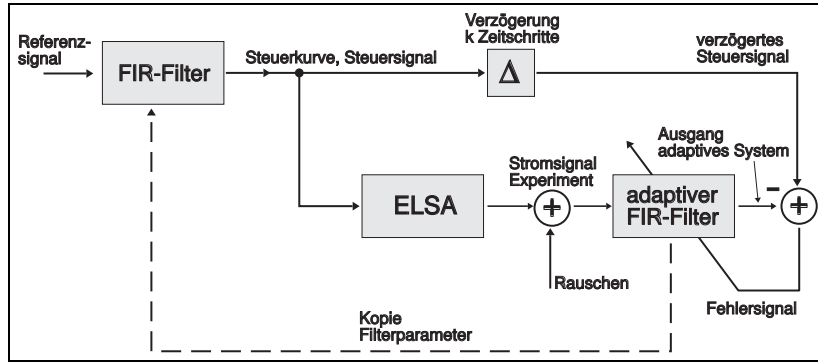


Abbildung 5.10: Adaptiver Regler der langsamen Extraktion

nachgeschaltet ist in Abbildung 5.10 das adaptive FIR-Filter mit Übertragungsfunktion (Beziehung 5.50):

$$H_{fir}(z) = \sum_{n=0}^M a_n z^{-n}; \quad (5.52)$$

es repräsentiert ein MA-System („moving average“-System). Für den Fall einer ausgeführten Identifizierung gilt: $H_{elsa}(z) \cdot H_{fir}(z) = 1$, also $H_{fir}(z) = H_{elsa}(z)^{-1}$.

Erweist sich das zu wählende Identifizierungsmodell für ELSA als ein MA-System, so gestaltet sich die Struktur in Abbildung 5.10 als ungünstig. Es bietet sich die direkte Systemidentifikation aus Abbildung 5.9 (b) an. Der Extraktionsvorgang würde hierbei unmittelbar durch ein FIR-System identifiziert, d.h. die Impulsantwort h_n wäre bekannt und für beliebige Anregungen x_n läßt sich die zugehörige Ausgangsgröße y_n berechnen (Beziehung 5.37):

$$y_n = \sum_{i=0}^M x_i h_{n-i} = \sum_{i=0}^M h_i x_{n-i}. \quad (5.53)$$

Die Faltungssumme 5.53 läßt sich umformen:

$$h_n = \frac{y_n - \sum_{i=0}^{M-1} h_i x_{n-i}}{x_0} \quad \text{bzw.} \quad (5.54)$$

$$x_n = \frac{y_n - \sum_{i=0}^{M-1} x_i h_{n-i}}{h_0}. \quad (5.55)$$

Gleichung 5.55 erlaubt, für einen vorgegebenen Verlauf der Ausgangsfunktion y_n (Referenzsignal), in Verbindung mit der gemessenen Systemantwort h_n , die Berechnung der erforderlichen Eingangsgröße x_n . Die Faltungssumme wird umgekehrt; man nennt diese Methode dementsprechend auch Entfaltung.

In EPOS wurde für die adaptive Regelung der Operator **controller** entwickelt. Zur Bearbeitung von Experimentespillsignalen und zur Ermittlung von Signalhüllkurven, insbesondere denen der Spillsignale, wurden die Operatoren **enveloppe** und **filter/minimum**, **filter/maximum** implementiert. Dazu werden nichtlineare „Rank-Value“-Filter eingesetzt, die ursprünglich im Rahmen der Bildverarbeitungssoftware (Abschnitt 5.11) implementiert wurden, dann aber auch eine sinnvolle Verwendung für die eindimensionale Signalverarbeitung aufwiesen. Ein Signalamplitudenwert wird dabei durch den Minimal- oder Maximalwert aller Signalamplituden in einem Bearbeitungsfenster ersetzt. Entsprechend arbeitet auch der **filter/median**-Operator in EPOS.

Im Rahmen von Simulationen wurde die Funktionstüchtigkeit der entwickelten Verfahren geprüft.

5.4 Steuerkurvengeneratoren für Nachbeschleunigung und Extraktion

Im Nachbeschleunigungsmodus werden die Magnetfamilien von ELSA, die Hochfrequenzanlage sowie die schnellen Extraktionsquadrupole zeitlich variabel angesteuert. Das geschieht durch Steuerkurvengeneratoren, die das Kontrollsystem bereitstellt; ihnen sind Steuerkurven vorzugeben, welche vom Kontrollsystem zu berechnen sind.

Berechnete Steuerkurven werden in digitalisierter Form (Datentabelle) im verteilten Datenbanksystem gespeichert und über Parameternamen einem Endgerät oder Subsystem zugeordnet. Elementare Schreibtransaktionen transportieren sie zur Prozeß- und Feldebene. Die Rechner der Prozeßebene nehmen die Daten entgegen und speichern sie in der lokalen Prozeßdatenbank. Angekoppelte Prozeßdatenbank-Servicefunktionen übermitteln die Datenvektoren (-tabellen) der Steuerkurven an arbiträre Funktionsgeneratoren. Das Kontrollsystem hält für jede diskrete Steuerkurve zwei Datenvektoren.

Ein Vektor enthält die Zeitbasis (Zeitvektor). Die Elemente des Zeitvektors geben die Zeitdauer Δt_i an, wie lang ein dazu passender Amplitudenwert A_i ausgegeben werden soll. Die Δt_i müssen nicht äquidistant sein. Die Amplitudenwerte A_i sind in einem eigenen Datenvektor abgelegt. Die Ausgabe der Ansteuersollwerte $A(t_k)$ geschieht über die Elemente des Zeit- Δt_k und Amplitudenvektors A_k :

$$A(t_k) = tab(k, A_k, \Delta t_k), \quad t_k = \sum_{i=0}^k \Delta t_i, \quad k = 0, 1, 2, \dots, L,$$

wobei $tab(k, A_k, \Delta t_k)$ den k -ten Tabelleneintrag (die laufende Nummer der Abtastung) und L die Länge der Sollwertrampe bezeichnet. Arbiträre Funktionsgeneratoren starten die sukzessive Ausgabe der Sollwertrampe auf einen Befehl in, welcher sich aus einem Signal der ELSA-Zeitsteuerung ableitet. Das Kontrollsystem setzt zwei Arten von arbiträren Steuerkurvengeneratoren ein:

1. **Generatoren im Feldbussystem auf Basis der Feldbusprozessoren:** Eine Reihe von Feldbusprozessoren sind mit Software zur Ausgabe digitaler Sollwertrampe ausgerüstet. Die digitale Ausgabe erfolgt über eine Optokoppler-Schnittstellenkarte direkt an das Endgerät, das innerhalb seiner Ansteuerelektronik einen Digital-Analog-Wandler zur Umwandlung des digitalen Steuermusters in eine Steuerspannung besitzt¹⁰. Die Datentabellen zur Kurvenerzeugung werden vom Kontrollsystem an die Feldbusprozessoren übermittelt und in deren Arbeitsspeicher abgelegt. Die Steuerkurvenausgabe startet durch ein externes Signal (hintere Flanke eines ELSA-Normpulses der Länge 200 μs) der ELSA-Zeitablaufsteuerung. Die Hardware der verwendeten Feldbusprozessoren wurden aus dem alten Kontrollsystem übernommen, ihre Software aber in wesentlichen Punkten geändert.

Die Länge der Datentabellen wurde von 1000 Worte auf 5000 Worte (16 Bit) durch eine Optimierung der Speicheraufteilung in den Feldbusprozessoren erhöht. Die Übertragung von Datenpaketen einer Länge von ca. 10 kByte ist erst durch den Einsatz des VME-Feldbuscontrollers und der damit verbundenen Softwareentwicklung (Abschnitt 2.3.5) möglich gewesen.

Während der Ausgabe einer Sollwertrampe generiert der Feldbusprozessor Parameterpakete mit dem zuletzt ausgegebenen Steuerwert und sendet sie an den VME-Feldbuscontroller, welcher sie seinerseits als Parameteränderung durch eine Schreibtransaktion an die Kontrollebene weiterleitet. Die Steuerkurvenausgabe läßt sich somit z.B. auf der graphischen Bedienungsfläche überprüfen und hat sich als Kontrollmöglichkeit für die Bedienung bewährt.

Die Steuerwerte des Zeitvektors müssen nicht äquidistant liegen, der Stützstellenabstand kann minimal ca. 65 μs und maximal ca. 42 ms, bei einer zeitlichen Auflösung von 651 ns, betragen. Eine Sollwertkurve kann auf Basis der Feldbusprozessoren eine maximale Gesamtlänge von etwa 3 $\frac{1}{2}$ Minuten im Fall des maximalen Stützstellenabstands von 42 ms und 325 ms im Fall des minimalen Stützstellenabstands von 65 μs erreichen.

2. **Generatoren auf VME-Basis im Prozeßsystem:** Zur Ansteuerung der Extraktionselemente wurden zusätzlich schnellere VME-Funktionsgeneratoren in das Prozeßsystem integriert¹¹. Auch diesen Funktionsgeneratoren wird eine Steuerkurve über einen VME-Rechner des Prozeßsystems geladen. Dazu verfügen sie über einen eigenen Speicher mit 128·1024 Speicherstellen (jeweils 16 Bit groß) und einen Taktgenerator mit Speicherstellenzähler. Der Stützstellenabstand Δt der VME-Funktionsgeneratoren ist für alle Steuerwerte äquidistant und variiert durch Programmierung des Taktgenerators zwischen minimal 5 μs und maximal 4.3 ms. Ein Generator hat einen Wandlerbereich von 16 Bit und gibt über einen Digital-Analog-Wandler eine Spannung zwischen 0–10 Volt aus. Für den minimalen Stützstellenabstand von 5 μs ist eine maximale Dauer der Rampe von ca. 655 ms, für den maximalen Stützstellenabstand von 4.3 ms eine Gesamtlänge der Steuerkurve von 9 $\frac{1}{2}$ Minuten möglich. Der VME-Funktionsgenerator verfügt über keinen eigenen externen Triggereingang, die

¹⁰Diese Konstruktion wurde aus Gründen der Störsicherheit schon im Rahmen des alten Kontrollsystems gewählt.

¹¹Auf eine Eigenentwicklung wurde verzichtet und auf eine Standard-VME-Karte der Firma Janz zurückgegriffen [54].

Sollwertrampenausgabe wird durch Schreibzugriff auf eine bestimmte Speicherzelle der VME-Modul ausgelöst und angehalten. Diese Punkte und die Festlegung auf einen äquidistanten Stützstellenabstand machten eine Softwareentwicklung unter dem VxWorks-Betriebssystem der Prozeßebene notwendig.

Die Anbindung der VME-Funktionsgeneratoren an die Zeitablaufsteuerung übernimmt ein zugeordnetes VME-Prozessormodul mit einer Unterbrechungskarte, welche externe Triggersignale aufnimmt und den beschriebenen Schreibzugriff über den VMEbus auslöst. Dazu werden die Echtzeiteigenschaften von VxWorks ausgenutzt, das auf ein externes Signal durch eine Unterbrechungsroutine reagiert und darin die notwendigen Start-, Stopbefehle an das VME-Modul weitergibt. Die Zeit zwischen Triggererkennung und Verarbeitung durch VxWorks (Befehl an den Generator) liegt im Bereich von weniger als $20 \mu\text{s}$ ¹².

Im Kontrollsystem sind die Datenvektoren für Steuerkurven nicht auf einer äquidistanten Zeitbasis abgelegt. Deswegen wurde eine Softwarebibliothek entwickelt, welche die Abbildung dieser Datenvektoren auf die äquidistante Zeitbasis der VME-Funktionsgeneratoren übernimmt. Die Software stellt selbsttätig immer den kleinstmöglichen Stützstellenabstand für eine geforderte Gesamttrampplänge ein; optional lassen sich Interpolationsmodelle zur Sollwertrampenberechnung auswählen. Dadurch müssen nur wenige Stützstellen vorgegeben und an das Prozeßsystem übertragen werden; die Berechnung der Datentabellen für die Funktionsgeneratoren wird von einem VME-Prozessormodul ausgeführt.

Zur zeitlich variablen Ansteuerung von Endgeräten oder Subsystemen existiert folgende Einteilung.

Die Netzgeräte der ELSA-Hauptmagnete (Dipole, F- und D-Quadrupole, F- und D-Sextupole) steuert jeweils ein Feldbusprozessor an¹³. Die Prozessoren befinden sich in einem Feldbus-Überrahmen mit gemeinsamer Triggerversorgung. Jeder Feldbusprozessor verfügt über einen quarzstabilisierten Oszillator zur Taktgebung der Steuerkurvenausgabe. Nach externer Triggerung der Prozessoren laufen die lokalen Oszillatoren frei gegeneinander; dies kann zu Abweichungen der gemeinsamen Zeitbasis, insbesondere für lange Steuerkurven im Mikrosekundenbereich führen. Alle Prozessoren sollten in Zukunft mit einem gemeinsamen Zeitnormal versorgt werden, um somit einen Zeitbasisfehler zu vermeiden. Der Überrahmen mit den Feldbusprozessoren wird über einen dedizierten Feldbuscontroller an die Prozeßebene angekoppelt, damit die Übertragungsbandbreite zum Feldbus von $1.25 \frac{\text{MBit}}{\text{s}}$ ausschließlich für diese Feldbusprozessoren bereitsteht und das Laden der Steuerkurven in minimaler Zeit erfolgen kann. Die Übertragungszeit für Steuerkurven läßt sich mit Beziehung 2.9 berechnen.

Die für die Extraktion verwendeten Elemente (zwei Paare schneller, eisenloser Quadrupole, die Hochfrequenzanlage, Extraktionssextupole) werden zur Zeit alle noch mit Feldbusprozessoren angesteuert. Der Feldbusprozessor zur Ansteuerung der Extraktionssextupole befindet sich im gleichen Überrahmen wie die Prozessoren zur Steuerung der ELSA-Hauptmagnete. Die Sprungantwort bei einer rechteckförmigen Amplitudenänderung der Hochfrequenzanlage von ELSA wurde gemessen und beträgt ca. $20 \mu\text{s}$ [47]. Dafür ist die Ansteuerungsbandbreite, welche die Feldbusprozessoren bereitstellen, zu gering. Im Hinblick auf die Anwendung von HF-unterstützten Extraktionsmethoden, ist eine Ansteuerung durch einen VME-Funktionsgenerator vorgesehen. VME-Funktionsgeneratoren stehen ebenfalls zur Ansteuerung der schnellen Extraktionsquadrupole zur Verfügung.

5.5 Integration von Simulation und Kontrolle

Im 50 Hz-Stretchermodus kann die Wirkung einer Parametervariation auf den Teilchenstrahl instantan beobachtet werden. Der Maschinenzyklus im Nachbeschleunigungsmodus kann zwischen Sekunden und einer Minute variieren; das Antwortverhalten von ELSA wird stark unersetzbar und eine interaktive Manipulation zur Verbesserung der Betriebsbedingungen ist nicht mehr möglich. Vielmehr muß schon zur Definitionszeit des kompletten Maschinenzyklus eine annähernde Kenntnis der Parametereinstellungen zur Nachbeschleunigung bestehen und die Definition der Maschinenoptik zum Startzeitpunkt der Extraktionsphase getroffen werden. Günstige Parametereinstellungen der Maschinenoptik und der Extraktionselemente für die Extraktionsphase müssen also bereits zu diesem Zeitpunkt annähernd bekannt sein¹⁴.

¹²Dies gilt für einen Rechner der Firma Force FRC30ZBE mit einer MC68030-CPU/25MHz.

¹³Der typische Stützstellenabstand zur Ansteuerung der Hauptmagnete liegt im Bereich von Millisekunden, so daß Feldbusprozessoren für diese Aufgabe ausreichen.

¹⁴In der Extraktionsphase besteht nur noch eingeschränkte Möglichkeit, einzelne Parameter, welche die Extraktionsverfahren beeinflussen, zu variieren.

Ein wichtiges Hilfsmittel zur Bestimmung günstiger Parametereinstellungen soll der ELSA-Simulator `xsim` sein, den J.Wenzel in seiner Dissertation [114] zur Analyse und Beschreibung der linearen und nichtlinearen Teilchenbewegung in ELSA entwickelte. Mit ihm lassen sich Hypothesen und Untersuchungen für Maschineneinstellungen auf der Basis eines aktuellen ELSA-Maschinenzustandes oder einer frei einstellbaren Maschinenkonfiguration interaktiv behandeln. Das Programm ist in die X-Window/Motif-Fensteroberfläche eingebettet, ein typisches Erscheinungsbild zeigt Abbildung 5.11. Der ELSA-Simulator erlaubt die Ana-

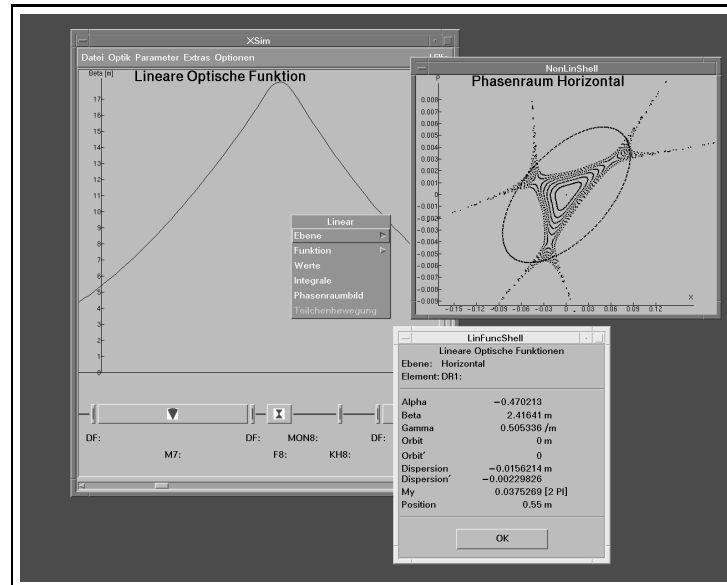


Abbildung 5.11: Der ELSA-Simulator `xsim`

lyse des transversalen und longitudinalen Phasenraums der Bewegung, die Identifikation und Separation von Resonanzen nach ihrer Stärke, die Berechnung der dazugehörigen Fixpunkte der Bewegung sowie die Separatrixlage am Extraktionsseptummagnet im Fall der ELSA-Extraktionsverfahren. Für eine einstellbare Teilchenverteilung in den Phasenräumen kann der Simulator abhängig von einer ELSA-Maschineneinstellung ein Signal des extrahierten Elektronenstroms aus ELSA berechnen.

Zum Startzeitpunkt lädt `xsim` die ELSA-Maschinenbeschreibung aus Konfigurationsdateien und zeigt alle Elemente im ELSA-Ring, zusammen mit den linearen optischen Funktionen an. Für jede Stelle im Ring können die optischen Parameter etc. angezeigt und abgeändert werden (siehe Abb. 5.11). Der Simulator führt Berechnungen zur Teilchenverfolgung entweder für ein Teilchen oder für eine einstellbare Teilchenverteilung aus. Die Berechnungsergebnisse zeigen Phasenraumbilder für die Bewegungsrichtungen in der Darstellung des Poincare-Schnitts[14][81], welche unmittelbar mit den Ergebnissen des Phasenraummeßsystems (Abschnitt 5.10) vergleichbar sind. Ebenfalls werden Strahlspektren der longitudinalen und transversalen Bewegungsrichtung ausgerechnet, die einen Vergleich mit den Meßdaten der Phasenraummessung und dem Spektralanalysesystem von T.Götz [38] zulassen.

Dieses wesentliche Merkmal des Simulators, seine Ergebnisdaten direkt mit Meßdaten vergleichen zu können, ist ein Ergebnis der **Gesamtkonzeption zur Integration von Kontrolle, Strahldiagnose und Simulation**, die zwischen T.Götz, J.Wenzel und dem Autor dieser Arbeit zu Anfang der Kontrollsystementwicklung erarbeitet und festgelegt wurde (Abschnitt 1.4.2).

Der Simulator koppelt sich in seiner Startphase oder zu einem späteren Zeitpunkt an das Kontrollsystem an. Nach Anbindung agiert er als „normale“ Kontrollsystem-Applikation, verwendet die vorhandenen Schreib-, Lesetransaktionen und hat Zugriff auf alle ELSA-Parameter. Das Simulator-Programm kann auf einem beliebigen Rechner der Kontrollebene gestartet werden und auf der Basis von aktuellen Maschineneinstellungen eine Berechnung ausführen, z.B. die aktuelle Konfiguration analysieren und damit einem Physiker zusätzliche Informationen zur Bewertung liefern. Ist aufgrund seiner Analyse eine bessere Maschineneinstellung gefunden, lassen sich die dazugehörigen Parameter zurück in das Kontrollsystem schreiben. Berechnungen können zyklisch in Abhängigkeit von geänderten Maschinenparametern ausgeführt werden. Ein Beispiel wäre die Berechnung des Phasenraumdreiecks (Lage der Separatrizen) am Ort des Septummagneten für

variable Stärken der Extraktionssextupole sowie des horizontalen Arbeitspunktes möglich, womit dann eine günstige Maschinenvoreinstellung gefunden werden kann. Neben der Ankopplung an die Kontrolle (und damit an ELSA) und daraus abgeleiteter Berechnungen, läßt sich der Simulator als reines „off line“-Werkzeug benutzen.

Kontrolle und Simulation sind also eng miteinander gekoppelt; damit ist für die Zukunft ein wesentliches Hilfsmittel zur Verbesserung bestehender Betriebsverhältnisse und zur Etablierung neuer Betriebsmodi vorhanden.

Damit das Kontrollsystem, unabhängig von Arbeitsweise und Einstellung des ELSA-Simulators, wichtige Parameter der Maschinenoptik für eine aktuelle Maschineneinstellung ausrechnen kann und sie als Kontrollparameter allen Applikationen zur Verfügung stellt, entwickelte J.Wenzel eine Funktionsbibliothek (Untermenge des Simulator-Funktionsumfangs). In Zusammenarbeit mit J.Wenzel wurden, aufbauend auf dieser Funktionsbibliothek, zwei Experten mit dazugehörigem Regelwerk entwickelt. Beide Experten lesen in ih-

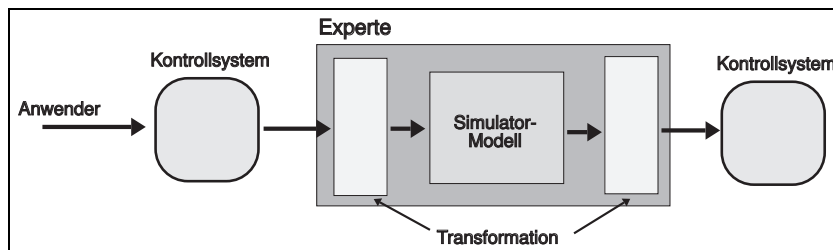


Abbildung 5.12: Arbeitsweise der Simulator-Experten

rer Startphase die Maschinenbeschreibung von ELSA und warten dann auf Wertänderungen (z.B. durch einen interaktiven Anwender der Bedienungsoberfläche des Kontrollsystems) ihrer Eingangsparametermenge. Im Fall einer Werteänderung nehmen sie Kontrollsystemparameter entgegen, transformieren die Werte in das lineare Simulatoremodell des Experten. Auf Basis der Werteeinstellungen berechnet der Experte Ausgangsgrößen, die er wieder zurück in das Kontrollsystem schreibt (Abb. 5.12). Das Regelwerk der Experten verknüpft also Kontrollsystemparameter über die Simulator-Funktionsbibliothek. Die entwickelten Experten decken folgende Anwendungsbereiche ab:

1. Der `simlin`-Experte berechnet in Abhängigkeit von Maschinen-Sollwerten wesentliche Strahlparameter der linearen Maschine¹⁵ und Funktionen¹⁶. Die Ergebnisse der Berechnung werden in Kontrollsystemparameter abgelegt und durch die graphische Bedienungsoberfläche angezeigt (Abb. 5.13 (a)).

Das Verfahren ist ein wesentliches Hilfsmittel, die physikalische Gesamtansicht des Kontrollsystems auf die Beschleunigeranlage sicherzustellen (Abschnitt 1.4.2)¹⁷.

2. Der `elsamodel`-Experte arbeitet mit einem Parametersatz, welcher nicht an ELSA gekoppelt ist und dessen Werte ohne Auswirkungen auf die Maschine manipulierbar sind. Der Parametersatz umfaßt alle Größen zur vollständigen Beschreibung der linearen Maschinenoptik an ELSA, so daß Berechnungen einer beliebigen linearen ELSA-Optikeinstellung möglich sind. Hypothesen und Modellrechnungen können geprüft und die daraus resultierenden Strahlparameter analysiert werden. Die Ausgabeparametermenge umfaßt alle Größen, die auch der `simlin`-Experte liefert. Das Bedienungs-menü des `elsamodel`-Experten zeigt Abbildung 5.13 (b). Abhängig von den Eingaben auf der linken Seite werden die Ausgaben auf der rechten Seite durch den Experten berechnet.

Die Berechnung von Arbeitspunkten in Fokussierungsstärken übernimmt der `emagnets`-Experte (siehe [38]), da die Simulatorsoftware als Eingabeparameter Fokussierungsstärken verarbeitet und daraus Arbeitspunkte berechnet, ein Anwender für eine Modellrechnung aber Arbeitspunktvorgaben bevorzugt.

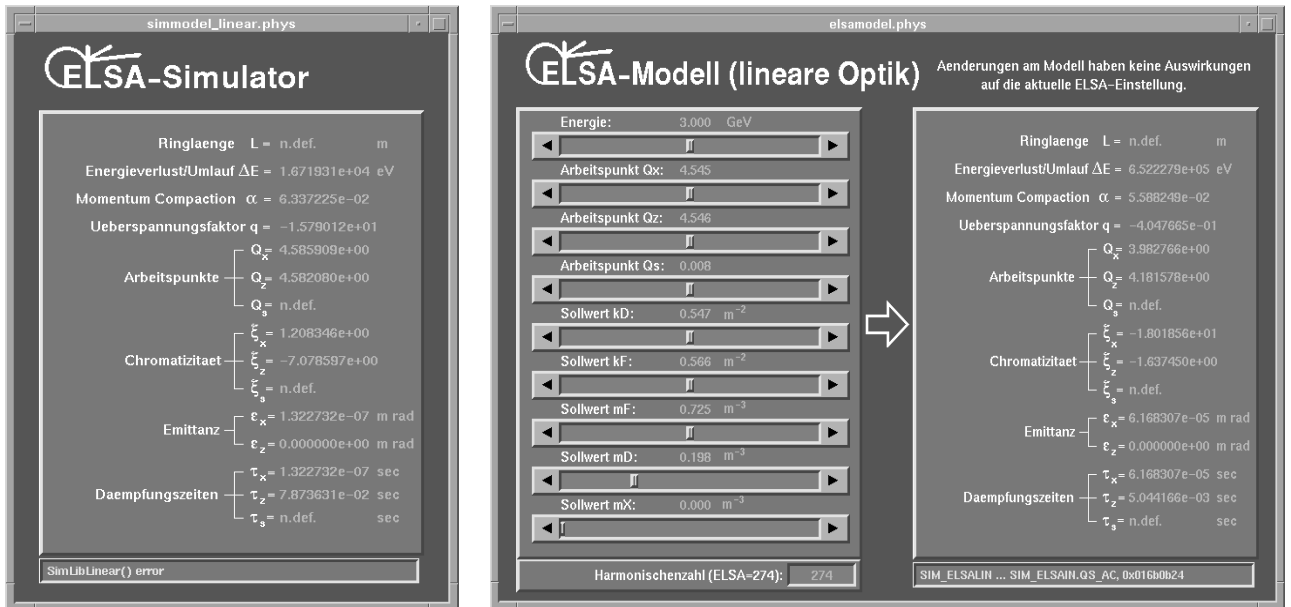
¹⁵Es handelt sich dabei um Arbeitspunkte Q_x, Q_z, Q_s , Chromatizitäten C_x, C_z, C_s , Strahlungsintegrale und Dämpfungszeiten τ_x, τ_z, τ_s etc.

¹⁶Hier sind Beta- $\beta(s)$, Alpha- $\alpha(s)$, Dispersionsfunktion $D(s)$ und deren Ableitung $D(s)'$ etc. zu nennen.

¹⁷In der Bedienungsfläche (Magnetmenü) ist durch `simlin` z.B. die Chromatizität direkt einstellbar oder die theoretischen Arbeitspunkte werden (auch) unter Berücksichtigung eingestellter Sextupolstärken berechnet und lassen sich unmittelbar mit den Kontrollsystemeinstellungen und den Arbeitspunkt-Istwerten vergleichen.

Die Funktionalität des **emagnets**-Experten hinsichtlich Berechnung und Erprobung verschiedener Verfahren zur Arbeitspunkt-Sollwertbestimmung sind somit für den **elsamodel**-Experten einsetzbar. Es bestehen Vergleichsmöglichkeiten zwischen theoretischer, linearer Berechnung und realer Maschinenoptik.

Es wird in Zukunft angestrebt, ebenfalls Berechnungen zur nichtlinearen Maschinenoptik in Experten zu integrieren.



(a) On-Line-Simulator-Experte

(b) ELSA-Modellbeschleuniger-Experte

Abbildung 5.13: Simulator-Experten im Kontrollsystem

Das Anwendungsspektrum des Systems verteilter Regelexperten zeigt seine Leistungsfähigkeit durch die Integration der beiden Simulator-Experten. Die Integration ist beispielhaft für die angestrebte Kopplung von Kontrolle und Simulation im Rahmen der Modellvorstellung aus Abschnitt 1.4.2, welche die übergeordnete Zielsetzung des neuen Kontrollsystems darstellt.

5.6 Strahldiagnose für den Nachbeschleunigungsmodus

Der Abschnitt 5.1.4 macht deutlich, daß die Einstellung des Nachbeschleunigungsmodus eine genaue Abstimmung aller ELSA-Teilkomponenten notwendig macht. Die Wirkung aller beteiligten Effekte, ihre Komplexität sowie deren kompliziertes Ineinandergreifen im Nachbeschleunigungsbetrieb kann durch das Kontrollsystem allein nicht modelliert werden. Die verbleibende Möglichkeit ist die Untersuchung der Strahldynamik in allen Phasen des Nachbeschleunigungsbetriebs durch Meßsysteme der Strahldiagnose, um damit eine Verifizierung der vorgegebenen Maschineneinstellung zu erhalten. Auf Grundlage von Messungen lassen sich gegebenenfalls Korrekturinformationen ableiten, welche in eine verbesserte Einstellung für einen Betriebsmodus einfließen. Schwerpunkt in diesem Kapitel ist die Darstellung von Strahldiagnosemethoden zur Unterstützung der Extraktion.

Der gespeicherte Teilchenstrahl in ELSA soll mit möglichst guter Extraktionseffizienz und mit möglichst hohem mikroskopischem Tastverhältnis bei gleichbleibenden Anfangsbedingungen extrahiert werden.

Die Extraktionseffizienz ist im wesentlichen gegeben durch die Sprungweite der Teilchen am Septum und die Dicke des Septums sowie die Winkelstellung der auslaufenden Separatrix zum Septum. Günstige Werte für Position und Winkel des Septummagneten sind zwar für eine bestimmte Maschineneinstellung experimentell

auffindbar, eine grundsätzliche Optimierung der Extraktionseffizienz auf Basis theoretischer Aussagen ist allerdings vorzuziehen. Das ist die Aufgabe des ELSA-Simulators. Zur Unterstützung des ELSA-Simulators wird das Phasenraummeßsystem, welches prototypenhaft in [81] für ELSA erprobt wurde, in das Kontrollsystem integriert. Im Vorgriff auf den Ergebnisteil der Arbeit soll hier erwähnt sein, daß im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine Reihe von Messungen mit dem Phasenraummeßsystem, speziell für einen Vergleich mit Ergebnisdaten des ELSA-Simulators durchgeführt wurden. Sie wurden J. Wenzel zur Verfügung gestellt und konnten unmittelbar in seiner Arbeit verwendet werden. Durch Vergleich der Meßdaten aus dem Phasenraummeßsystem mit Ergebnisdaten des ELSA-Simulators besteht eine Möglichkeit, Fixpunkte der Bewegung und damit die Separatrixlage am Beobachtungsort, festzustellen. Nach Abgleich durch die Phasenraummessung ermöglicht der Simulator, den Extraktionsprozeß am Ort des Extraktionsseptummagneten zu verfolgen¹⁸.

Die Grundlage für ein hohes mikroskopisches Tastverhältnis dc_m besteht in der gleichmäßigen Füllung des ELSA-Rings; sie stellt dafür eine obere Schranke dar: $dc_m \leq dc_{elsa}$. Im Rahmen des Kontrollsystems wurde ein Injektionsschema für den Nachbeschleunigungsmodus entwickelt, welches eine Homogenisierung der ELSA-Füllstruktur zuläßt. Im Abschnitt 4.3 wurde die dafür aufgebaute Injektionszeitsteuerung beschrieben. Die Überprüfung des Injektionsverfahrens geschieht durch einen aufgebauten, breitbandigen Intensitätsmonitor, mit großem Dynamikumumfang.

Zur Überprüfung der Extraktionsanfangsbedingungen wurde das Phasenraummeßsystem herangezogen. Aus den gemessenen Lagedaten lassen sich unter anderem Lagespektren der Bewegung ermitteln. Die Zusammensetzung eines idealisierten Lagespektrums wird hier nicht rekapituliert. Den Fall einer umlaufenden Punktladung und des sich daraus ergebenden idealisierten Lagespektrums behandelt z.B. [72][92][65]. Aus einem Lagespektrum ergibt sich der horizontale Arbeitspunkt Q_x und der Synchrotronarbeitspunkt Q_s . Aus den Phasenraumfiguren ist direkt der Arbeitspunktabstand zur Resonanz bestimmbar.

Als ergänzendes Instrument der Strahldiagnose befindet sich ein Synchrotronlichtmonitor im Aufbau [45], welcher für Untersuchungen des Strahlverhaltens im Fall hoher Stromstärken in ELSA dienen soll. Durch ihn können – über eine Strahlprofilmessung – die horizontale und vertikale Strahlemittanz ϵ_x, ϵ_z bestimmt werden. Zur quantitativen Erfassung von Profildaten wurde im Rahmen dieser Arbeit ein bildverarbeitendes Monitorsystem aufgebaut und in das Kontrollsystem integriert.

Zu jedem Zeitpunkt im Nachbeschleunigungszyklus muß eine getriggerte Strahldiagnose möglich sein; dazu wurde ein Diagnosepulsgenerator entwickelt (Abschnitt 4.4). Strahldiagnosesubsysteme benutzen die Diagnosepulsketten zur zeitaufgelösten Datennahme im Nachbeschleunigungsbetrieb.

Grundlage für Untersuchungen mit dem Phasenraummeßsystem bilden Lagedaten der kohärenten transversalen Betatronschwingung, wie sie das ELSA-Monitorsystem liefern kann. Das ELSA-Monitorsystem mußte zu diesem Zweck in das Kontrollsystem integriert werden.

Kohärente Betatronschwingung

Das elektromagnetische Feld jedes Teilchens im Strahl superponiert mit den elektromagnetischen Feldern aller anderen im Strahl befindlichen Teilchen zu einem effektiven Feld der Ladungsverteilung, welche sich als Multipolentwicklung schreiben läßt. Ein kapazitiv an den Strahl koppelnder Lagemonitor, wie er im ELSA-Monitorsystem [93] verwendet wird, kann im wesentlichen nur die Bewegung des Ladungsschwerpunkts (Dipolanteil der Multipolentwicklung) des vorbeifliegenden Teilchenstrahls erfassen. Im allgemeinen verteilen sich die Phasen der Betatronschwingung statistisch über alle Teilchen des Strahls, so daß der Ladungsschwerpunkt der Bunche auf der Gleichgewichtsbahn zu liegen kommt. Die Betatronschwingung der Teilchen um die Gleichgewichtsbahn kann in diesem Fall nicht durch Messung der Schwingung des Ladungsschwerpunkts untersucht werden. Es muß sichergestellt sein, daß alle Teilchen im Strahl gleichphasig bzgl. einer Bezugsphase und im Mittel mit gleicher Anfangsamplitude schwingen, denn in diesem Fall ist die Ablage des Ladungsschwerpunkts bzgl. der Gleichgewichtsbahn mit der transversalen Schwingungsfrequenz der Teilchen moduliert. Man spricht dann von einer **kohärenten Betatronschwingung**. Für diese Situation läßt sich die Bewegung des Ladungsschwerpunktes mit der Einteilchenbewegung identifizieren.

Zur Erfassung von Lagedaten im Nachbeschleunigungsbetrieb muß der gesamte Strahl durch eine rechteckförmige Auslenkung zu einer kohärenten Betatronschwingung angeregt werden. Dabei sollte sich die

¹⁸Dazu könnten Untersuchungen zur Lage der Separatrix am Septum, zur Sprungweite am Septum, Einflüsse auf die Sprungweite und damit die Extraktionseffizienz etc. gehören.

Erregung möglichst schnell auf- und abbauen und für weniger als einen ELSA-Umlauf konstant sein. Alle Teilchen im Strahl erhalten dann im wesentlichen die gleiche Kickanregung und bekommen sprunghaft neue Anfangskoordinaten im Phasenraum (zunächst einen Winkelversatz, der dann als Ablage in einem Positionsmontitor sichtbar wird). Am Anfang der kohärenten Betatronschwingung ist damit sichergestellt, daß die Variation der Ablagen aller Teilchen klein gegenüber der maximalen Ablage des Ladungsschwerpunktes ist.

Die reale Kickanregung ist nicht rechteckförmig, so daß alle Teilchen nur annähernd die gleichen Anfangsmittanzen (-koordinaten) im Phasenraum erhalten und davon abhängig individuell unterschiedliche Betatronfrequenzen besitzen, da höhere Magnetfeldkomponenten in einem Beschleuniger nicht zu vermeiden sind und eine Nichtlinearität der Bewegung bewirken. Nach einiger Zeit ist die starre Ausgangsphasenbeziehung nicht mehr gegeben, die Kohärenz der Schwingung geht verloren und die Bewegung des Ladungsschwerpunktes wird auf die Gleichgewichtsbahn gedämpft (Filamentierung)¹⁹. Die individuelle Schwingungsamplitude eines Teilchens bleibt erhalten, nur die Schwerpunktsbewegung ist vom Prozeß der Filamentierung betroffen. Für die Signalnahme mit einem Lagemonitor bedeutet dies ein langsames Abklingen der Schwingungsamplitude. Die Zeit, bis der Ladungsschwerpunkt auf die Gleichgewichtsbahn gedämpft ist, heißt Filamentierungszeit; sie kann für die Erfassung der kohärenten Betatronschwingung durch einen Lagemonitor benutzt werden. Die Dauer, in der das Signal beobachtet werden kann, ist stark davon abhängig, wie hoch der nichtlineare Anteil an der Gesamtbewegung ist.

Die mit einem Lagemonitor gemessenen Positionsdaten werden einer Digitalisierungseinheit zugeführt und in einem Speicher abgelegt. Eine Frequenzanalyse (z.B. durch eine digitale Fouriertransformation [16]) der Daten liefert Amplituden und Phasen der Strahlschwingung²⁰. Können N Meßwerte in einem Zeitfenster – dieses ist durch die Filamentierungszeit gegeben – mit einer Abtastfrequenz von f_{sample} erfaßt werden, so beträgt die Frequenzauflösung: $\Delta f = \frac{f_{sample}}{N}$. Unter Berücksichtigung des Nyquist-Theorems kann höchstens eine maximale Frequenzkomponente $f_{max} = \frac{1}{2}f_{sample}$ rekonstruiert werden [85].

Die Filamentierungszeit limitiert also die Beobachtungsdauer eines Lagesignals der kohärenten Strahlschwingung und damit eine maximal erreichbare Frequenzauflösung. Für ELSA beträgt die Filamentierungszeit einige hundert Mikrosekunden.

