

Inhalt

Einleitung	1
1 Aufgabenstellung	2
1.1 Warum überhaupt EPOS ?	2
1.2 Die Arbeitspunktmessung als typisches Anwendungsbeispiel	4
2 EPOS als Werkzeug für die Beschleunigerphysik an ELSA	5
2.1 Allgemeines Arbeitsprinzip von EPOS	5
2.2 EPOS und das ELSA-Kontrollsystem	11
2.3 EPOS und das ELSA-Monitorsystem	16
2.4 Automatisierung von Meß- und Steueraufgaben	19
2.5 Datenanalyse, Signalverarbeitung und Grafik	20
2.6 Der Strukturplan der Software	24
3 Grundlagen für die Arbeitspunkt-Messung an ELSA	26
3.1 Definition des Arbeitspunktes	26
3.2 Das Frequenzspektrum des ELSA-Strahls	28
3.3 Das Meßprinzip für die Bestimmung des Arbeitspunktes	35
3.4 Die diskrete Fourier-Transformation	37
3.5 Fehlerquellen und Fehlerkorrektur bei der Frequenzbestimmung	38
4 Die Automatische Messung des Arbeitspunktes	45
4.1 Einfluß des Monitorsystems auf die Ausgangsdaten	45
4.2 Arbeitsweise der beteiligten EPOS-Operatoren	46
4.3 Automatisierung der Arbeitspunktmessung	50
4.4 Fehlerabschätzung durch Simulation	52
5 Ergebnisse der Messungen an ELSA	56
Zusammenfassung	65
Anhang	66
Literaturverzeichnis	75

Einleitung

Am Physikalischen Institut der Universität Bonn ist seit Oktober 1987 die **EL**ektronen-**St**retcher-Anlage **ELSA** in Betrieb [9],[6]. Aufgabe der Anlage ist zum einen (im sogenannten Stretcher-Mode) die Verbesserung des Tastverhältnisses des extrahierten Strahls — das Verhältnis aus nutzbarer Strahlzeit und Gesamtzykluszeit —, und zum anderen (im sogenannten Nachbeschleunigungs-Mode) die Erhöhung der Energie der vom Bonner 2.5-GeV-Synchrotron [1] gelieferten Elektronen auf 3.5 GeV. Zusätzlich kann ELSA bei Akkumulation und Speicherung der Elektronen als Quelle von Synchrotronstrahlung für sowohl anwendungsbezogene als auch Grundlagen-Forschung dienen.

Die Anlage wird durch ein computergestütztes Kontrollsystem mit "verteilter Intelligenz" gesteuert und überwacht [29]. Dieses System hat sich in der Vergangenheit für den einfachen Routinebetrieb des Beschleunigers weitgehend bewährt. Die Forderung nach einem hohen Tastverhältnis und reproduzierbaren stabilen Betriebseinstellungen macht jedoch die genaue maschinenphysikalische Untersuchung der Strahleigenschaften und die Lagekorrektur der in ELSA vorliegenden Gleichgewichtsbahn nötig. Zu diesem Zweck wurde ein Monitorsystem entwickelt, welches die wichtigsten Strahlparameter wie Intensität und Position mit guter zeitlicher Auflösung erfassen kann [23]. Obwohl das System für den direkten Anschluß an das Kontrollsystem konzipiert wurde, ist es aber noch nicht in die Rechnersteuerung des Beschleunigers eingebunden. Deshalb können zur Zeit weder strahlendiagnostische Aufgabenstellungen (wie beispielsweise die Bestimmung des Arbeitspunktes) noch eine Korrektur der Gleichgewichtsbahn durch das Kontrollsystem angegangen werden. Das Steuersystem von ELSA stellt somit keine Instrumente zur Verbesserung der Extraktion oder der allgemeinen Betriebseigenschaften zur Verfügung. Darüber hinaus kann das Kontrollsystem in der jetzigen Form keine Hilfsmittel zur Automatisierung von Meß- und Steuerabläufen liefern. Auch die Visualisierung von Lagedaten, Orbits oder Strahlspektren durch entsprechend hochwertige Grafikmöglichkeiten fehlt fast vollständig.

Zur vollen Integration des Monitorsystems in das Kontrollsystem unter besonderer Berücksichtigung der Strahl Diagnostik an ELSA wurde das Programm "**EPOS**" entwickelt. Dieses Programm verbindet die Steuerung der Maschine und die Verarbeitung der Monitordaten in einer einheitlichen Umgebung und gestattet darüber hinaus die Automatisierung von Meß- und Kontrollaufgaben durch eine eigens auf ELSA abgestimmte, einfach zu verwendende Programmiersprache. EPOS ist mit einem umfangreichen Grafiksystem ausgestattet und erlaubt dadurch adäquate Darstellungen von Lagedaten, Orbits, Strahlspektren und beliebigen Meßdaten. Die Verbindung einer Programmiersprache mit Werkzeugen der Strahl Diagnostik und Maschinensteuerung führt zu einer wesentlich flexibleren und leistungsfähigeren Kontrolle des Beschleunigers.

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist die Konzeption und die Entwicklung von EPOS sowie der Einsatz des neuen Systems für eine typische Aufgabenstellung der Beschleunigerphysik an ELSA: die vollautomatische, präzise Bestimmung des Arbeitspunktes während des Routinebetriebs.

Ausgehend von der im ersten Kapitel skizzierten Aufgabenstellung gibt Kapitel 2 zunächst einen exemplarischen Einblick in die prinzipielle Arbeitsweise des Programms unter besonderer Berücksichtigung des ELSA-Kontroll- und Monitorsystems. Die theoretischen Grundlagen für die automatische Messung des Arbeitspunktes mit EPOS werden separat in Kapitel 3 behandelt. Insbesondere kann hier ein speziell auf die durch EPOS bereitgestellten Werkzeuge abgestimmtes Meßverfahren abgeleitet werden. Die theoretisch erzielten Resultate leiten dann über zu Kapitel 4, welches die Implementierung der benötigten Berechnungen und die Automatisierung der Messung durch ein EPOS-Programm beschreibt. Kapitel 5 schließlich gibt einen Überblick über die an ELSA erzielten Meßergebnisse der Arbeitspunktbestimmung.

1. Aufgabenstellung

1.1 Warum überhaupt EPOS ?

ELSA wird seit der Inbetriebnahme im Jahr 1987 von einem rechnergestützten Kontrollsystem gesteuert und überwacht. Dieses Kontrollsystem wurde von C. Wermelskirchen im Rahmen seiner Dissertation konzipiert und implementiert [29]. Das System gliedert sich in drei Schichten:

- **Front-End-System**

Direkt "vor Ort" sorgen eine Vielzahl verteilter, autonom arbeitender Mikroprozessoren für eine direkte Kontrolle und Überwachung angeschlossener Hardware, wie z.B. Netzgeräte oder Ionengetter-Pumpen [22]. Jeder Prozessor (genannt MACS) ist dazu mit speziell auf das zu steuernde Gerät angepasster Software ausgestattet. Alle Prozessoren sind über eine oder mehrere schnelle Datenleitungen an einen Zentralrechner vom Typ VAX 750 gekoppelt.

- **Kontrollsystem-Kern**

Auf dem Zentralrechner läuft der sogenannte *Kern* des Kontrollsystems (vergl. Abb. 1.1). Zu diesem Kern gehört eine schnelle Datenbank zur Speicherung des aktuellen Maschinenzustandes sowie ein Prozeß zur Anbindung des Front-End-Systems. Darüber hinaus gestattet eine Vielzahl von Wartungsprogrammen die einfache Modifikation oder Erweiterung der Definitionen, die zur Steuerung von ELSA-Geräten erforderlich sind.

- **Benutzer-Schnittstelle**

Der ELSA-Operateur oder Physiker arbeitet mit dem Kontrollsystem über die grafische Darstellung von Maschinenparametern auf einer Konsole, die mit Farbgrafikschirmen und Rollbällen ausgestattet ist. Durch Bedienung des Rollballs können gezielt Parameter geschaltet oder quasi-kontinuierlich gefahren werden (z.B. Strom der Haupt-Dipole). Änderungen von Parametern werden durch einfache grafische Symbole auf dem Bildschirm sichtbar gemacht.

Obwohl sich das Kontrollsystem in den letzten Jahren als zuverlässiges und relativ einfach zu bedienendes Instrument zur Steuerung von ELSA erwiesen hat, gibt es jedoch bedeutende Einschränkungen und Schwächen, die einen Betrieb von ELSA besonders unter dem Hinblick auf beschleunigerphysikalische Forschung zur Verbesserung der Strahlqualitäten erschweren. Insbesondere die Optimierung des Duty-Cycles für die Experimente SAPHIR und ELAN sowie PHOENICS war in der Vergangenheit sehr problematisch. Die Probleme aus der Sicht des bestehenden Kontrollsystems liegen hierbei in folgenden Punkten:

- Das ELSA-Monitorsystem [23] ist nur unzureichend eingebunden. Damit entfällt die automatische Analyse der Strahlposition in ELSA sowie eine darauf sich anschließende notwendige Orbit-Korrektur. Der gesamte Bereich der Beam-Diagnostik an ELSA hat somit keine Basis im Kontrollsystem. Wichtige Messungen wie z.B. die genaue Bestimmung des Arbeitspunktes sind vom Kontrollsystem aus nicht durchführbar.
- Das System gestattet keine Einbindung universeller Meßgeräte zur Überwachung oder Diagnose von Maschineneigenschaften. Hierzu gehören z.B. LeCroy-Speicheroszilloskope, NMR-

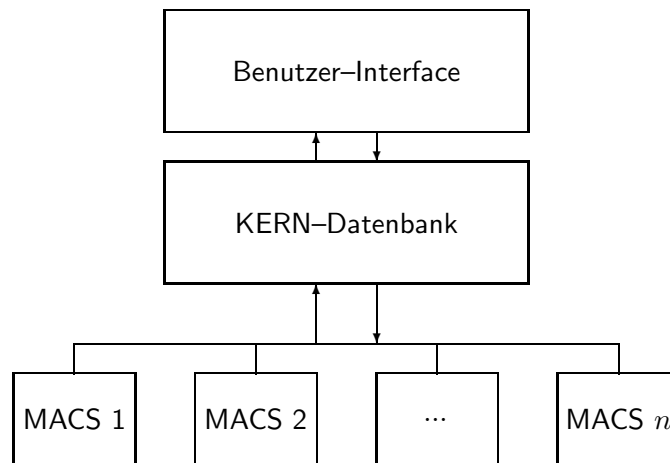


Abbildung 1.1: Blockdiagramm des ELSA-Kontrollsystems

Magnetfeldsonden und Intensitätsmonitore. Insbesondere können Daten, die diese Geräte liefern, nicht vom bestehenden Kontrollsystem verwertet werden.

- Die Benutzer-Schnittstelle gestattet nur die Änderung *einzelner* Parameter durch den Operateur. Es ist keine freie und einfache Programmierung elementarer Steuersequenzen möglich. Solche Sequenzen benötigt man z.B. für den zuverlässigen Übergang vom Normalmodus zum Akkumulationsmodus mit anschließender Strahlspeicherung und umgekehrt. Darüber hinaus sind Kopplungen zwischen einzelnen Parametern, wie z.B. die Korrelation der Parameter für die ELSA-Injektion, im System festgelegt und können nicht durch den Operateur geändert werden.
- Die Weiterverarbeitung von Maschinenparametern ist nicht möglich. Parameter können zwar auf den Bedienpulten angezeigt, aber z.B. nicht einzeln abgespeichert oder mit anderen Parametern korreliert werden. Dadurch entfällt die Möglichkeit automatischer Messungen von Maschineneigenschaften während des Routinebetriebs. Hierdurch wiederum ist die Menge der überhaupt durchführbaren Messungen an ELSA stark eingeschränkt.
- Es existiert keine Möglichkeit, komplexere Maschinenzustände grafisch darzustellen. Hierzu gehört z.B. die Visualisierung des Closed-Orbit, der genaue Verlauf von Stromrampen in den Dipolen und Quadrupolen sowie die Anzeige von Monitor-Daten und Strahl-Spektren.
- Das System ist vom normalen Benutzer aus nur über die Bedienpulte aus zu erreichen. Für die Experimentiergruppen gibt es keine weitere Schnittstelle, die während des Routinebetriebs z.B. von den Experiment-Kontrollräumen aus zugänglich ist. Ausserdem gibt es keine Möglichkeit, von anderen Rechnern des Instituts aus auf das Kontrollsystem zuzugreifen oder den Zustand von ELSA abzufragen.
- Die prinzipielle Beschränkung auf nur einen Zentralcomputer verhindert die Auslagerung rechenintensiver Anwendungen (wie z.B. die Korrektur des Closed-Orbit) auf andere Rechner. Dadurch wird die Leistungsfähigkeit des Kontrollsystems erheblich eingeschränkt.
- Aufgrund eines fehlenden, einfach aufgebauten Hilfe-Systems für die Kontrolle ist die Einarbeitung neuer Operateure schwierig und zeitaufwendig. Da alle Experimente an ELSA die Maschine eigenständig während der Meßschichten fahren, darf dieser Punkt nicht unterschätzt werden.

Die oben genannten Einschränkungen führten zur Entwicklung eines interaktiven Softwarepaketes mit dem Namen EPOS ("ELSA PHYSICS OPERATING SYSTEM"), welches als funktionale *Erweiterung* des bestehenden Kontrollsystems interpretiert werden muß. Im besonderen sollen durch EPOS die oben genannten Beschränkungen — falls möglich — aufgehoben oder zumindestens teilweise abgebaut werden. Darüber hinaus soll die gesamte Strahldiagnose an ELSA durch EPOS möglichst flexibel abgedeckt werden können, ohne neue Programme entwickeln zu müssen.

1.2 Die Arbeitspunktmessung als typisches Anwendungsbeispiel

Neben der eigentlichen Entwicklung von EPOS war es Ziel dieser Arbeit, das neue System für eine wichtige Problemstellung an ELSA einzusetzen und damit die Funktionsfähigkeit in der Praxis zu demonstrieren.

Als konkrete Aufgabe wurde die automatische Bestimmung des ELSA-Arbeitspunktes gewählt. Die Messung des Arbeitspunktes ist von großer Bedeutung für die langsame drittelzahlige Resonanzextraktion. Gleichwohl war eine angemessene Lösung bis dato nicht vorhanden: Die Bestimmung des Arbeitspunktes war bisher nur durch die Spektralanalyse der Monitor-signale mit einem digitalen Speicheroszilloskop möglich. Aufgrund der großen Meßzeit und der unbefriedigenden Genauigkeit der erzielten Resultate erschien dieses Vorgehen als wenig praktikabel und kaum ausreichend für den Routinebetrieb von ELSA. Die Alternative — Bestimmung des Arbeitspunktes mit einem hochgenauen Spektrum-Analysator — arbeitet dagegen nur bei akkumuliertem Strahl und kontinuierlicher Anregung kohärenter Betatron-Schwingungen durch einen Stripline-Kicker. Während des Experimente-Betriebs liegt aber kein Akkumulationsmode vor, so daß auch diese Methode ausscheidet. Der Nachteil bei beiden Meßverfahren ist darüber hinaus die fehlende Einbindung in das Kontrollsystem und somit die fehlende Möglichkeit, den Arbeitspunkt als ELSA-Parameter weiterverarbeiten zu können. Insbesondere die erwünschte automatische Korrektur des Closed-Orbit erfordert aber genau dies.

Die Bestimmung des ELSA-Arbeitspunktes mit EPOS mußte sich also an folgender Aufgabenstellung orientieren:

- Störungsfreie Messung während des normalen Stretcher-Betriebs
- Größtmögliche Präzision ($\frac{\Delta Q}{Q} < 10^{-3}$)
- Vollständige Integration aller Meßabläufe in das Kontrollsystem
- Kompatibilität mit dem Closed-Orbit Korrektursystem
- Vollständige Automatisierbarkeit aller Messungen

Bei allen oben genannten Punkten war gefordert, daß die zu erreichende Lösung vollständig in das generelle Konzept von EPOS integriert ist. Es sollte auf jeden Fall vermieden werden, daß *spezielle* Programme für die Arbeitspunktmessung entwickelt werden, da es bei speziellen Lösungen erfahrungsgemäß nach einiger Zeit für Nicht-Spezialisten kaum noch Zugang zu den verwendeten Methoden gibt. Vielmehr sollten in allen Fällen die in EPOS standardmäßig bereitgestellten Möglichkeiten ausgenutzt werden. Auf der anderen Seite legten obige Punkte natürlich Randbedingungen für die Konzeption von EPOS fest.

2. EPOS als Werkzeug für die Beschleunigerphysik an ELSA

Dieses Kapitel soll einen kurzen Einblick in die prinzipielle Arbeitsweise des EPOS-Systems geben. Dazu wird erst grundsätzlich die Arbeit des Benutzers mit dem Programm skizziert, um dann überblicksartig auf bestimmte Teilgebiete von EPOS und ihre Implementierung als Teil eines Rechnerprogramms einzugehen.

EPOS wurde in Zusammenarbeit mit M. Picard [18] entwickelt. Da die geforderten Leistungsmerkmale des Systems entsprechend der Aufgabenstellung dieser Arbeit im zur Verfügung stehenden Zeitraum nicht allein implementiert werden konnten, wurde die Programmier-Arbeit an EPOS aufgeteilt. Nach einer grundsätzlichen Planungs- und Designphase im März/April 1989 zusammen mit M. Schillo [23] wurde dann im Frühjahr 1990 eine erste arbeitsfähige Version fertiggestellt. Diese Version wurde zusammen mit dem von J. Wenzel entwickelten Softwaresystem COCPIT [28] zur Korrektur des ELSA-Orbits integriert und anschließend zur Demonstration der Funktionstüchtigkeit zur Messung des ELSA-Arbeitspunktes und Bestimmung des transversalen Phasenraumes eingesetzt.

Ausgehend von der im vorangegangenen Kapitel gegebenen Aufgabenstellung zielt EPOS auf die Verwendung durch Beschleuniger-Physiker *und* Operateure sowie Experimentatoren. Die Berücksichtigung dieser großen Gruppe unterschiedlicher Benutzer mit unterschiedlichen Präferenzen führte bei der Entwicklung zu einem Konzept, welches immer die möglichst einfache Modifizierbarkeit und Anpassbarkeit aller Strukturen im Auge hatte. Bei der Alternative zwischen möglichst eleganter oder möglichst universeller bzw. "robuster" Implementierung wurde immer versucht, den Weg größtmöglicher Flexibilität einzuschlagen.

Wegen des großen Umfangs der in EPOS implementierten Fähigkeiten kann dieses Kapitel die wichtigsten Punkte nur kurz streifen. Die vorliegende Beschreibung ist immer im Zusammenhang mit der Arbeit von M. Picard zu sehen — die beiden Arbeiten sind bezüglich der Beschreibung von EPOS so aufeinander abgestimmt, daß zusammen genommen eine gute Abdeckung aller wichtigen Teilaspekte erreicht wird. Für die Integration des Systems zur Korrektur des Closed-Orbit an ELSA sei zusätzlich auf die Arbeit von J. Wenzel verwiesen.

2.1 Allgemeines Arbeitsprinzip von EPOS

Es kann nicht Ziel dieser Arbeit sein, eine umfassende Anleitung zur Bedienung von EPOS zu geben. Dieser Abschnitt beleuchtet daher nur stichpunktartig generelle Eigenschaften, die für die Arbeit mit dem System typisch sind. Dabei wird versucht, möglichst alle Punkte mit einem aussagekräftigen Beispiel zu verknüpfen, um statt einer abstrakten Definition etwa von Kommando-Syntax oder Aufrufeschemata einen konkreten Eindruck der gegebenen Möglichkeiten zu vermitteln.

Interaktion mit dem Benutzer

EPOS ist als *Erweiterung* des bereits bestehenden Kontrollsystems entwickelt worden. Es handelt sich um ein Software-System, welches "interaktiv" mit dem Benutzer kommuniziert: Ein Operateur gibt durch Eintippen von Klartext-Kommandos Aufträge an das System, welches die gestellten Aufgaben sofort bearbeitet und nach Bearbeitung des Kommandos unverzüglich die Resultate oder eine entsprechende Mitteilung auf dem Bildschirm einer Workstation oder eines Terminals zurückgibt. Dadurch unterscheidet sich EPOS von einem Programm mit sog. "graphischer Benutzerschnittstelle" wie zum Beispiel dem zur Kontrolle von ELSA verwendeten MENU-System auf den Farbgrafik-Konsolen. Hier wurden Befehle durch Manipulation grafischer Elemente mittels Rollball (z.B. Parameter-Änderung) gegeben. Letztere Methode hat den großen Vorteil, auf einen Parameter quasi-kontinuierlich zugreifen und instantan die erzielten Resultate auf dem Pult beobachten zu können. Der Nachteil eines solchen Verfahrens besteht allerdings in der mangelnden Fähigkeit, auch kompliziertere Operationen mit möglichst geringem Aufwand einfach und flexibel verfügbar zu machen. Darüber hinaus ist eine "Automatisierbarkeit" bestimmter Vorgänge über eine grafische Oberfläche nur sehr schwer erreichbar. Der auftragsorientierte Ansatz von EPOS dagegen liefert jedoch die Grundlage für das einfache Aneinanderketten von Kommandos, die nacheinander als "Programm" abgearbeitet werden können.

Die Arbeit mit Objekten, Variablen und Kommandos

Da EPOS generell für die Beschleunigerphysik an ELSA entwickelt worden ist, müssen die Kommandos und vor allem die Daten oder Objekte, mit denen gearbeitet wird, in der Struktur speziell auf die Erfordernisse der Maschinenphysik zugeschnitten sein. EPOS verfolgt hier den sogenannten "objektorientierten" Ansatz: Das Programm kann Daten-"Objekte" erzeugen, löschen, manipulieren, kombinieren und Berechnungen mit ihnen ausführen — die Daten-Objekte selber sind dabei einfache Elemente, die ihre Struktur zum Teil direkt aus dem Beschleuniger und dessen Kontrollsystem herleiten, zum Teil aber auch abstrakte Größen der Beschleunigerphysik (Optikdaten etc.) darstellen.

Die nachstehende Aufzählung beschreibt die *Typen* von Objekten, mit denen EPOS arbeiten kann. Der objektorientierte Ansatz besagt, daß bestimmte Kommandos nur auf bestimmte Typen von Objekten anwendbar sind. Damit besteht eine feste Bindung zwischen Datentypen und Kommandos, die auf diesen Typen definiert sind¹. EPOS kennt

- ELSA-Parameter (z.B. Stromwerte)
- Digitalisierte Signale des Monitorsystems (z.B. Ablagewerte)
- Spektren (z.B. berechnet durch FFT)
- Datenfelder verschiedener Meßgeräte (z.B. LeCroy-Oszilloskop)
- Maschinen-Orbits (Ablagewerte im ELSA-Ring)
- Monitor-Einstellungen (z.B. Verstärkungswerte)
- Strahlage-Korrektor-Einstellungen (z.B. Kickstärken)
- Daten optischer Elemente (z.B. Quadrupol-Gradienten)
- Ein- und zweidimensionale Vektoren (z.B. Messreihen)

¹In der Informatik bezeichnet man diese Typen als "abstrakte Datentypen". Die Kommandos, die auf den Objekten definiert sind, heißen dann "Operatoren".

- Beliebige Zahlen oder Texte (z.B. '4.612')

EPOS arbeitet mit den genannten Objekten als *Variablen*. Dies bedeutet, daß jedes Objekt nur als "Platzhalter" für aktuell gültige Datenwerte dient. So kann z.B. ein Objekt vom Typ "Zahl" den aktuellen Arbeitspunkt von ELSA speichern ("4.612"), oder ein Objekt vom Typ "Monitorsignal" kann bis knapp über 32000 Intensitäts- oder Ablagewerte des Strahls an zeitlich äquidistanten Stützstellen aufnehmen. Der aktuelle Wert, den ein Objekt besitzt, kann jederzeit durch entsprechende Kommandos modifiziert oder gelöscht werden.

EPOS verwaltet alle Datenobjekte über "Variablen-Namen". Der Benutzer kann ein Objekt des gewünschten Typs erzeugen und dann mit Werten füllen. Bei der Erzeugung gibt der Benutzer dabei EPOS den *Namen*, mit dem das Objekt in Zukunft angesprochen werden soll. Man könnte z.B. ein Objekt vom Typ "Zahl" erzeugen, in der der Q_x -Arbeitspunkt von ELSA gespeichert werden soll: der Name dieses Objekts soll deshalb "QX" heißen. Im gesamten EPOS-System kann ab dieser Definition diese Zahl über "QX" referenziert werden. Die Menge der Objekte eines einzelnen Typs ist in EPOS nur durch den Speicher des Rechners begrenzt.

Die *interaktive Manipulation oder Kombination von Variablen* ist die Hauptaufgabe von EPOS. Der Benutzer definiert zunächst die Objekte, mit denen er arbeiten will oder die bestimmte Daten (z.B. Meßreihen oder Spektren) aufnehmen sollen. Durch Abgabe von Kommandos und Angabe der Variablen-Namen können dann die gewünschten Operationen durchgeführt werden. Ein eingetipptes Kommando ist nur gültig mit *gleichzeitiger* Angabe der Variablen als sogenannte Kommando-Argumente. Ein Beispiel: Man definiert drei Variablen vom Typ "Zahl" ("Z1", "Z2" und "Z3") und weist den beiden ersten Variablen den Wert 1 bzw. 5 zu. Anschließend sollen beide Zahlen addiert und das Ergebnis in der Variablen "Z3" abgelegt werden. Der Benutzer muß dazu die folgenden Kommandos eingeben²:

```
VARSET Z1 1
VARSET Z2 5
ADD Z1 Z2 Z3
```

Die ersten beiden SET-Kommandos haben *zwei*, das dritte Kommando hat *drei* Argumente. Die *Stellung* der Argumente ist für EPOS sehr wichtig: Das VARSET-Kommando erkennt durch die Stellung von "Z3", daß hier die Zielvariable angegeben wurde, die das Ergebnis aufnehmen soll. Die beiden Summanden werden an den beiden ersten Plätzen erwartet.

Falls ein Kommando in bestimmten Fällen eine vom Standard abweichende Operation durchführen soll, so teilt man EPOS dies über die Angabe sogenannter *Optionen* mit. Optionen werden dem betreffenden Kommando mittels Schrägstrich gekennzeichnet.³ So gibt es in EPOS z.B. das Kommando, eine Zahl als neues Element in einen eindimensionalen Zahlenvektor aufzunehmen. "VECTOR" ist das Kommando zur beliebigen Manipulation von eindimensionalen Datenfeldern — wird die Variable z.B. mit "REIHE" angesprochen und ist die Zahl in "Z3" gespeichert, so lautet das Kommando

```
VECTOR/APPEND REIHE Z3
```

In bestimmten Anwendungsfällen können Optionen auch Werte mitgeteilt bekommen, die für die Ausführung des Kommandos wichtig sind. So existiert beispielsweise ein Befehl zum Erzeugen von Histogrammen. Diesem Befehl müssen die Histogrammparameter über Optionen mitgeteilt werden. Nachstehendes Kommando erzeugt ein Histogramm in der Variable "HISTVAR" und nimmt die Ausgangsdaten aus dem Vector "REIHE". Das Beispiel zeigt auch, daß mehrere Optionen

²In Zukunft werden die EPOS-Kommandos immer in der jetzt folgenden Schriftart gesetzt.

³Diese Konvention wurde deshalb gewählt, weil das Betriebssystem der verwendeten -Rechner ebenfalls den "/" für Optionen verwendet. Daher ist diese Schreibweise den meisten Physikern und Operateuren bekannt.

gleichzeitig auftreten können. Die Reihenfolge der einzelnen Optionen kann übrigens willkürlich gewählt werden:

```
HISTOGRAM/START=0.0/BINWIDTH=10.0/NUMBINS=20 REIHE HISTVAR
```

Nicht immer ist die Anzahl der Argumente bei einem Kommando genau festgelegt. Das Kommando zum Abspeichern von Variablen beispielsweise erwartet lediglich eine Aufzählung. Im folgenden Beispiel wird erst die Variable "Z1" gespeichert, danach "REIHE", "Z2" und "Z3". Als Resultat wird vom Rechner eine Datei mit dem Namen "meine-datei" erzeugt.

```
VARSAVE Z1 'meine-datei'  
VARSAVE REIHE Z2 Z3 'meine-datei'
```

Obiges Beispiel zeigt auch, daß ein Kommando durchaus mehrere Variablen-Typen unterstützen kann. So steht zum Beispiel im ersten Befehl eine "Zahl" an der ersten Stelle, beim folgenden Befehl steht hier eine Variable vom Typ "Vektor". Der `VARSAVE`-Befehl dient generell zum Abspeichern aller Objekte in EPOS. Das Kommando `VARLOAD` liest einmal abgespeicherte Objekte wieder in Variablen ein. Auf diese Weise kann man von EPOS berechnete Daten dauerhaft für eine spätere Verwendung konservieren oder auch anderen EPOS-Benutzern zur Verfügung stellen.