5.7 Integration des ELSA-Monitorsystems

Die Erfassung von Strahlagedaten geschieht mit dem ELSA-Monitorsystem, das von M.Schillo [93] aufgebaut wurde.

Das ELSA-Monitorsystem wurde im neuen Kontrollsystem in einem eigenständigen Feldbuszweig gruppiert, dem ein dedizierter VME-Feldbuscontroller vorsteht (Abschnitt 2.3.5), so daß es als Subsystem der Prozessebene in das Kontrollsystem mit der hoher Bandbreite integriert ist. Der Feldbuscontroller kommuniziert mit den Monitorsystem-Feldbusprozessoren über Datenpakete. Er steuert damit einstellbare Niederfrequenzvorverstärker, zuschaltbare HF-Verstärkerkaskaden, HF-Kalibrationssignale sowie Schalter zur Auswahl der vertikalen und horizontalen Meßebeane. Weiter verfügen die Feldbusprozessoren des Monitorsystems über lokal ablaufende Kalibrationsroutinen, welche ebenfalls gesteuert werden. Alle Einstellungen des Monitorsystems sind als Kontrollsystemparameter verfügbar und werden von der Software im Feldbuscontroller verwaltet. Jede Kontrollsystemapplikation hat darauf transparenten Zugriff.

Die Etablierung des Monitorsystems als eigenständiges Subsystem erforderte die Entwicklung einer Software unter VxWorks. Die Verarbeitungsleistung des zugeordneten Feldbuscontrollers (MC68030/40MHz) ermöglichte eine komfortable Verwaltungsstruktur in Verbindung mit lokalen Einstell- und Kalibrationsroutinen, welche unmittelbar vom Feldbuscontroller durchgeführt werden. Monitorstationen werden durch die VxWorks-Software in zwei disjunkte Gruppen eingeteilt und gegeneinander abgegrenzt verwaltet²¹:

1. Für Messungen der geschlossenen Teilchenbahn (Closed-Orbit) wird die Mehrzahl der Monitore eingesetzt. Zunächst werden sie durch das Kontrollsystem kalibriert, so daß anschließend die periodische Messung des Closed-Orbit einsetzen kann.

¹⁹In der Arbeit von A.Dreist [27] sind einige Untersuchungen an ELSA zur Filamentierung des injizierten Strahls ausgeführt.

²⁰Insbesondere können aus dem Amplitudenspektrum Arbeitspunktinformationen gewonnen werden.

²¹Die Einstellkonfiguration einer Monitorstation im Rahmen einer Closed-Orbit-Messung ist unterschiedlich zu einer Monitor-einstellung für eine zeitaufgelöste Strahlidiagnose.

2. Einige ausgewählt Monitorstationen stehen schnellen Systemen zur zeitaufgelösten Strahldiagnose während des ELSA-Maschinenzyklus zur Verfügung.

Die Zuordnung von Monitorstationen zur ersten oder zweiten Gruppe ist nicht festgeschrieben und kann jederzeit in der Verwaltung geändert werden. Damit der Feldbuscontroller zu jedem Zeitpunkt eine konsistente Gesamtsicht des Zustandes angeschlossener Monitorstationen hat, mußte die Feldbusprozessor-Software dahingehend erweitert werden, daß nach Ablauf einer lokalen Kalibration die Feldbusprozessoren ihre Kalibrationsergebnisse an den Feldbuscontroller zurückliefern. Der Feldbuscontroller seinerseits bildet alle Größen auf Kontrollsystemparameter ab, welche an übergeordnete Schichten durch elementare Schreibtransaktionen weitergegeben werden.

Alle Kalibrationsergebnisse sind im Feldbuscontroller konzentriert und stehen zur Umrechnung von relativen Lagesignale (Lagesignal bezogen auf ein Summensignal) in physikalische Ablagen (Abweichungen von der Sollbahn in der Einheit Millimeter) durch Umrechnungsroutinen, die J.Wenzel im Rahmen seiner Diplomarbeit [113] entwickelt hatte und die in das neue System portiert wurden, bereit. Eine Closed-Orbit-Messung wird vom Feldbuscontroller eigenständig eingeleitet und ausgeführt; ein Anwender muß dazu lediglich einen Befehl geben. Die Ergebnisse einer Closed-Orbit-Messung (ein oder mehrere Orbits und z.B. Differenz-Orbits) sind auf Kontrollsystemparameter abgebildet; sie werden durch elementare Transaktionen beschrieben und so allgemein im Kontrollsystem verfügbar gemacht.

Zur unmittelbaren Analyse von Rohdaten, welche in den Speicherblöcken der Transientenrecorder (Daten der Analog-Digital-Wandler) abgelegt sind, wurden transiente Parameter definiert, so daß sich die Rohdaten systemweit über transiente Transaktionen auslesen lassen. Zur Zeit kann diese Funktion noch nicht genutzt werden, da bislang eine technische Fehlfunktion die Kommunikation zwischen Feldbusprozessoren und Feldbuscontroller behindert.

Insgesamt legen der Feldbuscontroller und die erstellte VxWorks-Software die Möglichkeiten des Monitor-systems in Form von Kontrollsystemparametern offen. Der Zugriff erfolgt über Transaktionsmechanismen des Kontrollsystems. Ein erheblicher Teil an Vorverarbeitungs- und Analyseschritten wird bereits auf Prozeßebene abgewickelt. Die Kontrollebene hat damit eine transparente Sicht und Zugriffsmöglichkeit auf den Gesamtzustand des ELSA-Monitor-systems. Auf dieser Grundlage ist eine zukünftige Erweiterung des ELSA-Monitor-systems durch neue Monitorstationen leicht möglich.

5.8 Überprüfung der korrigierten Füllstruktur

Für die Untersuchung des Injektionsschemas zur Korrektur der ELSA-Füllstruktur (Abschnitt 4.3), wurde ein breitbandiger Intensitätsmonitor vorgeschlagen. Das damit verbundene Meßsystem ist im größeren Rahmen der gesteckten Zielsetzung zur Integration von Strahldiagnose und Kontrolle zu sehen.

Die Realisierung des Intensitätsmonitors hatte insoweit einen Prototypencharakter für das neue Kontrollsystem, da hierdurch die Anwendbarkeit des Konzeptes zur Integration eines Strahldiagnosesubsystems in die Kontrolle, also die enge Kopplung zwischen Strahldiagnose mit neuem Kontrollsystem im Sinn der Modellvorstellung aus Abschnitt 1.4.2, gezeigt werden sollte. Es sollten allgemeine Methoden der digitalen Signalverarbeitung im Zeit- und Frequenzraum zur Analyse und Weiterverarbeitung der anfallenden Daten eingesetzt, die damit verbundenen Begriffsbildungen eingeführt, erprobt und etabliert werden. Die Methodik der Datenanalyse sollte mit dem EPOS-System [37][81] entwickelt werden, um auf Grundlage dieser Erfahrung ein eigenständiges Meßsystem in der Prozeßebene des neuen ELSA-Kontrollsystems aufzubauen.

Ein Teil der dazu erforderlichen Methoden der digitalen Signalverarbeitung wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit unter anderem zur Realisierung dieses Meßsystems entwickelt und sind im Abschnitt 5.3 beschrieben.

Das Strahldiagnosesubsystem zur breitbandigen Erfassung und Überwachung der ELSA-Füllstruktur wurde von J.Keil im Rahmen einer Diplomarbeit [57] realisiert (Abbildung 5.14 wurde dieser Arbeit entnommen). Zur elektromagnetischen Ankopplung an den in ELSA umlaufenden Elektronenstrahl findet ein kapazitiv arbeitender Knopfmonitor Verwendung, wie er baugleich im ELSA-Monitor-system eingesetzt wird. Der Monitor „sieht“ eine Folge von gaußförmigen Strompulsen in einem zeitlichen Abstand von 2 ns. Das entspricht dem zeitlichen Muster des zur Teilchenbeschleunigung eingesetzten 500 MHz-Hochfrequenzsystems von ELSA. Eine inhomogene ELSA-Füllstruktur ist periodisch mit der Umlaufzeit $T_{elsa} = 548$ ns des Strahls und erzeugt eine periodische Amplitudenmodulation des registrierten Signals.

Im ersten Verarbeitungsschritt werden die Signale von vier Knöpfen des verwendeten Monitortyps gleichphasig summiert und verstärkt (Modul A im ELSA-Tunnel). Zur Demodulation des pulsamplitudenmodulierten Signals bei einer Frequenz von 500 MHz wird eine Elektronik eingesetzt, die nach dem Prinzip des synchronen Detektors arbeitet. In der Arbeit von J.Keil wurden verschiedene Detektionsverfahren zur Demodulation aufgebaut und detailliert getestet; es konnte gezeigt werden, daß das Prinzip des synchronen Detektors für ELSA die günstigste Variante darstellt. Der Dynamikbereich von 35 dB läßt sich durch verschiedene Vorverstärkerkonfigurationen über einen Bereich von 60 dB variieren. Das System besitzt eine Bandbreite von 100 MHz am Eingang und ca. 43 MHz am Ausgang. Das Ausgangssignal ist durch ein Tiefpaßfilter bandbegrenzt und damit auf die nachfolgende Digitalisierung unter Beachtung des Nyquist-Theorems angepaßt (Modul B im „HF-Raum“). Zur Datennahme wird ein Speicheroszilloskop mit einer Digitalisierungsbreite von 8 Bit und einer Abtastfrequenz von $f_s = 100$ MHz eingesetzt. Das Signal läßt sich bis zu einer Speichertiefe von $15 \cdot 1024$ Meßwerten in Echtzeit erfassen; insgesamt sind das ca. 300 Umläufe mit jeweils 55 Datenpunkten pro Umlauf. Die Aktivierung der Datennahme erfolgt mit dem Signal der ELSA-Umlauffuhr (Umlaufclock), welches durch die Entwicklung der neuen Injektionszeitsteuerung zur Verfügung steht (Abschnitt 4.3). Zur Auslesung des verwendeten Speicheroszilloskops wurde ein allgemeines Treibermodul für den IEC-Bus-Controller TMS-9914A zur Verwendung im Echtzeitbetriebssystem VxWorks von J.Keil entwickelt. Die Spezifikationen für dieses Treibermodul wurden von J.Keil, T.Götz und dem Autor dieser Arbeit definiert und sind so allgemein gehalten, daß alle an ELSA verwendeten Geräte mit IEC-Bus-Schnittstelle für die Kontrolle nutzbar sind (Abschnitt 5.9). Besonderer Wert wurde auf eine hohe Auslesegeschwindigkeit gelegt. Mit dem Treibermodul sind Übertragungsraten bis zu $250 \frac{kByte}{s}$ erreichbar, sofern das angeschlossene Meßgerät seine Daten mit dieser Rate ausliefern kann. Die Weiterverarbeitung der Daten in der Prozeßebene

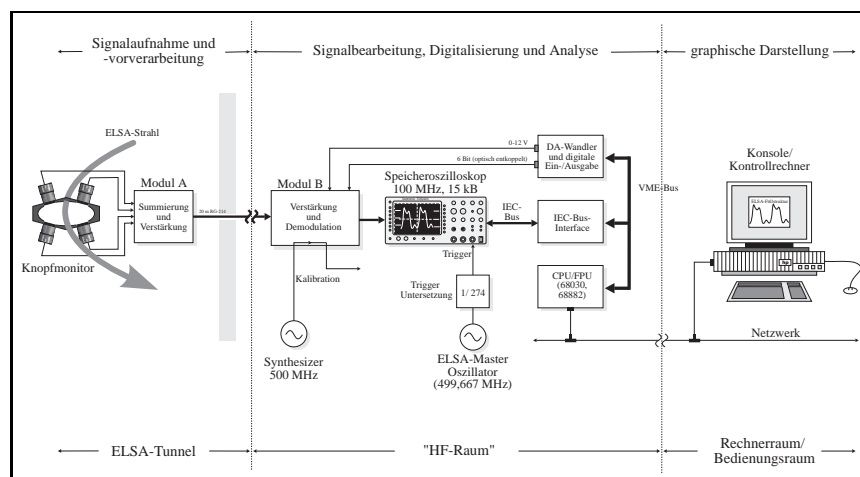


Abbildung 5.14: Blockdiagramm des schnellen Intensitätsmonitors zur Füllstrukturanalyse

des Kontrollsystems erfolgt durch ein VME-Prozessormodul (MC68030/MC68882/25MHz) unter Verwendung allgemeiner Methoden der digitalen Signalverarbeitung im Zeit- und Frequenzraum. Dabei werden die Meßdaten mit digitalen Filtern tiefpaß- und kammgefiltert sowie mit einer schnellen Fouriertransformation und daran anschließender Identifikation die Harmonischen der Umlauffrequenz ermittelt. Ein Teil der verwendeten Algorithmen konnte mit vorhandenen Operatoren in EPOS getestet werden. Der Operator imon wurde von J.Keil in das EPOS-System integriert und der segproc-Operator erweitert. Die in EPOS getesteten Verfahren wurden dann auf das VME-Prozessormodul portiert. Unter anderem ermittelt das Meßsystem Gütezahlen zur Charakterisierung der Füllstruktur (z.B. das Tastverhältnis der Füllung). Das Meßsystem ist in die neue Kontrolle integriert. Alle Eingangs- und Ausgangsgrößen sind auf Parameter des Kontrollsystems abgebildet. Der Zugriff auf Parameter der Elektronik in Modul B geschieht über Servicefunktionen der Prozeßdatenbank. Die Meßgrößen werden mehrmals pro Sekunde (ca. 4 Hz) erfaßt und durch Schreibtransaktionen an die Kontrollebene übermittelt.

Das aufgebaute Meßsystem erfüllt die gesetzten Ziele und ist ein Beispiel für die Verwendung des Ansatzes zur Integration von Strahldiagnose und Kontrollsystem im Sinne von Abschnitt 1.4.2.

5.9 Allgemeine Meßgeräteaufbauten für die Strahldiagnose

Die Entwicklung des Treibermoduls zur Einbindung von Meßgeräten mit IEC-Bus-Schnittstelle im Rahmen der Entwicklung des Strahldiagnosesubsystems zur breitbandigen Erfassung der ELSA-Füllstruktur [57], war der Ausgangspunkt zur einheitlichen Integration von Meßgeräten mit dieser Standardschnittstelle in das Kontrollsystem.

Die Meßgeräte sind in die Prozeßebene über VME-Prozessormodule und Standardschnittstellenkarten eingebunden. Das entwickelte Treibermodul regelt den parallel Zugriff auf den IEC-Bus und synchronisiert den Zugriff auf ein Gerät. Ein Gerät kann für einen exklusiven Zugriff durch eine Anwenderapplikation reserviert werden.

Ein VME-Prozessormodul kann mehrere Meßgeräte verwalten, die entweder über eine lokale Schnittstellenkarte oder einen anderen VME-Rechner angebunden sind. Aus diesem Grund führt jeder VME-Rechner die notwendigen Verwaltungsstrukturen in einer Tabelle. Die Meßgeräte sind durch Angabe eines eindeutigen Namens ansprechbar. Die Abbildung auf hardware-spezifische Setzungen für das entsprechende Geräte wird durch die Konfigurationsverwaltung beim Zugriff automatisch vorgenommen und ist für einen Anwender transparent. Eine Anwenderapplikation im Prozeßsystem ist so von Hardwareeigenschaften eines bestimmten Geräts abgekoppelt²². Für den Zugriff auf Meßgeräte durch einen VME-Rechner stehen Zugriffsroutinen zur Verfügung.

Damit ein kontrollsystemweiter Zugriff auf die vorhandenen Meßgeräte möglich ist, wurde die rechnerlokale Funktionalität netzwerkweit verfügbar gemacht. Mehrere Funktionsbibliotheken, welche das Konzept des rechnerfernen Prozeduraufrufs verwendet, wurden nach dem Vorbild des Kommunikationssystem des verteilten Kontrollsystemkerns (Abschnitt 2.4.2) für den Einsatz in der Kontrollebene entwickelt. Es wurde ein zweistufiger Ansatz verfolgt:

1. In einer unteren Stufe wurden entsprechend den elementaren Befehlen des lokalen Treibermoduls korrespondierende Netzwerkrountinen entwickelt und als Funktionsbibliothek bereitgestellt.
2. Für komplexe Meßgeräte (mehrere Speicheroszilloskope und ein Spektrumanalysator) sind die elementaren Routinen zu kompletten Auslesefunktionen zusammengesetzt, welche die wesentlichen Eigenheiten eines Gerätes berücksichtigen. Die Auslesefunktionen sind in einer Funktionsbibliothek zusammengefaßt.

Die Funktionsbibliotheken sind so allgemein gehalten, daß sie von beliebigen Applikationen genutzt werden können.

Auf den VME-Einheiten der Prozeßebene bietet der entwickelte Serverprozeß `iecserv` den systemweiten, rechnerfernen Meßgerätezugriff an. Eine zusätzliche Funktionsbibliothek für den Einsatz im Prozeßsystem, ermöglicht von einer VME-Einheit den Zugriff auf Meßgeräte, welche an andere VME-Einheiten angeschlossen sind. Damit sind rechnerübergreifende Meßaufbauten im Prozeßsystem möglich. Sie können von einem oder mehreren Rechnern der Prozeßebene koordiniert werden. Diese Konzeption hat im Rahmen der Entwicklung des schnellen Intensitätsmonitors von J.Keil bereits Einsatz gefunden.

Zur Zeit sind die Funktionsbibliotheken der Kontrollebene für Meßgeräte in der Prozeßebene im EPOS-System gebündelt und durch eine Menge von EPOS-Operatoren zugänglich gemacht. EPOS kann damit die Koordination von Meßgeräteaufbauten zur Untersuchung beschleunigerphysikalischer Fragestellungen übernehmen (Abb. 5.15). Besonderer Wert wurde auf Konfigurierbarkeit gelegt, um so Strahldiagnoseaufbauten leicht zu ermöglichen. Die Meßgeräte sind aus EPOS heraus durch einen eindeutigen Namen systemweit ansprechbar. Zur Einbindung spezieller Meßgeräte in EPOS wurden die Operatoren `rdlcr9400`, `rdlcr9424E`, `rdhp54600A`, `rdtek` und `rdfsa` entwickelt. Diese Operatoren sind in EPOS noch ergänzt durch geräteunabhängige Operatoren: `iecmofify`, `iectransfer`, `iecread`, `iecsend`, `iectalk` und `ieclist`.

Für die direkte Meßgeräteintegration in das Kontrollsystem, wurde eine Funktionsbibliothek mit Prozeßdatenbank-Servicefunktionen implementiert. Mit Hilfe der Servicefunktionen lassen sich die Fähigkeiten eines Meßgerätes in die Kontrolle einbeziehen und dessen Funktionen systemweit durch Schreibtransaktionen des Kontrollsystems bedienen.

Alle Maßnahmen zusammen integrieren die vorhandenen Meßgeräte in das Kontrollsystem; die Meßgeräte können, entsprechend der konkret zu lösenden Strahldiagnoseaufgabenstellung, kombiniert werden. Die

²²Im allgemeinen benötigen Geräte herstellerabhängige Zeichenketten für die Begrenzung zu übertragender Daten oder zur Initialisierung.

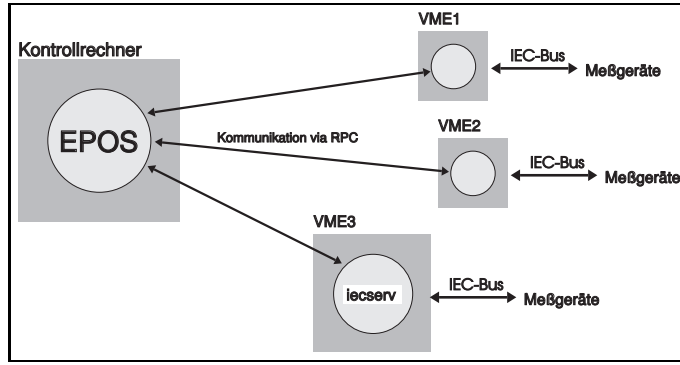


Abbildung 5.15: Koordination von Meßaufbauten durch EPOS

Anforderungen aus Kapitel 1 zur Integration von allgemeinen Meßgeräteaufbauten in das Kontrollsystem sind somit erfüllt.

5.10 System zur Messung des transversalen Phasenraums

Ein Meßaufbau zur Bestimmung von Phasenraumbildern in der Darstellung des Poincaré-Schnitts wurde prototypenhaft in einer Diplomarbeit [81] für ELSA erprobt; das Prinzip der Messung ist dort ausführlich erklärt und wird hier nur kurz wiederholt. Durch die zur Verfügung stehende ELSA-Umlaufuhr des neuen Kontrollsystems ergeben sich für die Phasenraummessung wesentlich günstigere Bedingungen als in der Vergangenheit.

Das Meßprinzip der Phasenraumrekonstruktion beruht darauf, an einem Ort s im Ring **gleichzeitig** und synchron mit der **Umlaufzeit** der Teilchen im Beschleuniger (nach einer kohärenten Anregung des Strahls) die **Ablage** des Elektronenstrahls von der Gleichgewichtsbahn sowie den **Winkel** des Teilchenstrahls zur Gleichgewichtsbahn zu messen.

Ein Positionsmonitor des ELSA-Monitorsystems kann nicht gleichzeitig Lage und Winkel des Ladungsschwerpunktes zur Gleichgewichtsbahn erfassen. Den Winkel zur Gleichgewichtsbahn bestimmt deswegen eine zusätzliche Ablagemessung mit einem zweiten Positionsmonitor. Die beiden Monitorstationen haben die Bezeichnungen i und ii ; der Strahl durchläuft zuerst Monitorstation i und danach Monitorstation ii . Die Ablage im jeweiligen Monitor sei mit y_i bzw. y_{ii} und der Phasenvorschub der Betatronschwingung zwischen den Monitorstationen mit $\Delta\psi$ bezeichnet. Es wird angenommen, daß der Wert der Betafunktion an beiden Monitorstationen $\beta_i(s)$ und $\beta_{ii}(s)$ annähernd gleich ist: $\beta_i(s) \approx \beta_{ii}(s)$, so daß die Indizes nicht weiter zu berücksichtigen sind.

In den Koordinaten $\tilde{\eta} = \eta\sqrt{\beta(s)}$ und $\tilde{\eta}' = \eta'\sqrt{\beta(s)} = \alpha(s)y(s) + \beta(s)y'(s)$, wobei mit $\alpha(s)$ die Alphafunktion und mit (η, η') die normalisierten Koordinaten

$$\begin{pmatrix} \eta(s) \\ \eta'(s) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{\beta(s)}} & 0 \\ \frac{\alpha(s)}{\sqrt{\beta(s)}} & \sqrt{\beta(s)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y(s) \\ y'(s) \end{pmatrix} \quad (5.56)$$

bezeichnet sind, ergeben sich folgende Beziehungen [81]:

$$\begin{aligned} \tilde{\eta}_{ii} &= \sqrt{\beta}\eta_{ii} = y_{ii}, \\ \tilde{\eta}'_{ii} &= \sqrt{\beta}\eta'_{ii} = \frac{1}{\sin(\Delta\psi)} [y_{ii} \cos(\Delta\psi) - y_i]. \end{aligned} \quad (5.57)$$

Dabei bezeichnen η_{ii} und η'_{ii} die normalisierten Koordinaten an der jeweiligen Monitorstation. Die Gleichungen 5.57 geben die Vorschrift zur Bestimmung der Phasenraumfigur an der zweiten Monitorstation an. Für die erste Monitorstation kann die Phasenraumfigur ebenfalls ermittelt werden:

$$\begin{aligned} \tilde{\eta}_i &= \sqrt{\beta}\eta_i = y_i, \\ \tilde{\eta}'_i &= \sqrt{\beta}\eta'_i = \frac{1}{\sin(\Delta\psi)} [y_{ii} - y_i \cos(\Delta\psi)]. \end{aligned} \quad (5.58)$$

Allein durch die Messung der Ablagen y_i , y_{ii} und des Phasenvorschubs $\Delta\psi$ läßt sich Phasenraumfigur bestimmen. Für den speziellen Fall $\Delta\psi = \frac{\pi}{2}$ ergibt sich aus den Beziehungen 5.57 und 5.58:

$$\begin{pmatrix} \tilde{\eta}_i \\ \tilde{\eta}'_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_i \\ y_{ii} \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} \tilde{\eta}_{ii} \\ \tilde{\eta}'_{ii} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_{ii} \\ -y_i \end{pmatrix}. \quad (5.59)$$

Trägt man die für jeden Umlauf k gemessenen Strahlpositionen $y_i(k)$ und $y_{ii}(k)$ entsprechend der Vorschriften in 5.59 gegeneinander auf, kann der Phasenraum der Bewegung an beiden Monitorstationen sichtbar gemacht werden.

Es ist zu beachten, daß sich die Messung „stroboskopartig“ zusammensetzt, denn in jedem Umlauf wird nur eine Messung genommen. Eine geschlossene Phasenraumfigur ergibt sich bei Betrachtung vieler Umläufe. Zwar ist die Phasenraumfigur immer noch aus diskreten Punkten aufgebaut, allerdings erzeugen viele Messungen die visuelle Scheinwirkung geschlossener Trajektorien.

Für eine lineare Bewegung wird eine kreisförmige Phasenraumfigur erwartet. Im Fall einer nichtlinearen Bewegung ist die Kreislinie deformiert. Für den Fall einer drittelzahligen Resonanz stellt sich z.B. die charakteristische Dreieckstruktur im Phasenraum ein. Die Phasenraumfigur entwickelt sich in einem bestimmten Drehsinn, welcher Aufschluß über den Nachkommaanteil q des Arbeitspunktes $Q = M + q$ (M ganzzahlig) gibt. Ist der Nachkommaanteil $q < 0.5$, so entwickelt sich die Figur im Uhrzeigersinn, für $q > 0.5$ gegen den Uhrzeigersinn. Ist der Arbeitspunkt Q nahezu rational $Q \approx \frac{l}{m}$ (l, m ganzzahlig) und betrachtet man nur jeden m -ten Umlauf in der Phasenraumfigur, so entwickeln sich diese Punkte für $Q > \frac{l}{m}$ im Uhrzeigersinn und für $Q < \frac{l}{m}$ gegen den Uhrzeigersinn. Tabelle 5.1 stellt diese Ergebnisse zusammen.

Abstand der Umläufe	Drehsinn gegen Uhrzeigersinn	Drehsinn im Uhrzeigersinn
1	$q > 0.5$	$q < 0.5$
m	$Q < \frac{l}{m}$	$Q > \frac{l}{m}$

Tabelle 5.1: Drehsinn der Teilchenbewegung

Ist die Phasenraumfigur nach n Umläufen geschlossen, so ist der Nachkommaanteil des Arbeitspunktes $q = \frac{1}{n}$. Erneut sei angenommen, der eingestellte Arbeitspunkt Q sei nahezu rational: $Q = \frac{l}{m} - \delta q$. Betrachtet man nur jeden m -ten Umlauf, so haben aufeinanderfolgende Punkte eine Winkelabweichung $\delta\phi = 2\pi m\delta q$. Betrachtet man fortlaufend weitere Punkte bis nach k Punkten der Ausgangspunkt wieder erreicht ist, so gilt: $2\pi\delta\phi = 2\pi mk\delta q$. Der Abstand zur Resonanz beträgt dann: $\delta q = \frac{1}{mk}$.

In [81] findet sich ebenfalls ein Verfahren, um aus den Lagedaten zwischen zwei Monitorstationen den Phasenvorschub der Betatronschwingung zu bestimmen, was allerdings im Rahmen dieser Arbeit nicht angewendet wird.

Benutzt man die Positionsdaten zwei aufeinanderfolgender Umläufe eines Monitors y_n, y_{n+1} , so beträgt der Phasenvorschub $\Delta\psi$ zwischen beiden Messungen $\Delta\psi = 2\pi Q$, wobei Q den Arbeitspunkt darstellt. Spaltet man den Arbeitspunkt in einen ganzzahligen Vorkommanteil l und einen Nachkommaanteil q auf $Q = l + q$, so ergibt sich aus den Beziehungen 5.57 und 5.58 eine gemeinsame Gleichung:

$$\begin{aligned} \tilde{\eta}_n &= y_n, \\ \tilde{\eta}'_n &= \frac{1}{\sin(2\pi q)} [y_{n+1} - y_n \cos(2\pi q)]. \end{aligned} \quad (5.60)$$

Die Lagedaten sukzessiver Umläufe einer Monitorstation zusammen mit dem Nachkommaanteil des Arbeitspunktes q reichen zur Bestimmung der Phasenraumfigur aus. Der Nachkommaanteil q des Arbeitspunktes kann durch eine Fouriertransformation aus den Lagedaten bestimmt werden. Allerdings besteht hier eine Mehrdeutigkeit, da aus der Messung an einer Monitorstation allein nicht entschieden werden kann, ob der Nachkommaanteil q größer oder kleiner als 0.5 ist. Das ist an der Beziehung 5.60 ersichtlich, da $\cos(2\pi q) = \cos(2\pi(1 - q))$. Diese Information des Nachkommaanteils muß also im Fall der Phasenraumbestimmung mit einem Monitor in die Messung eingebracht werden.

Für die Phasenraum-Messung werden die Lagedaten über viele Umläufe aufgezeichnet und gespeichert. Aus den Daten läßt sich der Nachkommaanteil des Arbeitspunktes q auf einer Zeitskala von vier aufeinanderfol-

genden Umläufen $[y_n, y_{n+1}, y_{n+2}, y_{n+3}]$ bestimmen [60], ohne eine Frequenzanalyse durchführen zu müssen:

$$\cos 2\pi q = \frac{1}{2} \frac{y_n - y_{n+1} + y_{n+2} - y_{n+3}}{y_{n+1} - y_{n+2}}. \quad (5.61)$$

Formel 5.61 läßt sich auf zwei Arten einsetzen:

1. Der Nachkommaanteil q läßt sich über viele Umläufe mitteln. Als Fehler der Arbeitspunktbestimmung kann die Standardabweichung des Mittelwertes angegeben werden.
2. Die Variation des Nachkommaanteil des Arbeitspunktes $q(n)$ und damit dessen Entwicklung über die Zeit, läßt sich alternativ untersuchen. Im Fall von ELSA kann etwa alle $2.2\mu\text{s}$ ein Arbeitspunktwert bestimmen werden.

Mit den Meßdaten von vier aufeinanderfolgenden Umläufen $[y_n, y_{n+1}, y_{n+2}, y_{n+3}]$ läßt sich ein Wert für die statische Ablage des Strahls in einer Monitorstation angeben [13][60]:

$$y_{co} = \frac{1}{4 \sin^2 2\pi q} (y_n + y_{n+2} - 2y_{n+1} \cos 2\pi q) \quad (5.62)$$

$$= \frac{y_{n+1}^2 - y_{n+2}^2 + y_{n+1}y_{n+3} - y_{n+2}y_n}{2y_{n+1} - 2y_{n+2} + y_{n+3} - y_n}. \quad (5.63)$$

Diese Meßmethode könnte gegebenenfalls in der Zukunft in den Monitorstationen des ELSA-Monitor-systems zur Bestimmung der Ablage der Gleichgewichtsbahn herangezogen werden, falls die Datennahme umlauf-synchron erfolgen würde.

Aufbau des Phasenraum-Meßsystems und Integration in die Kontrolle

Für das Phasenraummeßsystem – Abb. 5.16 zeigt eine Gesamtübersicht des Meßsystems – werden zwei Moni-torstationen des ELSA-Monitor-systems eingesetzt. Günstige Monitorpaare für eine Phasenraum-Messung in ELSA sind die Monitorstationen in Halbzelle 32 (HZ32) und in Halbzelle 1 (HZ1) sowie die Monitorstationen in Halbzelle 18 (HZ18) und Halbzelle 19 (HZ19); in beiden Fällen macht die horizontale Betatronschiwung einen Phasenvorschub von ca. $\frac{\pi}{2}$ und der Wert der Betafunktion an den Orten der Monitorstationen stimmt paarweise in etwa überein. Die Einstellung der Monitorstationen (Modul A und Modul B) erfolgt im Rahmen der Steuerung des ELSA-Monitor-systems durch eine dedizierte Feldbuscontrollereinheit (Abschnitt 5.7).

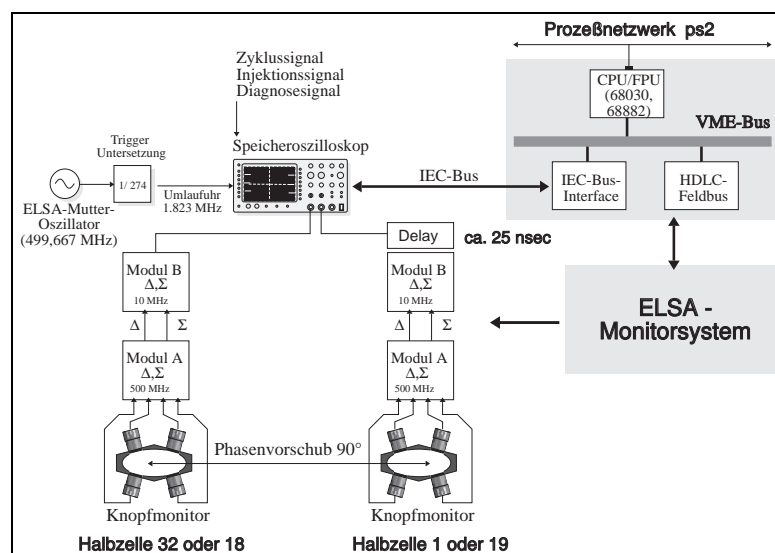


Abbildung 5.16: Übersicht des Phasenraummeßsystems

Das Lagesignal der Monitorstation, welche als erste vom Strahl durchlaufen wird, muß gegenüber der zweiten Station um die Laufzeit der Elektronen zwischen den Monitorstationen verzögert werden, damit in beiden

Monitorstationen das entsprechende Teilchenensemble zu beobachten ist. Für eine Feinabstimmung der Laufzeiten zwischen den Monitorstationen lassen sich die Summensignale beider Stationen benutzen. Das Summensignal des ersten Kanals wird solange verzögert, bis es mit dem Summensignal des zweiten Kanals zusammenfällt. Die typischen Verzögerungszeiten liegen im Bereich von ca. 25 ns und werden durch entsprechende Kabellängen eingestellt. Die gemessene Verzögerung für die Summenkanäle verwendet man auch für die Differenzkanäle.

Als Digitalisierungseinheit wird ein Speicheroszilloskop²³ [62] mit insgesamt vier Eingängen von jeweils 50000 Meßwerte Speichertiefe mit 8 Bit Digitalisierungsbreite eingesetzt, das über einen (speziellen) externen Eingang für den Digitalisierungstakt verfügt²⁴. Die ELSA-Umlaufuhr wird direkt aus dem ELSA-HF-Muttergenerator abgeleitet und über eine Teilerelektronik dem Digitalisierungstakteingang des Oszilloskops zugeführt²⁵. Die Lagesignale der Monitorstationen werden auf die Digitalisierungseingänge des Oszilloskops geführt. Die Phasenraumfiguren, genauer der Poincaré-Schnitt der Bewegung am Beobachtungsort, sind unmittelbar auf dem Oszilloskop sichtbar. Zur Aktivierung der Datennahme stellt das Oszilloskop umfangreiche Möglichkeiten bereit. Als Triggersignale finden sowohl das Injektionssignal als auch das Diagnosesignal aus dem Diagnosetriggergenerator (Abschnitt 4.4) Verwendung. Für die zeitaufgelöste Datennahme im Nachbeschleunigungsbetrieb lassen sich die vier Eingangsdatenspuren des Oszilloskops in Sequenzen einteilen und nacheinander mit Meßwerten füllen. Ein Diagnosesignal löst z.B. die Datennahme einer Datenspur oder einer Gruppe von Datenspuren (in einer Sequenz) aus. Synchron zu einer Pulschette der Diagnosezeitsteuerung werden entsprechend viele Datensegmente aufgezeichnet. Die Anzahl der Datensegmente in einer Sequenz hängt von der Länge einer Datenspur ab. In jedem Fall können maximal nur 200 Datensegmente pro Kanal genommen werden. Die Steuerung des Oszilloskops, bzw. die Meßdatenauslesung und die Integration in das Kontrollsystem, erfolgt über den IEC-Bus (siehe Abschnitt 5.9), eine entsprechende Schnittstellenkarte sowie ein VME-Prozessormodul (MC68030/FP68882/40MHz). Den Zugriff auf das Oszilloskop führen Servicefunktionen aus, welche an die Prozeßdatenbank gekoppelt sind.

Es wurde ein Meßprozeß tPMon für das VxWorks-System der Prozeßebene entwickelt, welche die periodische Auslesung des Oszilloskops übernimmt und die Überwachung des gesamten Meßsystem durchführt. Er berechnet Phasenraumbilder sowohl aus der Messung mit zwei Monitorstationen als auch mit einer Monitorstation. Eine Arbeitspunktverfolgung gemäß Beziehung 5.61 wird ausgeführt und daraus ein mittlerer Arbeitspunkt berechnet. Zusätzlich wird das Amplitudenspektrum der aufgezeichneten Lageschwingung berechnet und daraus Arbeitspunkte berechnet.

Eine Menge von Parametern definiert das Meßsystem im Kontrollsystem; der Meßprozeß tPMon benutzt Schreibtransaktionen des Kontrollsystems zur Weitergabe der Meßergebnisse an die Kontrollebene. Die Messung kann mehrmals pro Sekunde (typische Rate 2 Hz) durchgeführt werden. Die Funktionen des Phasenraummeßsystems stehen auch systemweit durch EPOS zur Verfügung. Damit läßt sich das Phasenraummeßsystem in zwei Betriebsarten einsetzen:

1. Der Meßprozeß tPMon führt die Messung selbsttätig durch und stellt die Ergebnisse unmittelbar dem Kontrollsystem zur Verfügung.
2. Spezielle Untersuchungen, welche den Rahmen der selbsttätigen Messung übersteigen, können mit EPOS koordiniert und ausgeführt werden.

5.11 Bildverarbeitendes Monitorsystem

Die transversale Betatronschwingung eines Teilchens ohne Impulsabweichung in einem Ringbeschleuniger (parametrisiert durch die Bahnlänge s) erweist sich als pseudoharmonische Bewegung und kann durch $y(s) = a\sqrt{\beta(s)}\cos(\psi(s) + \phi)$ angegeben werden. Dabei bezeichnet $\beta(s)$ die Betafunktion und $\psi(s)$ deren Phasenvorschub zwischen einem Anfangspunkt im Ring und s . Mit Hilfe von $y(s)$ und deren Ableitung $y' = \frac{dy(s)}{ds}$ läßt sich die Parameterdarstellung einer Ellipse im (y, y') -Phasenraum angeben, welche für ein

²³Das Speicheroszilloskop LeCroy9424E erhielt den Vorzug vor einer dedizierten Digitalisierungseinheit z.B. auf VME-Basis, da es ein Standardmeßgerät ist und über umfangreiche eigene Funktionen verfügt, welche nicht erst entwickelt werden müssen.

²⁴Das Oszilloskop wurde wegen dieser Eigenschaft für das Phasenraum-Meßsystem angeschafft.

²⁵Die Teilerelektronik auf Grundlage des Bausteins Q3036 ist mit dem Phasenraummeßsystem getestet worden. Nach erfolgreichem Test wurde dann eine verbesserte Elektronik im neuen Timingsystem eingesetzt (Abschnitt 4.3).

festes s im Beschleuniger die möglichen Koordinaten von (y, y') für jeden Umlauf festlegt:

$$a^2 = \gamma y(s)^2 + \beta(s)y'(s)^2 + 2\alpha(s)y(s)y'(s) = \text{const}, \quad \alpha(s) = -\frac{1}{2}\beta'(s), \quad \gamma(s) = \frac{1 + \alpha(s)^2}{\beta(s)}. \quad (5.64)$$

Zwei äquivalente Deutungsmöglichkeiten der Beziehung 5.64 bieten sich an. Entweder wird nur ein Teilchen mit einer festen Anfangsphase ϕ ausgewählt und der Verlauf der Betatronphase $\psi(s)$ für viele Umläufe an einem festen Punkt s_0 aufgezeichnet oder ein Teilchenensemble einer Schwingungsamplitude aber verschiedenen Phasen $0 \leq \psi \leq 2\pi$, an einem Punkt s_0 , zu einem Zeitpunkt betrachtet. In beiden Fällen wird eine Ellipsenbahn (y, y') mit Zentrum $(0, 0)$ beschrieben. Verschiedene Amplituden und Phasen der Teilchen führen zu einer entsprechenden Zahl verschieden großer Ellipsen im Phasenraum. Da Amplituden und Phasen aller Teilchen normalerweise statistisch verteilt sind, nimmt der Strahl eine Fläche im Phasenraum ein. Die Fläche der Phasenraumellipse ist durch $F = \pi a^2$ gegeben und, unter Beachtung des Liouville-Theorems, eine Konstante der Bewegung²⁶. Die Phasenraumdichte der Teilchen bleibt damit für alle Orte s im Ring konstant. Über die Fläche der Ellipse ist die Emittanz $\epsilon = a^2$ festgelegt, welche eine Erhaltungsgröße darstellt. Für die Betatronschwingung eines Teilchens ohne Impulsabweichung folgt $y(s) = \sqrt{\epsilon}\sqrt{\beta(s)} \cos(\psi(s) + \phi)$. Alle Teilchenschwingungen liegen innerhalb einer Grenze, welche die Strahlenveloppe $E(s) = \sqrt{\epsilon}\sqrt{\beta(s)}$ vorgibt. Sie ist ein Maß für den lokalen Strahlquerschnitt (wegen $\beta(s)$) und bestimmt somit wesentlich die transversale Strahldimension.

Betrachtet man die transversale, stationäre Gleichgewichtsverteilung eines Teilchenstrahls, so kann sie in guter Näherung als Gaußverteilung in Ort und Winkel beschrieben werden:

$$f(y, y') = \frac{1}{2\pi\sigma_y\sigma_{y'}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2 - \frac{1}{2}\left(\frac{y'}{\sigma_{y'}}\right)^2}, \quad (5.65)$$

wobei σ_y und $\sigma_{y'}$ die Breiten der Verteilung sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Bewegungsrichtung bezeichnen. Die transversale Ladungsdichte (horizontale und vertikale Richtung) $\rho(x, z)$ bezeichnet die Projektion der Gleichgewichtsverteilung auf die jeweilige Ortsachse; sie stellt ebenfalls eine Gaußverteilung in jede Richtung mit den Breiten σ_x und σ_z :

$$\rho(x, z) = \frac{Ne}{2\pi\sigma_x\sigma_z} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x}{\sigma_x}\right)^2 - \frac{1}{2}\left(\frac{z}{\sigma_z}\right)^2} \quad (5.66)$$

dar. Die Ladung eines Teilchens ist mit e und die Zahl der Teilchen mit N bezeichnet. σ_x und σ_z werden als horizontale und vertikale Strahlbreiten bezeichnet. Die jeweilige 1σ -Breite der transversalen Ladungsverteilung wird mit der Strahlenveloppe $E(s) = \sqrt{\epsilon}\sqrt{\beta(s)}$ identifiziert²⁷. Für einen festen Beobachtungsort im Ring gilt dann:

$$\sigma = \sqrt{\epsilon\beta}, \quad (5.67)$$

wobei β den Wert der Betafunktion am Ort der Beobachtung darstellt. Für die 1σ -Emittanz des Strahls folgt:

$$\epsilon = \frac{\sigma^2}{\beta}. \quad (5.68)$$

Eine Messung des Strahlprofils sowie die Bestimmung der Verteilungsbreite σ aus dem Profil, kann für eine Emittanzbestimmung genutzt werden.

Für die Beschreibung der horizontalen Strahlbreite muß die gaußförmige Impulsverteilung der Teilchen Berücksichtigung finden, welche, vermittelt durch die Dispersionsfunktion $D(s)$, für jedes Teilchen i mit Impulsabweichung Δp_i vom Sollimpuls p_0 eine zusätzliche Ablage $x_{D,i}(s) = D(s)\frac{\Delta p_i}{p_0}$ erzeugt. Die gesamte Ablage eines Teilchens x_i ist damit $x_i(s) = x_{\beta,i}(s) + x_{D,i}(s) = x_{\beta,i}(s) + D(s)\frac{\Delta p_i}{p_0}$. Die gaußförmige Impulsverteilung erzeugt eine gaußförmige Verteilung von Dispersionsbahnen der Teilchen im Strahl und die Angabe von Δp – im Zusammenhang mit der Strahlbreite – ist hier als Betrag der Standardabweichung der Impulsverteilung (Energieverteilung ist für Elektronenmaschinen äquivalent) zu verstehen. Die beiden

²⁶ Abstrahlungseffekte, Wechselwirkungen des Strahls mit der Kammerwand oder Streuung an Restgasmolekülen sind hier vernachlässigt.

²⁷ Mit dieser Definition kann eine Emittanz für den gesamten Teilchenstrahl angegeben werden. Sie wird auch oft auf die zweifache oder dreifache σ -Breite bezogen.

gaußförmigen Verteilungen für die horizontale Bewegungsrichtung sind miteinander gefaltet, es ergibt sich daraus eine Gaußverteilung mit der neuen Strahlbreite σ_x :

$$\sigma_x = \sqrt{\epsilon_x \beta_x(s) + \left(D_x(s) \frac{\Delta p}{p_0}\right)^2}. \quad (5.69)$$

Im allgemeinen setzt sich die horizontal meßbare Strahlbreite σ_x aus zwei Anteilen zusammen. Kann man für den Einbauort eines profilgebenden Monitors (z.B. Synchrotronlichtmonitor) eine Stelle mit kleinem Wert der Betafunktion β_x wählen, so daß in guter Näherung gilt: $\epsilon_x \beta_x \ll (D_x \frac{\Delta p}{p_0})^2$, ist ein Studium der Strahlbreite aufgrund des dispersiven Anteils möglich. Das Profil ist ein direktes Maß für die Impulsverteilung (Energieverteilung) im Strahl. Kann hingegen $\epsilon_x \beta_x \gg (D_x \frac{\Delta p}{p_0})^2$ gewählt werden, z.B. an einer Stelle mit großem Wert der Betafunktion, ist der dispersive Anteil vernachlässigbar und die Strahlbreite nur aufgrund der Betatronschwingung gegeben.

Aufbau des Meßsystems und Integration in die Kontrolle

Für ELSA sollen Strahlprofilmonitore in den Transferkanälen zwischen dem zweiten Linearbeschleuniger und dem Synchrotron sowie zwischen Synchrotron und ELSA installiert werden. Im Rahmen einer Diplomarbeit [11] wurde der Prototyp eines Folienprofilmonitors entwickelt und in den Transferkanal zwischen Synchrotron und ELSA eingesetzt. Erste Messungen von Strahlagedaten und Profilen konnten mit dem bildverarbeitenden Meßsystem für diese Arbeit durchgeführt werden. Zusätzlich befindet sich ein Synchrotronlichtmonitor für ELSA im Aufbau [45]. Für die quantitative Erfassung der damit meßbaren Profildaten ist das bildverarbeitende Monitorsystem ebenfalls ausgelegt.

Die Elektronik und die Kameraeinheit des bildverarbeitenden Monitorsystems basiert auf kommerziellen VME-Einheiten und benötigt deswegen keine Hardwareeigenentwicklung. Kern der Hardware des Monitorsystems stellt eine VME-Bilderfassungskarte IPP-100 („Image Processing Port“) [30] dar, welche Analogsignale von Standardkameras erfassen kann. Sie verfügt über eine Triggereinheit und Funktionen zur Kontrolle einer externen Kamera. Das analoge Eingangssignal wird durch schnelle Analog-Digital-Wandler (bis zu 15 MHz Abtastrate) mit einer Digitalisierungsbreite von 8 Bit bestimmt. Eine VME-Rechnereinheit (CPU 68030, 25 MHz, 4 MByte Speicher) im Prozeßsystem komplettiert Bilderfassungskarte und Kameraeinheit. Das Monitorsystem ist an verschiedene Triggersignale der Zeitsteuerung angekoppelt. Für eine Messung kann jeweils ein Triggersignal (im allgemeinen das Diagnosesignal) ausgewählt werden. Ein von der IPP-100 digitalisiertes Bild wird vom VME-Prozessormodul periodisch, oder im Anschluß an ein externes Triggersignal ausgelesen, vorverarbeitet und an die darüberliegende Kontrollebene über einen Netzwerkstrang transferiert. Das digitalisierte Bild wird zusätzlich auf einem TV-Monitor angezeigt, wobei sich die Darstellung durch Punktoperationen mit Hilfe von Farbtabelle („look up“-Tabellen) in Echtzeit modifizieren läßt. Abbildung 5.17 zeigt den Aufbau des bildverarbeitenden Monitorsystems im Überblick. Weitere technische Eckdaten der IPP-100 finden sich in [30]. Alle Parameter des bildverarbeitenden Monitorsystems sind auf Kontrollsystemparameter abgebildet. Für den Zugriff auf Bilddaten fanden zum Teil transiente Parameter Verwendung; sie sind zum Transport großer Datenmengen vorgesehen. Die Software des Monitorsystems setzt sich aus drei Komponenten zusammen:

1. Auf Prozeßebene befindet sich Ansteuerungs- und Kontrollsoftware, sowie Zugriffsbibliotheken für die IPP-100. Diese Software wird von der VME-Rechnereinheit im Prozeßsystem ausgeführt. Sie umfaßt unter anderem auch eine Menge von Servicefunktionen für die Prozeßdatenbank zum Zugriff auf die Parameter der IPP-100. Ein Meßprozeß `tImageMon` übernimmt die periodische Datennahme, ermittelt Strahlageposition, Strahlprofil, Breite der Verteilung²⁸ und benutzt Schreibtransaktionen des Kontrollsystems zum Transport der Ergebnisdaten an die Kontrollebene. Eine Menge von Funktionen zur digitalen Bildverarbeitung bildet den Grundstock zur „on line“-Bearbeitung von Bildern durch das VME-Prozessormodul. Für die zeitaufgelöste Strahl diagnose im Nachbeschleunigungsbetrieb mit dem Synchrotronlichtmonitor bietet der Meßprozeß `tImageMon` die triggersynchrone Datennahme einer Bildsequenz von bis zu 30 Teilbildern an, welche über transiente Parameter durch entsprechende Transaktionen des Kontrollsystems auslesbar sind. Zur Zeit kann ein Bild in einer Sequenz maximal 300*300 Punkte (Pixel) groß sein. Bildgröße und Anzahl der Bilder begrenzt der Speicher des VME-Prozessormoduls. In der zeitaufgelösten Datenerfassung können Bilder in einem Abstand von ca. 50 ms genommen werden.

²⁸Es wird die Verteilungsbreite auf halber Höhe des Verteilungsmaximums bestimmt.

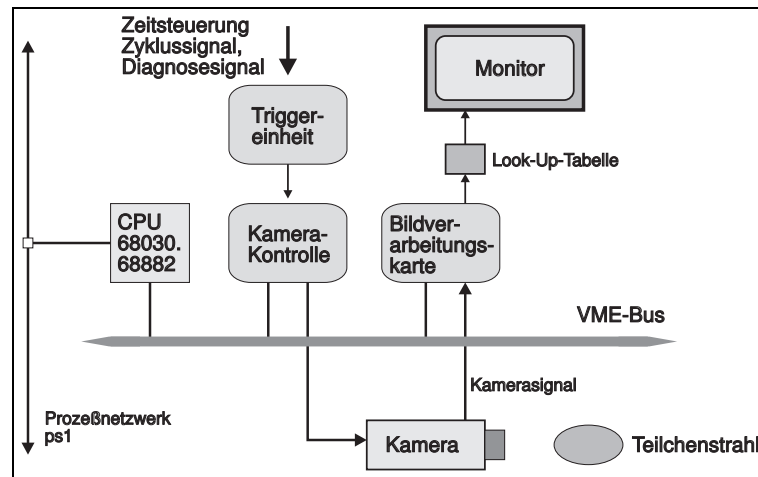


Abbildung 5.17: Gesamtübersicht des bildverarbeitenden Meßsystems

2. Ein RPC-Server auf dem VME-Prozessormodul stellt zusätzlich die Dienste des bildverarbeitenden Monitorsystems im gesamten ELSA-Kontrollsystem zur Verfügung. Dazu wurde ein Satz von Funktionen zur rechnerfernen Kommunikation entwickelt, die z.B. in EPOS für den Zugriff auf das bildverarbeitende Monitorsystem verwendet werden.
3. Eine Softwarebibliothek zur digitalen Bildverarbeitung wurde für das EPOS-System entwickelt. Die Operationen zur digitalen Bildverarbeitung sollen hier nicht im Detail erklärt werden; dazu sei z.B. auf die Literatur [31][52] verwiesen. In einer kurzen Übersicht seien hier nur die Möglichkeiten aufgezählt, welche in den EPOS-Operatoren **IMAGE** und **IPROC** zur Analyse und Auswertung von Bilddaten gebündelt sind:

Punktoperationen auf einem Bildinhalt (z.B. für Bearbeitung durch „look up“ Tabellen) lassen sich tabellengesteuert ausführen. Zum Funktionsumfang gehört die Bild-Histogrammierung sowie die Berechnung eines Histogrammausgleichs („histogram flattening“). Sowohl eine Berechnung des Bildschwerpunktes als auch eine Bestimmung von Profildaten (z.B. durch Gaussfit an ein Strahlprofil) leisten beide Operatoren. Lage- sowie Abstandsbestimmung und grundlegende Arithmetikfunktionen (Bilder addieren, subtrahieren, multiplizieren, dividieren, skalieren etc.) sind realisiert. Die für fortgeschrittene Berechnungen und Analysen von Bildinhalten wesentliche zweidimensionale Faltung (z.B. für Glättungsoperationen, Kantendetektion etc.) ist Bestandteil des Funktionsumfangs. Methoden zur Berechnung nichtlinearer zweidimensionaler Filteroperationen (z.B. Rank Value Filter) wurden entwickelt. Im Rahmen von EPOS kann eine graphische Darstellung von Strahlaufnahmen mit verschiedenen Farbkarten in Fenstern des X11/Motif Graphiksystems der Kontroll-Workstations erfolgen.

Für die Bildoperationen wurde in EPOS der Variablentyp **IMAGE** eingeführt und die Möglichkeiten des Variablentyp **MATRIX** erweitert. Die Variablentypen lassen sich ineinander wechselseitig konvertieren und können graphisch angezeigt werden. Eine Reihe der Algorithmen zur digitalen zweidimensionalen Bildsignalverarbeitung in EPOS wurden auf das VxWorks-System übertragen. Die Kommunikation von EPOS mit dem bildverarbeitenden Monitorsystem erfolgt über den RPC-Server im VME-Prozessormodul.

Zur unmittelbaren Anzeige von Bilddaten wurde ein Darstellungsprozeß für die Graphikworkstations der Kontrollebene entwickelt. Der **csimg**-Prozeß zeigt Bilddaten, die mit einem bestimmten Kontrollsystemparameter verbunden sind, im Fall ihrer Änderung, in Falschfarbendarstellung an. Die Falschfarbendarstellung läßt sich durch Auswahl voreingestellter Farbtabelle bestimmen. **csimg** nimmt an den ereignisorientierten Transaktionen des Kontrollsystems teil. Alle Angaben des bildverarbeitenden Meßsystems erfolgen zur Zeit noch in Pixel-Werten. Mit dem **csimg**-Programm kann eine Umskalierung zu Daten mit einer physikalischen Längeneinheit selbsttätig vorgenommen werden. Eine solche Transformation ermöglicht ebenso das EPOS-System.

6. Erste Erfahrungen und Ergebnisse mit dem neuen Kontrollsystem

Das abschließende Kapitel beschreibt zunächst den Übergang vom alten zum neuen Kontrollsystem. Es enthält Resultate der jüngsten Betriebsphase, ausgehend von der Inbetriebnahme (März 1994) über einen Zeitraum bis September 1994. Die Entwicklung der graphischen Benutzeroberfläche ist direktes Ergebnis der ersten Betriebserfahrungen. Eine erste Aufgabe des neuen Kontrollsystems bestand in der Realisierung des 50 Hz–Stretcherbetriebs und des Speichermodus für die Synchrotronlichtexperimente. Daran anschließend wurde der ELSA–Nachbeschleunigungsbetrieb mit langsamer Teilchenextraktion auf Basis einer drittelzahligen Resonanz mit dem neuen Kontrollsystem entwickelt. Die Steuerungsaufgabe im Nachbeschleunigungsmodus und die dafür ausgeführte Strahldiagnose bildet einen Schwerpunkt des Kapitels. Bislang erreichte Betriebsergebnisse für die Mittelennergieexperimente an ELSA werden zusammengestellt.

6.1 Inbetriebnahme des Kontrollsystems

Die Übergangszeit zwischen dem bestehenden und dem neuen Kontrollsystem sollte so kurz wie möglich sein, damit im Rahmen einer turnusmäßigen Wartungsperiode die Umstellung erfolgen konnte. Für die Kontrollsystementwicklung bedeutete das von vornherein einen Parallelaufbau seiner Bestandteile zum damals noch bestehenden alten Kontrollsystem. Angestrebt war eine Gesamterstellung des neuen Kontrollsystems, welche die Übernahme des aus dem alten System noch zu verwendenden Feldbussystems in einfacher Weise ermöglichen sollte. Es war angestrebt, ausschließlich durch „Umstecken“ der Feldbusleitungen des alten Systems an die neue Kontrolle alle vorhandenen Endgeräte unmittelbar wieder verfügbar zu haben. Grundvoraussetzung dafür war Übernahme aller Definitionen des alten Kontrollsystems in das neue Kontrollsystem, um es – vor seiner Inbetriebnahme – parallel zur laufenden Kontrolle zu betreiben. Die Bedienungsoberfläche mußte vor der Inbetriebnahmephase auf einem Stand sein, um mit ihr eine Funktions- und Erreichbarkeitsprüfung aller Endgeräte – in möglichst kurzer Zeit – mit dem neuen Kontrollsystem auszuführen. Zusätzlich sollte die graphische Benutzeroberfläche bereits zu diesem Zeitpunkt eine Minimalbedienung der Gesamtanlage ermöglichen.

Übergang vom bestehenden zum neuen Kontrollsystem

Im Vorfeld der Inbetriebnahme waren zunächst mehrere Schritte zum Übergang vom bestehenden zum neuen System zu leisten.

Die Software des Feldbussystems wurde im alten System mit einem dazu entwickelten Crossassembler für Z80–Code erstellt; er war eine Speziallösung und nur auf VAX–Computern lauffähig. Für das neue System wurden alle Softwaremodule des Feldbussystems konvertiert, so daß sie mit einem dazu beschafften kommerziellen Entwicklungssystem auf Basis eines Personalcomputers zur Bearbeitung bereitstanden. Alle Softwaremodule befinden sich in einer Revisionsverwaltung, welche Archivierung und Überprüfung übernimmt. Die Werkzeuge der Revisionsverwaltung generieren selbsttätig Softwaremodule für Feldbusprozessoren, die unmittelbar zur Programmierung eines EPROMs geeignet sind

Das Gesamtsystem zur Zeitablaufsteuerung, wie auch die Injektionszeitsteuerung wurden komplett erstellt und überprüft. Die verteilte Hardware des neuen Systems wurde an den späteren Einsatzorten aufgebaut und Funktionstests ausgeführt. Zwischen allen Rechereinheiten der Kontroll- und Prozeßebene fand eine Vernetzung statt.

Nach Entwicklung eines Konverterprogramms wurden alle Parameter–Strukturdefinitionen des alten Kontrollsystems in das neue System (RDF–Format) konvertiert. Verschiedene etablierte Betriebsdatensätze des alten Kontrollsystems wurden ebenfalls mit einem Konverterprogramm gelesen und in ein, für das neue Kontrollsystem, lesbares Format transformiert. Die Experimentegruppen wurden vorher nach erprobten Betriebsdatensätzen befragt und diese in das neue System übernommen. Die übernommenen Parameter–Strukturdefinitionen und Betriebsdatensätze wurden auf die UNIX–Rechner des neuen Systems transportiert und dort mit UNIX–Werkzeugen nachbearbeitet.

Anhand von Modell-Parametersätzen fand eine Überprüfung des Zusammenwirkens aller Hardware- und Softwarekomponenten statt. Daran anschließend wurden die für das neue Kontrollsystem angepaßten Parameterdefinitionen des alten Kontrollsystems durch Kontrollsystemwerkzeuge in das neue System, zusätzlich zu den bereits getroffenen Definitionen eingespielt. Das neue Kontrollsystem bearbeitete von diesem Zeitpunkt an die insgesamt etwa 2000 Parameter des alten Kontrollsystems. Zusätzlich dazu existierten bereits umfangreiche Parameterdefinitionen für die Strahldiagnosesubsysteme. Weitere Testserien der Software mit dieser neuen Konfiguration folgten und gaben zusätzlichen Aufschluß über das Gesamtverhalten und Ineinanderwirken aller Komponenten. In diesem Entwicklungsstand war das neue Kontrollsystem bereits lauffähig und wurde parallel zur alten Kontrolle betrieben. Die Messungen von J.Keil im Rahmen seiner Diplomarbeit [57] fallen in diesen Zeitraum und sind ausnahmslos mit den Mitteln des neuen Kontrollsystems ausgeführt.

Im Rahmen eines zweitägigen Wartungsintervalls wurden die beiden Feldbusleitungen des alten Kontrollsystems an zwei dafür vorgesehene Feldbuscontroller des neuen Systems angeschlossen. Die Hardware des Feldbuscontrollers und insbesondere die komplexe Kommunikationssoftware konnte hier erstmals unter realistischen Betriebsbedingungen erprobt werden. Eine Reihe von Verbesserungen für die spätere Inbetriebnahme ließ sich unmittelbar aus diesem Test ableiten; erstmalig war zu diesem Zeitpunkt eine detaillierte Beobachtung des zu erwartenden Datenaufkommens möglich. Die Datenpakete des Feldbussystems empfangt die Feldbuscontroller-Software, dekodierte sie und gab sie in Schreibtransaktionen an darüberliegende Schichten des Kontrollsystems weiter. Damit waren auch realistische Testmöglichkeiten für die Software des verteilten Kernsystems gegeben. Zugriff und Erreichbarkeit aller Parameter des alten Kontrollsystems konnten erfolgreich überprüft werden. Nach Ablauf der Testserie wurde das Feldbussystem wieder mit dem Zentralrechner des alten Kontrollsystems verbunden.

Das Programm `csmgen` fand Einsatz zur Erzeugung von technischen Bedienungsbildern für alle zu diesem Zeitpunkt definierten Kontrollsystemparameter. Einen dazugehörigen Menübaum erstellte `csmgen`. Ein interaktiver Zugriff auf alle Kontrollsystemparameter war somit möglich. Zusätzlich wurde ein Satz übergeordneter Bedienungsbilder mit dem `csmd`-Programm entwickelt, welche vor allem Parametergruppen der Hauptsubsysteme der Beschleunigeranlage logisch in verschiedene Bedienungsfenster zusammenfaßte. Die Grundbestandteile der Bedienungsfläche waren somit für die eigentliche Inbetriebnahmephase konsistent vorbereitet.

Verschiedene Experten wurden in einer ersten lauffähigen Version in das System aufgenommen. Dazu zählten vor allem der Timing-, der Magnet- und der Transfer-Experte. Die Strahldiagnosesysteme waren zu diesem Zeitpunkt weitgehend in die Kontrolle integriert.

Im Anschluß an diese vorbereitenden Maßnahmen wurde das neue Kontrollsystem **parallel** zum alten Kontrollsystem betrieben, ohne allerdings auf die Beschleunigeranlage einzuwirken. Am Anfang der Wartungsperiode fand eine erste testweise Inbetriebnahme statt. Das existierende Feldbussystem erfuhr eine Umstrukturierung und Aufteilung auf fünf Feldbuscontroller. Mit diesem Schritt waren alle Endgeräte der Beschleunigeranlage im neuen System verfügbar; ein schrittweiser Funktionstest der wichtigsten Komponenten schloß sich unmittelbar an. Nach einigen Stunden konnte mit dem neuen Kontrollsystem wieder ein Strahl bei 1.2 GeV vom Synchrotron nach ELSA transferiert, dort akkumuliert und gespeichert werden. Der Zentralrechner der alten Kontrolle wurde danach abgeschaltet. Danach wurde die eigentliche Wartungsperiode eingeleitet und detaillierte Umarbeitungen und weitergehende Tests ausgeführt. Das System zur Zeitablaufsteuerung des Maschinenzyklus und der Injektionsgenerator wurden aktiviert. Die Geräte und Subsysteme erhielten die für sie vorgesehenen Triggersignale. Wesentliche Triggerzeitpunkte ganzer Gerätegruppen und auch Einzelverzögerungen von Endgeräten mußten angepaßt werden. Feldbusprozessoren, welche als Funktionsgeneratoren zur dynamischen Steuerkurvenausgabe eingesetzt werden, erhielten eine einheitliche Software. Eine Reihe neuer Softwaremodule wurde dafür generiert; sie ersetzen die alte Software der Feldbusprozessoren.

Nach der Inbetriebnahme wurde ein Speicherbetrieb für Synchrotronlichtexperimente eingestellt. Daran schloß sich eine Experimentierphase für PHOENICS an, welche einen Zeitsteuerungsfehler des Kontrollsystems in der ELSA-Injektionskickeransteuerung aufdeckte. Er wurde behoben und ein regulärer Betrieb durchgeführt. Erstmals konnte hierbei die Injektionszeitsteuerung zur Homogenisierung der ELSA-Füllstruktur ihren Einsatz finden. Das Kontrollsystem zeigte in der Anfangsphase noch einige Fehler; besonders im Speichermodus, welcher eine große Langzeitstabilität des Kontrollsystems verlangt, ergaben sich z.B. Datenübertragungsprobleme für Steuerkurven an die ELSA-Hauptmagnete, die behoben wurden. Seit dieser Zeit werden kontinuierlich Verbesserungen und Erweiterungen am laufenden System vorgenommen.

6.2 Erstellung der graphischen Bedienungsoberfläche für den ELSA-Betrieb

In der Inbetriebnahme- und einer anschließenden Erprobungsphase, in welcher das neue Kontrollsystem schon einen regulären Betrieb für die Experimente moderierte, wurde noch mit einer stark vereinfachten Version der Bedienungsoberfläche gearbeitet. Für die Erstellung der letztendlichen Bedienungsoberfläche erfolgten mehrere Festlegungen.

Innerhalb der Bedienungsoberfläche fand eine Einteilung in drei **Ebenen** statt: Die abstrakte, rein durch die Beschleunigerphysik und die Betriebsmodi von ELSA gegebene, Sichtweise ist auf der obersten Ebene angesiedelt (**Physikebene**). Unterhalb davon befindet sich die **Subsystemebene**, die Teilbereiche der Beschleunigeranlage logisch zusammenfaßt (z.B. Hochfrequenzsystem, Extraktionselemente). Auf unterster Darstellungsebene befindet sich die **Technikebene** zum Zugriff auf alle Endgeräte. Von der Technikebene zur Physikebene findet eine Komprimierung der Parametermenge statt, welche unmittelbar vom Anwender manipulierbar ist. Die Abstraktion nimmt von der Physikebene zur Technikebene ab. Ein für die Subsystemebene oder die Physikebene entwickeltes Bedienungsbild sollte, falls möglich und im konkreten Fall sinnvoll, immer in drei **Sichtweisen** (Interpretationen) angeboten werden: Eine Darstellungsvariante soll unmittelbar den physikalischen Zugriff auf ELSA-Parameter gestatten. Sie wird begleitet von einer technischen Sichtweise, die Zusammenhang und Gefüge eines Subsystems darstellt und abschließend eine geographische Sichtweise, welche den Ort der Subsystemkomponenten aufzeigt und insbesondere dem Anwender im Fehlerfall Hilfestellung leistet. Jedes Subsystem sollte durch ein charakteristisches und intuitives **Piktogramm** (Ikone) präsentiert werden. Die Piktogramme sollten selbst wieder Elemente der Bedienung sein, somit dem Bedienungspersonal nach einer Gewöhnungszeit vertraut sein und die visuelle Wiedererkennung erleichtern. Alle Soll- und Istwerten werden durch eine weitgehend einheitliche **Farbgebung** dargestellt. Eine einheitliche Zuordnung wurde entsprechend auch für Statusmeldungen und Schalterstellungen gewählt. Diese Farbfestlegung erleichtert einem Operateur die Überwachungsarbeit durch visuelle Erfassung der Farbstruktur eines Bedienungsfensters. Zur manuellen Entwicklung von Bedienungsfenstern mit dem `csmd`-Programm wurde eine Konvention zur Verwendung und Farbgebung bestimmter **Bedienungselemente** (z.B. hellgraue Knöpfe zur Anwahl eines Bedienungsfensters) getroffen. Damit kann sichergestellt werden, daß insgesamt alle Menüs ein einheitliches Erscheinungsbild zeigen. Die Anordnung der Bedienungselemente (Ikonen) im obersten Bedienungsfenster sollte dem Anwender eine grobe Orientierung und eine einfache **Benutzerführung** anbieten. Das Durchlaufen von Ikonen von z.B. links nach rechts in einem Bedienungsfenster sollte gewisse Einstellungsabläufe verdeutlichen. **Technische Bedienungsfenster** für Endgeräte wurden ausschließlich mit dem `csmgcn`-Programm generiert. Dabei werden die Parameter eines Endgerätes so angezeigt, wie sie technisch erfaßt werden. Eine Interpretation der Werte wird nicht vorgenommen. Für die erste Betriebsphase war damit ein enormer Zeitgewinn verbunden, da die manuelle Entwicklung hunderter technischer Endgerätemenüs den Zeitrahmen der Arbeit gesprengt hätte. Die letztendliche Erstellung aller technischen Endgerätemenüs, aufbauend auf den bereits generierten Bedienungsbildern und Erfahrungen, sollte von verantwortlichem Technikerpersonal ausgeführt werden.

Abbildung 6.1 zeigt das Hauptbedienungsfenster der graphischen Benutzeroberfläche zusammen mit den Auswahlmenüs zur Einstellung der Subsysteme und der Betriebsmodi. Das Auswahlmenü der Strahldiagnosesubsysteme wird in in einem zusätzlichen Fenster dargestellt.

Akzeptanz der Bedienungsoberfläche durch die Anwender

Ein wesentlicher Punkt für die Akzeptanz des gesamten Kontrollsystems durch Anwender ist das Antwortverhalten und Reaktionsvermögen der Bedienungsoberfläche. Die erreichbaren Antwortzeiten insgesamt sind durch das verteilte Kontrollsystem gegeben; die Bedienungsoberfläche bringt dieses Antwortverhalten durch sein Gesamtverhalten möglichst ungehindert zur Darstellung. Das Antwortverhalten und Reaktionsvermögen der Bedienungsoberfläche begünstigt mehrere Punkte.

Eine quasianaloge Steuerung von Kontrollsystemparametern ist auch unter Beteiligung angekoppelter Regexperten mit einer Wiederholrate von mindestens 20 Hz möglich. Die autonome Istwerterfassung der Kontrolle sorgt für eine unmittelbare Rückkopplung des Systems an den Operateur. Das prompte Antwortverhalten auf Parametervariationen förderte beim Operateurpersonal Bedienungssicherheit. Die Wechselzeiten von Bedienungsfenstern liegen deutlich unterhalb von einer Sekunde¹.

¹Das Aufblenden selbst einfacher strukturierter Bedienungsfenster im alten Kontrollsystem benötigte, wegen beschränkter Leistungsfähigkeit des Zentralrechners, mehrere Sekunden und länger.

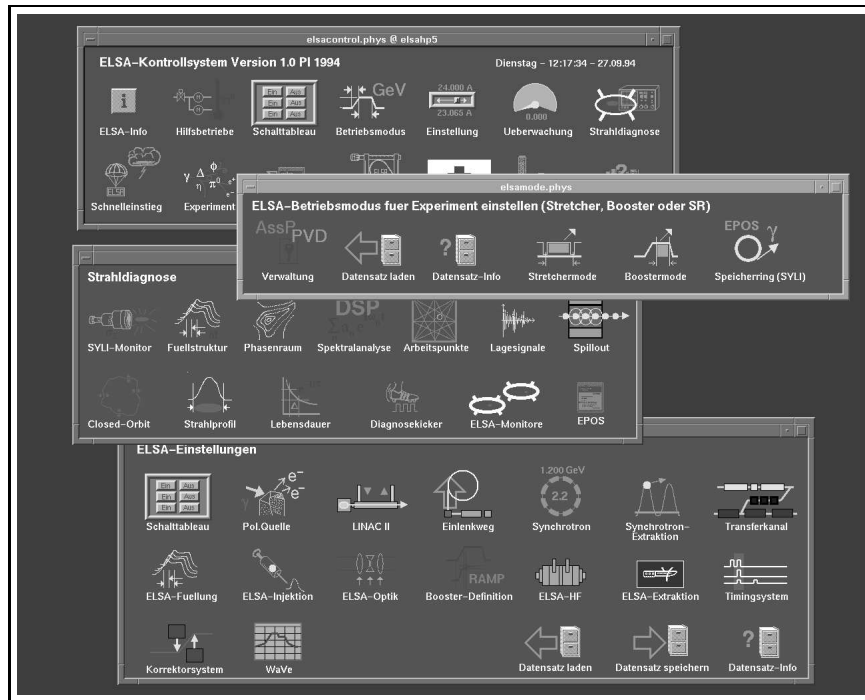


Abbildung 6.1: Erscheinungsbild der ELSA Bedienungsfläche

Die verschiedenen Variationsmöglichkeiten eines Parameters mit der Maus, der Tastatur und den „Tickern“ (Inkrement- und Dekrementgebern) wurde vom Bedienungspersonal weitgehend intuitiv erfaßt und für die geplanten Anwendungsfälle eingesetzt. Die Variation eines Kontrollsystemparameters mit der Maus leitete dabei zwar zunächst einen Umgewöhnungsprozeß beim Bedienungspersonal ein², machte aber im weiteren Verlauf keinerlei Probleme. Die Erfahrungen mit der Mausbedienung zeigen sich insgesamt positiv. Anpassungen der Bedienungsfläche, was z.B. die Anordnung von Bedienungsbildern oder den Zugriff darauf betrifft, kann in Zukunft durch das Programm *csmd* geleistet werden. Eine Softwareentwicklung ist dazu nicht mehr notwendig, Änderungen werden interaktiv ausgeführt.

Die realisierte Bedienungsfläche erfüllt die Forderungen nach transparenter Bedienbarkeit aller Kontrollsystemparameter; sie interpretiert und präsentiert den Gesamtzustand des Kontrollsystems mit kurzem Antwortverhalten.

6.3 Konstruktion zusätzlicher Experten

Nach Umstellung der Kontrolle auf das neue System stellte sich heraus, daß das Konzept der Regelexperten über die geplanten Anwendungen (beschleunigerphysikalische Berechnungen) hinaus Verwendungsmöglichkeiten hat.

Alarmexperten

Es zeigte sich, daß, aufbauend auf dem Konzept der Regelmaschinen, logische Verknüpfungen sinnvoll in Regelexperten integrierbar sind. Ein Regelwerk zur Überwachung der Endgeräte des Beschleunigerkomplexes wurde entworfen, welches aus Einzelmeldungen eines Gerätes oder eines Subsystems Summen- und Statusmeldungen ableitet und zu Bereichsmeldungen bündelt³. Insgesamt umfaßt das Regelwerk 42 Regeln, die ca. 800 Maschinenparameter berücksichtigen. Das Regelwerk bearbeiten parallel mehrere Regelexperten

²Im alten Kontrollsystem erfolgte die Bedienung über Rollbälle.

³In der Überwachung sind folgende Subsysteme enthalten:

Die Elemente der Synchrotron-Extraktion (3 Kickermagnete, 3 Bumpermagnete, 3 Septummagnete), die Magnetgruppen des Transferkanals zwischen Synchrotron und ELSA (3 Strahlschieber, 3 Quadrupolmagnete), die Injektionselemente von

auf verschiedenen Kontrollrechnern. Für die Anwender werden aussagekräftige Meldungen direkt auf der Benutzeroberfläche des Kontrollsystems dargestellt, wobei eine Klartextmeldung den Zustand eines Subsystems und ein Statusparameter die ordnungsgemäße Funktionsweise anzeigt. Alle Statusmeldungen werden als Kontrollsystemparameter geführt und können somit für weitergehende Analysen und Überwachungen genutzt werden. Das auf Basis der verteilten Regelexperten erstellte Überwachungssystem hat im laufenden Betrieb Akzeptanz im Kreis des Bedienungspersonals gefunden, da im Fall einer Störung die Ursache der Fehlfunktion (ein Gerät oder Subsystem) unmittelbar vom Kontrollsystem gemeldet wird. Allerdings funktioniert dieses Verfahren nur, falls die Istwerterfassung aller Endgeräte fehlerfrei arbeitet. Hier konnte das Überwachungssystem einige Fehlfunktionen aufdecken. Trotzdem gestaltete sich die Fehlersuche und Fehlerbehebung in vielen Fällen durch Unterstützung des Überwachungssystems einfacher als bisher. Die Elemente der externen Strahlführungen sollen auf Grundlage dieser positiven Erfahrungen in Zukunft ebenfalls durch ein Alarmsystem von Regelexperten überprüft werden.

Experten für die Experimente

In der ersten Betriebsphase mit dem Experiment SAPHIR wurde der Wunsch nach Anbindung der Experimentedaten – soweit sie für die Einstellung und Überwachung des Betriebsmodus relevant sind⁴ – an das Kontrollsystem bzw. die Möglichkeit zum Zugriff auf ELSA-Parameter durch das Experiment geäußert. Um nicht eine spezielle Lösung für ein Experiment zu schaffen, wurde das Kommunikationssystem der Kontrolle um ein entsprechendes Kommunikationsprotokoll, wie auch die Kommunikationsinstanz `csexconnect` für den Netzwerkzugriff erweitert. Über den `csexconnect`-Prozeß ist eine allgemeine Anbindung „externer“ Benutzer an das Kontrollsystem möglich. Für externe Benutzer wurde eine Kommunikationsbibliothek erstellt, welche in deren Datenerfassungen eingebaut werden kann und den Zugriff auf das Kontrollsystem aus ihren Steuerungssystemen ermöglicht. Die Kommunikationsbibliothek ist rechnerunabhängig und erlaubt den lesenden und schreibenden Zugriff auf die Kontrolle⁵. Die Funktionsbibliothek ist erprobt für verschiedene UNIX-Rechner, für Personalcomputer, welche mit dem LINUX-System betrieben werden sowie für Rechner der VAX-Familie.

Das Experiment SAPHIR ist über diesen Mechanismus bereits „on line“ angebunden (Abb. 6.2). Im Fall des ELAN-Experiments werden die zur Einstellung des Betriebsmodus hilfreichen Experimentedaten von einem Personalcomputer genommen, der nur eine serielle RS232-Schnittstelle für den Datenaustausch bereitstellt. Auf der Seite des Kontrollsystems ist ELAN aus diesem Grund nicht durch ein Netzwerk, sondern über eine serielle RS232-Schnittstelle an ein VME-Prozessormodul der Prozeßebene angekoppelt. Dieses ermittelt zyklisch die Experimentedaten und belegt eine entsprechende Menge von Kontrollsystemparametern durch Schreibtransaktionen. Das PHOENICS-Experiment ist bislang noch nicht angebunden.