Während der Arbeit mit EPOS kann man jederzeit mit dem Befehl `VARINFO` Auskunft über eine Variable erhalten. Hierzu muß nur der Name der Variablen angegeben werden. EPOS gibt einem dann detaillierte Auskunft über Typ, Inhalt und benötigten Speicherplatz.

Komplexe Variablen

Die Aufzählung der verschiedenen Variablen-Typen in Punkt "Objekte, Variablen und Kommandos" auf Seite 6 gibt bereits einen Hinweis darauf, daß die Verwaltung von einfachen Zahlen in Variablen bei EPOS zwar wichtig ist, aber doch nur einen kleinen Teil der Komplexität ausmacht. Gerade durch die spezielle Berücksichtigung der Beschleunigerphysik gibt es auch Variablen, die eine Vielzahl gemischter Informationen speichern müssen. Hierzu gehören Monitor-Daten, Spektren, Reihen, zweidimensionale Zahlenfelder, Ablage-Werte usw.. Variablen, die solche Informationen speichern können, heißen bei EPOS *komplexe Variablen*.

Es würde zu weit führen, an dieser Stelle die genaue Definition der verwendeten Typen offenzulegen. Als Verdeutlichung soll hier die detaillierte Struktur einer sogenannten *SAMPLE*-Variablen skizziert werden. Eine *Sample*-Variable wird dazu verwendet, Meßwerte des Monitorsystems oder eines Speicheroszilloskops aufzunehmen. Die folgenden Punkte beziehen sich auf die einzelnen Einträge in solch einer Variable:

1. Datum und Uhrzeit, wann die Meßwerte eingelesen wurden
2. Notiz-Zeile für Kommentare zur Messung
3. Anzahl der gespeicherten Werte
4. Art der Messwerte: Amplitude/Zeit oder Anteil/Hz
5. Physikalische Einheit des X-Bereichs, z.B. μsec oder Hz
6. Physikalische Einheit des Y-Bereichs, z.B. mV oder dB
7. Indikator für logarithmische oder lineare Skalierung
8. Abstand zweier Meßpunkte: Δt oder Δf
9. Bis zu 32000 einzelne Meßwerte

Nach außen hin tritt eine solche Variable ebenfalls nur über ihren Namen in Erscheinung. Dadurch gibt es bei der praktischen Arbeit mit EPOS keinen Unterschied zwischen der Arbeit mit normalen Zahlen-Variablen oder komplexen Variablen. Durch dieses Konzept wird die Komplexität der Daten vor dem Bediener von EPOS verborgen, gleichsam "eingekapselt". Hierdurch wiederum wird die Arbeit mit dem System übersichtlich und effizient.

Überblick über die Menge verfügbarer EPOS-Kommandos

Die Menge der in EPOS verfügbaren Kommandos ist in der aktuell verwendeten Version sehr umfangreich. Eine nach Bereichen geordnete Liste ist im Anhang der Arbeit zu finden. Im wesentlichen handelt es sich um folgende Teilgebiete:

- Kommandos zum Erzeugen, Löschen und Speichern von Datenobjekten, d.h. von Variablen aller Art.
- Kommandos zur *Berechnung* bestimmter Größen. Hierzu gehören einfache Operationen wie beispielsweise die Addition von Zahlen, aber auch kompliziertere Aufgaben wie z.B. die Multiplikation von Spektren, die Subtraktion von Vektoren, das Erstellen von Histogrammen oder die Berechnung von Fourier-Transformationen oder Filteroperationen.
- Kommandos, die den vollständigen Zugriff auf das *ELSA-Kontrollsystem* erlauben. Hierzu gehört das Auflisten von Parametern, das Setzen oder Lesen bestimmter Werte, das Erzeugen von Rampen für Dipole und/oder Quadrupole etc.
- Kommandos zur vollständigen Einbindung der *ELSA-Monitore*. Dazu gehört auch das Einstellen von Monitor-Modulen und Sample-Elektronik, das Auslesen von Intensitäts- und Ablageinformationen oder das Setzen bestimmter Triggerbedingungen.
- Kommandos zur Ansteuerung von externen *Meßgeräten*. Hierbei handelt es sich um ein umfassendes System zur Einbindung von Meßgeräten mit dem IEC-Bus, wie z.B. LeCroy-Oszilloskop, Spektrum-Analysator oder Signalgenerator.
- Kommandos zum *Anzeigen* von Variablen oder zum Generieren bzw. *Zeichnen* von beliebigen Diagrammen auf Bildschirm oder Drucker.
- *Verwaltungskommandos* für EPOS. Hierzu gehören Kommandos, die Informationen über den augenblicklichen Zustand von EPOS anzeigen ebenso wie Kommandos, die EPOS in verschiedene Arbeitsmodi bringen. Darüber hinaus sind hier Kommandos zur Anzeige von Hilfs-Informationen oder erklärenden Texten zu finden.

Die vollständige Liste aller verfügbaren Kommandos zusammen mit einer genauen Erklärung der Befehlsformate und Optionen kann der Benutzer jederzeit durch das Kommando `HELP` abrufen.

Anpassung an spezielle Wünsche des Benutzers

Der in EPOS aufrufbare Pool von Kommandos ist nicht durch die Programmierung festgelegt. Für alle Kommandos existiert vielmehr eine einfach modifizierbare Definition, die sowohl den Namen als auch die Optionen und andere Setzungen enthält. Alle diese Kommando-Definitionen sind in einer Datei gesammelt, die beim Start des Programms automatisch geladen wird. Nach Abschluß dieses Ladevorganges – von dem der Benutzer nichts merkt – kann EPOS mit den definierten Kommandos arbeiten. Dieses Konzept bietet die wertvolle Möglichkeit, unterschiedliche Dateien mit unterschiedlichen Kommando-Sätzen zu verwenden, um so zum Beispiel entweder alle Kommandos mit deutschen *oder* englischen Namen zu versehen. Eine weitere Möglichkeit besteht auch darin,

einem geübten Operateur mehr und kompliziertere Kommandos zur Verfügung zu stellen, als es für einen noch nicht eingearbeiteten Benutzer wünschenswert wäre. Die allgemeinste Version von EPOS bietet natürlich Zugriff auf alle Kommandos, die überhaupt zur Verfügung stehen.

Um dem Operateur weitergehende Freiheiten bei der Arbeit mit dem System zu bieten, wurde EPOS mit einem System zur *Symbol-Verwaltung* ausgestattet. Man kann einen symbolischen Namen definieren, dessen Bedeutung mit beliebigem Inhalt gefüllt werden kann. Immer dann wenn EPOS auf ein solches Symbol trifft, wird es durch seinen Inhalt ersetzt, ohne daß der Bediener davon in Kenntnis gesetzt wird. Ein einfaches Beispiel für ein Symbol wäre die Ersetzung eines Kommando-Namens durch ein anderes Wort. Das Beispiel definiert ein Symbol namens "SUMME", das bei der Angabe als Kommando von EPOS sofort durch "ADD" ersetzt wird.

```
SYMALIAS 'SUMME' 'ADD'
```

Statt "ADD Z1 Z2 Z3" kann man dann auch ab sofort "SUMME Z1 Z2 Z3" schreiben. Durch diesen Symbol-Mechanismus kann man sich auf einfache Art und Weise seine eigenen Kommando-Namen definieren, was in vielen Fällen eine große Erleichterung bietet. Natürlich kann ein Symbol auch mehrere Kommandos mit Optionen etc. beinhalten. So können zum Beispiel sehr lange Befehle durch ein einzelnes kurzes Wort abgekürzt werden. Aber auch die Definition von Zahlen ist möglich:

```
SYMALIAS 'EINS' '1'
```

```
SYMALIAS 'ZWEI' '2'
```

```
SYMALIAS 'PI' '3.141592' usw.
```

Die Anzahl der definierbaren Symbole ist in EPOS nur durch den Speicherausbau des Rechners begrenzt. Zusammen mit der Kommando-Definition bietet der Symbol-Mechanismus eine einfache Möglichkeit, EPOS an die spezifischen Wünsche des einzelnen Operateurs anzupassen.

Automatische Bearbeitung von Kommando-Folgen

In der Praxis ist es meistens äußerst mühsam, gleichlautende Kommandos immer wieder in derselben Reihenfolge einzutippen, um zum Beispiel bestimmte Einstellungen von Variablen vorzunehmen. EPOS bietet daher die Möglichkeit, Kommandos nacheinander *automatisch* abzuarbeiten, genau so, als wenn sie direkt vom Benutzer eingegeben worden wären. Dazu muß man nur mit einem normalen Editor eine Datei erzeugen, die die Kommandos enthält. Durch Angabe des Befehls

```
EXECUTE 'dateiname'
```

wird dann die Datei gelesen und die dort gefundenen Kommandos sofort abgearbeitet. Dies geschieht durch den speziellen Aufbau von EPOS besonders schnell. Eine solche Datei wird von EPOS als "Programm" interpretiert. Die Anzahl solcher Dateien sowie der jeweils in ihnen enthaltenen Befehle ist nicht begrenzt. Um aber nicht nur Kommandofolgen sequentiell abzuarbeiten, sondern auch Bedingungen und Verzweigungen in einem Programm zu ermöglichen, besitzt EPOS einen Satz von Kontrollkonstrukten, die sich auf den Bearbeitungsfluß eines Programmes auswirken können. Hierzu gehören zum Beispiel IF, JUMP oder ähnliche Befehle. Auf die Automatisierung von Meß- und Steueraufgaben mit solchen Konstrukten wird in Punkt 1.4 auf Seite 19 eingegangen.

Eingebaute Sicherheitsmechanismen

Da EPOS zur Kontrolle und Steuerung von ELSA dient, kann natürlich nicht jedem, der auch Zugang zu einem Rechner besitzt, gleichzeitig (über EPOS) auch Zugang zum Kontrollsystem der Maschine gewährt werden.

Aus Sicherheitsgründen hat EPOS daher ein dreistufiges Sicherheitssystem eingebaut. Die erste Stufe besteht darin, daß sich jeder Operateur beim Aufruf des Systems *anmelden* muß, indem er

seinen Namen und ein Passwort eingibt. Der Name wird mit einer von EPOS gespeicherten Liste autorisierter Benutzer verglichen. Falls ein Eintrag gefunden wird, startet das System erst dann, wenn auch das Passwort übereinstimmt. Jeder Benutzer hat hierbei ein persönliches Passwort, welches *nur von ihm selbst* jederzeit geändert werden kann. Alle Passwörter werden von EPOS sofort nach der Eingabe durch einen speziellen Algorithmus verschlüsselt.

Ist die Anmeldung erfolgreich verlaufen, so findet EPOS in der Liste autorisierter Benutzer einen Satz sogenannter *Privilegien*, der die Zugriffsrechte des jeweiligen Benutzers auf EPOS definiert. Die Privilegien wirken sich so aus, daß bestimmte Kommandos nicht ausgeführt werden dürfen, wenn ein benötigtes Privileg fehlt. Es handelt es sich um

- Das normale Benutzer-Privileg USER
Dies benötigt man, um überhaupt mit EPOS arbeiten zu können. Ansonsten kann man nur Kommandos wie z.B. HELP benutzen.
- Das Kontrollsystem-Lese-Privileg READ
Mit diesem Zugriffsrecht kann man alle Parameter des Kontrollsystems *lesen* bzw. anzeigen lassen. Änderungen sind hierbei nicht möglich.
- Das Kontrollsystem-Schreib-Privileg WRITE
Mit diesem Zugriffsrecht kann man bei Bedarf jeden beliebigen ELSA-Parameter ändern. Will man also die Maschine steuern, so benötigt man dieses Zugriffsrecht.
- Das EPOS-System-Privileg SYSTEM
Dieses Recht umfasst alle anderen Privilegien und gestattet darüber hinaus auch die Verwendung sogenannter EPOS-System-Kommandos. Diese Kommandos erlauben beispielsweise die Änderung bestimmter Einstellungen und Arbeitsmodi von EPOS. Auch die Verwaltung der Liste autorisierter Operateure fällt unter diesen Punkt.

Die obigen Zugriffsrechte gelten individuell für einen einzelnen Operateur. Allerdings ist das Privileg, ELSA-Parameter ändern zu dürfen, etwas zu allgemein, um einen Schutz spezieller Komponenten und damit eine gewisse Betriebssicherheit zu erreichen. Deshalb gibt es bei EPOS noch die dritte Sicherheitsstufe. In dieser Stufe kann *jedem ELSA-Parameter* ein spezielles Passwort zugeordnet werden. Eine Modifikation des betreffenden Parameterwertes kann nur erfolgen, wenn der Benutzer zuvor das korrekte Passwort eingibt. Passwörter können für einzelne Parameter jederzeit geändert werden; auch hier werden alle Wörter sofort von EPOS verschlüsselt. In der praktischen Arbeit sind zur Zeit zum Beispiel die Hauptschalter der Dipol- und Quadrupolnetzgeräte mit speziellen Passwörtern gesichert.

Der Passwort-Schutz für Parameter wird von EPOS automatisch aktiviert, wenn das System Zugang zum Kontrollsystem des Beschleunigers bekommt. In speziellen Fällen kann jedoch von jedem Operateur mit "WRITE"-Privileg der gesamte Schutz vorübergehend deaktiviert werden. Hierzu ist die Angabe eines speziellen Kennungswortes nötig. Ist die Kennung korrekt, so schaltet EPOS den Schutz der ELSA-Parameter aus, bis der Modus durch Angabe eines bestimmten Kommandos wieder zurückgenommen wird.

2.2 EPOS und das ELSA-Kontrollsystem

Die Anbindung an den Kern des Kontrollsystems

Die zentrale Stelle zum Anbinden externer Software an die ELSA-Steuerung findet sich im Kern des Kontrollsystems. Hier existiert eine Bibliothek von Funktionen, die den vollständigen Zugriff auf die Beschleuniger-Datenbank erlauben. Durch Aufruf der betreffenden Routinen kann so ein

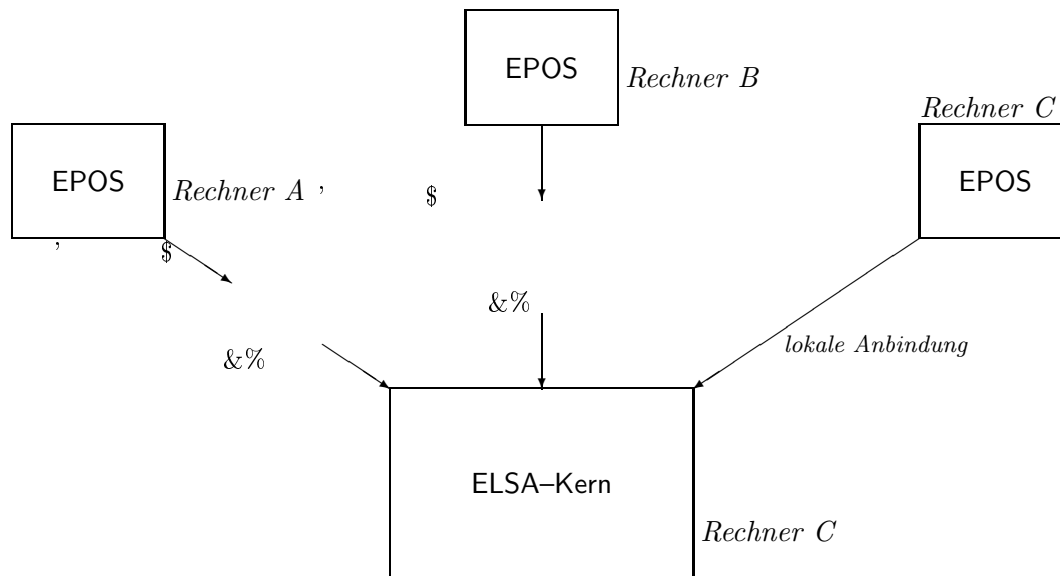


Abbildung 2.1: Anbindung an das ELSA-Kontrollsystem

Parameter gelesen oder gesetzt werden. Eine weitere Gruppe von Funktionen befaßt sich mit der Kommunikation mit den MACS-Prozessoren des Front-End-Systems: der Anwender kann einem Prozessor sogenannte "USER"-Pakete senden und auch wiederum vom Prozessor empfangen – hierdurch können spezielle Kommandos oder auch Daten zwischen einem Anwenderprogramm und einem MACS-Prozessor ausgetauscht werden. Dies ist immer dann notwendig, wenn Prozessoren eingesetzt werden, deren Aufgabe von standardisierten Problemstellungen (z.B. Steuerung von Netzgeräten) stark abweicht, was beispielsweise bei typischen Aufgaben des Monitorsystems der Fall ist.

Die oben beschriebene Bibliothek von Funktionen kann allerdings nur von solchen Programmen in Anspruch genommen werden, die *auf dem Kontrollrechner selbst* ablaufen. Ein Programm auf einem anderen Rechner hat keinen Zugriff. EPOS fordert aber den Anschluß an das Kontrollsystem auch von externen Rechnern: Das EPOS-Programm läuft auf einer leistungsfähigen Workstation, die nur über das Rechnernetz mit dem ELSA-Rechner verbunden ist. Gleichwohl aber muß EPOS den vollen Zugriff auf das Kontrollsystem erhalten, um zum Beispiel den Closed-Orbit zu korrigieren. Der Betrieb von EPOS auf einer Workstation ist übrigens dadurch motiviert, daß nur eine Workstation genügend Rechenleistung und Grafikmöglichkeiten bieten kann, um die gestellten Aufgaben (vergl. Aufgabenstellung) bearbeiten zu können; der zur Zeit als Zentralrechner verwendete Computer vom Typ VAX-750 wäre überfordert.

Um dennoch EPOS den vollen Zugriff auf das ELSA-System zu gestatten, wurde folgender Ansatz gewählt: Stellt EPOS fest, daß es *nicht* auf dem Zentralrechner selber aktiviert wurde (und somit also auf einem anderen Rechner läuft), so wird zunächst über das Netzwerk der Zugang zum (anderenorts befindlichen) Zentralrechner gesucht und aufgebaut. Daraufhin initiiert EPOS vom lokalen Rechner aus die Aktivierung eines EPOS-Moduls auf dem Zentralrechner, dem *Netzwerk-Server* (vergl. Abb. 2.1). Dieses neu aufgerufene Programm hat automatisch Zugang zum Kontrollsystem. EPOS kommuniziert nun beim Zugriff auf ELSA nicht mehr direkt mit dem Kern, sondern *indirekt* über den eingeschobenen Server. Der Benutzer merkt von diesem Vorgehen nichts: EPOS gibt von *jedem* Rechner des Netzwerkes aus einen gleichartigen Zugriff auf den Beschleuniger. Auch mehrere Versionen von EPOS auf mehreren Rechnern sind gleichzeitig möglich.

Der Umweg über das Rechnernetz bedeutet natürlich eine Leistungseinbuße verglichen mit dem

Fall, in dem EPOS lokal auf dem Zentralrechner arbeitet. In der Praxis kann man allerdings feststellen, daß die erhöhte Rechenleistung der Workstation die Verlangsamung durch das Netz mehr als aufwiegt. Die Anzahl der Kontrollsystem-Zugriffe bleibt allerdings eine Größe, die sich bei der Arbeit mit EPOS auf den Datendurchsatz des Systems auswirkt.

Die Verbindung zum Kontrollsystem kann bei EPOS jederzeit durch Abgabe entsprechender Kommandos aktiviert oder wieder abgebrochen werden. EPOS protokolliert auch alle Verbindungen und Anforderungen an das Kontrollsystem. Damit ist im Fehlerfall die Rückverfolgung von Steuerbefehlen möglich. Außerdem kann für jeden Benutzer festgestellt werden, ob, wann und wie ein Zugriff auf ELSA erfolgt ist.

Zugriff auf ELSA-Parameter

Die Steuerung des Beschleunigers erfolgt über das Lesen und Setzen von ELSA-Parametern. Jeder Parameter kann durch einen eindeutigen Namen im Kontrollsystem angesprochen werden. Im Kern des Kontrollsystems werden aber keine Namen zum Ansprechen von Parametern verwendet, sondern vielmehr Kenn-Nummern. Will der Benutzer mit einem Parameter arbeiten, so muß vom System der eingegebene Name in die entsprechende Kennung übersetzt werden. Hierzu existiert im ELSA-Kontrollsystem eine Datenbank, die die Namen und Nummern gespeichert hält. Da während des Routinebetriebs im Kernsystem nie mit den Namen gearbeitet wird, ist diese Datenbank leider relativ einfach und daher langsam implementiert worden.

Beim Zugriff auf Beschleunigerparameter muß zunächst durch EPOS der vom Benutzer angegebene Name in die Kennung übersetzt werden. Mit dieser Kennung wird dann eine Kontrollsystem-Routine direkt oder indirekt (über Netz) aufgerufen. Insbesondere beim indirekten Betrieb hat man so zwei langsame Aktionen pro Parameterzugriff: Namens-Konversion und Netz-Transfer. In der praktischen Arbeit würde dies eine Verlangsamung aller Beschleuniger-Zugriffe mit sich ziehen. Zur Vermeidung des oben beschriebenen Engpasses verwendet EPOS eine Datenstruktur, die allgemein als *CACHE*-Speicher bekannt ist. Es handelt sich um einen (in Software programmierten) Speicher, der die *am häufigsten benutzten Parameter* mit ihrem Namen und der Kennung aufnimmt. Fordert der Benutzer einen ELSA-Parameter an, so schaut EPOS zuerst in den *CACHE*. Wird der Parameter dort gefunden, hat man die Kennung, ohne eine Konversion oder einen Netztransfer benötigt zu haben. Wird der Parameter nicht gefunden, so wird die Konversion vorgenommen, und der neue Parameter wird in den *CACHE* aufgenommen, wo er jetzt den bis dahin am wenigsten gebrauchten Parametereintrag ersetzt. Der *CACHE*-Speicher enthält also während des EPOS-Betriebs eine Sammlung der am häufigsten benutzten ELSA-Parameter. In der Praxis hat die Einführung des *CACHE*-Speichers eine wesentliche Steigerung der Arbeitsgeschwindigkeit von EPOS beim Zugriff auf ELSA ermöglicht.

Der Kern von EPOS beinhaltet eine Bibliothek von Routinen zum Zugriff auf die Funktionen des Kontrollsystems. Der *CACHE*-Speicher ist hierbei den relevanten Routinen vorgeschaltet und tritt nicht nach außen in Erscheinung. Zur Steuerung des Beschleunigers verwenden alle EPOS-Kommandos Aufrufe aus dieser Bibliothek.

Die Verbindung vom Kontrollsystem zur Arbeit mit EPOS geschieht über EPOS-Variablen. Eine Variable vom Typ "Zahl" kann durch ein entsprechendes Kommando mit einem Parameterwert gefüllt werden. Andererseits kann eine Variable, die einen Wert enthält, gelesen und der gewonnene Wert von EPOS zur Änderung eines Maschinenparameters benutzt werden. Da EPOS mit Variablen rechnen kann, schließt sich der Kreis: Auslesen in Variable – Berechnung eines neuen Wertes – Neusetzen des Parameters. Dieses Prinzip skizziert Abbildung 2.2.

Generell können Variablen auch dazu dienen, aktuelle ELSA-Parameterwerte für den späteren Gebrauch aufzubewahren ("zu retten"). Will man beispielsweise die Injektion in ELSA ausschalten,

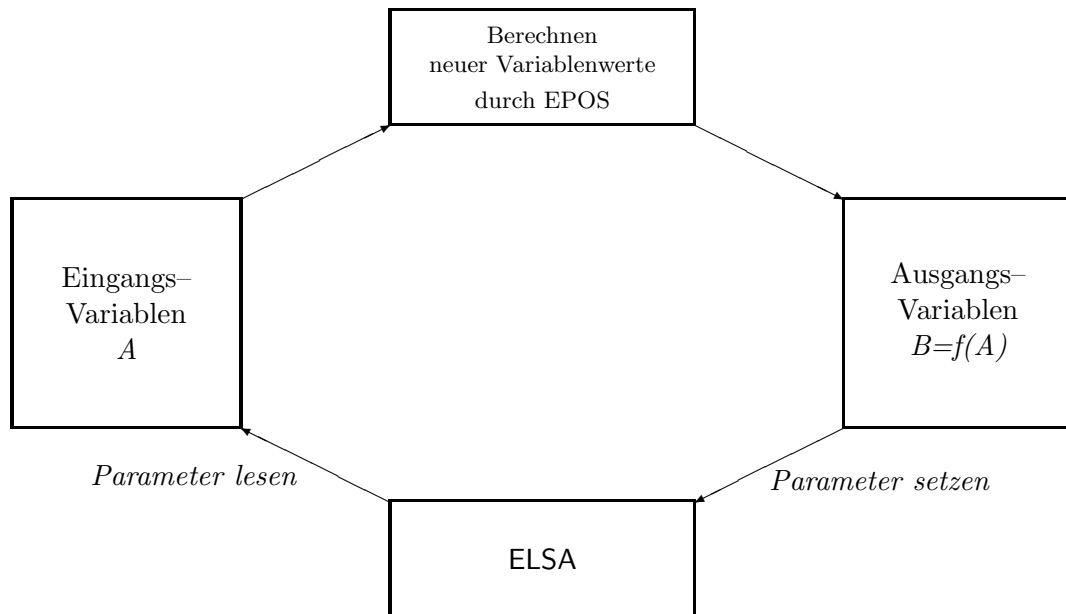


Abbildung 2.2: Prinzip der Arbeit mit ELSA-Parametern

so kann man sich den Stromwert eines Injektionsseptums in einer Variable merken und danach auf 0 zurücknehmen. Will man die Injektion wieder einschalten, so muß man nur die Variable wieder auslesen und den Wert an das Kontrollsystem übermitteln, womit der alte Zustand wieder hergestellt ist.

Neben der oben beschriebenen Arbeitsweise mit Variablen gibt es auch eine Reihe von Kommandos, die *direkt* auf das Kontrollsystem einwirken und ELSA kontrollieren. Hierzu gehören beispielsweise Befehle zum Generieren und Laden von Stromrampen für die Dipol- und Quadrupolnetzgeräte des Rings, aber auch Kommandos zum langsamen Fahren von Parametern in Richtung auf einen gegebenen Endwert. Letzteres Verfahren verwendet man beispielsweise dann, wenn die Erhöhung von Stromwerten bei Netzgeräten langsam und kontinuierlich vorgenommen werden muß. Die folgende Liste gibt eine kurze Auswahl bereits implementierter EPOS-Befehle zur Direktsteuerung von ELSA:

- SYLIMODE:
Erzeugen und Ausführen *schneller* Energierampen. Berechnet werden Rampen mit Anstiegs- und Abstiegsteil sowie einem Flat-Top. Die Rampen werden automatisch geladen und führen zur synchronen Steuerung von Dipolen und Quadrupolen. Dieser Befehl wird bereits seit längerer Zeit zur Einstellung von ELSA als Quelle für Synchrotronstrahlung verwendet.
- SLOWRAMP:
Erzeugen einer *langsamen* Energierampe zum langsamen Fahren der Ringenergie bis zu einem angegebenen Endwert. Dipole und Quadrupole werden entsprechend gesteuert. Auch dieser Befehl wird für den Synchrotronlicht-Betriebsmode verwendet.
- ELSASWEEP:
Automatisches, langsames Fahren eines einzelnen ELSA-Parameters von einem Start- zu einem festen Endwert in einer vorgegebenen Zeit.
- ELSAVAKUUM:
Auslesen des Ringvakuums und Berechnung von Mittelwerten, Minimal- und Maximaldrücken sowie der Pumpen mit höchstem bzw. niedrigsten Druck.