Zur Auswertung der SAPHIR-Daten wurde der Experte `saphir` konstruiert, der vor allem eine Verlaufsbildung übernimmt. Entsprechende Experten `elan` und `phoenics` für die Experimente ELAN und PHOENICS sind erstellt, zur Zeit jedoch noch nicht aktiviert. Der Verlauf der letzten 250 Daten einer Meßgröße des Experiments wird als vektorwertiger Parameter in das Kontrollsystem geschrieben und auf der Bedienungsfläche angezeigt. Verfolgung und Beurteilung der Extraktionsbedingungen für ein Experiment sind damit erleichtert. Zukünftige Entwicklungen in Form eines erweiterten Regelwerkes für die Experimente kann in die dafür angelegten Experten aufgenommen werden.

Weitere Experten

Die Strahlenergie des 2.5 GeV-Synchrotrons konnte im alten Kontrollsystem nicht erfaßt werden. Sie wird nun periodisch von einem VME-Rechner auf Prozeßebene – die Messung erfolgt durch ein Digitalvoltmeter, das sich über den IEC-Bus programmieren läßt – ermittelt und steht als Kontrollsystemparameter zur Verfügung. Eine Verlaufsbildung der Synchrotronenergie wird berechnet. Der Experte `synchrotron` überprüft

ELSA (3 Kickermagnete, 2 Septummagnete), die ELSA-Hauptmagnete (Dipole, F- und D-Quadrupolfamilien, F- und D-Sextupolfamilien), die Extraktionselemente von ELSA (2 Luftquadrupolfamilien, 4 Extraktionsseptummagnete, Extraktions-Sextupolfamilie), und das ELSA-Hochfrequenzsystem, soweit es für das Kontrollsystem zugänglich war.

⁴Unter anderem sind das Ergebnisse einer Tastverhältnismessung, Zählerstände, Gütefaktoren, Intensität des extrahierten Elektronenstrahls etc.

⁵Der rechnerunabhängige Datenaustausch verlangt eine weitgehend rechnerunabhängige Datenrepräsentanz. Der Austausch von Daten zwischen den Experimenten und ELSA wird auf Basis von Zeichenketten gemäß dem ASCII-Code ausgeführt.

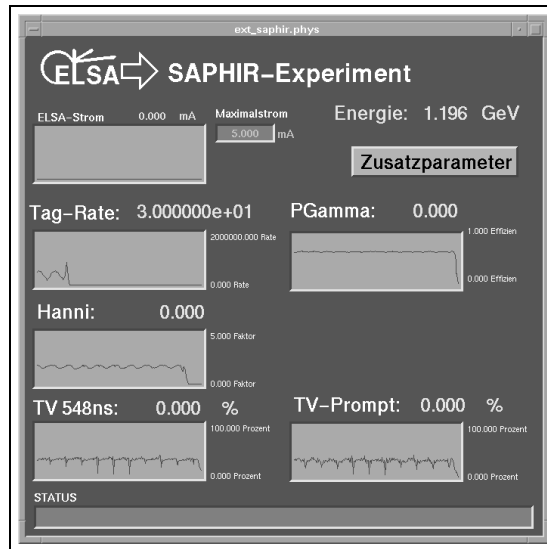


Abbildung 6.2: Überwachungsfläche für das Experiment SAPHIR

fortlaufend Istenergie des Synchrotrons mit der Istenergie von ELSA und generiert eine Meldung, falls beide Werte zu stark voneinander abweichen. In Zukunft könnte hier eine Kontrolle der Langzeitenergiedrift des Synchrotrons erfolgen. Das Kontrollsystem könnte selbsttätig ein Nachfahren der Synchrotronenergie und damit eine Stabilisierung optimierter Transfereinstellungen sicherstellen.

Die Meßwerte des Vakuumsystems, es handelt sich dabei um die Entladeströme der vorhandenen Ionengeterpumpen, werden vom vacuum-Experten in Druckwerte umgerechnet. Dabei findet eine Ermittlung von Minimal-, Maximal- und Durchschnittsdruckwert statt.

6.3.1 Erfahrungen mit dem Konzept der verteilten Regelexperten

Die Erfahrungen der Inbetriebnahme und die daran anschließende mehrmonatige erste Betriebsphase des neuen Kontrollsystems haben die Tragfähigkeit des Konzeptes der verteilten Regelexperten untermauert. Die Trennung von Kernkontrollsystem und Regelexperten für die beschleunigerphysikalischen Berechnungen hat sich als sinnvoll erwiesen. Erzielte Durchsatzraten mit dem Gesamtregelwerk, das durch die verteilten Regelexperten bearbeitet wird, führten zu keinerlei Beeinträchtigung der quasianalogen Steuerung. Insgesamt sind zur Zeit 75 Regeln mit ca. 1200 verschiedenen Ein- und Ausgabeparametern in 17 Experten in Bearbeitung⁶.

6.4 Bildverarbeitende Diagnose für den Nachbeschleunigungsbetrieb

Der im Aufbau befindliche Synchrotronlichtmonitor [45] konnte im Zeitrahmen dieser Arbeit nicht fertiggestellt werden, deswegen war eine zeitaufgelöste Erfassung von Profildaten (Bildsequenzen) zur Untersuchung z.B. der Variation des Strahlschwerpunktes und des Strahlprofils in Abhängigkeit von Energie und Intensität mit dem bildverarbeitenden Monitorsystem für den Nachbeschleunigungsmodus nicht auszuführen. Die Funktionstüchtigkeit des Monitorsystems und der Analysewerkzeuge wurde durch Messung von Strahlprofilen im Transferkanal zwischen Synchrotron und ELSA im Rahmen einer Diplomarbeit gezeigt [11].

6.5 Homogenisierung der ELSA-Füllstruktur

Die wesentlichen Parameter zur Einstellung einer gleichmäßigen ELSA-Füllstruktur durch die Injektionszeitsteuerung (Abschnitt 4.3) bestehen in Injektionsversätzen aufeinanderfolgender Synchrotronschüsse (Syn-

⁶Das entspricht den Betriebsbedingungen im September 1994.

chrotronfüllungen), deren Variation gegeneinander so erfolgen muß, daß eine homogene ELSA-Füllung erreicht wird. Zur Verifikation der eingestellten ELSA-Füllstruktur findet das Meßsystem zur breitbandigen Erfassung eines ELSA-Intensitätssignals seinen Einsatz (Abschnitt 5.8).

Die Verzögerungskanäle des Injektionsgenerators (Abschnitt 4.3) müssen für die Korrektur der ELSA-Füllstruktur in geeigneter Weise durch das Kontrollsystem gesetzt werden. Dazu dient der timing-Experte

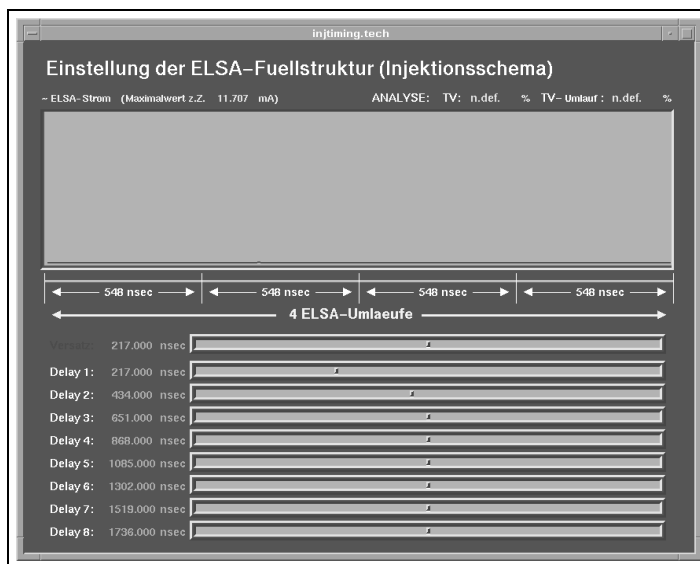


Abbildung 6.3: Bedienungsfenster für die Optimierung der ELSA-Füllstruktur

(Abschnitt 4.5), welcher eine einfache Konfiguration von äquidistant ansteigenden Injektionsversätzen für alle Verzögerungskanäle des Injektionsgenerators erlaubt. Abbildung 6.3 zeigt das Bedienungsfenster zur Optimierung der ELSA-Füllstruktur. Im oberen Teil des Bildes wird die Füllstruktur auf einer Zeitskala von vier ELSA-Umläufen (ca. $2.2 \mu s$) angegeben⁷, eine Variation des Parameters **Versatz** regelt die äquidistante Verzögerung für alle Kanäle gleichzeitig. Eine Feinabstimmung der Einzelverzögerungen ist für jeden Kanal ebenfalls möglich. Das Meßsystem des schnellen Intensitätsmonitors liefert seine Ergebnisse – unter anderem das Tastverhältnis der Füllstruktur (wird in Abbildung 6.3 oben rechts angezeigt) und das Füllstruktursignal – mit einer Wiederholrate von bis zu 3 Hz, so daß sich eine interaktive Korrektur der ELSA-Füllstruktur von einem Anwender durch Variation des Zeitversatzes vornehmen läßt, da die sofortige Auswirkung der Variation auf die Füllstruktur beobachtet werden kann. In der Praxis hat sich die Einstellung der Füllkorrektur durch den Parameter **Versatz** als ausreichend erwiesen, nur zu Testzwecken wird die individuelle Nachsteuerung von Einzelkanälen vorgenommen. Der aktuelle Wert des ELSA-Stroms wird vom System zur Strom- und Lebensdauermessung (Abschnitt 6.7.1) erfaßt und steht oben links in Abbildung 6.3.

6.5.1 Messung der ELSA-Füllstruktur ohne Injektionskorrektur

Die mit dem neuen Kontrollsystem erreichte Verbesserung läßt sich verdeutlichen, indem die Formierung eines Füllsignals in einem SAPHIR-Betrieb vor dem Einsatz der neuen Injektionszeitsteuerung betrachtet wird (Abb. 6.4 (a)). Das Füllsignal wurde dabei in Zeitabständen von 5 ms für insgesamt 35 Elementarinjektionen gemessen und hintereinander aufgetragen. Die Gesamtmeßzeit betrug ca. 1 s, so daß über die Injektionsphase hinaus der Verlauf der Füllung sichtbar ist. Die jeweils hinzuaddierte Intensität schwankt stark⁸. Die injizierten Füllungsstücke aus dem Synchrotron verteilen sich nicht gleichmäßig über die ELSA-Ringlänge, obwohl kein Ordnungsschema vorhanden ist, so daß sich eigentlich ein gleichmäßige Füllstruktur herausbilden sollte. Der Sachverhalt verdeutlicht sich durch eine weitere Messung, wobei diesmal das Füllsignal in Zeitabständen

⁷Schematisch muß man sich dabei den Umfang von ELSA viermal hintereinander abgerollt vorstellen; jeder Umlauf hat eine Dauer von 548 ns, was der ELSA-Ringlänge von 164 m entspricht.

⁸Ob dies auf Schwankungen des Synchrotrons oder Schwankungen der ELSA-Akzeptanz zurückzuführen war, ist an dieser Stelle nicht auszumachen.

von 3 ms erfaßt wurde; Abbildung 6.4 (b) zeigt das Meßergebnis. Weitere Füllstrukturuntersuchungen mit der alten Zeitsteuerung finden sich in [57].

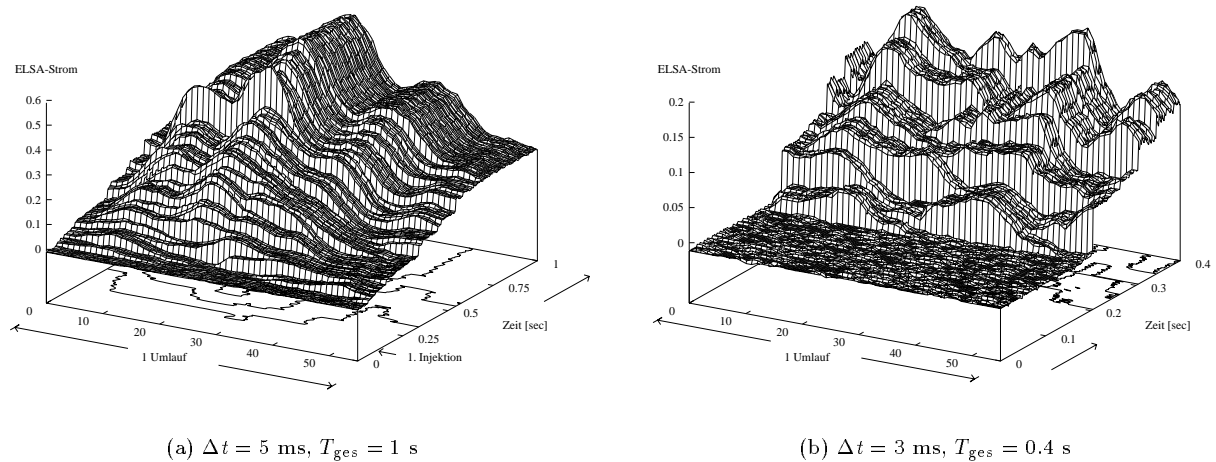


Abbildung 6.4: Injektionsphase im SAPHIR-Betrieb, 35 Injektionen und 12 Injektionen

6.5.2 Untersuchung des neuen Injektionsschemas

Das entwickelte Injektionsschema wurde durch eine Messung des Tastverhältnisses der ELSA-Füllstruktur in Abhängigkeit vom Zeitversatz – äquidistant ansteigender Versatz für alle Kanäle – untersucht, der für eine Injektionsgruppe aus 7 Synchrotronschüssen von 0 ns bis 300 ns in 5 ns Schritten variiert wurde. Insgesamt bestand die Injektionsphase aus 70 Elementarinjektionen, das Siebenerinjektionsschema wurde also zehnmal wiederholt. Zur Vorbereitung der Messung wurde die Synchrotronextraktion, der Strahltransfer vom Synchrotron nach ELSA sowie die ELSA-Injektion auf eine maximale Transfereffizienz abgestimmt und die Länge der Synchrotronfüllung ausgemessen. Für einen mittleren Synchrotronstrom von 7 mA war nach

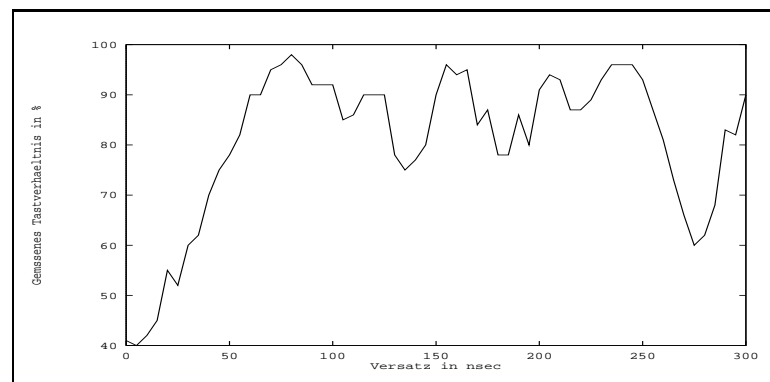


Abbildung 6.5: Tastverhältnis der ELSA-Füllstruktur in Abhängigkeit vom Zeitversatz des Injektionsgenerators

einer Elementarinjektion in ELSA ein mittlerer Strom von 2.5 mA zu messen⁹, was einer Transfereffizienz von etwa 84 % entspricht. Die Synchrotronfüllung, die sich nach der Injektion als Füllstruktur in ELSA bestimmen ließ, hatte eine trapezförmige (symmetrische) Struktur (eine gute Annäherung ist ein gleichschenkliges Trapez), mit einer unteren Grundlinie der zeitlichen Länge von etwa 230 ns und einer oberen Grundlinie

⁹Die Injektion war dabei so eingestellt, daß kein Strahl in ELSA akkumuliert wurde.

der zeitlichen Länge von etwas mehr als 200 ns. Der Fehler einer Tastverhältnismessung der ELSA-Füllung läßt sich mit ca. 1 % abschätzen, die Einstellgenauigkeit des Zeitversatzes beträgt 1 ns. Das Resultat der Messung zeigt Abbildung 6.5. Wird kein Zeitversatz ($\Delta t = 0$ ns) für die injizierten Synchrotronschüsse eingestellt, beträgt das Tastverhältnis der Füllung ca. 40 %, was einer Rechteckfüllung einer zeitlichen Länge von $0.4 \cdot 548 \text{ ns} = 219 \text{ ns}$ entspricht. Die Struktur der Synchrotronfüllung entsprach allerdings einem gleichschenkligen Trapez der Basislänge 230 ns, so daß aus dem gemessenen Tastverhältnis die obere Grundlinie des Trapez zu ca. 208 ns rückgerechnet werden kann, was gut mit den Ausgangsbedingungen übereinstimmt. Im Betrieb der Beschleunigeranlagen ist zu beobachten, daß die Synchrotronextraktion und damit die Einschubbedingungen in ELSA variieren und deswegen sowohl obere als auch untere Grundlinie einer Schwankung unterliegen. Die getroffene Aussage ist deswegen als Abschätzung zu verstehen.

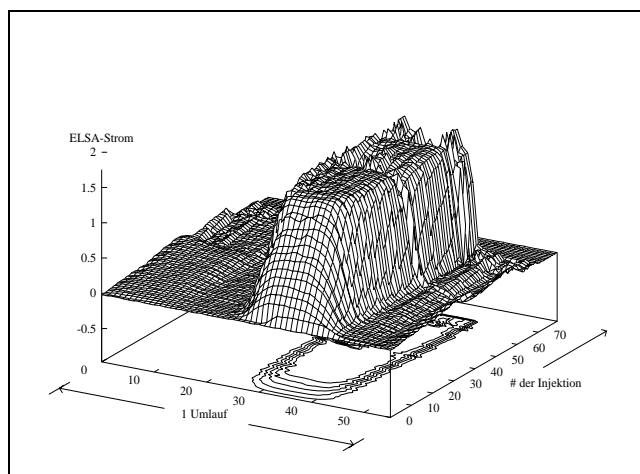
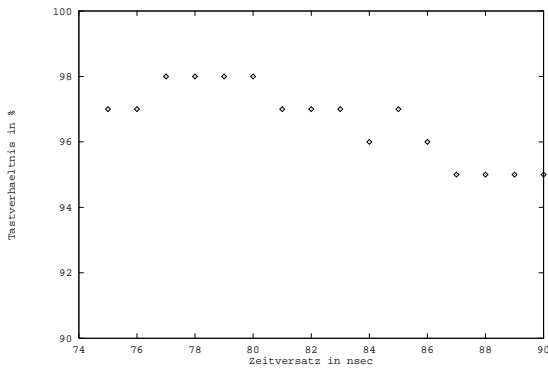


Abbildung 6.6: Füllung von ELSA ohne einen Injektionsversatz

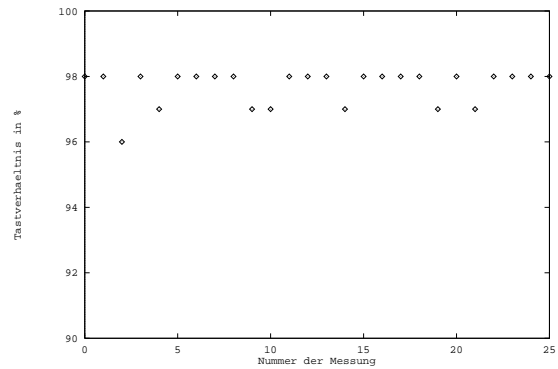
Abbildung 6.6 entstammt einer anderen Messung und ist ein Beispiel dafür, wie sich die Füllstruktur im Fall des Zeitversatzes $\Delta t = 0$ ns für insgesamt 70 Elementarinjektionen aufbaut. Die Daten wurden innerhalb eines regulären SAPHIR-Betriebs genommen, wobei für einen Maschinenzyklus probeweise der Zeitversatz auf $\Delta t = 0$ ns eingestellt war. Aufeinanderfolgende Schüsse des Synchrotrons werden wieder und wieder auf die bereits in ELSA umlaufende Füllstruktur akkumuliert, so daß sich für diesen Fall ein Tastverhältnis der Füllung von ca. 36 % ergibt. Gut läßt sich die trapezförmige Struktur einer Synchrotronfüllung erkennen. Hintereinanderfolgende Injektionen werden exakt auf die umlaufende ELSA-Füllung gesetzt; trotz 70-maliger Injektion läßt sich kein Auseinanderlaufen der Füllstruktur beobachten, was wiederum ein Indiz für die Reproduzierbarkeit des Injektionsgenerators darstellt. Die Abflachung der Füllstruktur nach etwa 15 Injektionen ist auf ein Übersteuern der Elektronik des schnellen Intensitätsmonitors zurückzuführen. Nach etwa 40 und 60 Injektionen erkennt man einen signifikanten Strahlausfall, der hier allerdings nicht weiter erklärt werden kann. Die sich daran anschließenden Injektionen werden wiederum auf die umlaufende ELSA-Füllung akkumuliert.

In Abbildung 6.5 sind drei signifikante Maxima des Tastverhältnisses der ELSA-Füllung zu sehen, wobei sich das deutlichste Maximum (98 %) für einen Zeitversatz von ca. $80 \pm 5 \text{ ns}$ herausbildet. Dieser Zeitversatz entspricht in etwa einem siebtel der ELSA-Umlaufzeit $\frac{548}{7} \text{ ns} = 78.3 \text{ ns}$. Er ist in Übereinstimmung mit den Überlegungen im Abschnitt 4.3. Während der Inbetriebnahme des neuen Kontrollsystems konnte, im Vorfeld von systematischen Untersuchungen, ebenfalls eine optimale Füllstruktur für den Nachbeschleunigungsbetrieb eingestellt werden, wenn der Injektionsversatz zu 78 ns oder 79 ns gewählt wurde. Ein weiteres Maximum des Tastverhältnisses der ELSA-Füllung ist für einen Zeitversatz von ca. 160 ns (95 %) sowie ein drittes Maximum (96 %) für einen Zeitversatz von ca. 240 ns (Mitte des kleinen Plateaus im Bereich 232 ns bis 248 ns) registrierbar. Der zeitliche Abstand zwischen den drei Maxima beträgt ca. 80 ns, eine Korrelation zur ELSA-Umlaufzeit – präziser zu einem siebtel der ELSA-Umlaufzeit – liegt damit nahe und gibt die einfachste Erklärung für die gemessene Struktur¹⁰.

¹⁰Auf den ersten Blick könnte das dritte Maximum für den Zeitversatz von ca. 240 ns auch zu der Länge der Synchrotronfüllung korrespondieren. Die in ELSA registrierte Synchrotronfüllung konnte im Rahmen der Präparierung der Messung durch ein



(a) Genaue Vermessung des Maximums der Tastverhältnisuntersuchung



(b) Stabilität des Füllstruktur-Tastverhältnisses

Abbildung 6.7: Vermessung des optimalen Zeitversatzes für die Füllkorrektur und Untersuchung des Tastverhältnisses der Füllstruktur

In einer zusätzlichen Messung wurde das Maximum des ermittelten Füllstruktur-Tastverhältnisses in einem Intervall von $[75 \text{ ns}, 90 \text{ ns}]$ in Abständen von 1 ns genauer vermessen. Abbildung 6.7 (a) zeigt das Ergebnis dieser Messung; das Maximum läßt sich nun genauer auf den Wert $\Delta t = 79 \pm 3.0 \text{ ns}$ (Mitte des Plateaus) festlegen, was einen noch nachhaltigeren Hinweis auf die Korrelation zur ELSA-Umlaufzeit darstellt. Es läßt sich ebenfalls ablesen, daß eine Veränderung des Zeitversatzes von 3.0 ns als Änderung im registrierten Tastverhältnis zu erkennen ist, weswegen die zeitliche Auflösung ebenfalls in diesem Bereich liegen muß. Für den praktischen Betrieb bedeutet dies, daß eine Veränderung von 3 ns im Zeitversatz eine meßbare Veränderung im Tastverhältnis der Füllstruktur bewirkt. Der Einsatz der ausgewählten Verzögerungsgeneratoren bestätigt sich durch diese Messung.

Die zeitliche Stabilität des Injektionstimings zur Füllkorrektur wurde durch mehrfache Messung bei einem Injektionsversatz von $\Delta t = 79 \text{ ns}$ untersucht. Die Messungen erfolgten im Abstand von 10 Sekunden und entsprachen dem Injektionsrhythmus (bzw. der eingestellten Zykluszeit). Das rechte Diagramm in Abbildung 6.7 zeigt eine gute Reproduzierbarkeit.

Die sich einstellende Füllstruktur für ein Siebenerinjektionsschema aus 70 Elementarinjektionen wurde gemessen. Dazu wurde das Intensitätssignal (Intensitätsverteilung) der ELSA-Füllung für eine Injektionsphase umlaufgetriggert aufgenommen. Für jede der 70 Elementarinjektionen wurde ca. 15 ms nach der eigentlichen Injektion, aktiviert durch die ELSA-Umlaufuhr, die ELSA-Füllstruktur für etwa vier ELSA-Umläufe lang mit 100 MHz abgetastet, so daß in einem ELSA-Umlauf ca. 55 Meßpunkte aufzuzeichnen waren. Die Messung erfolgte im Rahmen eines SAPHIR-Experimentierbetriebs und stellt somit eine typische Situation dar. Abbildung 6.8 zeigt beispielhaft ein Meßergebnis. Die Glättung der Füllstruktur ist gut zu erkennen. Jede der 10 Injektionszüge zu je 7 Elementarinjektionen addiert einen fast konstanten Strom zum bereits in ELSA umlaufenden Strom hinzu. Nach Abschluß eines Injektionszugs bildet sich eine „Treppenstufe“ heraus, die das eingestellte Injektionsschema verdeutlicht. Beste Bedingungen für die Füllkorrektur im Nachbeschleunigungsbetrieb wurden immer dann erreicht, wenn sich eine Formierung der ELSA-Füllung zu einer solchen Treppenform innerhalb der Injektionsphase einstellte (diese Beobachtung läßt sich als Indikator für insgesamt günstig eingestellte Injektionsverhältnisse werten). Damit deckt sich diese Beobachtung sehr gut mit den Erwartungen aus Abschnitt 4.3.

In einer anderen Messung wurde die Injektionszeitsteuerung mit anderen Zeitversätzen untersucht. Dazu wurde ein Zeitversatz von 87 ns eingestellt, und die Füllstruktur gemessen. Die Verschlechterung der Füllstruktur gegenüber der Füllstruktur bei einem optimalen Zeitversatz von 78 ns zeigt Abbildung 6.9 (a), eine

gleichschenkliges Trapez der Basislänge 230 ns und der zeitlichen Länge der oberen Grundlinie von ca. 200 ns gut angenähert sowie im Rahmen der Messung noch einmal bestätigt werden. Ein Maximum für einen Zeitversatz von 240 ns könnte also nur auf eine beträchtliche Schwankung der Einschubbedingungen zurückzuführen sein, die allerdings für alle anderen Messungen nicht zu beobachten waren. Eine Korrespondenz dieses Maximum zur Länge der Synchrotronfüllung erweist sich insgesamt als unwahrscheinlich, zumal keine Erklärung für das Maximum zum Zeitversatz $\Delta t = 160 \text{ ns}$ vorliegt. Die Ausbildung der drei Maxima wird insgesamt durch eine Korrespondenz zu einem siebtel der ELSA-Umlaufzeit am einfachsten erklärbar.

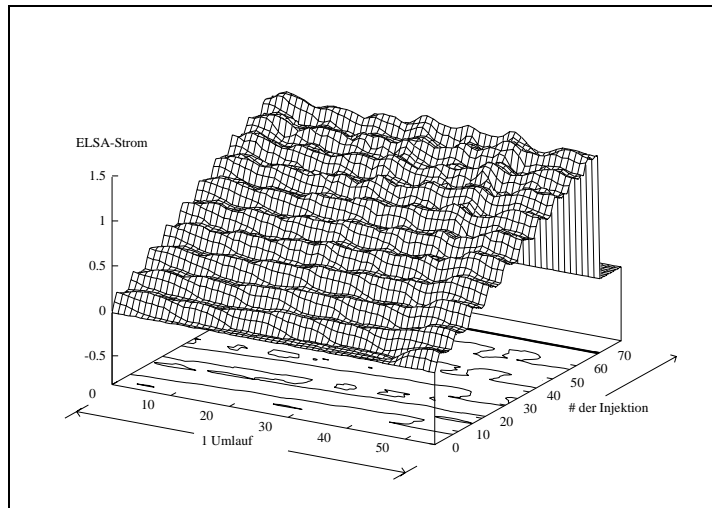
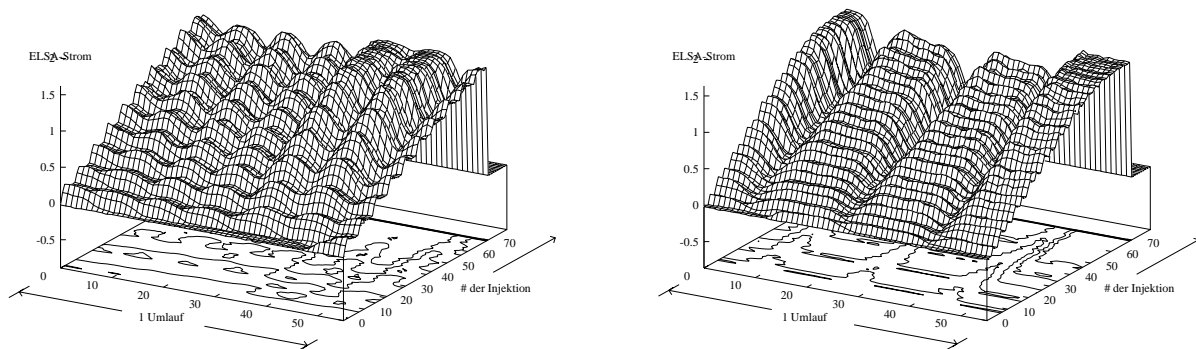


Abbildung 6.8: Optimierte SAPHIR-Füllung mit dem neuen Timingsystem, Injektionsversatz 78 ns

„Hügelstruktur“ der Füllung ist deutlich erkennbar und wird vom schnellen Intensitätsmonitor gut nachgewiesen. In einer weiteren Messung wurde der Injektionsversatz auf 185 ns abgeändert, was ca. einem Drittel der ELSA-Umlaufzeit entspricht. Das Diagramm 6.9 (b) zeigt das Meßergebnis. Die Form der Synchrotronfüllung kann in diesem Fall wieder gut durch ein gleichschenkliges Trapez angenähert werden, wobei die untere Grundlinie zwar eine zeitliche Länge besitzt, welche größer erscheint, als der eingestellte Injektionsversatz, die obere Grundlinie ist jedoch merklich kürzer. Insgesamt wird der Strom zwar reproduzierbar in ELSA akkumuliert, die einzelnen Schüsse überlappen allerdings nicht vollständig. Lediglich die Randbereiche einzelner Füllungen überlagern sich, nicht aber deren mittlere Bereiche, so daß im Lauf der Injektionsphase die Herausbildung einer „Grabenstruktur“ zu erkennen ist. Das beobachtete Verhalten liegt in Übereinstimmung mit den Überlegungen aus Abschnitt 4.3.



(a) Injektionsversatz von 87 ns

(b) Injektionsversatz von 185 ns

Abbildung 6.9: SAPHIR-Füllung mit einem Injektionsversatz von 87 ns, 185 ns

Die benutzerfreundliche Steuerung des Injektionstimingsystems erlaubt jederzeit eine interaktive Nachoptimierung im Fall wechselnder Einschubbedingungen; sie erhöht somit wesentlich die Gesamtreproduzierbarkeit einer Maschineneinstellung für den Nachbeschleunigungsmodus.

6.5.3 Untersuchung des ELSA–Akzeptanzverhaltens mit Injektionskorrektur

Das Akzeptanzverhalten von ELSA während des Injektionsprozesses mit neuer Injektionszeitsteuerung wurde durch eine Messung geprüft. Die Untersuchung fand im Rahmen des regulären SAPHIR–Betriebs statt; ein Siebenerinjektionsschema mit 70 Elementarinjektionen war eingestellt. Aktiviert durch das Injektions-

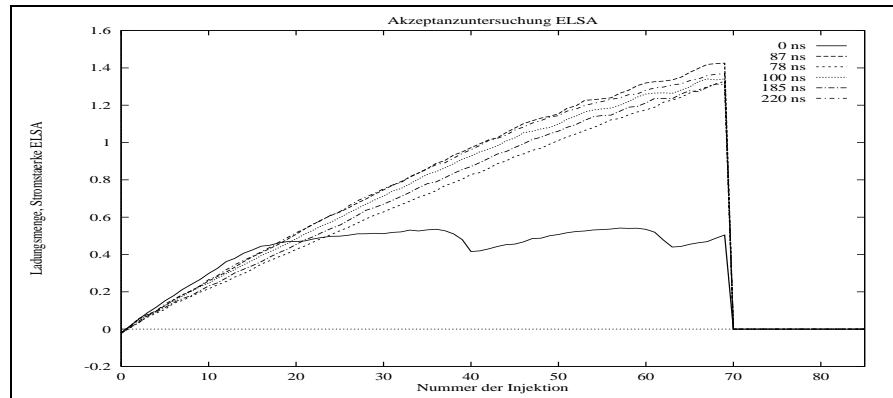


Abbildung 6.10: ELSA–Akzeptanzverhalten mit Injektionskorrektur

gnal der Zeitablaufsteuerung wurde nach jeder Injektion die in ELSA umlaufende Ladungsmenge (oder äquivalent Stromstärke) mit dem schnellen Intensitätsmonitor bestimmt. Für verschiedene Zeitversätze [0ns, 78ns, 87ns, 100ns, 185ns, 220ns] in der Injektionszeitsteuerung wurde die Messung wiederholt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6.10 dargestellt; auf der Abszisse ist die Nummer der Injektion, auf der Ordinate die Ladungsmenge in Skalenteilen aufgetragen. Die abknickende Kurve entspricht einem Injektionsversatz von 0 ns und erklärt sich durch Übersteuerung der Verstärkerelektronik im schnellen Intensitätsmonitor (siehe auch Abbildung 6.6). Bis zur etwa zwanzigsten Injektion verläuft diese Kurve entsprechend allen anderen Kurven. Insgesamt zeigt sich in guter Näherung ein linearer Anstieg der Ladungsmenge unabhängig vom eingestellten Injektionsversatz, d.h. in jeder Injektion konnte eine konstante Ladungsmenge nach ELSA transferiert werden. Eine leichte Sättigung ist für die letzten 10 Injektionen festzustellen. Der erreichte Endstrom entspricht ca. 55 mA und wird in allen Messungen in etwa erreicht. Die Akzeptanz von ELSA verringert sich nur unwesentlich während des Injektionsprozesses, obwohl bereits ein relativ hoher Strom gespeichert ist. Die neue Injektionszeitsteuerung besitzt im Rahmen dieser Untersuchungen keine akzeptanzbeschränkende Wirkung.

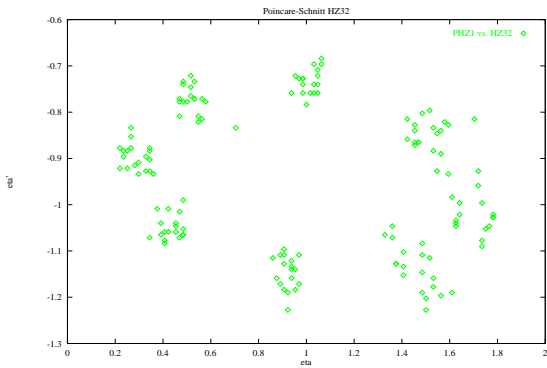
Die Injektionszeitsteuerung sowie das damit verbundene Injektionsschema, führt im neuen Kontrollsystem eine Homogenisierung der ELSA–Füllstruktur auf nahezu 99 % durch; die im Kapitel 1 gestellten Anforderungen sind gut erfüllt.

6.6 Untersuchungen mit dem Phasenraummeßsystem

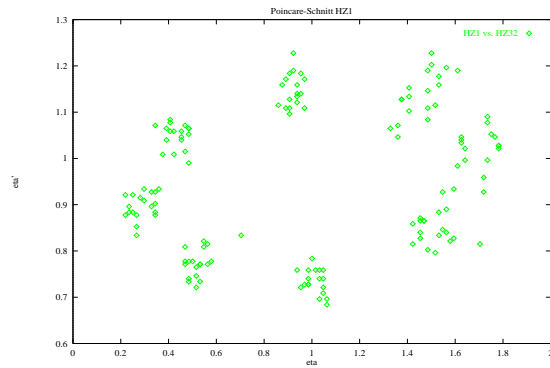
Mit dem Phasenraummeßsystem wurden Messungen des Poincaré–Schnitts der horizontalen Teilchenbewegung für die linear und nichtlinear eingestellte Maschine vorgenommen. Hauptziel dabei war der direkte Abgleich des ELSA–Simulators *xsim* mit den Strahldiagnosedaten, womit er einen wesentlichen Test seiner Funktionstüchtigkeit erfuhr. Der Aufbau des Meßsystems und seine Integration in das Kontrollsystem sind im Abschnitt 5.10 beschrieben. Zum Zeitpunkt der Messung konnten aus technischen Gründen keine kalibrierten Monitor signale genommen werden. Die Kalibrierung äußert sich für kleine Ablagen nur in einer linearen Skalierung der Meßwerte und damit der Phasenraumbilder insgesamt. Topologie und relative Größe der Phasenraumbilder bleiben jedoch erhalten. Die Messungen wurden an dem nach der Injektion kohärent angeregten Teilchenstrahl ausgeführt.