- **MACSRESET**:
Rücksetzen von Prozessoren des Front-End-Systems durch einfache Angabe des betreffenden ELSA-Parameters oder Gerätes.

Selbstverständlich kann man obige Befehle auch in Zusammenhang mit Variablen benutzen. So kann zum Beispiel eine Zahl-Variable einen Energiewert in GeV aufnehmen und an den Befehl SLOWRAMP als Energie-Endwert übermittelt werden.

Die Kombination von Variablen, Berechnungen von Werten und Direktbefehlen zur Steuerung gibt dem Operateur somit ein leistungsfähiges Werkzeug zur einfachen und effektiven Kontrolle der Maschine. Die Möglichkeiten heben sich hierbei bereits weit über die Fähigkeiten der bis dato eingesetzten Bedienpulte (und Software) heraus.

Anschluß externer Meßgeräte

Bei der Entwicklung des ELSA-Kontrollsystems wurde auch die Möglichkeit implementiert, ein einzelnes Meßgerät mit IEC-Bus anzuschließen. Das Kontrollsystem übernahm dabei den Service, den Datenaustausch zwischen dem Meßgerät und einem einzelnen Anwenderprogramm zu verwalten. Zur Ansteuerung des Gerätes muß dieses lediglich an einen MACS-Prozessor mit IECBUS-Karte angeschlossen sein. Die Daten des Meßgerätes waren allerdings nicht für die weitere Verarbeitung im *Kontrollsystem* verfügbar.

Im Laufe der Arbeit an ELSA erwies es sich jedoch als sehr wichtig, auch mehrere Meßgeräte mit IEC-Bus gleichzeitig anschließen und steuern zu können. Dabei handelt es sich nicht nur um das LeCroy-Oszilloskop, sondern auch um den verwendeten Spektrum-Analysator, Signalgeneratoren und Vektorvoltmeter sowie andere digitale Meßgeräte. Dazu gehören auch das System zur Bestimmung der Strahl-Intensität in ELSA und die zur Messung des ELSA-Dipolfeldes verwendete NMR-Magnetfeldsonde. Beide Komponenten liefern ihre Daten als IEC-konforme Signale.

Zur Abdeckung des IEC-Bereichs durch EPOS wurde zunächst die Software des Kontrollsystems in die Lage versetzt, auch mehrere IEC-Geräte anzusteuern. EPOS wurde mit einem Modul zur *Verwaltung* einer beliebigen Menge von Geräten ausgestattet. Jedes IEC-Gerät kann in EPOS durch einen eindeutigen, vom Benutzer frei definierbaren Namen angesprochen werden. Dadurch wird die in der Regel relativ komplizierte Ansteuerung der Geräte vom Operateur ferngehalten. Will man die Meßdaten eines Gerätes auslesen, so genügt die Angabe des Namens. Im folgenden Beispiel wird durch das Kommando "IECREAD" ein Digitalvoltmeter ausgelesen, welches vom Operateur mit dem Namen "DVM" versehen wurde. Die Daten werden in der EPOS-Variablen "DATA" abgespeichert:

```
IECREAD 'DVM' DATA
```

EPOS bildet den angegebenen Namen "DVM" auf einen Satz von Kontrollsystem-Informationen ab, welche die sofortige Ansteuerung des betreffenden Meßgerätes erlauben. Neben dem "IECREAD"-Kommando gibt es noch eine Reihe anderer Befehle zur Steuerung und Verwaltung von Meßgeräten. Ebenfalls vorhanden sind Kommandos, die aus den gelieferten Daten bestimmte Bereiche oder Zahlenfelder extrahieren und damit die vom Meßgerät gelieferte Information auch in Variablen anderen Typs überführen können. So liefert beispielsweise die NMR-Sonde ihre Daten als "Text", wobei innerhalb des Textes der Magnetfeldwert als Zahl angegeben ist. Durch einen universellen EPOS-Befehl kann man diese Zahl extrahieren und in einer Variablen abspeichern. Danach ist der Magnetfeldwert für weitere Berechnungen oder Steuerungen in EPOS frei verfügbar.

Die bei ELSA verwendeten Meßgeräte liefern in der Regel relativ kompliziert strukturierte Daten. Handelte es sich beim vorangegangenen Beispiel noch um eine einfache Zahl, so gibt zum Beispiel der verwendete Spektralanalysator bis zu vier Kanäle zu je 900 Werten – zusammen mit anderen komplexen Kontrollinformationen – zurück. Die gelesenen Daten sind im allgemeinen noch

nicht aufbereitet und müssen zunächst umgerechnet werden, um physikalisch aussagekräftige Werte darzustellen. Das Auslesen sowie die benötigten Berechnungen sind bei EPOS in einen Befehl für jedes Gerät zusammengefaßt worden. Will man zum Beispiel den Kanal 2 des Analysators (Name: "FSA") in die komplexe Variable "CHAN2" auslesen, so gibt man das Kommando

```
READANALYSATOR/CHANNEL=2 'FSA' CHAN2
```

Die komplexe Variable "CHAN2" kann maximal 900 einzelne Amplitudenwerte für eine diskrete Frequenz aufnehmen. Der Frequenzbereich, die Normierung der Amplituden etc. sind in bestimmten Feldern der Variable gespeichert.

Zum Auslesen von Spur C1 des LeCroy-Oszilloskops (Name: "LECROY") in die komplexe Variable "TRACE1" verwendet man beispielsweise

```
READLECROY/C1 'LECROY' TRACE1
```

Der Operateur merkt vom Auslese-Prozess, den Berechnungen und der den Daten innewohnenden Komplexität nichts — es genügt die Angabe des Geräte-Namens und der Ziel-Variablen, in welche Daten gelesen werden sollen.

2.3 EPOS und das ELSA-Monitorssystem

Prinzipieller Aufbau des Monitorystems

Das ELSA-Monitorssystem wurde von M.Schillo im Rahmen seiner Dissertation konzipiert und entwickelt [23]. Es besteht aus 25 kapazitiven Monitoren mit je vier in die Vakuumkammer isoliert eingelassenen Knopf-Elektroden (siehe Abbildung 2.3) sowie zugeordneter Elektronik. Durch die Bunch-Struktur des im Ring gespeicherten Elektronenstrahls kann an den Knöpfen jeweils ein 500 MHz-Signal kleiner Amplitude abgegriffen werden. Jede Lageänderung des Strahls relativ zu den Knöpfen bewirkt eine Amplitudenänderung der gemessenen Signale. Bildet man das Summen- und Differenzsignal zwischen jeweils zwei ausgewählten Paaren der Elektroden, so kann man ein zur Strahlintensität proportionales Summensignal und ein zur horizontalen bzw. vertikalen Lage des Elektronenstrahls proportionales Differenzsignal erhalten. Die Bildung des Summen- und Dif-

Abbildung 2.3: Querschnitt durch einen ELSA-Monitor

ferenzsignals geschieht in einer HF-Baugruppe. Die so erhaltenen 500 MHz-Signale werden über optional zuschaltbare Verstärker aufbereitet und auf einen Gleichrichtermodul geführt. Diese Baugruppe demoduliert den 500 MHz-Träger durch Einsatz eines Synchron-Detektors. Innerhalb dieses Teils gelangen dies Signale über Phasenschieber auf einen Limiting-Amplifier, der das Signal ohne amplitudenabhängige Phasendrehung auf einen konstanten Pegel verstärkt. Der Pegel ist damit

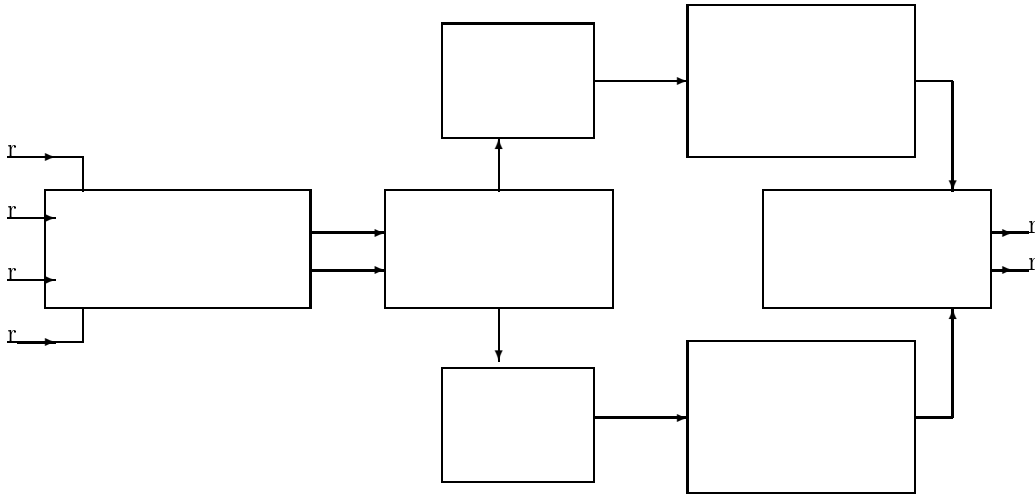


Abbildung 2.4: Vereinfachtes Blockschaltbild der HF-Monitorelektronik

von der Amplitude des *Eingangssignals* unabhängig. Das Blockschaltbild des HF-Teils der Monitorelektronik ist in Abbildung 2.4 skizziert.

Als Resultat verläßt die HF-Baugruppe ein Summen- und Differenzsignal mit einer Bandbreite von 10 MHz. Die Umlauffrequenz von ELSA beträgt ca. 1.8 MHz, damit hat das Monitorsystem ein zur Analyse des Strahls ausreichendes zeitliches Auflösungsvermögen. Durch eine besondere Kalibration kann aus der gelieferten Signalstärke die Lage des Elektronenstrahls relativ zum Mittelpunkt des Monitors berechnet werden. Die Genauigkeit liegt hierbei nach Abschätzungen im Bereich von $\frac{2}{10}$ Millimetern [24].

Um die so aufbereiteten Signale einer Auswertung zuführen zu können, verwendet das ELSA-Monitorsystem eine schnelle Digitalisierungs-Einheit pro Monitor. Diese Einheit wird auch "Sample-Modul" genannt und ist von M. Kiesheyer im Rahmen seiner Diplomarbeit entwickelt worden [11]. Das Modul verwendet schnelle Analog-Digital-Wandler mit einer Abtastrate von maximal 10 MHz. Die Amplitudenaufösung beträgt dabei 8 bit in einem Bereich von 0 bis 2 Volt. Es können 8192 Strahlage-Werte an zeitlich äquidistanten Stützstellen gespeichert und an einen angeschlossenen Prozessor des Kontrollsystems weitergegeben werden. Ein Blockschaltbild der Einheit ist in Abbildung 2.3 aufgeführt.

Die Wandlerrate von 10 MHz ist in Anbetracht der Umlauffrequenz f_{ELSA} von ca. 1.8 MHz ausreichend, um einen einzelnen Strahlumlauf auch in den digitalisierten Daten auflösen zu können. Bei Bedarf kann die Wandlerrate allerdings auch heruntermgesetzt werden.

Für das Sample-Modul sollen an dieser Stelle drei Punkte besonders hervorgehoben werden:

- Die vom HF-Modul gelieferten Signalamplituden sind zu klein, um direkt von der Wandlerelektronik verarbeitet werden zu können. Daher ist der Einsatz eines NF-Vorverstärkers notwendig. Die Steuerung der Verstärkerparameter erfolgt dabei durch zusätzlich auf dem Sample-Modul untergebrachte Elektronik. Der Verstärker liefert als Ausgangsspannung einen Wert zwischen 0 und 2 Volt und ist damit auf den Abtastbereich des Wandlers abgestimmt.
- Das Sample-Modul übernimmt ebenfalls die Ansteuerung von Verstärkern und Phasenschiebern der HF-Baugruppe. Dadurch ist die Kontrolle der gesamten Monitorelektronik vom Sample-

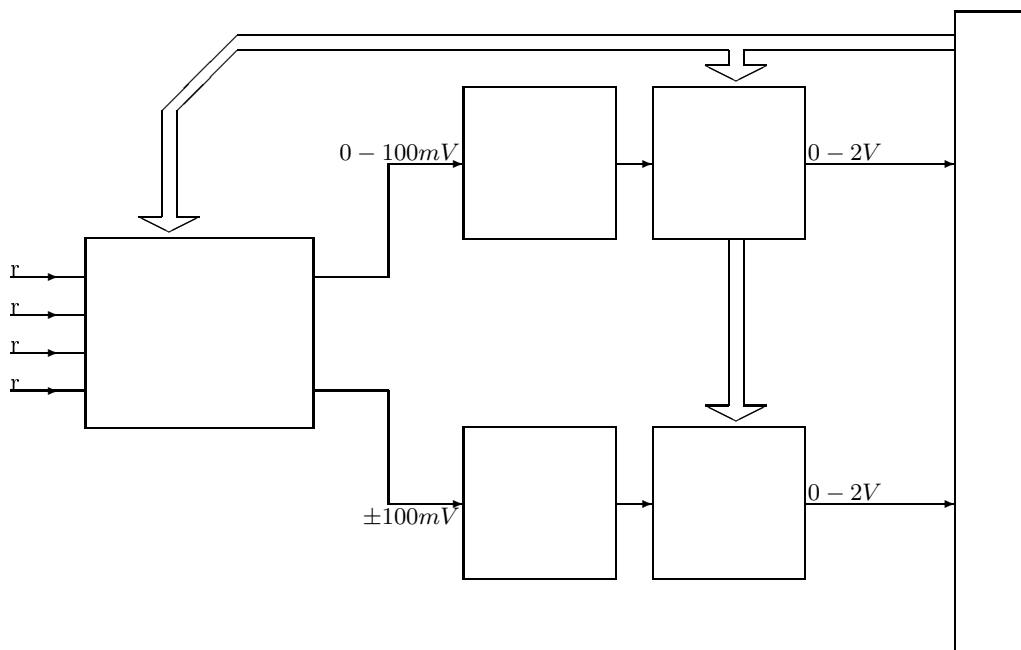


Abbildung 2.5: Gesamtüberblick über die Monitorelektronik

Modul aus durchführbar. Der Anschluß des Moduls an einen MACS-Prozessor erlaubt prinzipiell den Zugriff des ELSA-Kontrollsystems.

- Die den NF-Verstärkern vorgeschalteten Tiefpassfilter dienen zur Unterdrückung des sog. Aliasing-Effekts. Die Ursachen und Auswirkungen dieses Effekts werden in Kapitel 3. dieser Arbeit beschrieben. Die Grenzfrequenz der verwendeten Filter ist auf die Umlauffrequenz der Maschine abgestimmt worden und beträgt in der vorliegenden Konfiguration 1.9 MHz.

Zusammengefaßt liefert eine einzelne Monitoreinheit ein digitalisiertes Summen- sowie Lagesignal an zeitlich äquidistanten Stützstellen. Die so gewonnenen Daten liegen im Speicher des Sample-Moduls zur Weiterverarbeitung durch einen angeschlossenen MACS-Prozessor bereit. Über diesen erfolgt der Transport der Daten zum Kontrollsystem.

Ansteuerung des Monitorystems durch EPOS

In EPOS wurde ein Satz von Befehlen zur Kontrolle der im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Monitorelektronik implementiert. Dazu gehört die Steuerung der Verstärker und Phaseschieber des HF-Moduls sowie die Steuerung der Parameter für den NF-Verstärker. Auch das Sample-Modul kann über entsprechende Kommandos beeinflusst werden, um beispielsweise gewisse Triggerbedingungen zu setzen.

Der wichtigste Befehl ist das Kommando zum Transferieren von gemessenen Strahlagedaten vom Sample-Modul in eine EPOS-Variable. Der Befehl

```
READSAMPLE/DIFF 12 DATA
```

liest das digitalisierte Differenzsignal von Monitormodul 12 in die komplexe Variable DATA ein. Danach stehen die Lagedaten zur weiteren Verarbeitung durch EPOS zur Verfügung. Analog geht

man für das Summensignal vor. Will man die Lageebene wechseln (jede Monitoreinheit kann *entweder* in der x - oder z -Ebene messen), so kann dies durch die Abgabe eines entsprechenden EPOS-Kommandos eingestellt werden.

Durch die in EPOS implementierten Befehle ist das gesamte Monitorsystem für die Steuerung von ELSA verfügbar gemacht worden. Die Ansteuerung der Elektronik erfolgt vollkommen transparent für den bedienenden Operateur, der sich lediglich mit den physikalisch relevanten Aufgaben beschäftigen muß. Komplizierte Einstellvorgänge für die Elektronik oder den Datentransfer sind nicht erforderlich. Durch die Einbindung des Monitorsystems in EPOS steht darüber hinaus die gesamte Funktionalität von EPOS zur Weiterverarbeitung der Daten zur Verfügung.

Integration des Systems zur Korrektur des Closed-Orbit

Das Software-System COCPIT zur Korrektur des Closed-Orbit bei ELSA wurde von J. Wenzel konform zum Format der anderen EPOS-Kommandos implementiert und in die EPOS-Software eingebunden. Es handelt sich um einen Satz von Befehlen, die interaktiv alle Schritte zur Verfügung stellen, die für eine Korrektur der Gleichgewichtsbahn an ELSA notwendig sind. Der genaue Ablauf der eigentlichen Korrektur wird in [28] beschrieben.

Die Eingangsdaten für die Korrektursoftware werden in EPOS-Variablen bereitgestellt. Hierzu gehören im wesentlichen die ausgelesenen und nachfolgend kalibrierten Monitorablagen und der mit EPOS gemessene Maschinenarbeitspunkt. Aus dem Arbeitspunkt und der ELSA-Optik berechnet

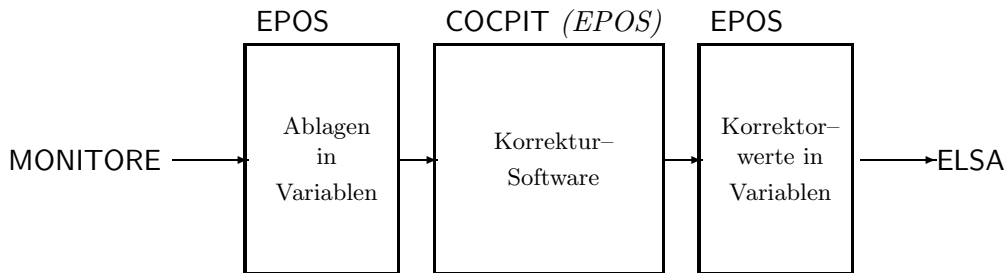


Abbildung 2.6: Einbindung des COCPIT-Systems

COCPIT die erforderlichen Größen zur Lösung der Korrekturaufgabe. Als Resultat werden EPOS-Variablen bereitgestellt, die die gelieferten Korrekturwerte (Kickstärken bzw. Ströme für Netzgeräte) enthalten. Mit diesen Variablen kann EPOS die Einstellung der Korrekturdipole durch normale Zugriffe auf das Kontrollsystem bewerkstelligen. Ausserdem stehen damit sowohl Eingangs- als auch Ausgangsdaten von COCPIT in Variablen zur Weiterverarbeitung zur Verfügung. Dieses Konzept wird durch Abbildung 2.6 skizziert.

2.4 Automatisierung von Meß- und Steueraufgaben

Wie in Punkt 1.1 auf Seite 10 bereits beschrieben wurde, kann EPOS die in einer Datei aufgeführten Kommandos nacheinander automatisch abarbeiten. Die Bearbeitung wird erst mit dem letzten Kommando abgeschlossen. Dieses Konzept kann man beispielsweise dafür benutzen, immer wiederkehrende

Kommandofolgen in einer Datei zu speichern und bei Bedarf aufzurufen. Die maximale Anzahl der in einer Datei enthaltenen Kommandos ist nur durch den Speicherausbau des verwendeten Rechners begrenzt. Ein Programm kann jederzeit vom Operateur abgebrochen werden. Der Abbruch wird dabei nur zwischen zwei Kommandos vorgenommen, um die Ausführung etwa von Setzoperationen nicht inkonsistent werden zu lassen.⁴

Natürlich gibt einem die starre Bearbeitung von Kommando-Listen keine Möglichkeit einer umfassenden *Programmierung*. Hierzu sind vielmehr Konstrukte notwendig, die den Bearbeitungsfluß der Kommandos – abhängig von bestimmten Werten – ändern können. So will man zum Beispiel bestimmte Kommandos überspringen, falls besondere Bedingungen vorliegen, die eine Ausführung dieser Kommandos als nicht sinnvoll erscheinen läßt. Weiterhin tritt dieser Wunsch dann auf, wenn der Operateur nur Teile einer Programmfolge abarbeiten lassen will, abhängig von seiner Eingabe.

Zur Programmierung ist in EPOS ein ganzer Satz von sogenannten Kontrollstrukturen integriert. In der einfachsten Form handelt es sich um *Verzweigungen* und *Abfragen*. Die anderen Kontrollelemente sollen an dieser Stelle nicht aufgeführt werden. Ihre Erklärung soll einem "Handbuch" zu EPOS vorbehalten bleiben.

Bei der *Abfrage* ("IF") handelt es sich um einen Befehl, der abhängig vom Wert einer Variablen (z.B. "gleich oder ungleich 0") eine andere Stelle in einem EPOS-Programm anspringt. Mit diesem Mechanismus kann z.B. der Operateur sog. Flaggen-Variablen definieren und eingeben. Je nach dem Wert einer solchen Variable wird dann die eine oder andere Stelle in einem Programm angesprungen.

Die *Verzweigung* ("JUMP") dient dazu, an einer Stelle des Programms gezielt an eine andere Stelle zu springen und somit die dem aktuellen Kommando nachfolgenden Befehle zu ignorieren. Der Sprung kann hierbei auch *rückwärts* erfolgen, so daß bereits abgearbeitete Befehle noch einmal ausgeführt werden. Zusammen mit dem IF-Befehl kann ein Bediener sogenannte "Schleifen" programmieren, die eine gewisse Gruppe von EPOS-Kommandos mehrfach hintereinander ausführen. Man denke zum Beispiel an das mehrfache Auslesen von Messwerten und anschließende Bildung von Mittelwert und Standardabweichung.

Bereits durch die elementaren Konstrukte IF und JUMP kann man so auf relative einfache Art und Weise EPOS-Programme schreiben, die bestimmte Meßaufgaben automatisch periodisch durchführen können. Die Arbeitspunktmessung als typische Anwendung von EPOS liefert dafür ein Beispiel⁵.

2.5 Datenanalyse, Signalverarbeitung und Grafik

Datenanalyse

EPOS bietet elementare Kommandos zur Datenanalyse. Dazu gehört zunächst die Fähigkeit, einzelne Meßwerte, die in Variablen gespeichert sind, zu einer *Meßreihe* zusammenzufassen. Der VECTOR-Befehl führt unter anderem eine solche Kombination durch. Meßreihen können hierbei ein- oder zweidimensional sein. Im ersteren Fall handelt es sich um eine einfache Liste von Zahlen, die z.B. durch eine Mehrfachmessung einer bestimmten Größe erstellt wurde. Im zweiten Fall handelt es sich um XY-Wertepaare, die z.B. eine gemessene Abhängigkeit $y = f(x)$ ausdrücken sollen. Durch Kombination mehrerer eindimensionaler Reihen kann man allerdings auch weitergehende

⁴So darf beispielsweise das Ändern von Maschinenparametern nicht einfach während der eigentlichen Setzoperation unterbrochen werden, da eventuell inkonsistente Daten entstehen könnten.

⁵Das EPOS-Programm zur automatischen Mehrfachmessung des Arbeitspunktes befindet sich im Anhang der Arbeit.

Aufgabenstellungen bearbeiten. EPOS bietet außerdem die Möglichkeit der Kombination von zwei Meßreihen zu einer XY-Reihe oder das Aufspalten einer XY-Reihe in zwei eindimensionale Reihen an.

Bei bestimmten Aufgabenstellungen ist es nötig, mit den gespeicherten Zahlenkolonnen zu rechnen. Gefragt sind beispielsweise die Addition oder Subtraktion zweier Zahlenreihen. Auch diese Operationen werden durch den **VECTOR**-Befehl abgedeckt. Darüber hinaus ist **VECTOR** in der Lage, Mittelwert und Standardabweichung, Minimal- und Maximalwerte und andere statistische Größen aus einer Meßreihe zu berechnen. Die gewonnenen Werte werden in einer EPOS-Variablen abgelegt.

Als weitergehende Funktion bietet EPOS die Möglichkeit der Berechnung von Näherungskurven ("Fits"). Das hierzu verwendete Kommando heißt **FIT** und berechnet wahlweise Polynominterpolationen oder Fits für fehlerbehaftete Eingangsdaten⁶, wobei im zweiten Fall die Methode der kleinsten Quadrate für die Näherung benutzt wird. Hat man beispielsweise Meßdaten der Art $y = f(x)$ in einer XY-Reihe, so kann man mit **FIT** eine zweite XY-Reihe berechnen, die die Näherungskurve (und deren Parameter) zu den gegebenen Daten enthält.

Neben dem **FIT**-Befehl gibt es noch ein Kommando zur Erzeugung von Histogrammen. Hierbei werden einzelne Zahlen aus einer Meßreihe gelesen und in einer Häufigkeitsverteilung untergebracht. Die Häufigkeitsverteilung wird dabei wiederum in einer XY-Reihe gespeichert. Da EPOS aber mit den Reihen wie beschrieben rechnen kann, ist der Bediener so in der Lage, zum Beispiel auch Histogramme zu addieren oder zu subtrahieren.

Durch den **CONVERT**-Befehl lassen sich auch die Daten komplexer Variablen in eine Meßreihe konvertieren. Hat man z.B. eine **SAMPLE**-Variable mit einem gespeicherten Oszillogramm (Spannung gegen Zeit), so kann man die Daten dieser Variable in eine XY-Reihe überführen, wobei dann der X-Teil die Zeitinformation und der Y-Teil die Spannungsinformation (als Zahlen) aufnimmt. Auf diese Weise lassen sich umfangreiche Daten schnell reduzieren. Auch die Bildung von Mittelwerten etc. dieser Daten ist dann wiederum mit **VECTOR** möglich.

Alle Daten in EPOS lassen sich bei Bedarf in eine oder mehrere Plattendateien abspeichern und wieder laden. So kann man die Aufnahme und die genaue Analyse von Meßdaten weitgehend voneinander trennen.

Digitale Signalverarbeitung mit EPOS

Eine hauptsächliche Aufgabenstellung für die Entwicklung von EPOS bestand darin, ein umfassendes Werkzeug zur *Analyse* der vom **ELSA**-Monitorsystem gelieferten Daten bereitzustellen. Dazu kommt noch die Verarbeitung der Daten von digitalen Oszilloskopen und Spektrum-Analysatoren. Die Manipulation der Daten solcher Signalquellen soll hier vereinfacht unter dem Begriff *Signalverarbeitung* zusammengefaßt werden. Die für EPOS relevanten Signale sind hierbei:

- Im Zeitbereich :
Signale der Art $Y = f(t)$, z.B. Ablagesignale des Monitorsystems
- Im Frequenzbereich :
Spektren der Art $Y = f(\nu)$, z.B. berechnete oder gemessene Frequenz-Spektren des **ELSA**-Strahls

Das Auslesen des Ablagesignals an einem **ELSA**-Monitor ergibt ein Signal im Zeitbereich: Zugeordnet zu zeitlich äquidistanten Stützpunkten t_i werden digitalisierte Daten $d_i(t_i)$ geliefert. Auch das Auslesen eines Speicheroszilloskops liefert in der Regel solche Signale. Das Auslesen eines Spektral-Analysators liefert dagegen für äquidistante, digitalisierte Frequenzwerte f_i die entsprechenden Amplituden $a_i(f_i)$.

⁶Der **FIT**-Operator wurde von J.Wenzel entwickelt.

EPOS erlaubt weitgehende Manipulationsmöglichkeiten mit den Signalen oder Spektren. Zunächst soll noch einmal betont werden, daß alle Daten immer in komplexen EPOS-Variablen abgelegt sind. Die Verarbeitung der Signale erfolgt über die Angabe bestimmter Kommandos, welche aus den angegebenen Daten neue Daten erzeugen und in Variablen speichern. Die einfachsten Operationen bestehen hierbei im *Rechnen mit Signalen und Spektren*. Durch bestimmte Kommandos ist z.B. die Addition von Signalen oder die Multiplikation von Spektren möglich. Aber auch die Addition einzelner Zahlen zu allen Werten eines Signals oder Spektrums ist erlaubt⁷.