6.6.1 Lineare Maschine

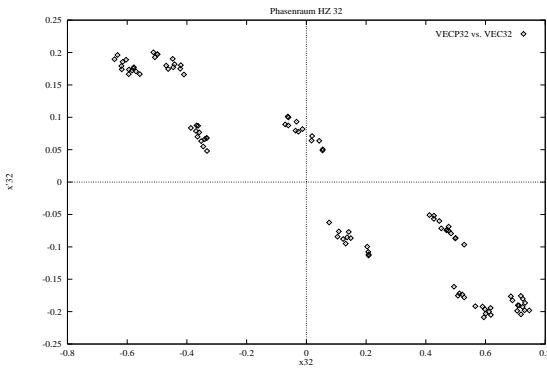
Für die Messung von Phasenraumbildern zur Untersuchung der linearen Bewegung bei ausgeschalteten Extraktions–Sextupolen wurden die Monitorstationen in Halbzelle 32 (HZ32) und Halbzelle 1 (HZ1)



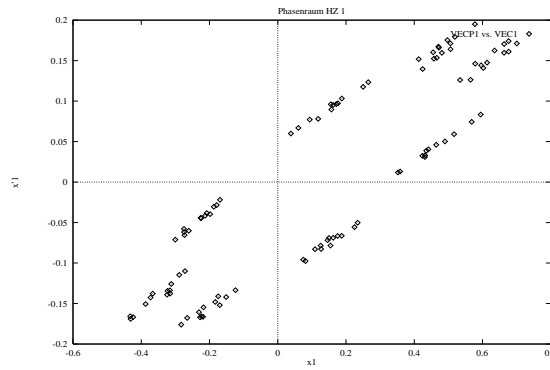
(a) norm. Messung HZ 32



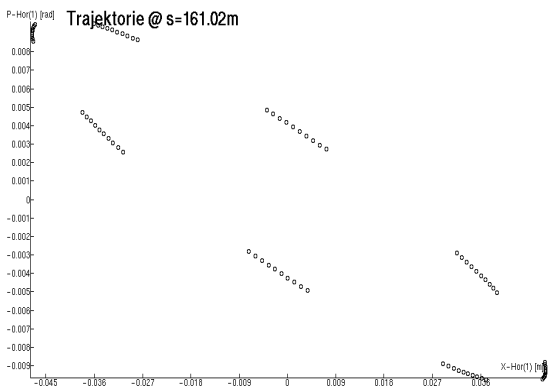
(b) norm. Messung HZ 1



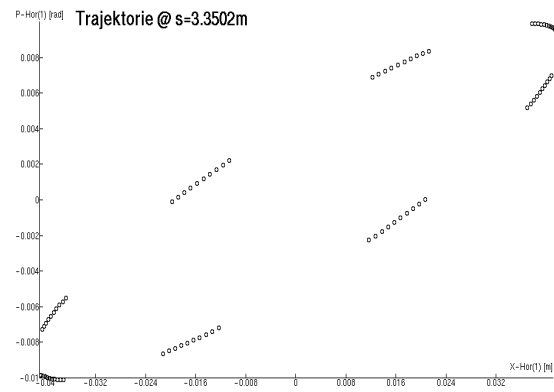
(c) Messung HZ 32



(d) Messung HZ 1



(e) Simulation HZ 32



(f) Simulation HZ 1

Abbildung 6.11: Vermessung des linearen Phasenraums

benutzt und die Lagesignale umlaufsynchron aufgezeichnet. Die Dispersionsfunktion verschwindet fast völlig an diesen Monitorstationen, so daß ausschließlich die Betatronbewegung betrachtet werden kann. Ein Beispiel von vielen Messungen zeigt Abbildung 6.11 oben. Die Phasenraumbilder für HZ32 und HZ1 sind wegen der leichteren Interpretierbarkeit in normalisierten Koordinaten aufgetragen. Eine inselartige Struktur der Phasenraumbilder läßt sich beobachten, sie resultiert aus dem eingestellten Arbeitspunkt, der in der Nähe von $Q_x = 4.625$ liegt. Eine Messung des Arbeitspunktes erfolgte sowohl aus dem Frequenzspektrum der Lagesignale als auch mit Hilfe der schnellen Bestimmung des Arbeitspunktes auf einer Zeitskala von vier ELSA-Umläufen, gemäß der Beziehung 5.61 im Abschnitt 5.10. Die unabhängigen Messungen des Arbeitspunktes zeigen gute Übereinstimmung. Für den gemessenen Arbeitspunkt von ca. $Q_x = 4.625 \approx \frac{37}{8}$ kommt ein Meßpunkt nach jedem achten Umlauf wieder in der Nähe seines Ausgangspunktes zu liegen. Damit gliedern sich die Meßpunkte der insgesamt 100 dargestellten Umläufe in acht Gruppen, die periodisch durchlaufen werden. Zum Vergleich der Meßergebnisse mit dem ELSA-Simulator werden die Daten in den (x, x') -Phasenraum umgerechnet. Abbildung 6.11 zeigt entsprechende Ergebnisse und im Vergleich dazu die Berechnungen des ELSA-Simulators. Form und Lage der Phasenraumbilder an beiden Monitorstationen werden reproduziert. Die Phasenraumfiguren entwickeln sich gegen den Uhrzeigersinn, der Nachkommaanteil des Arbeitspunktes ist damit größer als 0.5. Infolge der zusätzlichen Information, daß es sich insgesamt um einen achtezahligen Arbeitspunkt handelt, läßt sich aus beiden Ergebnissen der Nachkommaanteil des Arbeitspunktes in die Nähe von 0.625 bestimmen. Das Frequenzspektrum, wie auch die schnelle Arbeitspunktmessung bestätigen dieses Ergebnis. Aus einem Frequenzspektrum sowie der schnellen Arbeitspunktmessung allein ist nicht zu entscheiden, ob Q_x oberhalb oder unterhalb von 0.625 liegt. Betrachtet man dazu nur jeden achten Umlauf, entwickeln sich die Meßpunkte im Uhrzeigersinn und aus dem Phasenraumbild folgt $Q_x > 0.625$.

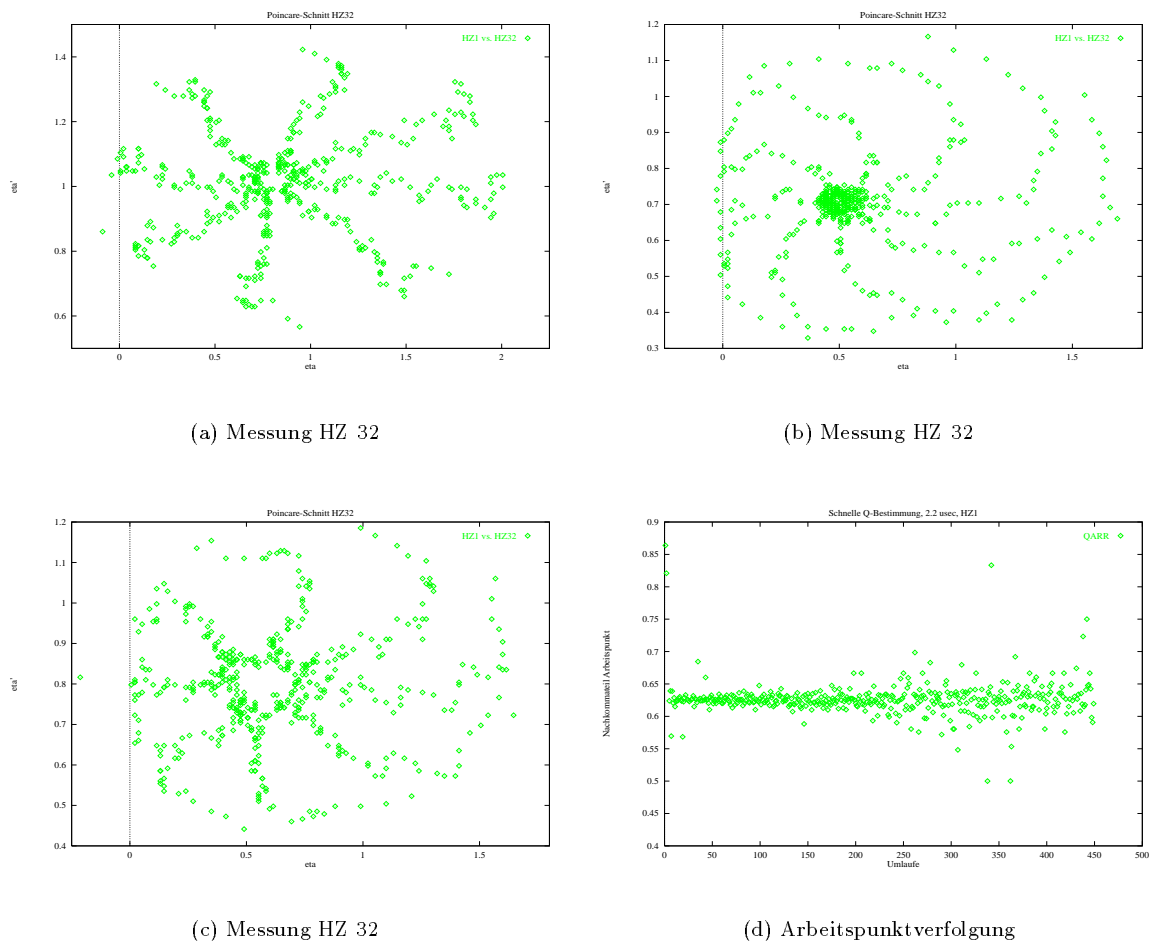


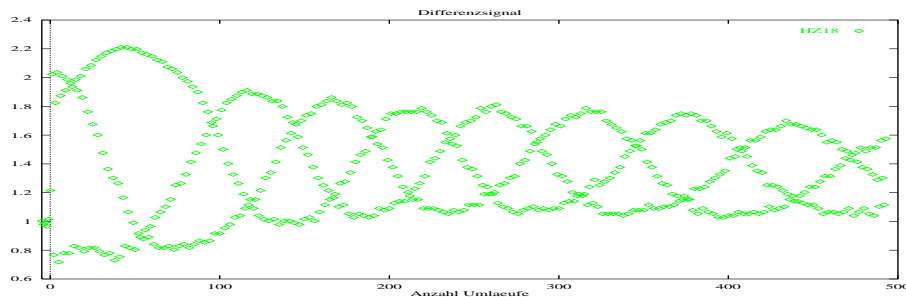
Abbildung 6.12: Linearer Phasenraum in normalisierten Koordinaten

Einige weitere Beispiele von Phasenraum-Messungen aus der aufgenommenen Meßreihe zeigt Abbildung 6.12;

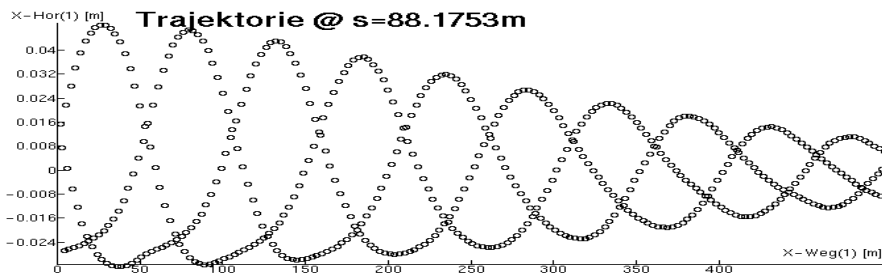
hierbei sind jeweils Meßpunkte für 250 Umläufe aufgetragen. Das Wandern der Meßpunkte zur Mitte der Phasenraumbilder ist auf den Kohärenzverlust der Schwerpunktbewegung des Strahls durch Filamentierung zurückzuführen. Der Vorgang kann ebenfalls in der Arbeitspunktverfolgung über 500 Umläufe in Abbildung 6.12 durch das Auffächern der Meßpunkte abgelesen werden.

6.6.2 Nichtlineare Maschine

Die nichtlinear eingestellte Maschine wurde mit dem Phasenraummeßsystem während eines regulären Experimentebetriebs für ELAN im 50 Hz–Stretchermodus untersucht. Es wurde der nach der Injektion kohärent angeregte Teilchenstrahl beobachtet. Die Extraktionssextupole sind hierbei eingeschaltet und regen die drittelzahlige Resonanz an; der horizontale Sollarbeitspunkt betrug 4.658 und entspricht den für die Resonanzextraktion (siehe [75]) typischerweise gewählten Verhältnissen. Diesmal wurden für die Messung die



(a) Messung

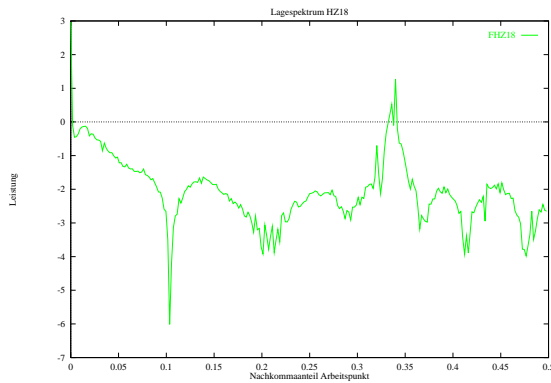


(b) Simulation

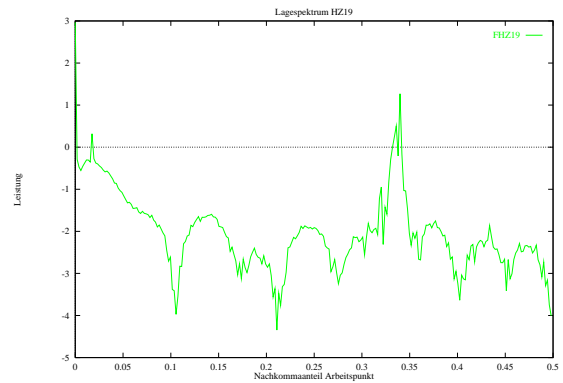
Abbildung 6.13: Lagedaten bei nichtlinearer Maschine für HZ 18

Monitorstationen in Halbzelle 18 (HZ18) und Halbzelle 19 (HZ19) verwendet. Abbildung 6.13 zeigt ein umlaufsynchron gemessenes Lagesignal und präsentiert gleichzeitig das Ergebnis einer Simulatorrechnung, in der Annahme, die Teilchenverteilung nähme die äußeren 15 % des stabilen Phasenraumbereichs ein [113]. Die Amplitude der Teilchenschwingung nimmt mit steigender Umlaufzahl wegen der Filamentierung der Teilchenverteilung ab. Das Meßergebnis und die Berechnungen des Simulators stimmen gut überein, bis auf eine Abweichung zu Anfang (Bereich bis zum 100 Umlauf), die wahrscheinlich auf einen Strahlverlust zurückzuführen ist, da sie allein durch Filamentierung nicht erklärt werden kann [113]. Die Punktdarstellung des Lagesignals zeigt bereits das charakteristische Bild der Teilchenbewegung in der Nähe der drittelzahligen Resonanz, welche der Simulator gut wiedergibt. In der Nähe der drittelzahligen Resonanz bilden sich drei sinusförmige Kurven mit einer Phasenverschiebung $\frac{2\pi}{3}$ im Lagesignal aus. Ein Teilchen durchläuft die drei Kurven zyklisch. Jede einzelne Kurve besitzt dabei die der Arbeitsabweichung ΔQ vom resonanten Arbeitspunkt Q_r entsprechende Frequenz. Im Bereich bis zum 100. Umlauf verlaufen die drei sinusförmigen Kurven mit kleinerer Frequenz als in den anschließenden Bereichen. Dies deutet für den Bereich bis zum 100. Umlauf auf einen geringeren Abstand zum resonanten Arbeitspunkt hin. Das könnte der Grund für den vermuteten Strahlverlust sein. Für die folgende Untersuchung werden nur die Meßpunkte nach

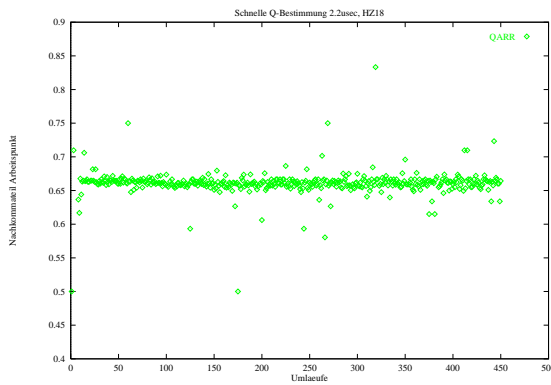
dem 100. Umlauf berücksichtigt. Betrachtet man jeden dritten Umlauf – folgt man also einer der drei Kurven – dauert eine Schwingung etwa 55 Meßpunkte, was einem Arbeitspunktabstand von der Resonanz $\Delta Q = \frac{1}{3 \cdot 55} = 0.0061$ entspricht. Der aus einer Frequenzanalyse bestimmte horizontale Arbeitspunkt beträgt



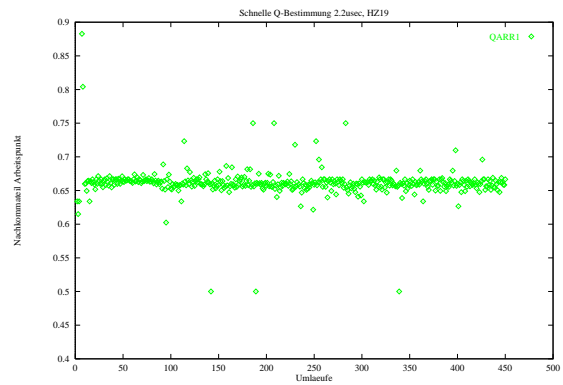
(a) Frequenzspektrum HZ18



(b) Frequenzspektrum HZ19



(c) Arbeitspunktverfolgung HZ18

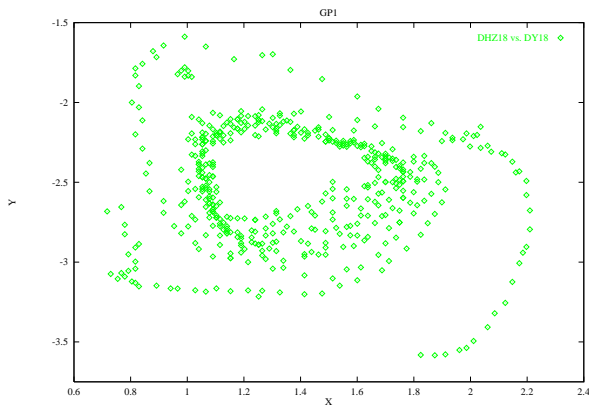


(d) Arbeitspunktverfolgung HZ19

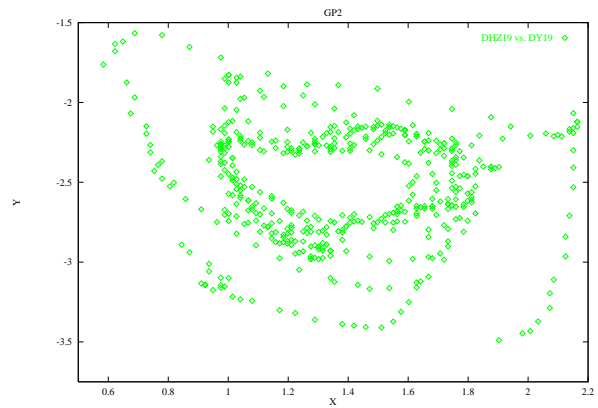
Abbildung 6.14: Frequenzspektrum der Lagesignale in HZ18 und HZ19 sowie eine Arbeitspunktverfolgung über 500 Umläufe während der ELAN-Extraktion

$Q_x = 4.6602$, Abbildung 6.14 zeigt oben beispielhaft ein Frequenzspektrum für HZ18 und HZ19. Der gemessene Arbeitspunktabstand ist konsistent damit, denn $Q_x + \Delta Q = 4.6602 + 0.0061 = 4.6663$. Besonders im Frequenzspektrum wird der Vorteil der umlaufsynchronen Erfassung der Lagesignale deutlich, da der Nachkommaanteil des Arbeitspunktes unmittelbar an der Abszisse in Abbildung 6.14 abzulesen ist. Wird das Lagesignal nicht umlaufsynchron erfaßt und soll der Arbeitspunkt aus dem Frequenzspektrum bestimmt werden, muß zusätzlich zur Identifizierung des Betatronpeaks der Bewegung auch noch die Umlauffrequenz bekannt sein. Sie wird entweder gemessen oder als fester Wert in die Messung eingebracht. Abbildung 6.14 zeigt unten zwei schnelle Arbeitspunktmessungen für HZ18, bzw. HZ19. Durch Mittelung ergeben sich: $Q_{hz18} = 4.6609 \pm 0.0051$ und $Q_{hz19} = 4.6611 \pm 0.0038$. Sie sind beide in guter Übereinstimmung mit den anderen Ergebnissen.

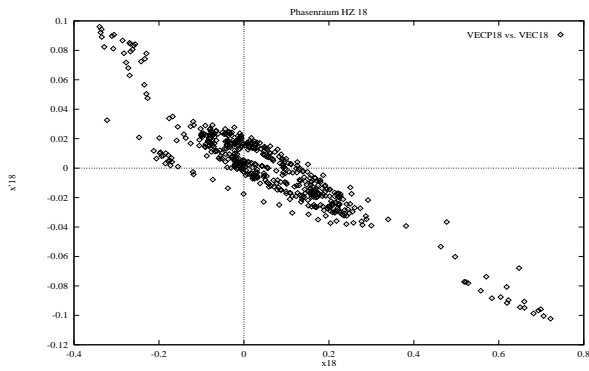
Die charakteristische Dreiecksfigur für die drittelzahlige Resonanz in normalisierten Phasenraumkoordinaten ist in Abbildung 6.15 oben für HZ18 und HZ19 dargestellt. Die Meßpunkte in der Phasenraumdarstellung entwickeln sich gegen den Uhrzeigersinn, was $Q_x > 0.5$ entspricht. Betrachtet man die Entwicklung jedes dritten Umlaufs in den Phasenraumbildern, entwickeln sich die Punkte im Uhrzeigersinn, so daß $Q_x < \frac{2}{3}$ sein muß. Um die Meßergebnisse mit Simulatorberechnungen zu vergleichen, werden die Daten in den (x, x') -Phasenraum umgerechnet. Das Ergebnis, zusammen mit den Auswertungen des Simulators, zeigt Abbildung



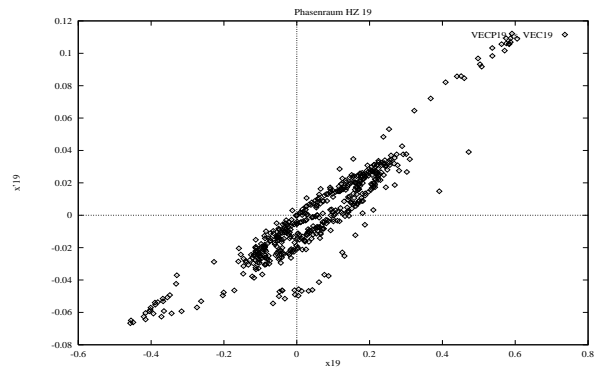
(a) Poincaré-Schnitt HZ18



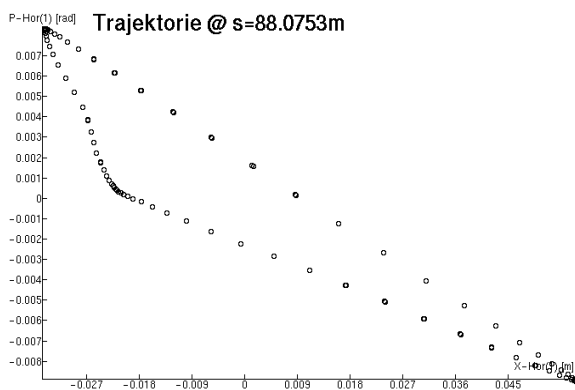
(b) Poincaré-Schnitt HZ19



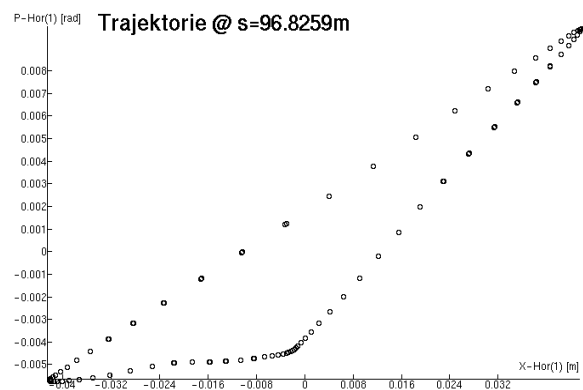
(c) Messung HZ 18



(d) Messung HZ 19



(e) Simulation HZ 18



(f) Simulation HZ 19

Abbildung 6.15: Vermessung des nichtlinearen Phasenraums

6.15. Meßergebnisse und Simulation stimmen in Form und Lage überein. Die Entwicklung der Meßpunkte läuft von außen nach innen. Die Umkehrpunkte der Teilchenbewegung treten deutlich hervor. Durch einen Vergleich mit den Auswertungen des Simulators sind diese Umkehrpunkte mit den Fixpunkten der Bewegung zu identifizieren; damit ist die Lage der Separatrix festgelegt und diese Information kann für weitere Studien im Rahmen des Simulators zur Lageuntersuchung der Separatrix am Ort der Extraktionsseptummagnete genutzt werden.

J.Wenzel benutzt Meßdaten des Phasenraummeßsystems im Rahmen seiner Arbeit [113] noch zu weitergehenden Untersuchungen – insbesondere zur Festlegung der Dispersionsbewegung –, die hier nicht weiter ausgeführt werden. Seine Analysen waren durch die Verwendung der Werkzeuge zur digitalen Signalverarbeitung in EPOS (Abschnitt 5.3) möglich. Die Werkzeuge waren ursprünglich für diesen konkreten Zweck nicht vorgesehen, ihre universelle Einsatzfähigkeit wird dadurch aber unterstrichen.

6.6.3 Bestimmung der horizontalen Chromatizität

J.Wenzel führte im Rahmen seiner Arbeit Messungen der natürlichen horizontalen Chromatizität (Sextupole sind ausgeschaltet) auf zwei verschiedene Arten durch:

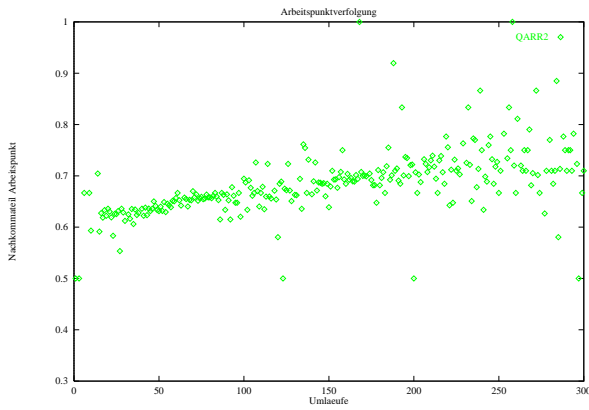
1. Zum einen wurde der Strom der ELSA-Dipolmagnete um ΔI variiert, was eine Feldänderung $\frac{\Delta B}{B} = \frac{\Delta I}{I}$ bewirkt und einer Impulsänderung $\frac{\Delta p}{p}$ entspricht. Für verschiedene Impulsabweichungen kann der Arbeitspunkt gemessen und daraus die Chromatizität C_x bestimmt werden [119].
2. Im zweiten Fall wird die Frequenz f des Mutteroszillators der Hochfrequenzanlage von ELSA um $\frac{\Delta f}{f}$ variiert, was ebenfalls eine Impulsabweichung bewirkt. Eine Messung des horizontalen Arbeitspunktes liefert die natürliche horizontale Chromatizität C_x .

Im ersten Fall wurde die natürliche horizontale Chromatizität zu $C_x = -5.8 \pm 0.11$ bestimmt. Die $\frac{\Delta f}{f}$ -Messung lieferte eine natürliche Chromatizität von $C_x = -10.5$. Beide Werte differieren deutlich.

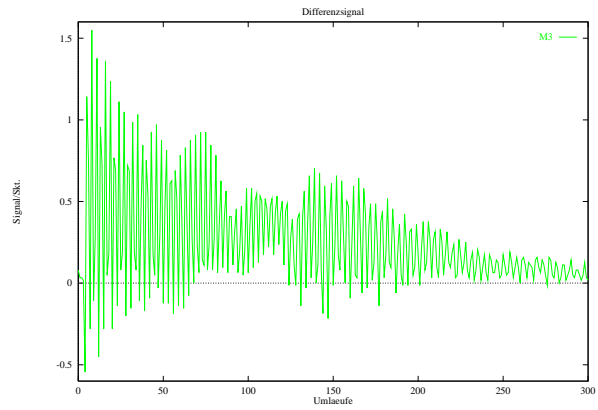
Als ein Beitrag zur Klärung wurde mit den umlaufsynchonen Lagedaten des Phasenraummeßsystems eine Messung der natürlichen horizontalen Chromatizität ausgeführt. Die Netzgeräte aller ELSA-Sextupolfamilien waren nicht eingeschaltet.

Die Hochfrequenzanlage von ELSA wurde ausgeschaltet. Ein injizierter Strahl kann dennoch einige hundert Umläufe (typisch sind hier 150 bis 200 Umläufe) in der Maschine gehalten werden, bevor die Energieabstrahlung durch Synchrotronlicht den Strahl aus der longitudinalen Energieakzeptanz von ELSA laufen läßt und er verloren geht. In dieser Zeit kann ein Lagesignal umlaufsynchron genommen werden. Der mittlere Energieverlust der Teilchen pro Umlauf $U_0 = 8.85 \cdot 10^{-5} \frac{m}{GeV^3} \frac{E_0^4}{\rho}$ bewirkt eine Energieabweichung $\frac{U_0}{E}$ (bzw. eine Impulsabweichung $\frac{\Delta p}{p}$), die sich, vermittelt durch die Chromatizität, in einem Anstieg des Arbeitspunktes niederschlägt. Mit der Möglichkeit zur schnellen Arbeitspunktmessung kann der Arbeitspunkt auf einer Zeitskala von vier ELSA-Umläufen (ca. $2.2 \mu s$) bestimmt und seine Entwicklung verfolgt werden. Eine Messung mit dem dazugehörigen Lagesignal zeigt Abbildung 6.16 für eine Einschußenergie von 1.6 GeV. Das Auffächern der Meßwerte in der Arbeitspunktverfolgung von Umlauf 100 bis 140 ist Folge des Zusammenschnürens des Lagesignals im entsprechenden Bereich. Danach erscheint das Differenzsignal wieder deutlich sichtbar und die Streuung der Arbeitspunktwerte verringert sich. Praktisch alle gemessenen Differenzsignale zeigen eine Einschnürung wie in Abbildung 6.16 (a). Der wahrscheinlichste Grund dafür ist das Überfahren der drittelzahligen Resonanz beim Arbeitspunkt $Q_R = \frac{14}{3}$. In guter Näherung gilt, daß das Auffächern der Arbeitspunktwerte dann einsetzt, sobald dieser Arbeitspunkt erreicht wird. Die Sextupole waren allerdings ausgeschaltet, so daß sie die Resonanz nicht angeregt haben; dieser Punkt muß noch weiter untersucht werden.

Aus Abbildung 6.16 wird ersichtlich, daß die Arbeitspunktverfolgung nur für einen Zeitraum vom 10-ten bis um 210-ten Umlauf sinnvoll ist, die Messung somit eine eingeschränkte Genauigkeit besitzt. Der lineare Anstieg des Arbeitspunktes (die natürliche horizontale Chromatizität ist negativ und der Strahl verliert Energie durch Synchrotronlichtabstrahlung) ist in Abbildung 6.16 (a) mit wachsender Umlaufzahl deutlich erkennbar, so daß die Messung gerechtfertigt ist. Insgesamt wurden 30 Messungen durchgeführt und jeweils für den Bereich vom 10-ten bis zum 210-ten Umlauf ein Geradenfit mit EPOS berechnet. Die ermittelte Steigung der Geraden m läßt sich direkt in die Chromatizität umrechnen: $C_x = m \frac{E}{U_0}$. Das Ergebnis der Messung ist in Abbildung 6.17 (a) aufgetragen. Als mittlere Chromatizität ergibt sich $\overline{C_x} = -10.52 \pm 2.56$,



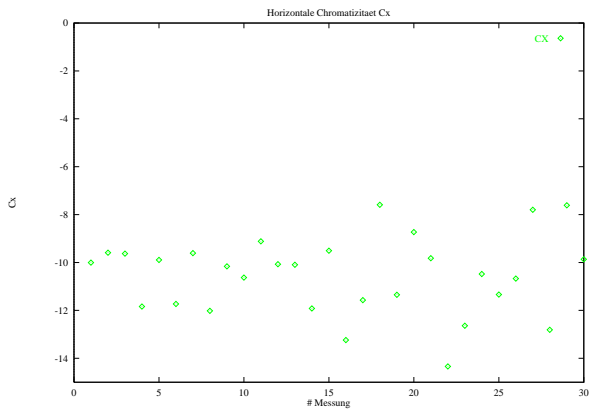
(a) Arbeitspunktverfolgung HZ1



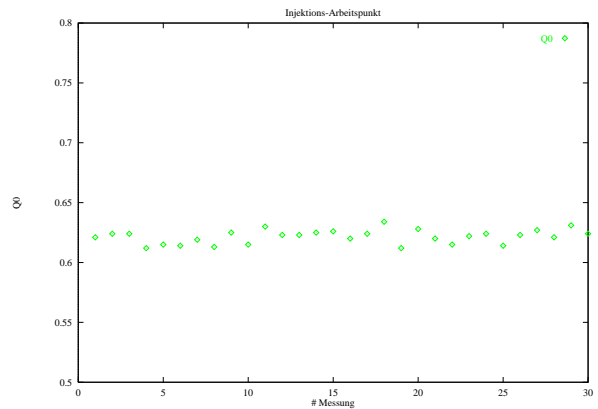
(b) Lagesignal HZ1

Abbildung 6.16: Arbeitspunktverfolgung zur Bestimmung der horizontalen Chromatizität

was sich mit dem Ergebnis der $\frac{\Delta f}{f}$ -Messung deckt. Das Ergebnis der Simulatorrechnung weicht davon ab. Der sich daraus ergebende Widerspruch wird zur Zeit noch untersucht. Aus der Messung wurde zusätzlich der



(a) Bestimmung der horizontalen Chromatizität



(b) Bestimmung des Injektionsarbeitspunktes

Abbildung 6.17: Bestimmung der horizontalen Chromatizität und des Injektionsarbeitspunktes

horizontale Injektionsarbeitspunkt als Achsenabschnitt der linearen Fitberechnung ermittelt: $Q_x = 4.6216 \pm 0.0011$; der vom Kontrollsystem eingestellte Sollarbeitspunkt für diese Messung betrug $Q_x = 4.6224$ und wird im Rahmen des Meßfehlers reproduziert. Die Meßreihe zur Bestimmung des Injektionsarbeitspunktes ist in Abbildung 6.17 (b) dargestellt.

6.7 Betriebsmodi für die ELSA-Experimente

Das neue Kontrollsystem unterstützt alle bestehenden ELSA-Betriebsmodi und ermöglicht die Entwicklung bislang undurchführbarer Betriebsarten. Besondere Berücksichtigung findet der Nachbeschleunigungsmodus für die Experimente SAPHIR und ELAN.

6.7.1 Speichermodus für Synchrotronlichtexperimente

Unmittelbar nach Inbetriebnahme des neuen Kontrollsystems wurde mit ELSA der Speichermodus für Synchrotronlichtexperimente eingestellt. Es stellte sich heraus, daß auf der Grundlage der Rechner des Prozeßsystems die Einrichtung einer schnellen und kontinuierlichen „on line“-Strom- und Lebensdauermessung möglich und für die Einstellung und Verbesserung der Betriebsverhältnisse im Speichermodus (Optimierung der Lebensdauer) nützlich ist. Dazu wurde ein entsprechendes Meßsystem aufgebaut und in das Kontrollsystem integriert. Dadurch konnte eine vom Kontrollsystem entkoppelte und mit einem EPOS-Programm im Rahmen des Speichermodus ablaufende Lebensdauerbestimmung abgelöst werden.

Die Lebensdauer τ eines gespeicherten Strahls ist ein Summenindikator für den Gesamtzustand eines Speicherrings. Die momentane Intensität $I(t)$ eines gespeicherten Strahls der Ausgangsintensität I_0 läßt sich für eine gegebene Lebensdauer τ durch Gleichung 6.70 angeben¹¹:

$$I(t) = I_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (6.70)$$

Die momentane Lebensdauer wird definiert als:

$$\tau = \frac{I}{\frac{dI}{dt}}. \quad (6.71)$$

Unter der Annahme, daß die Meßzeit zwischen zwei Punkten $\Delta t \ll \tau$ ist, kann die momentane Lebensdauer in guter Näherung angegeben werden:

$$\tau = I \frac{\Delta t}{\Delta I}, \quad (6.72)$$

wobei ΔI die Stromänderung im Zeitintervall Δt angibt.

Abbildung 6.18 zeigt das Bedienungsmenü der Strom- und Lebensdauermessung. Die Strommessung an

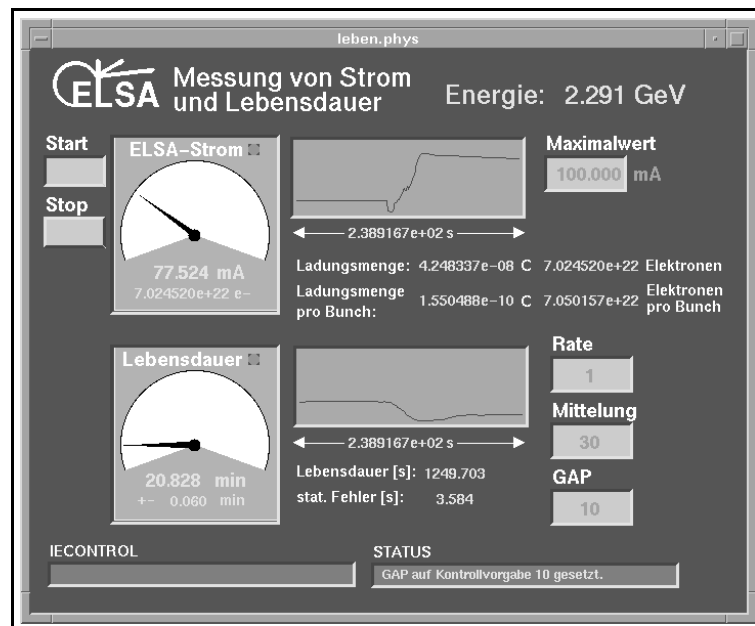


Abbildung 6.18: System zur Strom- und Lebensdauermessung im Kontrollsystem

ELSA erfolgt über einen Toroidmonitor mit nachgeschalteter Elektronikeinheit [8], welche eine dem momentanen ELSA-Strom streng proportionale Spannung (0-250 mA entsprechen 0-10V) abgibt; sie wird mit einem Digitalvoltmeter ($6\frac{1}{2}$ Stellen Genauigkeit) gemessen, und durch einen VME-Rechner des Prozeßsystems über eine IEC-Schnittstellenkarte periodisch ausgelesen. Die Ausleserate ist einstellbar. Um eine größere Genauigkeit zu erreichen, werden mehrere aufeinanderfolgende, eine Zeit T (ist ein Parameter im

¹¹Die Beziehung kann auch als Definition der Lebensdauer τ aufgefaßt werden.

Meßsystem) auseinanderliegende Messungen gemittelt. Das Meßsystem adaptiert sich an die gemessene Lebensdauer, indem der Parameter T für größer werdende τ nach einer heuristischen Regel ebenfalls vergrößert wird, um Rundungsfehler möglichst klein zu halten. Als Fehler für einen Lebensdauerwert τ – er geht aus einer Mittelung von n Teilmessungen hervor – wird die Standardabweichung des Mittelwertes angegeben. Neben der Stromangabe wird auch die entsprechende Ladungsmenge Q , die mittlere Ladungsmenge pro Bunch $Q_B = \frac{Q}{274}$ sowie die damit verbundene Anzahl von Elektronen berechnet. Für die Größen Strom $I(t)$ und momentane Lebensdauer τ führt das Meßsystem eine Verlaufsbildung selbsttätig aus. Alle Ergebnisse stehen als Kontrollsystemparameter zur Verfügung. Die Ergebnisse der Strom- und Lebensdauermessung werden vom EPOS-Programm zur Steuerung und Kontrolle des Speicherbetriebs verwendet. Die schnelle Bestimmung der Lebensdauer hat sich nach kurzer Zeit als wertvolles Einstell- und Optimierungsinstrument für die Speicherbetriebsart bewährt.

6.7.2 Experiment PHOENICS

Für die Extraktion aus ELSA zum Experiment PHOENICS wird die Vielfachstreuung des umlaufenden Elektronenstrahls an einem in den Strahlweg eingeschobenen Berylliumdraht benutzt. Im Lauf von vielen elementaren Streuprozessen am Berylliumdraht vergrößern sich die Schwingungsamplituden der Teilchen; ihre Schwingungsamplitude am Septummagneten kann so groß werden, daß sie über das Septum springen und aus ELSA extrahiert werden. Der Mechanismus findet sich in [23] genau untersucht. Für den PHOENICS-Betrieb wird Strahl aus dem Synchrotron in ELSA fortwährend akkumuliert, bis sich in ELSA ein Gleichgewicht aus extrahierten Teilchen zu wieder injizierten Teilchen einstellt. Die extrahierten Teilchen stammen sowohl aus dem umlaufenden, abgedämpften Strahl als auch aus dem injizierten Strahl. Das makroskopische Tastverhältnis in diesem Betriebsmodus ist hoch (nahezu 95 %). In der Vergangenheit konnte durch fortlaufende Verbesserungen der Maschineneinstellung das mikroskopische Tastverhältnis auf reproduzierbare und stabile Werte von ca. 50 % bis 60 % gesteigert werden. Es blieb im wesentlichen wegen des Tastverhältnisses der ELSA-Füllung auf diese Werte beschränkt.

Das Tastverhältnis der ELSA-Füllung war durch das Injektionsschema des alten Kontrollsystems auch im Akkumulationsbetrieb limitiert. Deswegen konnte für PHOENICS das mikroskopische Tastverhältnis nicht weiter verbessert werden. Abbildung 6.19 zeigt die mit dem alten Kontrollsystem eingestellte Füllstruktur für das Experiment PHOENICS¹². Deutlich erscheint eine Ungleichmäßigkeit der Füllung, welche das mikroskopische Tastverhältnis des extrahierten Strahls auf ca. 60 % limitiert. Für die Extraktionsmethode

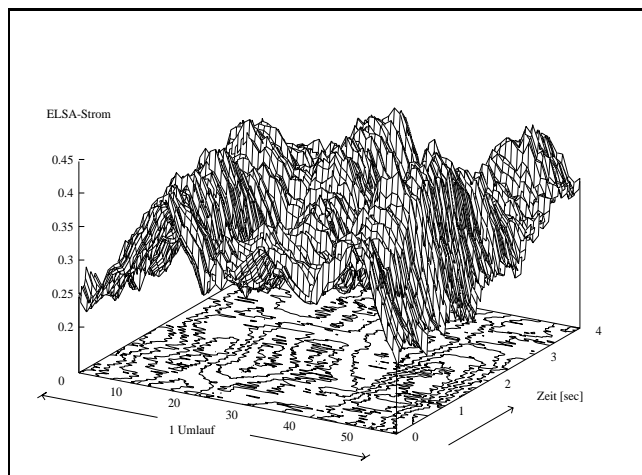


Abbildung 6.19: ELSA-Füllung im PHOENICS-Betrieb ($\Delta t = 20$ ms, $T_{ges} = 4$ s) ohne Injektionskorrektur.

mit eingefahrenem Berylliumdraht wird Strahl in ELSA akkumuliert. Es bot sich nach Inbetriebnahme des neuen Kontrollsystems die Verwendung eines neuen Injektionsschemas an: Der Injektionsgenerator des neuen Kontrollsystems wird dabei auf ein Siebenerinjektionsschema mit einem Zeitversatz von $\Delta t = 78$ ns konfiguriert, so daß sich durch fortlaufendes Positionieren und Aufakkumulieren injizierter Synchrotronsschüssen

¹²Abbildung wurde der Diplomarbeit von J.Keil [57] entnommen.

eine geglättete ELSA-Füllstruktur herausbildet. In der Einstellphase einer Maschinenkonfiguration wird die Füllstruktur mit dem schnellen Intensitätsmonitor erfaßt, das Füllstruktursignal auf der graphischen Bedienungsfläche angezeigt und kann überwacht werden. Die Verwendung des neuen Injektionsschemas brachte für PHOENICS eine Verbesserung des mikroskopischen Tastverhältnis auf Werte bis zu 85%. Wie erwartet konnte eine starke Abhängigkeit des vom Experiment gemessenen Tastverhältnis vom Zeitversatz Δt des Injektionsgenerators beobachtet werden. Durch interaktive Anpassung des Zeitversatzes über das Bedienungsfenster 6.3 kann ein Operateur die Füllstruktur optimieren.

Das Injektionsschema für PHOENICS konnte die Reproduzierbarkeit des Extraktionsbetriebs und die Langzeitstabilität erhöhen, da insgesamt die Extraktionsbedingungen nicht mehr so stark von den Einschußschwankungen der Vorbeschleuniger abhängen.

6.7.3 Nachbeschleunigungsmodus für das Experiment SAPHIR

Ein Nachbeschleunigungsbetrieb mit Extraktion für das Experiment SAPHIR konnte bereits vor Inbetriebnahme des neuen Kontrollsystems sowohl für Maschinenuntersuchungen als auch für einen Produktionsbetrieb mit Software des neuen Kontrollsystems und der Hardware des alten Kontrollsystems ausgeführt werden. Dazu wurden Softwarekomponenten des neuen System in das EPOS-System der alten Kontrolle integriert, wobei das alte Kontrollsystem als Datentransportmedium diente. Eine Eigenheit der alten Zeitsteuerung in Verbindung mit den benutzten Funktionsgeneratoren zur Ausgabe der Steuerkurven erwies sich zur Einstellung des SAPHIR-Modus als nützlich¹³. Für die angewendete stochastische Resonanzextraktion (Abschnitt 5.1.2) wurden alle Steuerkurven (Magnetsystem und Hochfrequenzansteuerung) für diesen Betriebsmodus in EPOS für den kompletten Maschinenzklus ausgerechnet und in Steuerkurvengeneratoren gesendet. Die Resonantorspitzenspannung wurde innerhalb des Zyklus so gewählt, daß nach Erreichen der Extraktionsenergie eine Reduktion stattfand, welche den Teilchenausfall einleitete. Diese Methode ließ keine genaue Festlegung des Extraktionszeitpunktes nach einer notwendigen Präparierung der Magneto-optik für die Extraktion zu, wie es das neue System leistet. Die Endenergie beschränkte sich auf 2.2 GeV und das makroskopisch erreichbare Tastverhältnis konnte Werte von rund 70 % erreichen.

Das neue Kontrollsystem und die darin eingebettete Zeitablaufsteuerung konnten die Betriebsbedingungen für SAPHIR verbessern und reproduzierbarer gestalten. Das System zur Zeitablaufsteuerung moderiert alle Betriebsabläufe und markiert insbesondere das Erreichen der Extraktionsenergie und den Start der Extraktionsphase. Eine genaue Feinabstimmung der Magneto-optik und der Ansteuerung der Hochfrequenzanlage zur Einstellung der Extraktionsbedingungen ist nunmehr reproduzierbar möglich. Die Injektionszeitsteuerung zur Homogenisierung der Füllstruktur sorgte für eine ELSA-Füllung mit einem reproduzierbaren Tastverhältnis von ca. 95 %. Innerhalb der Extraktionsphase wurde vom Experiment ein mikroskopisches Tastverhältnis zwischen 75 % und 90 % gemessen. Die Softwareerweiterung der verwendeten Steuerkurvengeneratoren, wie auch die entwickelten Feldbuscontroller, erlauben Maschinenzklen einer Länge von mehr als 3 Minuten, so daß die Extraktionszeit nach wenigen Maschinentests mit dem neuen System schrittweise, bei sonst konstanten Größen, erhöht werden konnte. Die Abbildungen 6.20 und 6.21 zeigen die Situation für einen Maschinenzklus einer zeitlichen Länge von rund 42 s. Die Extraktionszeit beträgt 35 s, das makroskopische Tastverhältnis ergibt sich zu 83 %. Im Stromsignal in Abbildung 6.20 ist erkennbar, daß ELSA am Ende der Extraktion nicht vollständig geleert ist. In der Rampphase von Extraktionsenergie auf Injektionsenergie wurde die Ansteuerung der Hochfrequenzanlage soweit reduziert, daß der Strahl nicht mehr in ELSA gehalten werden konnte. Damit waren die Ausgangsbedingungen für die anschließende Injektion hergestellt. Ohne die Reduzierung der Ansteuerung der Hochfrequenzanlage wurde der verbleibende Strahl ohne Verlust zurückgerampt. Die Stromüberwachung mit dem Injektionsgenerator konnte in den bisherigen Einstellungen wegen eines technischen Problems, das die Verfügbarkeit eines Istwertsignals der ELSA-Stromstärke verhinderte, noch nicht eingesetzt werden.

Insgesamt konnte mit dem neuen Kontrollsystem in kurzer Zeit eine Konfiguration für diesen Betriebsmodus eingestellt werden, so daß dem Experiment SAPHIR damit bereits Strahlzeit zur Verfügung stand. Als hilfreich erwiesen sich dabei die Erfahrungen aus der Betriebsphase mit dem alten EPOS-System. Typischerweise wird mit dem neuen System bei 1.2 GeV oder 1.6 GeV injiziert. Die Injektionsphase besteht aus 35 oder 70 Elementarinjektionen, welche in sieben Injektionszüge mit 5 bzw. 10 Wiederholungen durch die Injektionszeitsteuerung bei einem Injektionsversatz von $\Delta t = 78$ ns angeordnet sind; damit werden ca. 50 mA

¹³Siehe dazu auch die Ausführungen im Kapitel 4.

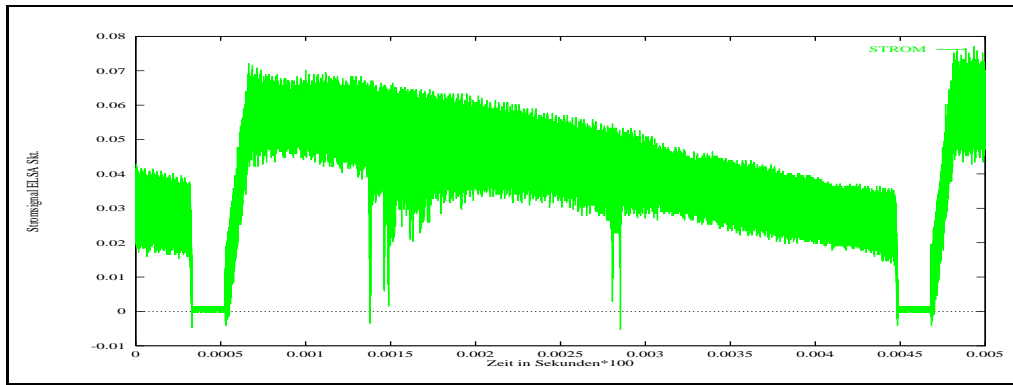


Abbildung 6.20: Stromsignal ELSA während des Nachbeschleunigungsbetriebs (2.2 GeV) für SAPHIR

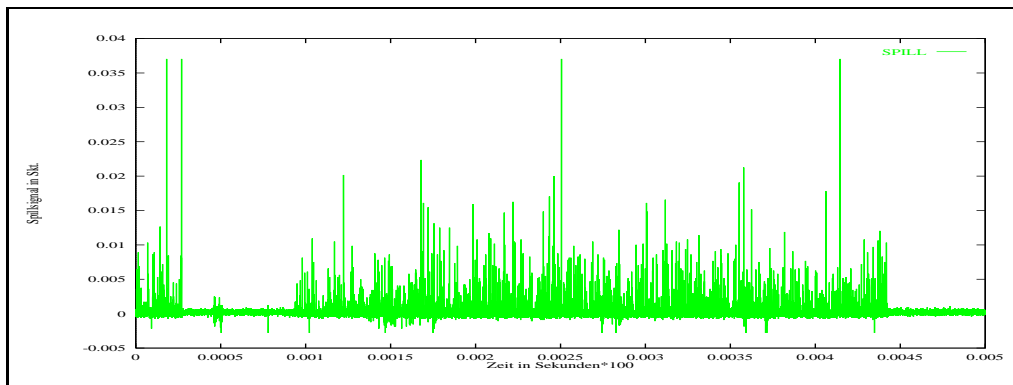


Abbildung 6.21: Spillsignal von SAPHIR im Nachbeschleunigungsbetrieb (2.2 GeV) mit Extraktionsperiode von 35 Sekunden

akkumuliert und in 1.5 s bis 2.5 s auf eine Endenergie von zur Zeit 2.2 GeV nachbeschleunigt. Die Magnetoptik wird in der Extraktionsvorbereitungsphase auf günstige Einstellungen gebracht, indem der horizontale Arbeitspunkt in die Nähe des resonanten Arbeitspunktes gefahren wird, die F-Sextupole in ihrer Stärke reduziert und die Extraktionssextupole zur Präparierung des horizontalen Phasenraums aktiviert werden. Das Extraktionssignal leitet die Extraktion ein; dabei wird die Beschleunigungsspannung in den Beschleunigungsstrecken so reduziert, daß ein gleichmäßiger Teilchenausfall beobachtet werden kann. Die Einstellungen wurden gemäß der Konzeption der Extraktionssteuerung in Abschnitt 5.1.4 gefunden. Abschnitt 5.1.4 kann somit auch als Einstellungsleitfaden benutzt werden. Zur Zeit werden für den SAPHIR-Betrieb Extraktionszeiten von 60 s bei einer Rampzeit von 2 s eingestellt, wobei das makroskopische Tastverhältnis mehr als 90 % beträgt. Das vom Experiment gemessene mikroskopische Tastverhältnis nimmt Werte zwischen 75 % bis 90 % bei einer mittleren Zählrate von ca. 500 kHz an. Das Datenerfassungssystem des SAPHIR-Experiments liefert diese Werte direkt über seine Verbindung zum Kommunikationssystem in die Kontrolle, wo sie graphisch dargestellt werden (Abb. 6.2). Die Abbildungen 6.22 und 6.23 zeigen ein ELSA-Stromsignal und das Spillsignal des Experiments für die beschriebene Konfiguration.

Beobachtungen und Probleme des Extraktionsbetriebs mit SAPHIR

In den Maschinentestzeiten zur Etablierung des Standard-SAPHIR-Betriebs konnten eine Reihe von Beobachtungen im Rahmen der Einstellarbeiten gemacht werden, von denen die wichtigsten hier zusammengetragen sind.

Die Intensität des extrahierten Elektronenstrahls ist stark abhängig von der Einstellung der horizontalen Chromatizität C_x , d.h. von der Stärke der fokussierenden Sextupole in der Extraktionsphase. Diese Beobachtung scheint auf den ersten Blick nicht weiter verwunderlich, hängt doch das Modell der stochastischen Resonanzextraktion von der horizontalen Chromatizität ab. Die Situation für den Extraktionsbetrieb sollte

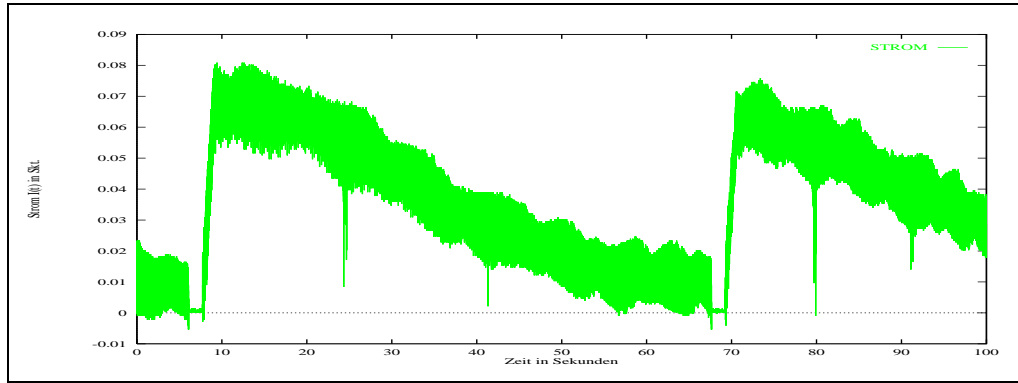


Abbildung 6.22: Stromsignal ELSA während des Nachbeschleunigungsbetriebs (2.2 GeV) für SAPHIR

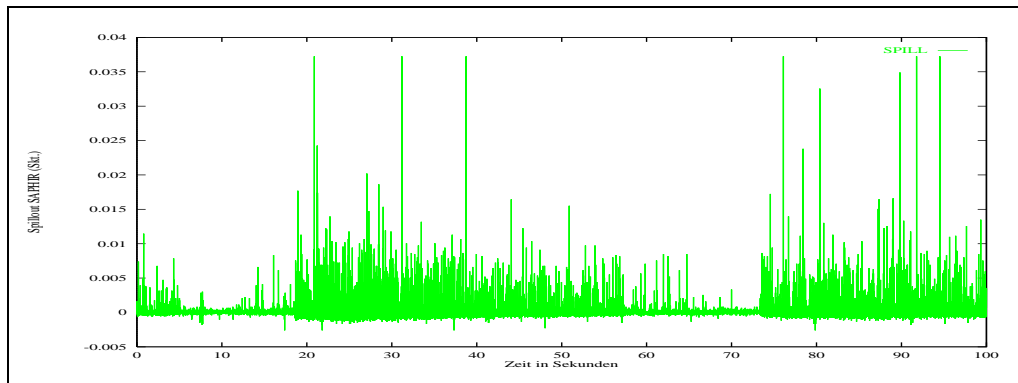


Abbildung 6.23: Spillsignal von SAPHIR im Nachbeschleunigungsbetrieb (2.2 GeV) mit Extraktionsperiode von 1 Minute

günstig für den Fall nichtkompensierter, natürlicher Chromatizität sein, da die Arbeitspunktabweichungen für ein Teilchen dann – im Fall einer Energievariation – am größten sind und ein Übergang in die horizontale Resonanz am wahrscheinlichsten wird. In der praktischen Einstellarbeit konnten die günstigsten Einstellungen gefunden werden, falls die F-Sextupole mit einem Wert von ca. 30 A bis ca. 45 A betrieben wurden, was einer Sextupolstärke von $0.72 \frac{1}{m^3}$ bis $1.08 \frac{1}{m^3}$ entspricht. Die eingestellte, horizontale Chromatizität von ELSA beträgt damit nur ca. die Hälfte der natürlichen Chromatizität. Eine Extraktion findet auch statt, wenn die horizontale Chromatizität beinahe kompensiert ist. Die Zeitstruktur des extrahierten Strahls verhält sich allerdings nicht mehr gleichmäßig und die extrahierte Teilchenrate ist deutlich niedriger (Faktor 10) als im Fall einer optimierten Einstellung.

Eine manuelle Variation der Sextupolstärke der fokussierenden Sextupole in der Extraktionsphase besitzt einen nicht zu vernachlässigenden Einfluß auf den horizontalen Arbeitspunkt Q_x , so daß dieser Effekt in der Gesamteinstellung der Extraktionskonfiguration immer Beachtung finden mußte. Diese Beobachtung ist von J. Wenzel mit dem ELSA-Simulator untersucht worden. Die Arbeitspunktverschiebung ist durch die Sextupole erklärbar, falls angenommen wird, daß die fokussierenden F-Sextupole einen mittleren Stellfehler $\overline{\Delta x} = 3.4 \text{ mm}$ sowie die Extraktionssextupole einen mittleren Stellfehler $\overline{\Delta x} = -1.4 \text{ mm}$ haben und ein mit der mittleren Ablage $\overline{\Delta x}$ durchlaufener Sextupol eine Fokussierung $\Delta k = \overline{\Delta x} \cdot m_s$ bewirkt, wobei k die Fokussierungsstärke und m_s die Sextupolstärke bezeichnet. Dabei ergeben sich folgende Arbeitspunktverschiebungen:

- F-Sextupole: $\Delta Q_x = \frac{0.005}{[m^{-3}]} m_s$
- Extraktionssextupole: $\Delta Q_x = \frac{-0.002}{[m^{-3}]} m_s$.

Die defokussierenden Sextupole haben eine vernachlässigbare Wirkung auf den horizontalen Arbeitspunkt.

Die Extraktionsanfangsbedingungen sind stark abhängig von der Höhe des in ELSA gespeicherten Stroms zum Extraktionsstartzeitpunkt. In der Extraktionsphase führt die Stromabnahme alleine zu einer Reduzie-

rung des horizontalen Arbeitspunktes und damit zu einer Veränderung der Betriebsbedingungen. Insbesondere war davon die Extraktionsrate betroffen; oftmals nahm die extrahierte Teilchenrate deutlich zum Ende der Extraktionsperiode hin ab¹⁴. Diese beiden Beobachtungen sind im Rahmen der Untersuchungen zur Stromabhängigkeit des horizontalen ELSA-Arbeitspunktes zu verstehen (Abschnitt 6.7.3). Zur Korrektur der Arbeitspunktvariation in der Extraktionsphase wurden die Extraktionsquadrupole von ELSA benutzt, die bislang für den SAPHIR-Betrieb keinen Einsatz fanden. Sie wurden in ihrer Stärke über die Extraktionsphase so gesteuert, daß der Spill am Experiment keine größeren Intensitätsschwankungen mehr zeigte. Diese Maßnahme führte zu einer Stabilisierung der SAPHIR-Betriebsart. Teilweise wurde dazu der komplette Arbeitspunkthub der Extraktionsquadrupole eingesetzt. Es wäre in Zukunft gegebenenfalls sinnvoll, hierfür einen separaten Korrekturquadrupol in ELSA vorzusehen.

In der Einstellarbeit lassen sich Konfigurationen finden, bei denen der Strahl aus ELSA extrahiert wird, obwohl die Beschleunigungsspannung der Resonatoren innerhalb der Extraktionsphase konstant angesteuert wird. Trotzdem ist eine gleichmäßige Teilchenrate genügend hoher Intensität am Experiment zu beobachten. Eine manuelle Variation der Beschleunigungsspannung in der Extraktionsphase kann den Extraktionsprozeß vollständig zum Erliegen bringen, um dann erneut einzusetzen, falls die Variation in der eingeschlagenen Richtung weitergeführt wird. Es ist dabei unerheblich, ob die Beschleunigungsspannung erhöht oder reduziert wird.

In einigen Einstellungen hat der vertikale Arbeitspunkt Q_z starken Einfluß auf Zeitstruktur und Intensität des extrahierten Strahls, obwohl die Sollarbeitspunktwahl keine Resonanzbedingung erfüllt.

Ein unkontrollierter Strahlverlust während der Extraktion kann in vielen Fällen nur durch die Wahl einer günstigen Gesamteinstellung der Maschine vermieden werden. In der Nachbeschleunigungsphase ist die Arbeitspunktwahl Q_x, Q_z, Q_s der drei Bewegungsrichtungen am Anfang der Nachbeschleunigung sorgfältig durchzuführen; sie wird experimentell ermittelt. Ungünstige Startbedingungen können zu einem Strahlverlust innerhalb oder am Ende der Rampphase führen (siehe auch [38]).

Aufgrund dieser Beobachtungen wurden von J. Wenzel verschiedene Hypothesen zum Extraktionsverfahren für SAPHIR geprüft; Untersuchungen finden sich in seiner Dissertationsschrift [113]. Sie nehmen als wahrscheinlichste Ursache für das noch nicht zufriedenstellende Verhalten der Extraktionsmethode für SAPHIR eine Synchro-Betatronkopplung an.

Das bislang nicht genau verstandene Extraktionsverfahren für diesen SAPHIR-Betriebsmodus ließ die Verwirklichung einer „on line“-Steuerkurvenerzeugung in Abhängigkeit vom Experimente-Spillsignal noch nicht zu. Zunächst muß hier ein intensives experimentelles und theoretisches Studium des genauen Extraktionsmechanismus erfolgen, bevor in dieser Richtung weitergearbeitet werden kann. Das im Abschnitt 5.1.2 beschriebene Modell der stochastischen Resonanzextraktion ist bisher unvollständig und hat nur vorläufigen Charakter. Für eine zukünftige Arbeit, die sich einer „on line“-Steuerkurvenerzeugung annimmt, sind die Werkzeuge zur digitalen Signalverarbeitung und die algorithmischen Konzepte für einen adaptiven (selbstoptimierenden) Regler entwickelt (Abschnitt 5.3.3).

Abhängigkeit des Arbeitspunktes von der gespeicherten Strahlintensität

Der horizontale Betatronarbeitspunkt in ELSA ist abhängig von der gespeicherten Stromstärke in ELSA. Für die Extraktion bedeutet das zum einen die Abhängigkeit der Extraktionsstartbedingungen vom akkumulierten Strom, zum anderen eine Arbeitspunktvariation in der Extraktion, da hier die gespeicherte Stromstärke von typischerweise 50 mA bis 80 mA auf 0 mA reduziert wird. Damit verbindet sich eine Arbeitspunktannahme von mehreren 10^{-3} , welche bereits im Bereich des möglichen Gesamthubs der Extraktionsquadrupole liegt¹⁵. Das Verständnis dieses stromabhängigen Effektes ist von wesentlicher Bedeutung für die ELSA-Einstellung im Nachbeschleunigungsbetrieb.

Im Rahmen dieser Arbeit waren überblicksartige Messungen möglich, welche die Beobachtungen bestätigen. Es wurden Messungen im Speicherbetrieb von ELSA für die Synchrotronlichtexperimente bei 2.3 GeV und

¹⁴Die Variation zwischen den Teilchenraten am Anfang und am Ende der Extraktionsphase kann bis zu einem Faktor 2 ausmachen.

¹⁵Hiermit ist z.B. ein maximaler Arbeitspunkthub von 0.015 bei 2.0 GeV möglich, der sich für größere Energien noch weiter verringert.

2.7 GeV ausgeführt. Den Strahl regte dabei ein Injektionskicker an¹⁶. Über mehrere Stunden wurde mit dem EPOS-Programm `histlife.epf` unter anderem der ELSA-Strom, die Strahllebensdauer sowie der horizontale Arbeitspunkt protokolliert und abgespeichert. Der horizontale Arbeitspunkt wurde dabei mit dem Spektralanalysesystem von T.Götz bestimmt. Im Abstand von 1.6 s erfolgte jeweils eine Messung, deren Ergebnisse einer Datenauswertung die Tabelle 6.7.3 zeigt¹⁷. Sie enthält einen Wert für 1.2 GeV, welcher

Energie	Strahlintensität	$\frac{\Delta Q}{\Delta I}$	$\frac{\Delta Q/\Delta I}{GeV}$
1.2 GeV	18 mA	$\frac{(2.8 \pm 0.1) \cdot 10^{-4}}{mA}$	$\frac{(3.0 \pm 0.1) \cdot 10^{-4}}{mA \cdot GeV}$
2.3 GeV	24 mA → 20 mA	$\frac{(1.3 \pm 0.1) \cdot 10^{-4}}{mA}$	$\frac{(3.0 \pm 0.1) \cdot 10^{-4}}{mA \cdot GeV}$
2.7 GeV	12 mA → 10 mA	$\frac{(1.2 \pm 0.1) \cdot 10^{-4}}{mA}$	$\frac{(3.2 \pm 0.1) \cdot 10^{-4}}{mA \cdot GeV}$

Tabelle 6.1: Abhängigkeit des Arbeitspunktes von der gespeicherten Strahlintensität.

von T.Götz bestimmt und von J.Wenzel in einer unabhängigen Messung bestätigt wurde. Die gefundenen Meßwerte in Tabelle 6.7.3 skalieren in guter Näherung umgekehrt proportional mit der Teilchenenergie und folgen den Erwartungen in Abschnitt 5.1.3 für eine kohärente Arbeitspunktverschiebung in Abhängigkeit der gespeicherten Stromstärke (siehe auch [46][82]¹⁸). Die kohärente Anregung der Betatronschwingung durch den Injektionskicker war gering, die Arbeitspunktbestimmung deswegen mit häufigen Fehlmessungen verbunden und die Datenauswertung sehr mühsam. Aus diesem Grund sollten sich in Zukunft ein verbesserte Messungen anschließen.

6.7.4 Nachbeschleunigungsmodus für das Experiment ELAN

Der Nachbeschleunigungsbetrieb mit Extraktion für das Experiment ELAN wurde in Zusammenarbeit mit T.Götz in zahlreichen Maschinentestschichten entwickelt.

Zunächst wurden im 50 Hz-Stretcherbetrieb bei 1.2 GeV die grundsätzlichen, magnetoptischen Einstellungen und Extraktionsbedingungen gesucht. Die Extraktion findet hierbei aus dem nicht abgedämpften Strahl heraus statt. Im Nachbeschleunigungsbetrieb gestalten sich die Verhältnisse anders, da in diesem Fall der Strahl abgedämpft ist und sich die gaußförmigen Gleichgewichtsverteilungen aus Dämpfung und Anregung der Synchrotronlichtabstrahlung eingestellt haben. Im ersten Entwicklungsschritt des Nachbeschleunigungsbetriebs wurde mit der neuen Zeitsteuerung eine Dämpfungszeit von 1 s zwischen Injektion und dem Start der Extraktion eingestellt, so daß die Schwingungsamplituden der Teilchen in longitudinaler und transversaler Bewegungsrichtung weitgehend gedämpft waren. Die zeitliche Ansteuerung der Extraktionsquadrupole wurde darauf angepaßt, allerdings war kein nennenswertes Spillsignal am Experiment zu beobachten. Die Injektion wurde dahingehend verändert, daß insgesamt eine Siebenerinjektionsgruppe eingestellt wurde, um zum einen die Intensität des ELSA-Strahls für die Extraktion zu erhöhen und zum anderen die ELSA-Füllstruktur zu homogenisieren. Erst nach Anpassung der Magnetoptik, insbesondere einer Erhöhung des horizontalen Arbeitspunktes und eines Heranfahrens des Extraktionsseptummagneten an den Strahl um ca. 5 mm, konnte die Extraktion durch das Spillsignal am Experiment wieder beobachtet werden. Dies enthält einen deutlichen Hinweis auf die Abhängigkeit der Extraktionskonfiguration vom Dämpfungszustand des Strahls, wobei die Verhältnisse aber bereits einen guten Anhaltspunkt für die weitergehende Entwicklung des Betriebsmodus bildeten.

Der horizontale Injektionsarbeitspunkt wurde leicht reduziert, der phasenstabile Bereich für den eingeschossenen Strahl damit vergrößert, so daß innerhalb der Injektionsphase kein Strahlausfall zu beobachten war.

¹⁶Die Injektionskicker sind üblicherweise in dieser Betriebsart während der Speicherphase in ihrer Wirkung auf einen Minimalwert reduziert. Für die Messung wurde jedoch ein Kicker in seiner Stärke soweit erhöht, daß zum einen in einem Lagesignal eine kohärente Betatronschwingung sichtbar wurde, zum anderen die Lebensdauer des gespeicherten Strahls davon unbeeinflusst blieb.

¹⁷Eine Untersuchung des vertikalen Arbeitspunktes Q_z in Abhängigkeit der Strahlintensität konnte nicht ausgeführt werden, da diese Messung aus technischen Gründen bislang unmöglich ist.

¹⁸Für einen gebunchten Strahl in einer Vakuumkammer elliptischen Querschnitts wird in [82] eine zu erwartende kohärente Arbeitspunktverschiebung berechnet (dieser Fall ist in guter Näherung für ELSA gegeben). In die Darstellung geht wesentlich die transversale Kammerimpedanz $Z_{tr}(\omega)$ ein, welche die elektromagnetischen Randbedingungen der Vakuumkammergeometrie und Materialeigenschaften widerspiegelt; sie ist ein Maß für die Stärke der elektromagnetischen Rückwirkung des Teilchenstrahls auf die transversale Bewegung. Die defokussierende Wirkung bei abnehmendem Strahlstrom wird in [82] vorhergesagt.

Die Extraktionssextupole nehmen innerhalb der Injektionsphase ihre volle Extraktionsstärke an und stören den Injektionsprozeß empfindlich¹⁹. Die Extraktionsvorbereitungsphase (zeitliche Länge 100 ms) wurde jetzt dazu benutzt mit den Extraktionsquadrupolen zunächst den Extraktionsstartarbeitspunkt schnell anzusteuern, um dann mit einer günstigen Form der Steuerkurve in der Extraktionsphase (hier wurde das Arkuscosinus-Modell benutzt) einen gleichmäßigen Teilchenausfall zu bewirken. Die Extraktionssextupole arbeiteten während der gesamten Zeit mit konstanter Stärke.

In diesem neuen Betriebsmodus – die Betriebsverhältnisse sind äquivalent dem Nachbeschleunigungsbetrieb unter Ausschluß der Rampphase (Abschnitt 4.1) –, welcher als Zwischenschritt zum eigentlichen Nachbeschleunigungsmodus für das Experiment ELAN entwickelt wurde, ließen sich die Extraktionsbedingungen für einen abgedämpften Strahl studieren. Die Verwendung dieses Betriebsmodus bietet sich für das PHOENICS-Experiment an. Die Intensität des extrahierten Elektronenstrahls für das PHOENICS-Experiment ist wesentlich kleiner als die maximale Intensität, welche ELSA liefern kann. Wegen der geringern Stromforderung von PHOENICS könnte also zunächst ein hoher Anfangsstrom in ELSA akkumuliert werden, der in einer langen Extraktionsperiode langsam an das Experiment abgegeben wird. Für PHOENICS brächte das den Vorteil einer reproduzierbar korrigierten ELSA-Füllstruktur bei gleichzeitiger Verwendung der drittelzahligen Resonanzextraktionsmethode.

Die Extraktionsanfangsbedingungen für ELAN wurden festgehalten und für den nachfolgenden Nachbeschleunigungsbetrieb bei 2.2 GeV zunächst linear skaliert. Es erfolgte eine Modifizierung des Injektionsschemas auf 70 Elementarinjektionen in zehn Siebenerinjektionszügen, bei einem Injektionsversatz von $\Delta t = 78$ ns. Damit ließ sich ein ausreichend hoher Strom von ca. 50 mA bis 60 mA akkumulieren. Das mit dem schnellen Intensitätsmonitor gemessene Tastverhältnis der ELSA-Füllstruktur konnte zu 98 % bestimmt werden. In 2.5 s wurde von der Injektionsenergie auf die Extraktionsenergie von 2.2 GeV ohne Strahlverlust nachbeschleunigt. Die Extraktionsvorbereitungszeit betrug 100 ms, in welcher die Extraktionssextupole sowie die Extraktionsquadrupole auf die Startwerte für die Extraktionsphase gefahren wurden. Insgesamt konnte in diesem Maschinentest über 3 s ein Strahl mit einer vom Experiment gemessenen mittleren Intensität von ca. 2 nA extrahiert werden. Das Spillsignal des extrahierten Strahl ist zusammen mit der Ansteuerkurve der Extraktionsquadrupole in Abbildung 6.24 bzw. 6.25 dokumentiert. Die Zykluszeit betrug in diesem ersten Test 9.520 s, das makroskopische Tastverhältnis demzufolge ca. 31 %. Das vom Experiment gemessene mikroskopische Tastverhältnis wurde mit 75 % angegeben. Deutlich wird der Strahlausfall in Abbildung 6.24 durch die Arbeitspunktkurve der Extraktionsquadrupole bestimmt. Eine Ausschnittsvergrößerung zur besseren Übersicht zeigen Abbildung 6.26 und 6.27. Ohne Unterstützung der Extraktionsquadrupole war praktisch kein Spillsignal am Experiment zu beobachten. Die genaue und reproduzierbare Ansteuerung der Extraktion durch die neue Zeitablaufsteuerung bildet die Grundlage dieser Betriebsart. Die Steuerung des horizontalen Arbeitspunktes im Zeitfenster der Extraktionsphase ist deutlich sichtbar. Der überstrichene Arbeitspunkt-hub mit den Extraktionsquadrupolen betrug ca. $\Delta Q = 0.0046$, was einem Stromhub von 50 A entspricht. Die Extraktionseffizienz nahm einen Wert von ca. 22 % an. Durch kontinuierliche Verbesserungen konnte die Extraktionszeit ohne Abnahme der mittleren, extrahierten Intensität von 2 nA und des mikroskopischen Tastverhältnisses auf 6 s verlängert werden. Damit ergab sich eine Steigerung der Extraktionseffizienz auf ca. 45 % sowie eine Verbesserung des makroskopischen Tastverhältnis auf ca. 50 %.

Ein nächster Entwicklungsschritt bestand in einer weiteren Erhöhung des makroskopischen Tastverhältnisses. Dazu wurden die Rampzeiten von 2.5 s auf 300 ms verkürzt und zugleich die Injektionsenergie von 1.2 GeV auf 1.5 GeV bei gleichbleibender Extraktionsenergie von 2.2 GeV angehoben, um den zu überfahrenden Gesamtenergiehub zu reduzieren. Die Extraktionskonfiguration blieb davon unberührt. Die Rampgeschwindigkeit betrug $2.1 \frac{\text{GeV}}{\text{s}}$, so daß das Zusatznetzgerät in der Stromversorgung der ELSA-Dipolmagnete vom Kontrollsystem automatisch aktiviert wurde und damit der schnelle Rampbetrieb (siehe Abschnitt 1.3.3) erstmals möglich war. In diesem Betriebszustand konnte reproduzierbar bei 1.5 GeV ein Strom von 50 mA akkumuliert, auf 2.2 GeV nachbeschleunigt und dann über 6 s bei einer Gesamtzykluszeit von 8.13 s extrahiert werden. Das makroskopische Tastverhältnis stieg somit auf ca. 74 %, bei einem vom Experiment bestimmten, mikroskopischen Tastverhältnis zwischen 70 % bis 85 % an. Die extrahierte Stromstärke betrug im Mittel ca. 3 nA. Ein ELSA-Stromsignal, wie auch das Spillsignal des extrahierten Strahls am Experiment zeigen diesen Betriebszustand in Abbildung 6.28 bzw. 6.29. Deutlich ist aus Diagramm 6.28 die lineare Abnahme des ELSA-Stromsignals über die Extraktionsphase zu erkennen, wobei das Spillsignal in

¹⁹Die Extraktionssextupole begrenzen den Akkumulationsprozeß stark. Zusätzlich muß die Injektionskonfiguration gegenüber der 50 Hz-Betriebsart abgeändert werden, was in aller Regel zu einem starken Strommaximum am Experiment unmittelbar im Anschluß an die Injektion führt.

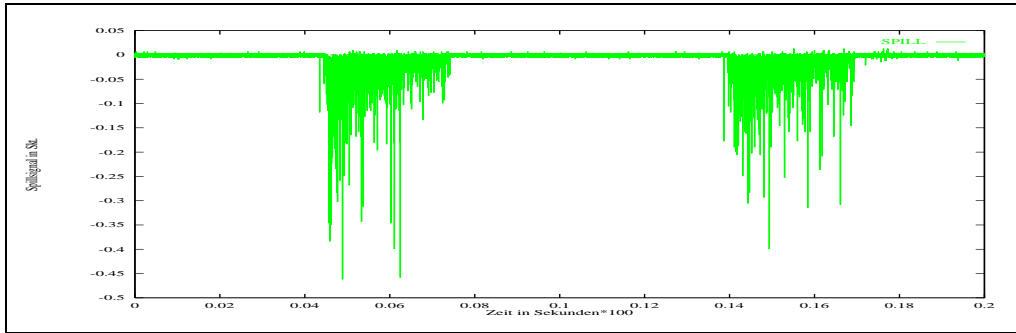


Abbildung 6.24: Spillsignal von ELAN im Nachbeschleunigungsbetrieb (Extraktionszeit 3 s, Zykluszeit ca. 9.5 Sekunden, makroskopisches Tastverhältnis ca. 31 %)

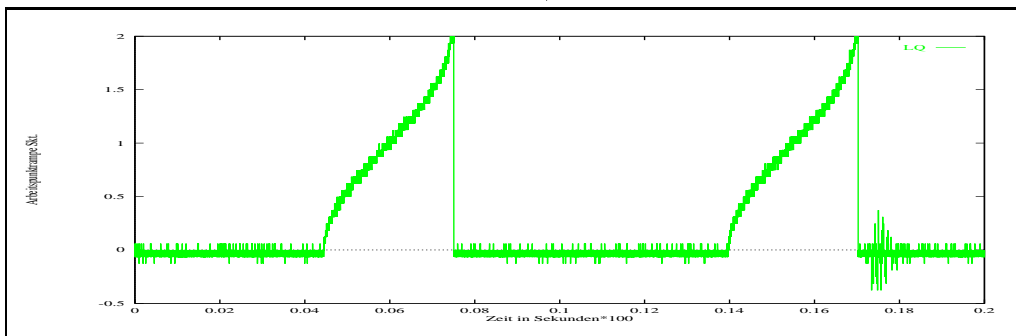


Abbildung 6.25: Arbeitspunkttrampe der Extraktionsquadrupole

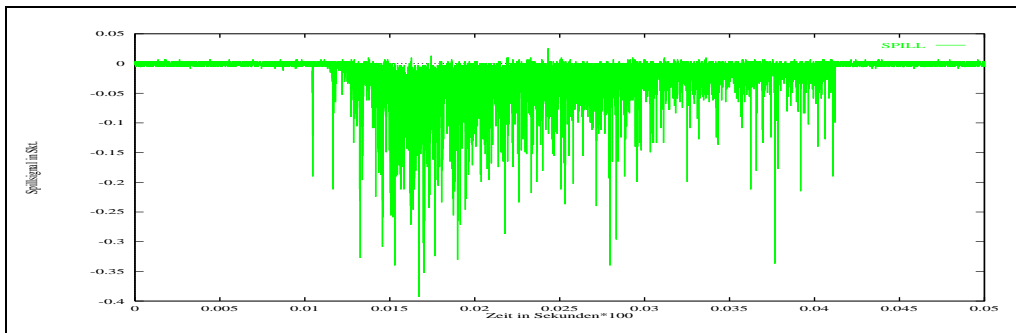


Abbildung 6.26: Ausschnittsvergrößerung des Spillsignals von ELAN im Nachbeschleunigungsbetrieb (Extraktionszeit 3 s, mikroskopisches Tastverhältnis ca. 70 %).