EPOS beinhaltet einen umfassenden Satz digitaler Filter. Digitale Filter werden durch mathematische Algorithmen gebildet, die den Effekt von analogen Tiefpass- oder Bandpass-Filtern auf ein Signal nachvollziehen. Die Anwendung digitaler Filter auf digitalisierte Daten entspricht dabei im Resultat der Anwendung analoger Filter auf analoge Signale⁸. Die Filtereinheit von EPOS wurde von M.Picard entwickelt und ist in [18] genauer beschrieben. Implementiert wurden

- Hochpass- und Tiefpass-Filter 1. und 2. Ordnung
- Bandpass- und Bandsperren-Filter 1. und 2. Ordnung

Die Anwendung digitaler Filter ist bei ELSA z.B. dort gegeben, wo ein Signal speziell auf das Auftauchen einzelner Frequenzkomponenten untersucht werden soll. Aber auch die Glättung von Daten durch gezielte Eliminierung von höherfrequenten Anteilen (z.B. bei der Analyse der Spillout-Struktur) ist denkbar.

Zusätzlich zu den Filtern erlaubt EPOS auch weitergehende Manipulationen der Werte. Als Auswahl der Möglichkeiten sei hier erwähnt:

- Null-Unterdrückung
- Abschneiden positiver oder negativer Werte
- Digitales Differenzieren oder Integrieren
- Abschneiden oder Verschieben im Zeit/Frequenzbereich

Der Prozeß des digitalen Differenzierens liefert bei ELSA-Signalen beispielsweise Aufschluß über plötzliche Signalsprünge oder Spikes. Das Integrieren kann zur Analyse der Qualität des Spillouts verwendet werden. Natürlich lassen sich die oben genannten Möglichkeiten auch kombinieren. So wäre die Tiefpass-Filterung des Spillout-Signals, die Eliminierung von störenden Anteilen durch eine Bandsperre und eine anschließende Integration denkbar.

Eine Hauptaufgabe der Signalverarbeitung bei ELSA besteht im Berechnen und Auswerten von Frequenzspektren. Das Aussehen des Lagesignal-Spektrums gibt wichtige Aufschlüsse über die Arbeit des Beschleunigers. Insbesondere können wichtige Größen wie der Arbeitspunkt oder die Synchrotronfrequenz aus dem Spektrum berechnet werden. Zur Erzeugung von Spektren aus Signalen ist ein Befehl zur Berechnung schneller Fourier-Transformationen implementiert worden ("FFT"). Hierdurch kann aus einem Signal im Zeitbereich ein Spektrum berechnet werden, welches dann in einer komplexen Variable abgelegt wird. Die Analyse eines solchen Spektrums kann dann durch den PEAKSEARCH-Befehl erfolgen. Dieses Kommando sucht und vermißt Spektralpeaks mit größtmöglicher Präzision. Die genaue Beschreibung des Aufbaus und der Arbeitsweise der beiden Befehle erfolgt in Kapitel 4. dieser Arbeit.

Das Grafiksystem

Eine der wichtigsten Eigenschaften des EPOS-Systems ist die umfangreiche Unterstützung von Grafiken auf dem Bildschirm einer Workstation oder angeschlossener Terminals. Das Fehlen aus-

⁷Natürlich sind auch alle anderen Operation wie Subtraktion, Multiplikation und Division eingebaut worden.

⁸Bis auf geringe Abweichungen, die in der Regel vernachlässigt werden können.

reichender Grafikmöglichkeiten auf den ELSA-Bedienpulten erwies sich in der Vergangenheit als stark einschränkend für die Steuerung und Überwachung der Maschine. Somit wurde die Entwicklung eines Grafikpaketes unter besonderer Berücksichtigung der Beschleunigerphysik an ELSA in die Aufgabenstellung dieser Arbeit integriert.

Um Grafik einer möglichst hohen Qualitätsstufe erzeugen zu können, wurde das Grafiksystem von EPOS speziell auf die verwendete Workstation und die dort bereitgestellte Software (X-Windows, GKS) abgestimmt. Als Ergänzung wurde aber auch der Anschluß einfacher Terminals mit Tektronix-Emulation ermöglicht.

Die Grafiksoftware der Workstation erlaubt die Generierung von farbigen Bildern oder Diagrammen in sogenannten *Fenstern*. Ein Fenster besteht auf dem Bildschirm aus einem Rahmen, der eigentlichen Grafik-Fläche und Elementen zum Vergrößern, Verkleinern oder Löschen des Fensters selbst. Die Bedienung dieser Elemente sowie die Positionierung und das Verschieben des Fensters auf dem Schirm erfolgt durch die an die Workstation angeschlossene *Maus*. Zu einem Zeitpunkt kann der Schirm mehrere Fenster mit jeweils unterschiedlichem Inhalt anzeigen. Dies ermöglicht EPOS die gleichzeitige Darstellung unterschiedlicher Diagramme. Einen Eindruck vom Schirm der Workstation bei einem Einsatz von EPOS liefert Abbildung 2.7.

Abbildung 2.7: Typisches Schirmbild mit Grafik

Es würde an dieser Stelle zu weit führen, alle Möglichkeiten des Grafiksystems vorstellen zu wollen. Stattdessen sollen die in EPOS implementierten Fähigkeiten stichwortartig aufgezählt werden:

- EPOS erlaubt die Darstellung von Signalen, Spektren und beliebigen Meßreihen als XY-Diagramm. Es genügt die Angabe der Datenvariable.
- Der X- und Y-Bereich eines Diagramms kann auch durch *verschiedene* Variablen definiert werden. So kann man z.B. zwei Meßreihen gegeneinander auftragen. Auch die Kombination zweier Signale in einem Diagramm ist möglich.

- Die Größe und das Format eines Fensters können frei definiert werden. Für bestimmte Anwendungen gibt es vordefinierte Größen.
- Ein Fenster kann mehrere Datenfelder darstellen. Die Daten können dabei als Punkt- oder Linien- bzw. Balkendiagramme visualisiert werden. Die Zuordnung von Farben und Linien- bzw. Marker-Typen ist frei wählbar.
- Die Anzahl der Diagramme ist nur durch den Speicher des Rechners limitiert. Jedes Diagramm kann einem beliebigen Fenster frei zugeordnet werden. Dadurch können auch mehrere Fenster durchaus die gleichen Diagramme enthalten. Die Menge der von EPOS verwalteten Diagramme kann größer sein als die Anzahl der dargestellten Fenster.
- Alle Diagramme enthalten beschriftete Koordinatensysteme, Hilfslinien und optionale Texte. Die Farbe sowie das Aussehen aller Elemente kann durch spezielle Kommandos an die Wünsche des Bedieners angepaßt werden.
- Alle Zeichnungen können in (fast) beliebigen Größen auf einem Laserdrucker in hoher Qualität ausgegeben werden.

Die Meßwert-Diagramme in dieser Arbeit sind ausnahmslos durch das EPOS-Grafiksystem erzeugt und auf einem POSTSCRIPT-Laserdrucker ausgegeben worden.

2.6 Der Strukturplan der Software

Nachdem in den vorangegangenen Abschnitten ein Eindruck von der Arbeit mit EPOS vermittelt worden ist, soll nun der strukturelle Aufbau des Programms skizziert werden. Dabei wird auf den Strukturplan in Abbildung 2.8 Bezug genommen.

Jede Eingabe des Operateurs gelangt zunächst in das Eingabe/Ausgabe-Modul IO. Hier werden die eingegebenen Kommandos so aufbereitet, daß sie für eine nachfolgende Analyse in standardisierter Form vorliegen. Diese Analyse wird durch den PARSER vorgenommen: Die Kommandos werden gelesen und nach dem Ersetzen von Symbolen (gespeichert im SYMBOL-Modul) in den Befehl, die Argumente und zugeordnete Optionen aufgespalten. Alle Argumente werden auf ihren Typ hin überprüft und die Veträglichkeit der Optionen mit dem gegebenen Befehl wird getestet. Sind alle diese Prüfungen erfolgreich verlaufen, so wird für die angegebenen Variablen eine interne Kennung aus dem Variablenspeicher VARIABLE besorgt. Falls die angegebenen Objekt-Variablen *erzeugt* werden müssen, so geschieht auch dies hier im Parser. Er allokiert den nötigen Speicherplatz und integriert das neu geschaffene Objekt im Speicher des VARIABLE-Moduls. Tritt die Variable dann noch einmal auf, kann der Parser sofort auf die interne Kennung zugreifen.

Durch die Analyse und Zerlegung der Befehle konstruiert der Parser eine *komprimierte Beschreibung* der eingegebenen Befehlsfolge im Befehlsspeicher EXEC. Dieser Speicher enthält nach der Arbeit des Parsers eine Liste, die nacheinander die auszuführenden Befehle, ihre Argumente und Optionen beschreibt. Das Format dieser Liste ist dabei so gewählt, daß die Bearbeitung der Einträge so schnell wie möglich erfolgen kann. Jedes Kommando wurde dazu in eine interne Kennung verwandelt, die sofortigen Zugriff auf den Teil der Software gestattet, der die Rechnerbefehle zur Bearbeitung der gestellten Aufgabe enthält. Hat der Parser seine Arbeit beendet, so übergibt er diese Liste dem PROZESSOR. Dieses Modul arbeitet nun nacheinander alle dort befindlichen Befehle ab und ruft dabei die betreffenden Teile des Codes auf.

Alle Kommandos von EPOS sind durch sogenannte *Operatoren* in der OPERATOR-Bibliothek realisiert. Ein Operator besteht aus einem Programmteil zur Übernahme der vom PROZESSOR gelieferten Daten und einem weiteren Teil, der die gewünschte Verarbeitung der Daten übernimmt.

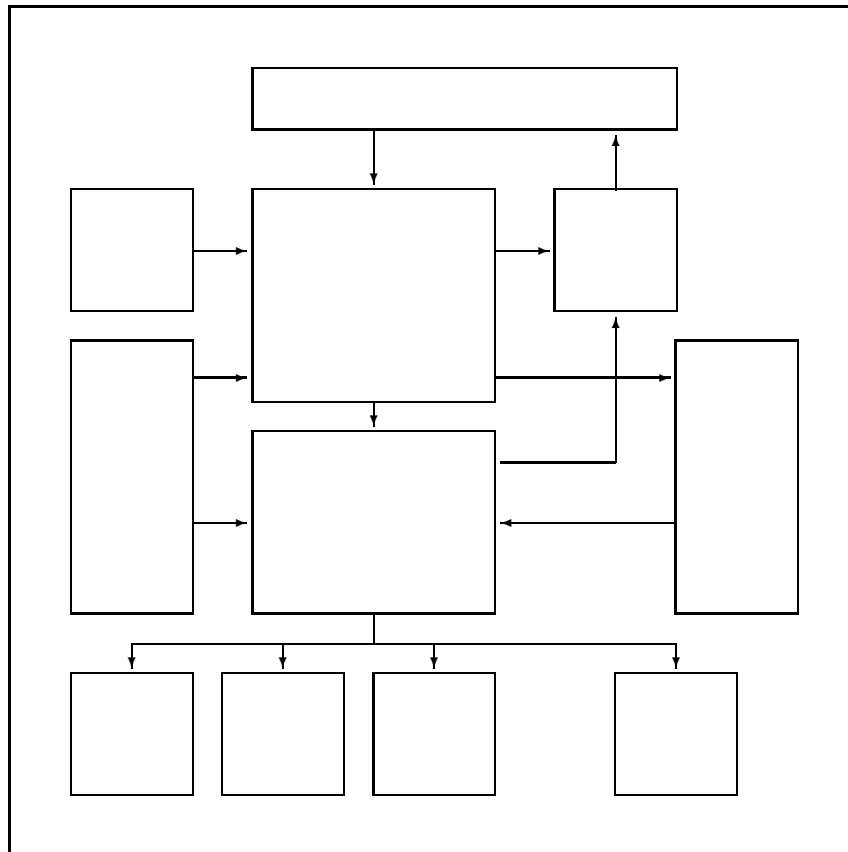


Abbildung 2.8: Strukturplan der Software

Die Resultate der Berechnungen werden dann vom Operator in die entsprechend übergebenen Variablen (deren interne Kennung ja bekannt ist) eingetragen. Jeder Operator meldet nach Abschluß der Berechnungen den Erfolg oder Mißerfolg an den PROZESSOR zurück. Dieser setzt im Falle des Erfolges die Abarbeitung der Liste im EXEC-Speicher fort, oder unterbricht anderenfalls die Bearbeitung und gibt eine Fehlermeldung aus.

Der Operator-Bibliothek beigeordnet ist eine Bibliothek von Routinen, die den direkten Zugriff auf das ELSA-Kontrollsystem gestatten ("ELSA"), sowie ein Modul zur Verwaltung externer Meßgeräte mit IEC-Bus ("IEC"). Der bereits erwähnte Passwortschutz für Parameter ist in das ELSA-Modul integriert. Ein weiterer Teil der Operator-Bibliothek besteht in den Routinen des Software-Systems COCPIT zur Korrektur des Closed-Orbit bei ELSA. Durch die einfache Integration der Korrektursoftware in die Menge der Operatoren kann man mit dem Korrektursystem über die Eingabe von EPOS-Befehlen kommunizieren.

Aus dem beschriebenen Ablauf wird deutlich, daß EPOS keinen Unterschied zwischen der Bearbeitung interaktiv eingegebener Kommandos oder Programm-Dateien macht. Die einzelnen Befehle aus einer Programm-Datei werden ebenfalls vom Parser analysiert und in die EXEC-Liste eingetragen, die dann vom PROZESSOR abgearbeitet wird. Die *Länge* der EXEC-Liste ist dabei durch die Anzahl der Programmbefehle gegeben. Aus diesem Grund ist die Menge der Befehle, die maximal in einem EPOS-Programm stehen dürfen, nur durch den Speicherplatz des verwendeten Rechners begrenzt.

3. Grundlagen für die Arbeitspunkt–Messung an ELSA

Dieses Kapitel beschreibt das der Arbeitspunktmessung an ELSA zugrundeliegende theoretische Konzept.