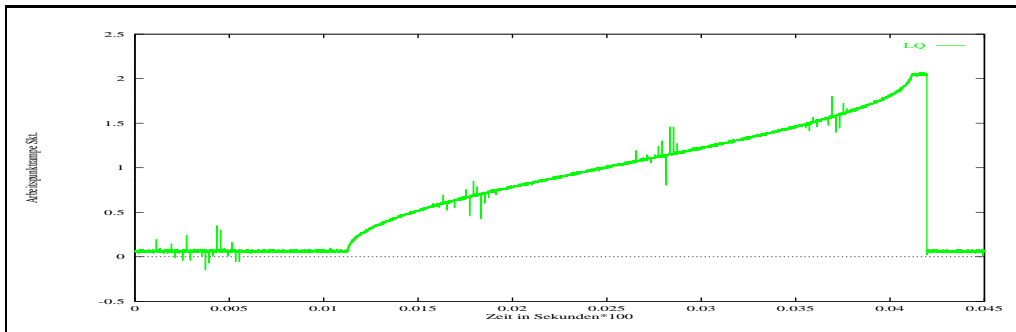


Abbildung 6.27: Ausschnittsvergrößerung der Arbeitspunkttrampe der Extraktionsquadrupole

6.29 eine entsprechend gleichmäßige Struktur besitzt. An dem schmalen ELSA-Intensitätssignal in Abbildung 6.28 läßt sich die gleichmäßige Struktur der ELSA-Füllung ablesen. Vom Gesamtzyklus nimmt neben der Extraktionsphase die Injektionsphase den längsten Zeitraum (1.43 s) ein; dies entspricht etwa 17.5 % der Gesamtzykluszeit²⁰. Die Extraktionseffizienz betrug in dieser Betriebsart ca. 60 %. In einem weiteren Schritt wurde die Extraktionszeit auf 1 s verkürzt und dabei ein proportionaler Anstieg der mittleren, extrahierten Stromstärke auf ca. 14 nA bei gleichbleibendem, mikroskopischem Tastverhältnis von ca. 75 % (vom Experiment gemessen) beobachtet. So konnte gezeigt werden, daß das mikroskopische Tastverhältnis, wie auch die Extraktionseffizienz in dieser Betriebsart weitgehend unabhängig von der Extraktionszeit sind. Die Extraktionseffizienz betrug ca. 51 %.

Erstmals konnte diese Betriebsart am 07.10.1994 in einem regulären Betrieb für das Experiment ELAN eingesetzt werden. Die Injektionsenergie betrug 1.2 GeV, die gewünschte Extraktionsenergie war 2.0 GeV; dabei wurden mit 70 Elementarinjektionen in zehn Siebenerinjektionsgruppen mit dem Standardzeitversatz von 78 ns zur Homogenisierung der ELSA-Füllstruktur im Mittel 85 mA injiziert, akkumuliert, ohne nennenswerten Strahlverlust nachbeschleunigt und für 2 Sekunden langsam extrahiert. Damit stand dem Experiment, bei noch akzeptablem, makroskopischem Tastverhältnis von ca. 47 %, ein mittlerer Strom von ca. 12 nA über die Extraktionszeit zur Verfügung. Die Extraktionseffizienz betrug etwa 51 %, die erreichte Rampgeschwindigkeit von $2.3 \frac{\text{GeV}}{\text{s}}$ stellt den bislang größten Wert dar. Abbildung 6.30 und 6.31 zeigen die Betriebsverhältnisse auf; sowohl ein ELSA-Stromsignal als auch das Spillsignal von ELAN finden sich hier aufgetragen. Die Abbildungen 6.30 und 6.31 stellen insgesamt 11 Maschinentypen (entspricht 50 s) dar; die gute Kurzzeitreproduzierbarkeit ist sichtbar.

Beobachtungen im Nachbeschleunigungsbetrieb mit ELAN

Die Etablierung des Nachbeschleunigungsmodus für ELAN wurde von – für die Extraktion – wesentlichen Beobachtungen begleitet.

Die Wahl des vertikalen Arbeitspunktes Q_z bei sonst gleichen Einstellungen ist wesentlich für die Zeitstruktur des extrahierten Elektronenstrahls. Im ungünstigen Fall war ein stark pulsierender Strahlfleck auf einem Folienmonitor im Strahlführungssystem zum Experiment zu beobachten. Die Frequenz dieser Modulation beträgt ca. 5 Hz bis 10 Hz. Durch Einstellung verschiedener vertikaler Arbeitspunkte zeigte sich die Modulation mehr oder weniger stark. Diese Beobachtung konnte nicht nur im Fall einer bestimmten Extraktionsenergie gemacht werden, sondern stellte sich im Testbetrieb bei 1.8 GeV, 2.0 GeV und 2.2 GeV ein. Sie kann ein Hinweis auf eine Kopplung der vertikalen mit der horizontalen Teilchenbewegung sein. Im Rahmen dieser Arbeit wurden dazu keine weiteren Untersuchungen angestellt, da die schnelle Erfassung eines vertikalen Lagespektrums und damit des vertikalen Arbeitspunktes an ELSA bislang nicht möglich ist²¹.

Das Strahlprofil des extrahierten Elektronenstrahls auf einem Folienmonitor im Strahltransfersystem zum Experiment konnte im Betrieb durch eine Variation der Spitzenspannung in den Beschleunigungsstrecken stark manipuliert werden. Für eine bestimmte Einstellung der Beschleunigungsspannung läßt sich ein diffuser, breiter Strahl beobachten. Die Form des Strahlprofils reagiert unmittelbar auf Veränderungen der Beschleunigungsspannung. Durch Variation der Spitzenspannung wird kein pulsierender Strahl erzeugt, doch reagiert die Tastverhältnismessung am Experiment signifikant auf deren Änderung. Diese Beobachtung gab Anlaß, den Nachbeschleunigungsmodus für ELAN mit den neuen Mitteln des Kontrollsystems zur zeitaufgelösten Strahldiagnose zu untersuchen.

6.8 Zeitaufgelöste Strahldiagnose im Nachbeschleunigungsmodus für ELAN

Zur Untersuchung des Nachbeschleunigungsbetriebs für ELAN fand das Phasenraummeßsystem Verwendung. Die Injektionsenergie betrug 1.2 GeV, die Extraktionsenergie 2.0 GeV. Es wurden mit 70 Elementarinjektionen, aufgeteilt in sieben Zehnergruppen, etwa 60 mA Strom in ELSA akkumuliert, in 350 ms nachbeschleunigt und für 6 s extrahiert. Der Diagnosepulsgenerator wurde so eingestellt, daß insgesamt 216 Strahlanregungen

²⁰Die Dauer der Injektionsphase kann aus dem Diagramm 6.28 als der Zeitabschnitt abgelesen werden, an dem der Stromanstieg in ELSA zu sehen ist.

²¹Die Problematik eines fehlenden horizontalen und vertikalen Diagnosekickers wurde im Abschnitt 4.4 angesprochen.

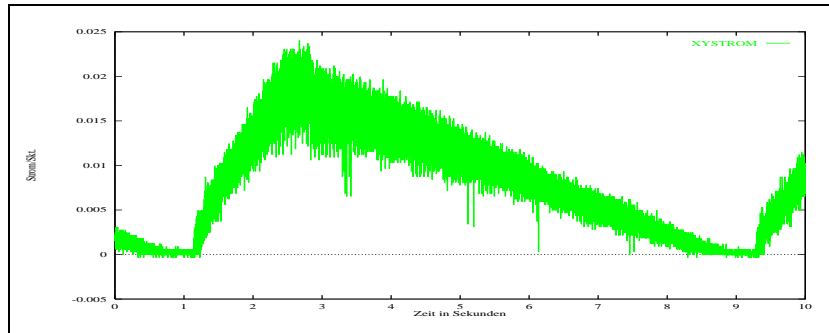


Abbildung 6.28: Stromsignal ELSA während des Nachbeschleunigungsbetriebs für ELAN mit 300 ms Rampzeit

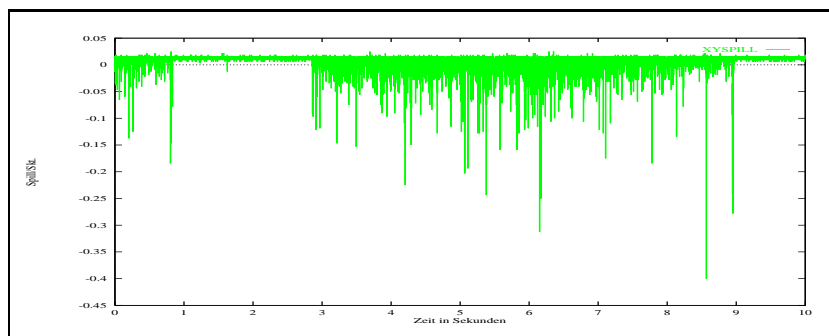


Abbildung 6.29: Spillsignal von ELAN im Nachbeschleunigungsbetrieb mit 300 ms Rampzeit von 1.5 GeV auf 2.2 GeV

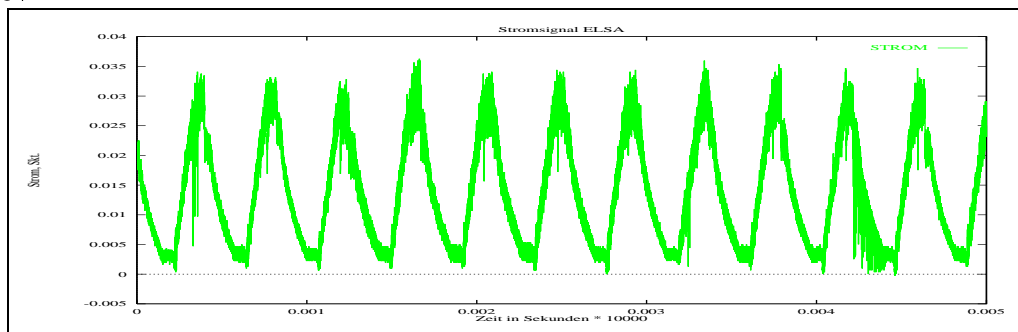


Abbildung 6.30: Stromsignal ELSA über mehrere Maschinenzyklen, 2 s Extraktion bei 2.0 GeV

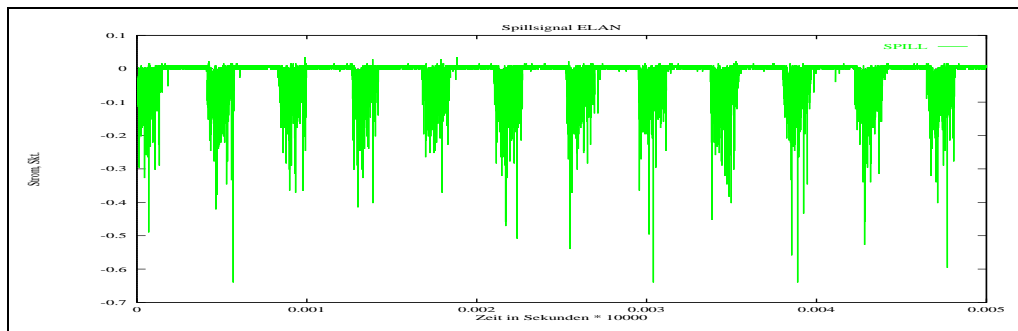


Abbildung 6.31: Spillsignal ELAN über mehrere Maschinenzyklen, 2 s Extraktion bei 2.0 GeV

mit dem Injektionskicker im Abstand von jeweils 30 ms, beginnend nach der Injektionsdämpfungsphase, erfolgten. Damit ließ sich die Injektionsdämpfungsphase, die Rampphase, die Extraktionsvorbereitungsphase, wie auch die Extraktion mit Diagnosepulsen überdecken (Abschnitt 4.4). Die Datennahme des Phasenraummeßsystems wurde durch einen Diagnosepuls ausgelöst, welcher auch zeitgleich den Injektionskicker zur Strahlanregung aktivierte. Es wurden mehrere Lagesignale (HZ18, HZ19, HZ1) und das Füllstruktursignal des schnellen Intensitätsmonitors umlaufsynchron aufgezeichnet; alle Daten wurden zunächst in Echtzeit für 200 Umläufe genommen und im verwendeten Speicheroszilloskop abgelegt, dann durch das Kontrollsystem über EPOS ausgelesen und für eine spätere Analyse abgespeichert. Wegen der Speicherbeschränkung des verwendeten Oszilloskops konnten aus der eingestellten Diagnosepulskette 200 Pulse für die Datennahme berücksichtigt werden. Nach Ablauf einer Diagnosepulskette standen also $200 \cdot 3$ Lagesignale für jeweils

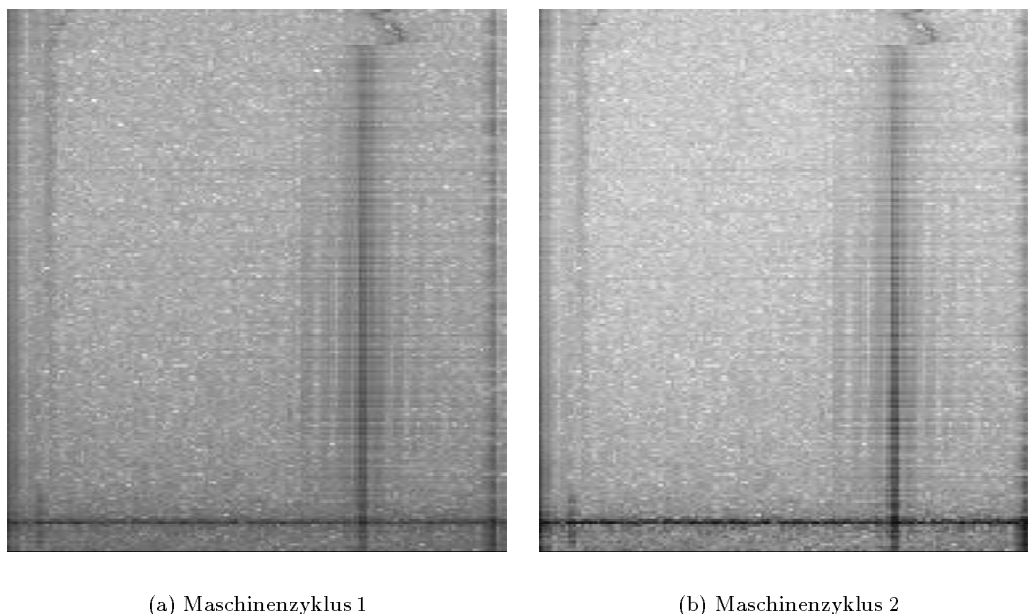


Abbildung 6.32: Zeitaufgelöste Strahldiagnose im Nachbeschleunigungsmodus für ELAN

200 Umläufe und das Intensitätssignal in einer entsprechenden Länge zur Auswertung bereit. Die Messung wurde ca. vierzigmal wiederholt und anschließend mit den Werkzeugen von EPOS analysiert. Der `segproc`-Operator (siehe auch [38]) berechnete das Frequenzspektrum für jedes Lagesignal und trug es hintereinander in eine EPOS-Matrix ein. Ein Resultat zweier unabhängiger Analysen zeigt Abbildung 6.32. Jeweils eine horizontale Zeile im Bild entspricht einem Frequenzspektrum, wobei die Schwärzung ein Maß für die Leistung des Signals im entsprechenden Frequenzintervall darstellt und eine intensive Schwärzung eine große Leistung anzeigt. Die Null-Linie entspricht dem linken Rand des Bildes, der rechte Rand entspricht einem halbzahligen Arbeitspunkt²².

Die Frequenzlinie der Synchrotronoschwingung taucht als Satellit zur Null-Linie auf²³. Abbildung 6.32 zeigt den Zeitverlauf von oben nach unten. Im oberen Teil ist in den ersten beiden Messungen die Injektionsdämpfungsphase noch erfaßt. Die Synchrotronlinie und die Betatronlinie verhalten sich konstant, entsprechend die Arbeitspunkte Q_s, Q_x . Die Nachbeschleunigungsphase setzt dann abrupt ein²⁴. In der Nachbeschleunigungsphase nimmt der Synchrotronarbeitspunkt Q_s sukzessive ab, da die Spitzenspannung der Beschleunigungsstrecken über den gesamten Maschinenzyklus konstant eingestellt war. Der Synchrotronarbeitspunkt Q_s folgt damit im wesentlichen dem Energieverlauf $E(t)$: $Q_s(t) \propto \sqrt{\frac{1}{E(t)}}$, bis er seinen Endwert am Anfang der Extraktionsvorbereitungsphase erreicht. Der Verlauf des horizontalen Arbeitspunktes gestaltet sich

²²Wegen der umlaufsynchronen Datenerfassung ist die Frequenzachse unmittelbar als Arbeitspunktachse zu sehen.

²³In beiden Fällen wurden Signale des Lagemonitors in Halbzelle 19 benutzt, da die Dispersionsfunktion am Ort der Monitorstation nicht verschwindet und deswegen das Lagesignal mit der Frequenz der Synchrotronoschwingung amplitudenmoduliert ist.

²⁴In diesem Fall wurde das lineare Rampmodell eingesetzt; siehe dazu auch die Arbeit von T.Götz [38].

komplizierter. Zunächst wird Q_x am Anfang der Nachbeschleunigungsphase nach links zu einem größeren Wert versetzt, bevor er dann sukzessiv wieder abnimmt, um in der Extraktionsvorbereitungsphase (innerhalb von 5 ms) auf den Startarbeitspunkt für die nachfolgende Extraktion versetzt zu werden. In dieser Darstellung ist Q_x in der Extraktionsphase weitgehend konstant, ebenso Q_s ²⁵. Abbildung 6.33 (a) enthält

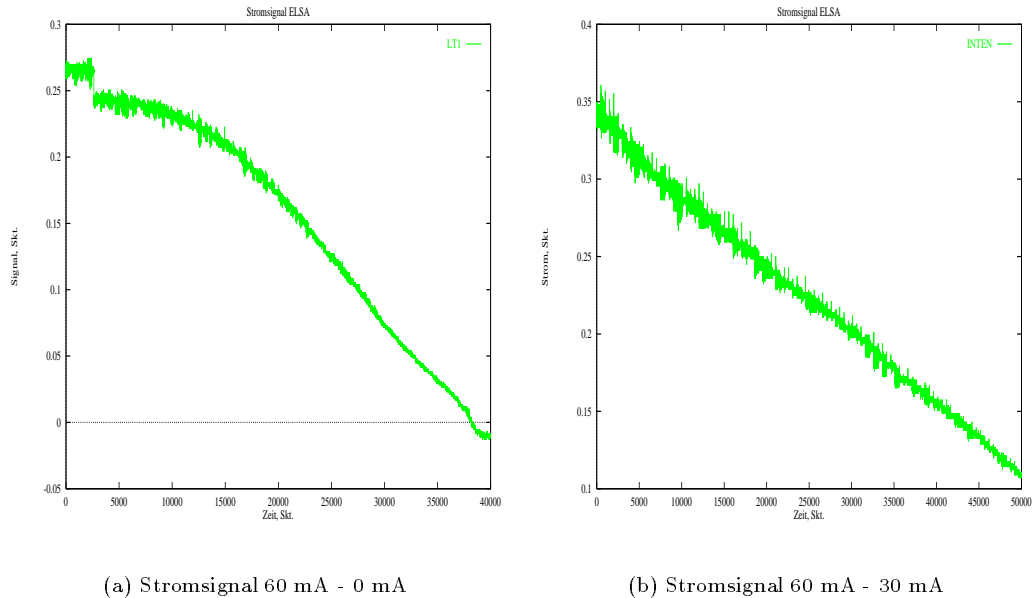


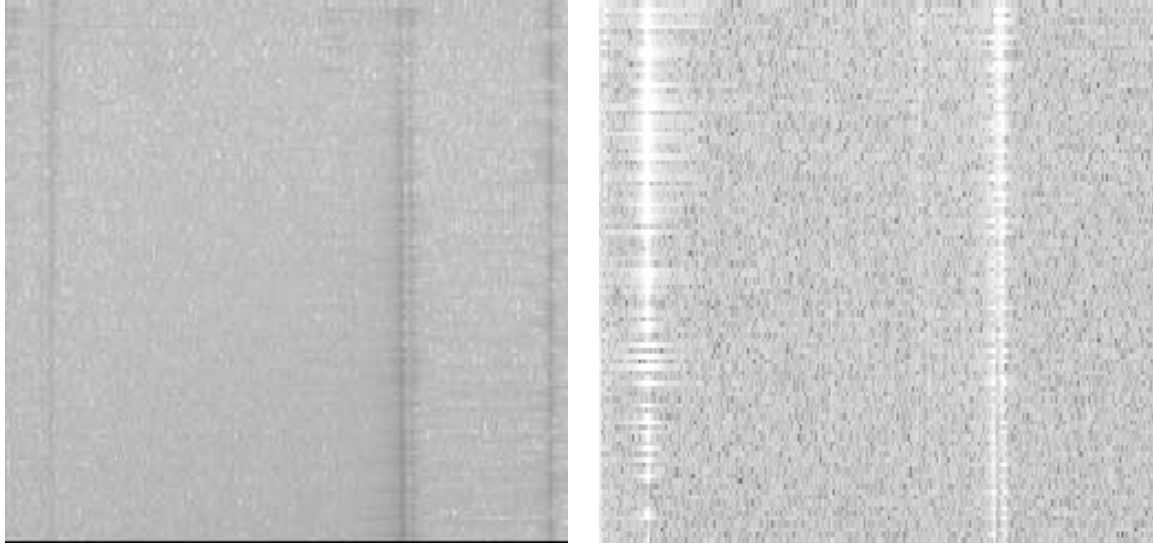
Abbildung 6.33: Stromsignal ELSA während der ELAN-Extraktion

ein Intensitätssignal, welches sich über den gesamten Meßzeitraum erstreckt. Das Signal überstreicht einen Bereich von 60 mA bis 0 mA. Am Ende der Rampphase – im Übergangsbereich zur Extraktionsphase –, wo der Arbeitspunktsprung erfolgt, läßt sich ein kleiner Strahlausfall erkennen. Danach wird ELSA im Verlauf der Extraktion geleert und dabei ein Stromintervall von 60 mA überstrichen. Auffallend sind Anregungen im Stromsignal, welche für hohe Ströme im Bereich von ca. 60 mA bis ca. 30 mA zu sehen sind. Dieser Bereich wurde in einer weiteren Messung untersucht. Dazu wurde die Datennahme geändert, so daß ausgehend vom Extraktionsstartzeitpunkt insgesamt für 100 Messungen Lagesignale und das Intensitätssignal umlaufsynchron für 500 Umläufe genommen wurden. Den umlaufenden Strahl regte wiederum der Injektionskicker im Abstand von 30 ms an. Eine Kurve des Stromsignals zeigt Abbildung 6.33 (b). Exemplarisch für diese Messungen sind der Zeitverlauf des Frequenzspektrums eines Lagesignals und des Intensitätssignals in Abbildung 6.34 nebeneinander aufgetragen. Die bessere Frequenzauflösung (es wurden 500 Umläufe statt bisher 200 Umläufe erfaßt) läßt im Frequenzspektrum des Lagesignals eine gespaltene Betatronlinie erkennen, wobei die Synchrotronlinie ebenfalls gespaltent ist. Die gespaltene Betatronlinie tritt ebenfalls deutlich im Frequenzspektrum des Intensitätssignals hervor. Allerdings läßt sich diese Struktur erst für Ströme unterhalb von ca. 40 mA erkennen, im oberen Bereich, für hohe Ströme, erscheint sie nicht sichtbar. Im unteren Bereich verläuft sie genauso wie im Frequenzspektrum des Lagesignals. Die Synchrotronlinie tritt im Frequenzspektrum des Intensitätssignals für hohe Ströme zunächst stark hervor, wird dann für niedrigere Ströme immer schwächer und kann im weiteren Verlauf teilweise nicht mehr beobachtet werden.

Aus den Meßdaten wurden einzelne Frequenzspektren von Lagesignalen für eine genauere Untersuchung extrahiert. Ein Beispiel zeigt Abbildung 6.35²⁶. Im Frequenzspektrum erscheint die gespaltene Betatronlinie bei $Q_x \approx 0.35$ und die gespaltene Synchrotronlinie bei $Q_s \approx 0.04$ ganz links sichtbar. Jeweils beide Linien – für den Fall der Synchrotron- und der Betatronschwingung – wurden identifiziert:

²⁵Die durchgehende Linie rechts im Bild ist in allen Abschnitten sichtbar, ohne das sich ihre Position ändert. Eine nachträgliche, unabhängige Messung zeigte, daß es sich um eine Störung in der verwendeten Monitorelektronik handelt. Die durchgehende schwarze Linie am unteren Bildrand wurde erst während der Datenanalyse bemerkt und als Fehlmessung interpretiert, die ihre Ursache in einer Übersteuerung der Elektronik oder einem Fehler in der Datennahme haben könnte.

²⁶In der Abbildung stellt die Linie ganz rechts das Artefakt aus der Monitorelektronik dar.



(a) Lagesignal

(b) Intensitätssignal

Abbildung 6.34: Zeitaufgelöste Diagnose mit Lage- und Intensitätssignal

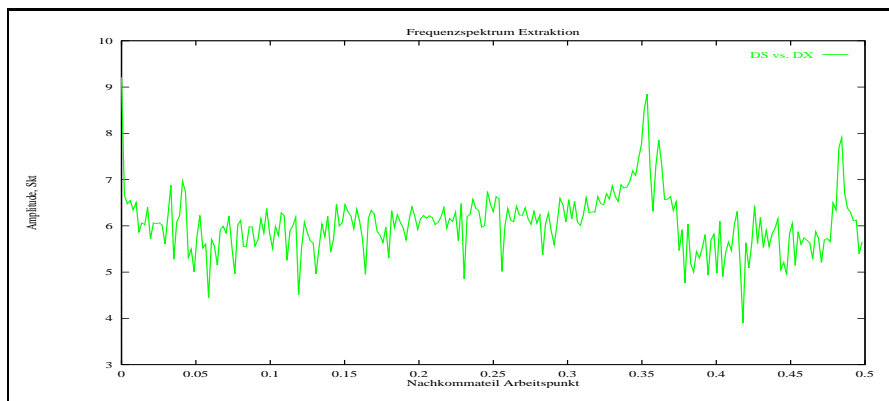


Abbildung 6.35: Spektrum im Fall der Synchro-Betatron-Kopplung $3Q_x + 2Q_s = 14$

$Q_{s1} = 0.0332$, $Q_{s2} = 0.04297$ und $Q_{x1} = 4.6465$, $Q_{x2} = 4.6367$. Der Abstand der Doppellinien beträgt: $|\Delta Q_s| = |Q_{s2} - Q_{s1}| = 0.00977$ und $|\Delta Q_x| = |Q_{x1} - Q_{x2}| = 0.0098$. Der Fehler in der Arbeitspunktbestimmung beträgt 0.00195; beide Arbeitspunktmessungen stimmen im Rahmen des Fehlers überein. Rechnet man den Abstand der Doppellinien in eine Anzahl von Umläufen um, so ergibt sich eine Periodizität von etwa 102 Umläufen. Das Lagesignal in Abbildung 6.36 zeigt auf einer Zeitskala von ca. 100 Umläufen eine Schwebung seiner Amplitude, welche auf einen Energieaustausch (also eine Kopplung) zwischen longitudinaler und horizontaler Bewegung hindeutet. Ebenfalls ist im Lagesignal eine noch schnellere Amplitudenmodulation mit einer Periode von weniger als $\frac{100}{7} = 0.07$ zu sehen; sie ist ein deutliches Indiz für den zweifachen Synchrotronarbeitspunkt. Die Mittelwerte der Doppellinien von Synchrotronschwingung $\overline{Q_s} = 0.03809$ und Betatronschwingung $\overline{Q_x} = 4.6416$ erfüllen $3\overline{Q_x} + 2\overline{Q_s} = 14.00098$; dies gibt den wesentlichen Hinweis auf eine Kopplung der longitudinalen mit der horizontalen Bewegung. Insgesamt wurden ca. 100 Spektren in dieser Weise untersucht und die gefundenen Ergebnisse immer wieder bestätigt, wobei das ausgeführte Beispiel einen typischen Fall darstellt. Die Analyse der Lagesignale für Ströme oberhalb von ca. 35 mA war wegen ungenügender kohärenter Strahlanregung nicht durchführbar.

Für hohe Ströme ist zu erwarten, daß die Emittanzen des Strahls deutlich von den natürlichen Emittanzen abweichen, so daß die Arbeitspunktverteilungen des Strahls verbreitert sind. Ein Hinweis darauf ist die

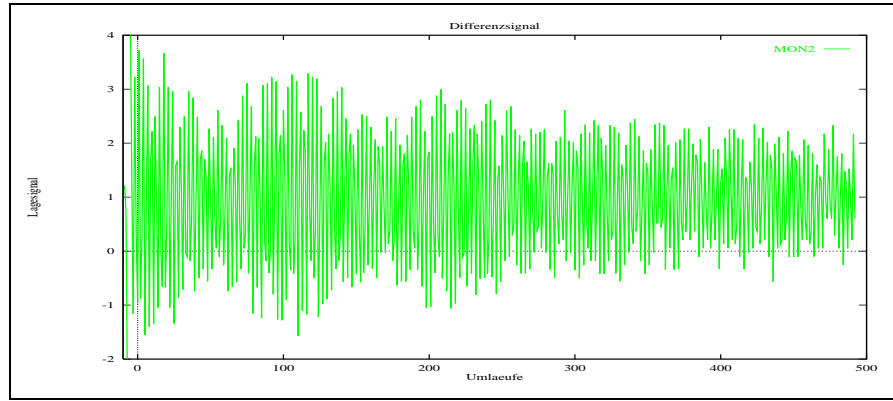
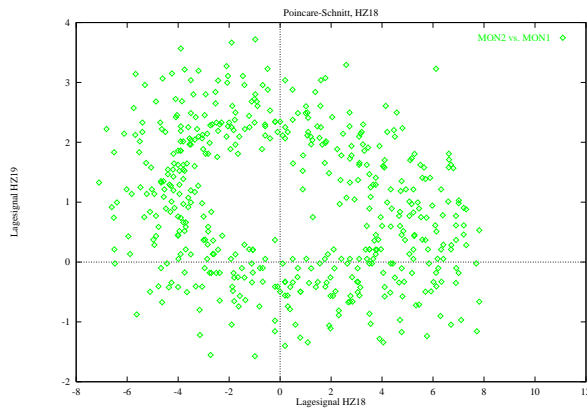


Abbildung 6.36: Differenzsignal 500 Umläufe HZ19

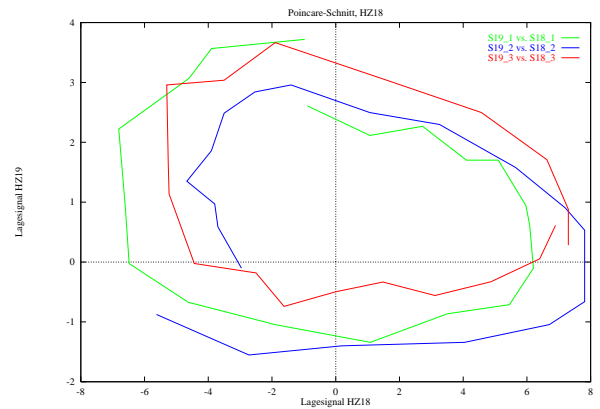
starke longitudinale Anregung des Strahls, welche sich im oberen Teil der Abbildung 6.34 erkennen läßt. Die Anregung durch den Injektionskicker ist nicht optimal, da der Kickerpuls über ca. 500 ns ansteigt, abfällt und für ca. 1000 ns konstant ansteht. Damit erfährt der umlaufende Strahl eine Mehrfachanregung, weil die Umlaufzeit in ELSA (548 ns) deutlich kleiner ist als die Gesamtlänge des Kickerpulses. Je nach Arbeitspunkt und Anfangsbedingungen des Teilchenensembles, das gerade eine Anregung erfährt, kann die Folge der Kicks anregend oder dämpfend sein. In aller Regel entsteht eine effektive Anregung als Summe aller Kicks, welche kleiner ist als jeder einzelne Kick. Eine kohärente Anregung des gesamten Strahls ist damit insgesamt nur in einer Näherung gegeben.

Für Ströme unterhalb einer Schwelle von etwa 30 mA bereitet die Analyse der Lagesignale keine Probleme, was auf einen stromabhängigen Effekt hindeuten könnte.

Abbildung 6.37 (a) stellt das Phasenraumbild der Bewegung dar, ohne daß eine dreieckförmige Kontour erkennbar wäre; die Ursache hierfür liegt wahrscheinlich an der geringen Anregung, welche den Strahl nicht in den Bereich der Separatrix verschieben konnte. Die gemessene Kontour läge dann im Inneren des phasenstabilen Bereichs und hat erwartungsgemäß (für den Fall normalisierter Koordinaten) ein kreisförmiges Aussehen. In Abbildung 6.37 (b) sind die Meßpunkte für jeden dritten Umlauf mit einer Linie verbunden;



(a) 500 Umläufe



(b) ca. 70 Umläufe, jeder dritte Umlauf markiert

Abbildung 6.37: Poincaré-Schnitt für die ELAN-Extraktion bei 2.0 GeV

die Bewegung in der Nähe einer drittelzahligen Resonanz wird hier deutlich. Die drei Linien entwickeln sich gegen den Uhrzeigersinn, damit ist der horizontale Arbeitspunkt $Q_x < \frac{2}{3}$. Nach ca. 19 Umläufen haben alle Linien einen Umlauf im Bild vollzogen; daraus folgt der Arbeitspunktabstand zur drittelzahligen Resonanz $\Delta Q_x = \frac{1}{3 \cdot 19} = 0.01754$, bzw. der eingestellte Arbeitspunkt zu $Q_x = 4.6491$, was in Übereinstim-

mung mit den anderen Messungen liegt. Beachtenswert ist, daß der Arbeitspunktabstand zum resonanten Arbeitspunkt $\Delta Q_x^{2,0} = 0.01754$ im Nachbeschleunigungsmodus bei 2.0 GeV viel größer ist als im Fall des untersuchten 50 Hz–Stretchermodus $\Delta Q_x^{1,2} = 0.0061$ bei 1.2 GeV, welcher in Abschnitt 6.6.2 untersucht wurde: $\delta(\Delta Q_x) = |\Delta Q_x^{2,0} - \Delta Q_x^{1,2}| = 0.0114$. Diese Beobachtung widerspricht den Erwartungen und ist weiter zu untersuchen.

In Abbildung 6.38 ist ein Lagesignal für 200 Umläufe aufgetragen. Die drei sinusförmigen Teilbewegungen

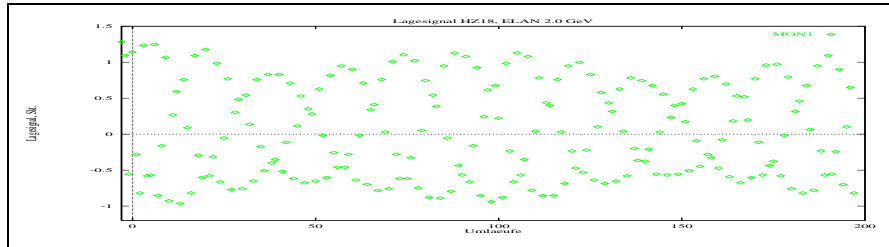
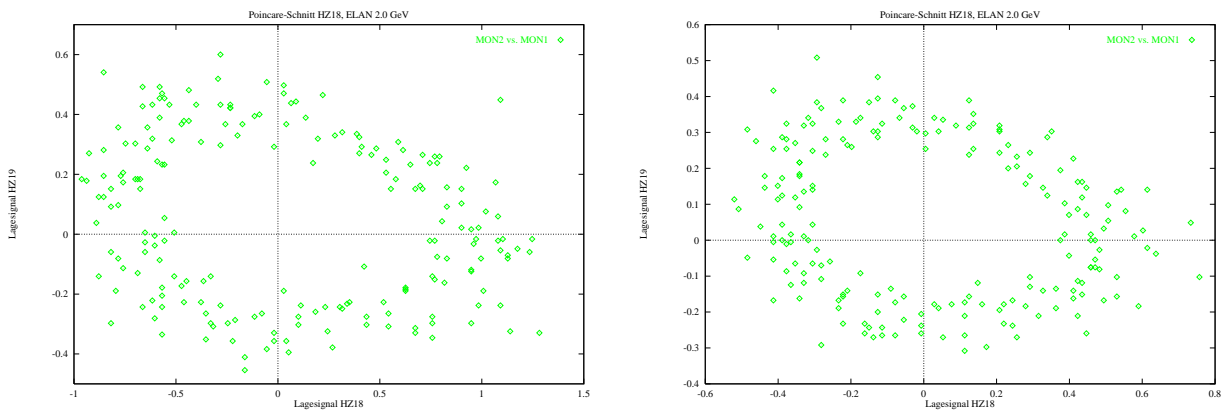


Abbildung 6.38: Differenzsignal 200 Umläufe HZ18

in Nähe der drittelzahligen Resonanz sind deutlich sichtbar und auch hier tritt wiederum die langsame Schwebung auf einer Zeitskala von ca. 100 Umläufen in der Amplitude des Lagesignals hervor. In Abbildung 6.39 finden sich beispielhaft zwei weitere Phasenraumbilder dargestellt. Die beiden Messungen liegen 210 ms



(a) 200 Umläufe

(b) 200 Umläufe

Abbildung 6.39: Poincaré-Schnitte für die ELAN-Extraktion bei 2.0 GeV

auseinander, die Reproduzierbarkeit der Messung ist gut, die Phasenraumbilder ändern ihr Aussehen in diesem Zeitraum nicht. Eine detaillierte Analyse dieser Bilder bestätigt die bereits aufgezeigten Ergebnisse.

An dieser Stelle kann zusammengefaßt werden, daß die drittelzahlige Resonanz die Extraktion im eingestellten ELAN-Betriebsmodus bestimmt. Soweit ist diese Beobachtung also in Übereinstimmung mit Abschnitt 5.1.1. Mit großer Wahrscheinlichkeit wird der Extraktionsprozeß bei ELAN allerdings durch die Synchro-Betatronkopplung $3Q_x + 2Q_s = 14$ gestört. Die nähere Untersuchung der SAPHIR-Betriebsart, welche von J. Wenzel ausgeführt wurde, liefert für die dortigen Extraktionsverhältnisse ein ähnliches Ergebnis. Im Unterschied zum ELAN-Betriebsmodus wird mit großer Wahrscheinlichkeit die Extraktion für SAPHIR durch die Synchro-Betatronkopplung dominiert. Die genaue Ursache der gefundenen Synchro-Betatronkopplung im ELAN-Betrieb ist noch nicht geklärt. Wahrscheinlich war aber die natürliche horizontale Chromatizität nicht vollkommen kompensiert, so daß dies die Ursache für die beobachtete Kopplung darstellt.

Da die ELAN-Betriebsart nur durch die Synchro-Betatronkopplung gestört und nicht dominiert wird, läßt sich in der Zukunft sicherlich eine Verbesserung der Betriebsbedingungen durch eine günstigere Betriebskonfiguration finden. Stromabhängige Effekte sind allerdings auch zu berücksichtigen, wie es die gemessenen Intensitätssignale in Abbildung 6.34 und die Messung der Stromabhängigkeit des Arbeitspunktes zeigen.

Die erreichten mikroskopischen Tastverhältnisse des extrahierten Strahls im ELAN-Betriebsmodus sind vergleichbar mit den Werten der SAPHIR-Betriebsart. Es bietet sich an, die gefundene Extraktionskonfiguration²⁷ der ELAN-Betriebsart in Zukunft auch für das SAPHIR-Experiment einzusetzen. Lange Extraktionszeiten lassen sich einstellen, so daß die extrahierte Stromstärke für SAPHIR klein genug gewählt werden kann.

Durch die Entwicklung dieses neuen Betriebsmodus für das Experiment ELAN konnte die Leistungsfähigkeit des Kontrollsystems und der damit verbundenen Strahldiagnose gezeigt werden. Die Entwicklungsarbeit an diesem Betriebsmodus ist sicherlich noch nicht abgeschlossen. In der Zukunft sollten sich detailliertere Untersuchungen auf Grundlage des bereits Erarbeiteten anschließen.

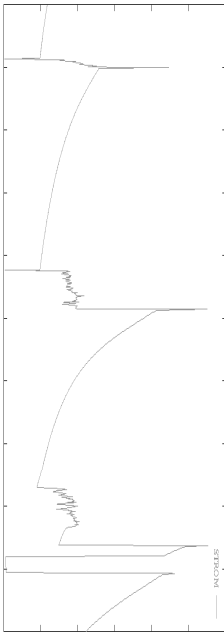
6.9 Langzeitstrahldiagnose in ELSA

Die Integration aller Meßgeräte mit IEC-Bus Standardschnittstelle in das Kontrollsystem (Abschnitt 5.9) gestattet den einfachen Aufbau einer Langzeitmessung von Strahlparametern über mehrere Stunden. Dazu wurde exemplarisch mit einem Spektrum-Analysator der Verlauf des transversale Lagespektrums eines 500 MHz-Monitorsignals des ELSA-Monitorsystems an einem gespeicherten Strahl erfaßt und über einen Zeitraum von ca. 3 Stunden im Abstand von 10 Sekunden insgesamt 1000 Messungen mit EPOS ausgeführt²⁸. Ein erfaßtes Spektrum wird jeweils ausgelesen und bildet die Zeile einer Matrix-Variablen in EPOS. Alle Messungen reihen sich nacheinander in die Matrix ein, um am Ende der Messung in einer Falschfarbendarstellung (Abbildung 6.40) angezeigt zu werden. Eine starke Schwärzung im Bild entspricht einem hohen Leistungsanteil des Signals für die zugeordnete Frequenz. Jedes Spektrum überstreicht das Frequenzintervall von ca. 500 MHz (linker Rand) bis etwa 502 MHz (rechter Rand). Der Zeitverlauf in Abbildung 6.40 vollzieht sich von oben nach unten. Im Rahmen der Messung wurden zur Überprüfung unter anderem auch der ELSA-Strom, die Strahllebensdauer, die eingestellten Sollarbeitspunkte in horizontaler und vertikaler Bewegungsrichtung Q_x, Q_z sowie verschiedene Leistungssignale der ELSA-Hochfrequenzanlage aufgezeichnet. Den Verlauf des ELSA-Stroms über die Meßzeit zeigt Abbildung 6.41, die dazugehörige Lebensdauer stellt Abbildung 6.42 dar; beide Strahlparameter wurden vom System zur Strom- und Lebensdauerermessung (Abschnitt 6.7.1) bestimmt. Zur besseren Verdeutlichung ist der Stromverlauf neben Abbildung 6.40 (b) dargestellt, so daß unmittelbar die Korrespondenz zwischen Strahlintensität und Lagespektrum hervortritt. Der horizontale Sollarbeitspunkt war vom Kontrollsystem über die gesamte Meßzeit konstant auf $Q_x = 4.6147$, der vertikale Sollarbeitspunkt auf $Q_z = 4.5717$ eingestellt. Die dunkle, am linken Bildrand durchlaufende Linie entspricht der 500 MHz Hochfrequenz von ELSA; dazu erscheint am rechten Bildrand die erste Umlaufharmonische bei einer Frequenz von ca. 501.8 MHz. Rechts von der 500 MHz-Linie sind Synchrotronsatelliten im Abstand von $f_s \approx n \cdot 74.3$ kHz, für $n = 1, 2, 3$, sichtbar. Links von der ersten Umlaufharmonischen liegen entsprechende Synchrotronsatelliten. Die schwachen Linien in Bildmitte lassen sich als vertikale, bzw. horizontale Betatronlinien identifizieren. Die Linien unmittelbar rechts und links von der Bildmitte zeigen den Verlauf des vertikalen Arbeitspunktes Q_z , welcher aus einem der Spektren zu $Q_z \approx 4.582$, in akzeptabler Übereinstimmung mit einer Messung des Spektralanalysesystems von T.Götz ($Q_z = 4.584$) bestimmt wurde. Neben der vertikalen Betatronlinie verläuft weiter außen die horizontale Betatronlinie. Der gemessene horizontale Arbeitspunkt Q_x beträgt 4.604, eine Vergleichsmessung mit dem Spektralanalysesystem ergab $Q_x = 4.605$.

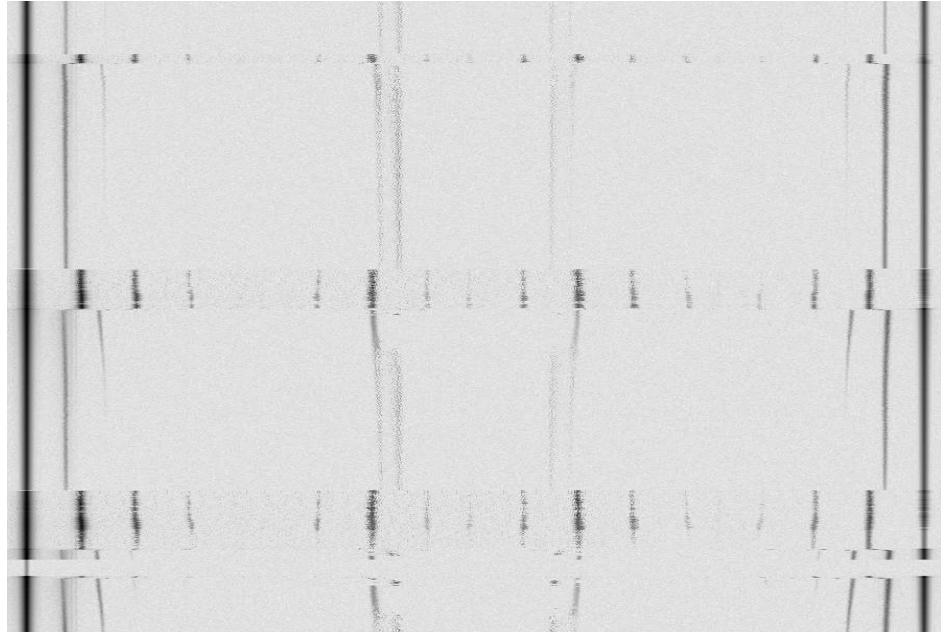
Zu Anfang der Messung ist der Strahl in ELSA bei einer Energie von 2.3 GeV gespeichert, wobei der Betriebsmodus so eingestellt war, daß nach Unterschreiten eines Schwellenstroms von ca. 20 mA das Kontrollsystem selbsttätig eine neue Injektionsphase einleitet. Dazu wird ELSA auf eine Injektionsenergie von 1.2 GeV zurückgefahren und die Injektionselemente wieder aktiviert. Die entsprechende Injektionsphase ist erkennbar. Die Synchrotronfrequenz verhält sich während der Injektion, im Vergleich zur Speicherperiode bei 2.3 GeV erheblich höher, da die ELSA-Hochfrequenzanlage über die ganze Zeit konstant angesteuert wird und deswegen im wesentlichen gilt: $Q_s \propto \sqrt{\frac{1}{E}}$. Eine entsprechende Verschiebung der Synchrotronsatelliten tritt erkennbar hervor. Der Strahl wird im Anschluß an die Injektionsphase nachbeschleunigt und für etwa eine Stunde gespeichert. Die nachfolgende Injektionsphase dauert wesentlich länger als die vorangegangene, was sowohl in den Spektren als auch im Stromverlauf zu beobachten ist. Für eine Zeit von ca. 600 Sekunden

²⁷Die gefundene Betriebskonfiguration ist in mehreren Maschinendatensätzen abgespeichert.

²⁸Die Messungen wurden im Synchrotronlicht-Speicherbetrieb von ELSA am 05.10.1994 in Zusammenarbeit mit J.Keil durchgeführt.



(a) Stromsignal



(b) Frequenzspektrum eines horizontalen Lagesignals

Abbildung 6.40: Langzeitdiagnose ELSA über ca. 3 Stunden

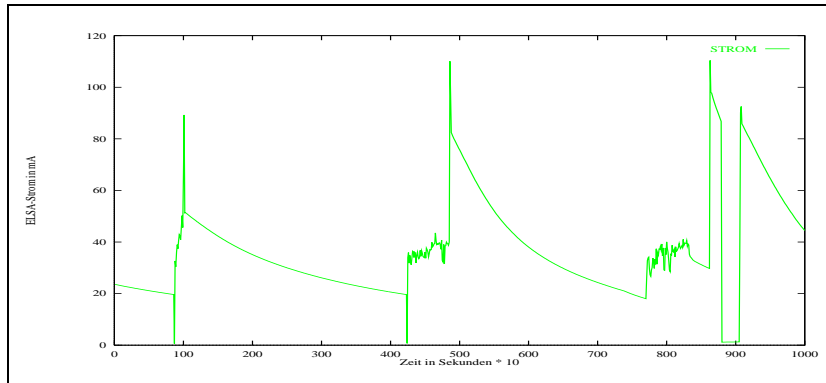


Abbildung 6.41: Langzeitdiagnose ELSA–Stromsignal im Speicherringbetrieb über ca. 3 Stunden

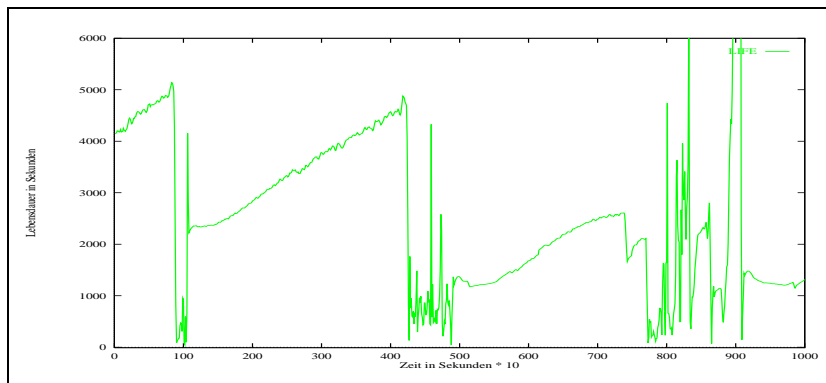


Abbildung 6.42: Langzeitdiagnose ELSA–Lebensdauer im Speicherringbetrieb über ca. 3 Stunden

stagniert die akkumulierte Stromstärke bei etwa 35 mA bis 38 mA, bevor sie auf ca. 110 mA ansteigt und nach Erreichen der Endenergie von 2.3 GeV auf ca. 80 mA abfällt.

Deutlich treten jetzt die Synchrotronsatelliten hervor, wobei sie stärker sind als in der vorhergehenden Speicherphase. Die horizontale Betatronlinie ist für Ströme von 80 mA bis 45 mA deutlich zu erkennen, ab einem Schwellenwert unterhalb von 45 mA ist sie merklich abgeschwächt. Dies ist sowohl in der vorangegangenen als auch der darauffolgenden Speicherperiode zu beobachten. Die vertikale Betatronlinie ist zunächst nicht erkennbar, kann aber unterhalb von ca. 45 mA wieder beobachtet werden. Dieser Ablauf wiederholt sich in der Speicherphase nach der nächsten Injektion und ist im unteren Bildteil zu sehen. Die zweite Harmonische der Synchrotronsatelliten verschwindet unterhalb des Schwellenstroms von 45 mA aus dem Spektrum. Der Verlauf der dritten Injektionsphase ist ähnlich wie bei der vorangegangenen Injektion. Es wird bis zu 120 mA akkumuliert, nachbeschleunigt und für eine kurze Zeit (etwa 2 Minuten) gespeichert, bis ein totaler Strahlensausfall zu beobachten ist. Die entsprechenden Spektren verbleiben bis auf die 500 MHz-Linie (Einstreuung durch die Hochfrequenz) leer. Im Anschluß daran wird ein Strom von 90 mA akkumuliert und bei 2.3 GeV gespeichert.

Betrachtet man die Betatronlinien in den Speicherphasen (vor allem die der zweiten Speicherphase), so ist eine Variation ihrer Stärke und ihres Verlaufs parallel zur Stromabnahme zu erkennen. Mit abnehmender Stromstärke ist eine Arbeitspunkterniedrigung verbunden. Diese stromabhängige Beobachtung deckt sich mit den Ergebnissen aus Abschnitt 6.7.3. Der Verlauf der Synchrotronsatelliten ist entsprechend; mit abnehmender Stromstärke ist eine Verkleinerung des Synchrotronarbeitspunktes verbunden. Dies ist deutlich jeweils für die zweiten Synchrotronsatellitenlinien zu beobachten.

Am Beispiel dieser Messung wurde versucht, einen Eindruck der zur Verfügung stehenden Strahldiagnosemöglichkeiten zur Überwachung des Betriebsverhaltens von ELSA zu vermitteln. Ergebnisse solcher Messungen können wiederum in die Einstellung und Verbesserung einer Betriebskonfiguration einfließen. Das ausgeführte Beispiel soll zukünftige Untersuchungen zum Verhalten von ELSA bei hohen Strömen motivieren.

Zusammenfassung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war Entwurf, Realisierung und Inbetriebnahme eines verteilten Rechnerkontrollsystems für die Elektronen-Strecher-Anlage ELSA, unter besonderer Berücksichtigung der Extraktion im Nachbeschleunigungsbetrieb bis zur Endenergie von 3.5 GeV. Dabei wurde die Einbindung von Strahldiagnose und beschleunigertheoretischer Beschreibung der Teilchenbewegung durch Simulation besonders berücksichtigt.

Die Gesamtaufgabe wurde wegen ihres technischen Aufwands auf die vorliegende Arbeit und eine weitere Dissertation [38] aufgeteilt. Neben dem Hauptziel des Entwurf und der Entwicklung des verteilten Kontrollsystems, liegt der Schwerpunkt dieser Arbeit auf Realisierung und Untersuchung der Extraktion im Nachbeschleunigungsbetrieb mit Mitteln der Strahldiagnose.

Das Anforderungsprofil des neuen Kontrollsystems leitete sich aus den Anforderungen der Mittlereenergieexperimente ELAN, PHOENIX und SAPHIR sowohl für den 50 Hz-Strecher- als auch den Nachbeschleunigungsbetrieb ab. Das Kernergebnis der Entwurfsphase bildete die Entscheidung, Hardware und Software in einer **verteilten Architektur** anzuordnen. Nach dem Vorbild eines verteilten Betriebssystems wurde die Software realisiert. Die übergeordnete Aufgabenstellung, der einheitlichen Integration von Kontrolle, Strahldiagnose und Simulation fand dabei besondere Berücksichtigung und stellt die wesentliche Eigenschaft des neuen Systems dar.

Zur konkreten Realisierung des Kontrollsystems wurden weitgehend Standardkomponenten gewählt. Die verteilte Hardwarearchitektur umfaßt die **Kontrollebene**, bestehend aus einer Menge gleichberechtigter RISC-Workstations mit dem Betriebssystem UNIX, sowie die **Prozeßebene**, bestehend aus einer Menge von VME-Prozessormodulen mit dem VxWorks-Echtzeitkern für schnelle Ansteuerungen und Strahldiagnoseaufgaben und die **Feldbusebene**, deren Komponenten bereits im vorhergehenden Kontrollsystem eingesetzt und nach einer kompletten Neuordnung ausnahmslos in das neue System übernommen wurden. Die entwickelte Software bindet die verteilte Hardware des Kontrollsystems zu einer virtuellen Einheit zusammen und verwirklicht eine transparente Gesamtsicht auf die Beschleunigeranlagen. Der Hauptbestandteil der Software ist ein Kommunikationssystem, aus dem wesentliche Transaktionsformen des Kontrollsystems hervorgehen. Ein verteiltes Datenbanksystem verwaltet alle Steuer- und Meßdaten. Die Anbindung von Applikationen an das Kontrollsystem wird besonders unterstützt.

Alle beschleunigerphysikalischen Berechnungen sind in einem System von verteilten Regelexperten gebündelt. Alle Regelexperten nehmen an der Ereignisverarbeitung des Kontrollsystems teil und repräsentieren dessen beschleunigerspezifische Intelligenz. Die beschleunigertheoretische Modellbildung wurde durch Entwicklung von „On-Line“-Simulatoren zur Beschreibung der linearen Teilchenbewegung auf Grundlage des Konzeptes verteilter Regelexperten ergänzt.

Zur Bedienung der Beschleunigeranlagen wurde eine graphische Benutzerschnittstelle entwickelt, welche die Erfahrungen des vorangegangenen Kontrollsystems berücksichtigt und sich ansonsten an modernen Entwicklungen im Bereich anderer Kontrollsysteme orientiert. Diese Bedienungsfläche läßt sich ohne Programmierarbeit frei gestalten.

Eine wesentliche Grundlage zur Realisierung des ELSA-Nachbeschleunigungsmodus war die Entwicklung einer neuen zeitlichen Ablaufsteuerung des Maschinenzyklus. Das System markiert zum einen die Betriebsphasen eines Maschinenzyklus durch entsprechende Signale, zum anderen erlaubt es die Homogenisierung der ELSA-Füllstruktur durch einen umlaufsynchronisierten Einschub aufeinanderfolgender Synchrotronfüllungen und deren Positionierung in ELSA durch einen einstellbaren Zeitversatz. Das realisierte System zur zeitlichen Ablaufsteuerung beinhaltet eine Einheit zur Generierung von frei definierbaren Diagnosepulsketten; diese dienen der Markierung strahldiagnostischer Messungen im gesamten Maschinenzyklus. Die zeitliche Ablaufsteuerung gilt als oberste Instanz, welche den Maschinenzyklus festlegt; Randwerte lassen sich über die graphische Bedienungsfläche interaktiv einstellen, notwendige Berechnungen werden von Experten ausgeführt.

Zur Steuerung der Extraktion berechnet das Kontrollsystem notwendige Steuerkurven zur dynamischen Variation der Extraktionselemente. Für eine Untersuchung der Extraktionsverhältnisse wurde ein System zur Bestimmung des Poincaré-Schnitts der transversalen Teilchenbewegung aufgebaut und in das Kontrollsystem integriert. Ein System zur digitalen Bildverarbeitung wurde für das zukünftige Studium des Hochstromverhaltens von ELSA mit einem Synchrotronlichtmonitor in das Kontrollsystem eingebunden. Basisalgorithmen

zur digitalen Bildverarbeitung sind ein Element dieses Monitorsystems. Zur Analyse digitaler Meßdaten aus den Strahldiagnosesubsystemen wurden allgemeine Werkzeuge zur digitalen Signalverarbeitung im Zeit- und Frequenzraum entwickelt, welche durch fortgeschrittene Algorithmen zur adaptiven digitalen Signalverarbeitung ergänzt sind. Sie eignen sich besonders zur Konstruktion selbstoptimierender Regler, die in Zukunft zur Echtzeitgenerierung von Steuerkurven für die Extraktionselemente, in Abhängigkeit vom extrahierten Elektronenstrom, ihren Einsatz finden können.

Das Konzept zur Integration von Kontrolle, Strahlbewegungsdiagnose und beschleunigertheoretischer Beschreibung der Teilchenbewegung durch Simulation in ein homogenes Gesamtsystem ist weitgehend gelungen. Die vorliegende Arbeit lieferte ausgehend vom neuen Kontrollsystem wesentliche Beiträge zur Entwicklung der Strahldiagnose und einen Beitrag zur beschleunigertheoretischen Modellbildung. Neue, bisher nicht einstellbare Betriebsarten wurden mit dem neuen Kontrollsystem realisiert. Die Möglichkeiten des neuen Kontrollsystems können Ausgangspunkt für weitere Qualitätsverbesserungen des Nutzstrahls für die Experimente in allen ELSA-Betriebsarten sein.

Literaturverzeichnis

- [1] A.V.Aho, R.Sethi, J.Ullman, Compiler-Bau, Addison Wesley Teil 1+2, 1992
- [2] 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
- [3] 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
- [4] 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
- [5] K.H.Althoff, D.Husmann, ELSA - ein neuer Beschleuniger in der Mittelenergiephysik, Interner Bericht, Bonn-IR-87-30, 1987
- [6] M.Bach, UNIX - Wie funktioniert das Betriebssystem, Hanser Verlag, 1991
- [7] J.Bengtsson, Non-linear transverse dynamics for storage rings with applications to the Low-Energy Antiproton Ring (LEAR) at CERN, CERN 88-05, 1-AUG-1988
- [8] BERGOZ, Beam current transformer, Technical Documentation
- [9] J.Bloomer, Power Programming with RPC, O'Reilly and Associates, Feb. 1992
- [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 1989
- [13] Bryant and Johnsen, The Principles of Circular Accelerators and Storage Rings, Cambridge University Press, 1993
- [14] J.Buon, Beam phase space and emittance in CERN Accelerator School, in CAS, CERN 94-01, Jan. 1994
- [15] D.Comer, Internetworking with TCP/IP, Prentice Hall, 1988
- [16] J.Cooley, J.W.Tukey, An Algorithm for the Machine Calculation of Complex Fourier Series, Math.Comput. 19(1965)
- [17] T.H.Cormen, C.E.Leiserson, R.L.Rivest, Introduction to Algorithms, MIT Press, 1990
- [18] G.F.Coulouris, J.Dollimore, Distributed Systems, Addison Wesley, 1988
- [19] E.D.Courant, H.S.Snyder, Theory of the Alternating-Gradient Synchrotron, Anals of Physics: 3,1-48 (1958)
- [20] M.C.Crowley-Milling, The control system for LEP, IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. NS-30, 1983
- [21] M.C.Crowley-Milling, Control problems in very large accelerators, IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. NS-32, 1985
- [22] P. Detemple et.al., The photon tagging system of the PHOENICS-Experiment at ELSA, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A321 (1992) 479-488, 1992
- [23] P.Detemple, Aufbau, Test und Betrieb eines energiemarkierten Elektronenstrahls am PHOENICS-Experiment der Bonner Elektronen-Stretcher-Anlage ELSA, Dissertation, BONN-IR-90-44, 1990

- [24] DG535, Digital Delay/Puls Generator, User's Manual, Stanford Research Systems
- [25] W.v.Drachenfels, persönliche Mitteilung
- [26] A.Dreist, Simulationsrechnungen für eine langsame Resonanzextraktion am Stretcherring ELSA, Diplomarbeit, BONN-IR-84-20, Juni 1984
- [27] A.Dreist, Das Injektionssystem des Stretcherringes ELSA, Dissertation BONN-IR-89-26
- [28] H.Ebeling, Konzeption, Bau und Test eisenloser Quadrupole für die Resonanzextraktion aus ELSA, Diplomarbeit, BONN-IR-87-35
- [29] D.Einfeld, W.Matz et al., ROSY, Rossendorfer Synchrotronstrahlungsquelle, Projektvorschlag, Forschungszentrum Rossendorf, FZR 93-27, November 1993
- [30] ELTEC GmbH Mainz, IPP Hardware Manual, IPP Toolpack Manual, Revision 1A.
- [31] P.M. Embree, B.Kimble, C Language Algorithms for Digital Signal Processing, Prentice Hall, 1990
- [32] N.Fliege, Systemtheorie, B.G. Teubner 1991
- [33] J. Fogelin, The VxWorks Real-Time Kernel, Wind River Systems Inc., 1010 Atlantic Ave., Alameda, CA 94501
- [34] W.K.Giloi, Rechnerarchitektur, Springer Verlag, Heidelberger Taschenbücher, 1981
- [35] G.H.Gonnet, R.Baeza-Yates, Handbook of Algorithms and Data Structures, Addison Wesley Second Edition, 1991
- [36] A.Goscinski, Distributed Operating Systems; The Logical Design, Addison Wesley, 1991
- [37] Th. Götz, Vollautomatische Messung des ELSA-Arbeitspunktes mit EPOS, Diplomarbeit, BONN-IR-90-50
- [38] Th. Götz, Entwicklung und Inbetriebnahme eines verteilten Rechnerkontrollsystems für die Elektronen-Stretcher-Anlage ELSA bis 3.5 GeV, unter besonderer Berücksichtigung der Nachbeschleunigung, Dissertation in Vorbereitung
- [39] G.Guignard, Hamiltonian Treatment of Synchrotron resonances, CERN SL/94-09 (AP), March 1994
- [40] U.Hacker et.al. , The COSY control system: Distributed Realtime Operating System for Accelerator Control, Proceedings of the IEEE 7th REAL TIME Conference 1991, Jülich/Germany
- [41] J.Hagel, Analytic theory of the coupled synchro-betatron motion in (electron) storage rings, CERN/LEP-TH/88-57, Dec. 1988
- [42] F.Halsall, Data Communications, Computer Networks and Open Systems, Addison Wesley, 1992
- [43] T.Götz, M.Picard, Bewertung des ELSA-Kontrollsystems, interner Bericht 1991
- [44] W.Hess, Digitale Filter, Teubner Studienbücher, 1989
- [45] W.Hillert, Der ELSA Synchrotronlicht-Monitor, Veröffentlichung in Vorbereitung
- [46] A.Hofmann, Tune shifts from self-fields and images, CAS, CERN 94-01, Jan.1994
- [47] M.Humpert, persönliche Mitteilung
- [48] D.Husmann, W.J.Schwille, ELSA - die neue Bonner Elektronen-Stretcher-Anlage, Phys.Blätter 44, 1988, Nr.2
- [49] D.Husmann, The ELSA Stretcher Ring, Lecture Notes in Physics No.234, Springer Verlag Berlin Heidelberg New York, Tokyo
- [50] E.Ifeachor, B.W.Jervis, Digital Signal Processing, Addison Wesley, 1993
- [51] P.G.Innocenti, The LEP control System, Nucl.Instr. and Meth. A293 (1990) 1-5, Elsevier Publ.Serv., North Holland
- [52] B.Jähne, Digitale Bildverarbeitung, Springer Verlag 1989
- [53] D.Jakob, Messung der Quadrupolanregung der Δ^+ -Resonanz, Experiment-Proposal

- [54] Janz, VDA16-D2, VMEbus High Precision Digital-Analog Converter Board, User's Manual, Firma Janz Computer AG
- [55] K.D.Kammeyer, K.Kroschel, Digitale Signalverarbeitung, Teubner Studienbücher, 1989
- [56] J.Kewisch et.al., Accelerator Simulation and Operation via identical operational interfaces, Proceedings of the IX. IEEE Particle Accelerator Conf. (PAC) 1991, San Francisco
- [57] J.Keil, Aufbau eines breitbandigen Intensitätsmonitors zur Messung, Überwachung und Optimierung der ELSA-Füllstruktur, Diplomarbeit, 1994, BONN-IB-94-18
- [58] Kernighan/Pike, Der UNIX-Werkzeugkasten, Hanser-Verlag, 1987
- [59] S.G.Kochan, P.H.Wood, UNIX Networking, Hayden Books, 1989
- [60] J.P.Koutchouk, Trajectory and Closed Orbit Correction, CERN LEP-TH/89-2
- [61] C.Kunz, Erste Messung der Quadrupolanregung des $N \rightarrow \Delta$ Übergangs am Neutron, Experiment-Proposal
- [62] LeCroy 9424e User's Manual, Remote Control Manual.
- [63] S.Leffler et al., The Design and Implementation of the 4.3BSD UNIX Operating System, Addison Wesley, 1988
- [64] J.Levine, lex & yacc, O'Reilly and Associates, Oct. 1992
- [65] R.Littauer, Beam Instrumentation, in Physics of High Energy Particle Accelerators. Editor: M.Month – AIP Conference Proceedings No. 105.
- [66] K.Low et.al., Overview of real time kernels at the SSCL, Proceedings of the IX. IEEE Particle Accelerator Conf. (PAC) 1991, San Francisco
- [67] M.P. Magnacco, The ELETTRA control System, Nucl.Instr. and Meth. A293 (1990) 144–49, Elsevier Publ.Serv., North Holland
- [68] J.Makhoul, Linear Prediction: A Tutorial Review, Digital Signal Processing, Proc. of the IEEE, Vol. 63, No. 4, Apr. 1975
- [69] MC68000, MC68010, MC68030, MC68040, Enhanced Microprocessor, Family Reference, User's Manual, Programmer's Reference Manual, Third Edition, Prentice Hall
- [70] MC68302, Integrated Multiprotocol Processor User's Manual, Rev 2, Motorola
- [71] R. Merkel: Doppel- π -Produktion am Deuteron mit dem energiemarkierten Photonstrahl der Spektrometer-Anordnung für Photon-Induzierte Reaktionen, Dissertation, BONN-IR-92-46, 1992
- [72] M.Month, S.Turner, Frontiers of Particle Beams; Observation, Diagnosis and Correction, Lecture Notes in Physics 343, 1988
- [73] S.J.Mullender, Editor, Distributed Systems, ACM Press, 1989
- [74] M.Neckenig, Der Einfluß von Synchro-Betatron Koppelresonanzen auf den extrahierten Strahl des Stretcher-ringes ELSA, Diplomarbeit, BONN-IR-87-34
- [75] M.Neckenig, Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Verbesserung der Zeitstruktur des extrahierten Elektronenstrahls aus dem Stretcher ELSA, Dissertation, Bonn IR-93-14
- [76] H.D.Nuhn, Schnelle Extraktion aus dem Bonner 2.5-GeV-Elektronensynchrotron und Strahltransfer zur neuen Stretcher-Anlage ELSA, Dissertation BONN-IR-88-03
- [77] A.Nye, T. O'Reilly, The X Window System, Vol.0–Vol.10, O'Reilly and Associates, Inc., Sebastopol 1990
- [78] A.V.Oppenheim, R.W.Schafer, Discrete-Time Signal Processing, Prentice Hall, 1989
- [79] OSF/Motif 1.2 Programmers Guide, Reference Guide, Open Software Foundation, Prentice Hall, Eaglewood Cliffs NJ, 1992
- [80] W.Paul, H.Ehrenberg, Das 500 MeV Elektronen Synchrotron in Bonn, Die Atomwirtschaft, Juli/August 1959
- [81] M. Picard, Das Steuer- und Strahldiagnosesystem EPOS und dessen Anwendung zur Messung des transversalen Phasenraums an ELSA, Diplomarbeit, BONN IR 91-76

- [82] A.Piwinski, Impedances in Lossy Elliptical Vacuum Chambers, DESY 94-068, April 94
- [83] A.Piwinski, Synchro-Betatron resonances, Lecture Notes in Physics 247, Nonlinear Dynamics of Particle Accelerators, Sardinia 1985
- [84] Proceedings of the International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems, Vancouver, BC, Canada, Oct.30-Nov.3, 1989
- [85] J.G. Proakis, D.G.Manolakis, INTRODUCTION to Digital Signal Processing, Macmillan Publishing Company 1988
- [86] Proc. of the IEEE, Special Issue on adaptive systems, Vol. 64, No. 8, Aug. 1976
- [87] Proc. of the IEEE, Digital Signal Processing, Vol. 63, No. 4, Apr. 1975
- [88] W.H. Press, B.P.Flannery, S.A.Teukolsky, W.T. Vetterling, Numerical Recipes, The Art of Scientific Computing, Cambridge University Press
- [89] L.R.Rabiner, B.Gold, Theory and Applications of Digital Signal Processing, Prentice Hall, 1975
- [90] K. Rith, Bau und Test eines magnetischen Spektrometers zum Nachweis von Elektronen bei Elektroproduktionsexperimenten, Dissertation, PIB 1-239, 1974
- [91] M.Sands, The Physics of Electron Storage Rings, An Introduction, SLAC Report No.121, 1970
- [92] 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
- [93] M. Schillo, Das Strahldiagnosesystem für ELSA, Dissertation, BONN-IR-91-77, 1991
- [94] H.H. Schmitz, Elektrosplattung des Deuterons im Bereich der $\Delta(1232)$ Resonanz bei Proton-Laborwinkeln von 44, 56 und 68 Grad, Dissertation, BONN-IR-90-24, 1990
- [95] W.J.Schwille et al., Design and construction of the SAPHIR detector, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A344 (1994) 470-486, 1994
- [96] Private Mitteilung von Prof. W.J.Schwille am 12.07.1994
- [97] W.J.Schwille, Physik an der Bonner Elektronen-Stretcher-Anlage ELSA, Phys. Blätter 45, 1989, Nr. 7
- [98] S.D. Stearns, Digitale Verarbeitung analoger Signale, 3. Auflage R. Oldenbourg Verlag München Wien 1987
- [99] S.D.Stearns, R.A.David, Signal Processing Algorithms, Prentice Hall, 1988
- [100] W.R.Stevens, UNIX Network Programming, Prentice Hall Software Series, 1990
- [101] A.S.Tanenbaum, Computer-Netzwerke, Wolfram's Fachverlag, 2.Auflage, 1990
- [102] A.S.Tanenbaum, Computer Organisation, Prentice Hall, 1994
- [103] A.S.Tanenbaum, Moderne Betriebssysteme, Hanser Verlag, 1994
- [104] Texas Instruments, Digital Control Applications with the TMS320 family, 1991
- [105] Texas Instruments, Theory, Algorithms and Implementation with DSPs, Vol 3, 1990
- [106] R.Unbehauen, Systemtheorie, 6.Auflage, 1993, Oldenbourg Verlag
- [107] K.B.Unser, Design and preliminary tests of beam intensity monitor for LEP, CERN/LEP-BI/89-07
- [108] The VMEbus Specification, VITA, 1987
- [109] VxWorks User's Manual, Reference Manual, 5.02
- [110] D.Wehrmeister, Aufbau und Test einer Quelle polarisierter Elektronen für die Bonner Beschleunigeranlage, Dissertation, 1993
- [111] E. Weiße: Die langsame Strahlauslenkung am Bonner 2.5 GeV Elektronensynchrotron, Dissertation, Phys. Inst. Uni Bonn, 1-046, 1968
- [112] J.Welt, persönliche Mitteilung.

- [113] J.Wenzel, Die Korrektur der Gleichgewichtsbahn des 3.5 GeV Beschleunigers ELSA, Diplomarbeit, BONN-IR-90-36
- [114] J.Wenzel, Entwicklung und Test eines Simulators der Teilchenbewegung in der 3.5 GeV Elektronen–Stretcher–Anlage ELSA, Dissertation, Bonn IR 94-13
- [115] C.Wermelskirchen, Das Kontroll- und Steuersystem der Bonner 3.5 GeV-Elektronen-Stretcher-Anlage ELSA, Dissertation, BONN-IR-88-31
- [116] 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
- [117] B.Widrow, S.D.Stearns, Adaptive Signal Processing, Prentice Hall, 1985
- [118] B.Widrow, Adaptive Noise Cancelling, Proc. of the IEEE, Vol. 63, No. 12, Dec. 1975
- [119] H. Wiedemann, Particle Accelerator Physics, Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York 1993
- [120] K.Wille, Physik der Teilchenbeschleuniger und Synchrotronstrahlungsquellen, Teubner Studienbücher, 1992

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand am Physikalischen Institut der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn im Bereich ELSA. Allen Mitgliedern dieser Abteilung danke ich für die gute und anregende Atmosphäre.

Herrn Prof. Dr. D. Husmann danke ich für die Betreuung der Arbeit.

Herrn Prof. Dr. W. Schulle danke ich für die Übernahme des Koreferats.

Herrn Prof. Dr. K.H. Althoff danke ich für die ermutigenden Worte während der Inbetriebnahmezeit des neuen Kontrollsystems.

Herr Dr. W. v. Drachenfels stand immer mit gutem und nützlichem Rat zur Seite. Mit Engagement unterstützte er die Umsetzung vieler Ideen.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dipl.Phys. T.Götz für die langjährige, über diese Arbeit hinausgehende, erfolgreiche Zusammenarbeit. Die Gesamtkonzeption und Realisierung des verteilten Kontrollsystems fand in enger Zusammenarbeit mit ihm statt. In nicht gezählten Sachdiskussionen wurden Lösungsansätze für alle Fragestellungen eines verteilten Rechnersystems und den damit verbundenen beschleunigerphysikalischen Fragestellungen entwickelt und umgesetzt. Die gemeinsame Arbeit fand stets in einer freundschaftlichen und motivierenden Atmosphäre statt. Das geschaffene Gesamtsystem ist das Ergebnis dieser fruchtbaren und kontinuierlichen Zusammenarbeit.

Herrn Dipl.Phys. J.Wenzel danke ich für viele Diskussionen, welche Klarheit für die experimentelle Verbesserung der Elektronenextraktion in den verschiedenen ELSA-Betriebsmoden brachte. Das Phasenraummeßsystem konnte durch einige seiner Anforderungen und Anregungen leistungsfähiger und flexibler gestaltet werden. Mit dem Phasenraummeßsystem konnten Ergebnisse seines Simulators mit realen ELSA-Meßdaten unmittelbar in Übereinstimmung gebracht werden.

Herrn Dipl. Phys. J. Keil danke ich für die gute Zusammenarbeit bei der Integration von Meßinstrumenten in das Kontrollsystem. Für die vorliegende Arbeit entwickelte er einen schnellen Intensitätsmonitor zur Überwachung der ELSA-Füllstruktur.

Herr cand.phys. C. Steier leistete wesentliche Beiträge in der Umgestaltung und Neuprogrammierung des Feldbussystems.

Herrn Dipl. Ing. W. Lindenberg danke ich für seine Mitarbeit in allen elektronischen Fragestellungen. Für die Entwicklung des Feldbuscontrollers, welcher die kurzfristige und weitgehend problemlose Inbetriebnahme des Kontrollsystems im Rahmen einer turnusgemäßen ELSA-Wartung sicherstellte, stand er zur Seite. Für das Injektionsverfahren zur Optimierung der ELSA-Füllstruktur hat er eine VMEbus-Karte aufgebaut.

Herrn J. Welt danke ich für die Unterstützung im Rahmen der Übernahme des MACS-Systems als Feldbus in das neue verteilte ELSA-Kontrollsystem. Komponenten der neuen Zeitablaufsteuerung wurden in seinem Labor hergestellt.

Den Herren Welt, Schug und Müller danke ich für die tatkräftige und engagierte Mithilfe in der Umgestaltung des Bedienungsraums.

Die Betriebsmannschaft der Beschleunigeranlagen möchte ich hervorheben und mich für die gute Zusammenarbeit insbesondere während der Inbetriebnahmezeit des Kontrollsystems bedanken. Die Bereitwilligkeit zur Übernahme und Akzeptanz neuer Ideen war ausgesprochen groß. Viele Anregungen von Seiten der Operateure konnten berücksichtigt und in das neue System aufgenommen werden.

Herrn Dipl. Phys. J. Hanappel vom Experiment SAPHIR danke ich für die Hilfe bei der Anbindung der SAPHIR-Experimentedatenerfassung an das Kontrollsystem.

Die wichtigsten Stützen dieser Arbeit waren meine Frau Karin und mein Sohn Christian. Ihnen gilt mein ganzer Dank für Ihr Verständnis und Ihre Geduld.