Im Rahmen der linearen Maschinenoptik wird zunächst die Definition des Arbeitspunktes Q vorgestellt. Darauf aufbauend kann abgeleitet werden, wie sich der Arbeitspunkt in dem von einem Positionsmonitor gelieferten Ablagesignal über die Betatron–Schwingung äußert. Dazu wird zunächst der Übergang von einem einzelnen in der Maschine umlaufenden Teilchen zu einem *kohärent* schwingenden Ensemble diskutiert, um dann durch die Analyse des vom Monitor gelieferten *Signalspektrums* eine genaue Meßvorschrift für die Bestimmung von Q zu erhalten. Hierbei wird sich allerdings herausstellen, daß der ganzzahlige Teil des Arbeitspunktes nicht rekonstruiert werden kann. Zur Ermittlung des Signalspektrums aus dem Monitorsignal wird eine schnelle diskrete Fouriertransformation verwendet. Die durch die Diskretisierung auftretenden systematischen Fehler können berechnet und durch ein Interpolationsverfahren korrigiert werden. Dadurch läßt sich die Genauigkeit des Meßverfahrens für den Arbeitspunkt erheblich steigern.

Eine ausführliche Darstellung der in diesem Kapitel nur skizzenhaft vorgestellten theoretischen Berechnungen findet sich z.B. in [13],[27],[25]. Die konkrete Anwendung der theoretischen Überlegungen für die Bestimmung des Arbeitspunktes bei ELSA folgt in Kapitel 4.

3.1 Definition des Arbeitspunktes

Zur Beschreibung der Teilchenbahnen in einem Kreisbeschleuniger wird üblicherweise ein entlang der Sollbahn mitbewegtes, lokal kartesisches Dreibein verwendet. Der jeweilige Ursprung dieses lokalen Koordinatensystems liegt auf der Sollbahn und wird durch den Vektor r_0^* definiert (siehe Abb. 3.1). Die Position auf der Sollbahn wird durch s gegeben.

Als Trajektoriengleichung der Elektronen erhält man in der *linearen* Maschinenoptik für die horizontale und vertikale Bewegung die *Hill'sche Differentialgleichung*:

$$y''(s) - \left(k(s) - \frac{1}{\rho(s)^2} \right) y(s) = \frac{1}{\rho(s)} \frac{p - p_0}{p_0} \quad (3.1)$$

Die Ableitung " ' " bezeichnet hier die Operation $\frac{d}{ds}$. Der Sollimpuls der Teilchen heißt p_0 , der (evtl. davon abweichende) aktuelle Impuls wird mit p angegeben. Die Größe $k(s)$ beschreibt die auf die Sollenergie normierte Quadrupolstärke

$$k := \frac{e}{p_0} g, \quad (3.2)$$

wobei $g := \frac{\partial B}{\partial x}$ den Quadrupolgradienten angibt (e ist die Elementarladung, negativ für Elektronen). Der Krümmungsradius der Dipolmagnete ist definiert durch

$$\rho := \left| \frac{p_0}{eB} \right| \quad (3.3)$$

Abbildung 3.1: Mitbewegtes, lokales Koordinatensystem

Zur Lösung der Bewegungsgleichung separiert man die Funktion $y(s)$ in einen zur Impulsabweichung $\frac{p-p_0}{p_0}$ proportionalen Anteil und einen zweiten Summanden, der die Schwingung des Teilchens um die Sollbahn beschreibt:

$$y(s) = \underbrace{D(s)\frac{p-p_0}{p_0}}_{\text{dispersiver Teil}} + \underbrace{y_\beta(s)}_{\text{"Schwingung"}} \quad (3.4)$$

Als Proportionalitätsfunktion im ersten Term wird $D(s)$ eingeführt, die *Dispersionsfunktion*. Durch $D(s)$ beschreibt der erste Summand die "Verformung" der Sollbahn an der Stelle s abhängig von der Impulsabweichung.

Die Hill'sche Differentialgleichung (3.1) zerfällt nun mit diesem Ansatz für $y(s)$ in

$$y_\beta''(s) - \left(k(s) - \frac{1}{\rho(s)^2}\right) y_\beta(s) = 0 \quad (3.5)$$

$$D''(s)\frac{p-p_0}{p_0} - \left(k(s) - \frac{1}{\rho(s)^2}\right) D(s)\frac{p-p_0}{p_0} = \frac{1}{\rho(s)} \frac{p-p_0}{p_0} \quad (3.6)$$

Vernachlässigt man eine etwaige Impulsabweichung des Teilchens, so genügt es, die erste Differentialgleichung (3.5) zu betrachten. Sie beschreibt die Schwingung eines Teilchens mit dem Sollimpuls p_0 um die Sollbahn. Für die horizontale und vertikale Bewegung ergeben sich damit zwei voneinander unabhängige Differentialgleichungen gleichen Typs. Hierbei bezeichnet jetzt und im weiteren x die Bewegung in der horizontalen und z die Bewegung in der vertikalen Ebene:

$$\begin{aligned} x_\beta''(s) - K_x(s)x_\beta(s) &= 0 && \text{horizontale Bewegung} \\ z_\beta''(s) - K_z(s)z_\beta(s) &= 0 && \text{vertikale Bewegung} \end{aligned}$$

Der Unterschied liegt in den entsprechend der Magnetfeldkonfiguration gegebenen K -Funktionen:

$$K_x(s) = k(s) - \frac{1}{\rho(s)^2} \quad \text{und} \quad K_z(s) = -k(s) \quad (3.7)$$

$k(s)$, $\rho(s)$ und damit auch $K(s)$ sind stückweise konstante Funktionen mit der Periodizität der Sollbahnlänge L des Kreisbeschleunigers. Bei bekannten $k(s)$ und $\rho(s)$ kann man die Bewegungsgleichung mit dem *pseudoharmonischen* Ansatz der Art

$$x_\beta(s) = \sqrt{\epsilon_x} \sqrt{\beta_x(s)} \cos(\psi(s) + \phi_{0x}) \quad (3.8)$$

lösen. Den Ausdruck für $x_\beta(s)$ bezeichnet man als analytische Darstellung der "horizontalen Betatron-Schwingung" des Teilchens um die Sollbahn. Bei dem gewählten Ansatz (3.8) fuer $x_\beta(s)$ ist

$$\psi(s) = \int_0^s \frac{ds'}{\beta_x(s')} \quad \begin{array}{l} \epsilon_x \quad \text{die horizontale Emittanz,} \\ \beta_x \quad \text{die horizontale Betafunktion,} \\ \text{der Phasenvorschub zwischen 0 und } s \\ \phi_{0x} \quad \text{ein konstanter Phasen-Offset} \end{array}$$

Die oben aufgeführte Lösung gilt natürlich auch für die z -Ebene, man ersetzt lediglich die Größen β_x , ϵ_x und ϕ_{0x} durch die entsprechenden Größen der vertikalen Bewegung.

Der in Gleichung (3.8) auftretende Phasenvorschub ψ der Betatron-Schwingung ist nach einem Umlauf des betrachteten Teilchens, ausgehend von s_0 , gerade

$$\psi_L(s) = \int_{s_0}^{s_0+L} \frac{ds'}{\beta_x(s')} \quad (3.9)$$

Da aber die Betafunktion $\beta(s)$ periodisch mit L ist, wird dieses Integral *unabhängig von s_0* . Diese wichtige Eigenschaft führt zur Definition des *Arbeitspunktes Q* :

$$2\pi Q_x := \int_s^{s+L} \frac{ds'}{\beta_x(s')} = \int_0^L \frac{ds'}{\beta_x(s')} = \oint \frac{ds'}{\beta_x(s')} \quad (3.10)$$

und somit zu

$$Q_x = \frac{1}{2\pi} \oint \frac{ds'}{\beta_x(s')} \quad (3.11)$$

Für die vertikale Bewegung gilt natürlich die gleiche Betrachtung, so daß man genau immer vom sogenannten x -Arbeitspunkt Q_x bzw. vom z -Arbeitspunkt Q_z spricht. Vereinfacht gesprochen beschreibt der Arbeitspunkt die Anzahl der Betatron-Schwingungen *pro Umlauf* des betrachteten Teilchens in der Maschine.

Um ein resonanzartiges Anwachsen der Betatron-Amplituden und dadurch hervorgerufenen Strahlverlust zu vermeiden, wird Q_x bzw. Q_z in der Regel so eingestellt, daß Q weder ganzzahlig noch eine einfache rationale Zahl der Art $\frac{n}{m}$ ist¹ (n, m sind kleine natürliche Zahlen). Für Speicherringe gilt ab einer gewissen Größe die halbempirische Abschätzung $Q \sim \sqrt{R}$, wobei R der mittlere Maschinenradius ist [25]. Bei ELSA liegt der Normal-Arbeitspunkt für Q_x bzw. Q_z typischerweise zwischen 4 und 5 (der mittlere ELSA-Radius beträgt ca. 26m).

3.2 Das Frequenzspektrum des ELSA-Strahls

Die Betatron-Schwingung im Monitorsignal

Bestimmt man – bei festgehaltenem Arbeitspunkt Q – die pseudoharmonische Schwingung x_β eines Teilchens um die Sollbahn an einem festen Punkt s_0 , indem man die jeweilige *Ablage* $x_\beta(s_0)$ bei

¹Verallgemeinert gilt im Falle von – bedingt durch Justierfehler und Feldungenauigkeiten – immer vorhandenen Nichtlinearitäten des Führungsfeldes die Einstell-Bedingung $mQ_x + nQ_z \neq l$, wobei l ebenfalls eine kleine natürliche Zahl ist.

jedem Umlauf analysiert, so verhalten sich die gemessenen Ablagen in der Zeit wie die Amplituden einer harmonischen Schwingung, deren Schwingungsfrequenz lediglich durch den Arbeitspunkt und die Umlauffrequenz des Teilchens bestimmt ist.

Zur Herleitung dieses Resultats betrachtet man die Ablage *eines* Teilchens an der Stelle s_0 beim Umlauf mit der Nummer k [21]. Das Teilchen führe horizontale Betatron-Schwingungen um die Sollbahn ($x = 0$) aus, die einzelnen Umläufe seien nummeriert mit $k = 0, 1, 2, 3, \dots$, die Ablage nach dem k -ten Umlauf sei gegeben durch $x_k^{s_0}$ ².

Nach k Umläufen in der Maschine beträgt der Phasenvorschub der Betatron-Schwingung gemäß Gleichung (3.16) unter Berücksichtigung der Startphase ϕ_{0x} gerade

$$\psi_k^{s_0} = \int_{s_0}^{s_0+kL} \frac{ds'}{\beta(s')} = 2\pi Qk + \phi_{0x} \quad (3.12)$$

Damit ergibt sich die Ablage $x_k^{s_0}$ beim k -ten Umlauf als

$$x_k^{s_0} = \sqrt{\epsilon_x} \sqrt{\beta(s_0)} \cos(2\pi Qk + \phi_{0x}) \quad (3.13)$$

Sind die Teilchen bei den relevanten Maschinen-Energien ultrarelativistisch (für Elektronen im GeV-Bereich ist dies der Fall), dann kann die Umlauffrequenz ω_0 in guter Näherung als konstant angesehen werden:³

$$\omega_0 = 2\pi \frac{c}{L} \quad c: \text{ Lichtgeschwindigkeit} \quad (3.14)$$

Der Zeitpunkt t_k , zu welchem ein Teilchen beim k -ten Umlauf die Stelle s_0 erreicht, errechnet sich als $t_k = \frac{L}{c}k$, und damit ergibt sich wegen $2\pi k = \omega_0 t_k$ die Beziehung für die Ablage x and der Stelle s_0 zum Zeitpunkt t_k :

$$x_k^{s_0}(t_k) = \sqrt{\epsilon_x} \sqrt{\beta(s_0)} \cos(Q\omega_0 t_k + \phi_{0x}) \quad (3.15)$$

Führt man an der Stelle von $Q\omega_0$ die *Betatronfrequenz* ω_β ein, und faßt man die Amplitudenterme zur Konstanten $A_{\epsilon\beta s_0}$ zusammen, so ergibt sich die Gleichung einer einfachen harmonischen Schwingung mit der Betatronfrequenz ω_β :

$$x_k^{s_0}(t_k) = A_{\epsilon\beta s_0} \cos(\omega_\beta t_k + \phi_{0x}) \quad (3.16)$$

Der Arbeitspunkt ist mit dieser Setzung eindeutig gegeben durch

$$Q = \frac{\omega_\beta}{\omega_0} \quad (3.17)$$

und damit einer Messung durch einen Positionsmonitor zugänglich.

Durch Analyse der Schwingungsfrequenz in den gemessenen Ablagewerten x_k an einer festen Stelle kann also *im Prinzip* der Arbeitspunkt Q bestimmt werden – mit einer Einschränkung:

Wie im vorangegangenen Abschnitt bemerkt, ist Q in der Regel größer als 1, was bedeutet, daß ein Teilchen *pro Umlauf in der Maschine* deutlich mehr als eine Betatron-Schwingung ausführt. Da ein Positionsmonitor an der Stelle s_0 jeweils nur *eine* "Messung" der Ablage pro Umlauf durchführen kann, läßt sich die Betatron-Schwingung und insbesondere die Betatron-Frequenz ω_β nicht eindeutig rekonstruieren – die Information über die während eines Umlaufes ausgeführten *ganzen* Schwingungen ist verloren gegangen. Um eine Meßvorschrift für die Bestimmung des Arbeitspunktes Q zu erhalten, kann man das von einem Positionsmonitor gelieferte Signal in Hinsicht auf seine *Frequenzverteilung* analysieren. Bei der nun folgenden Analyse wird sich zeigen, daß das Frequenz-Spektrum des Ablage-Signals ein charakteristisches Muster aufweist, dessen Interpretation direkt auf den Nachkomma-Teil des Arbeitspunktes Q führt.

²Der begleitende Index β wird bei x im folgenden weggelassen. Implizit handelt es sich bei x immer um die horizontale Schwingung x_β .

³Eventuelle Abweichungen von ω_0 , z.B. bedingt durch eine Impulsabweichung $p - p_0 \neq 0$, werden für die weitere Betrachtung vernachlässigt.

Theoretische Beschreibung des idealisierten Frequenzspektrums

Um das bei der Analyse des Monitorsignals anfallende Frequenz-Muster zu verstehen, muß man zunächst das Spektrum ermitteln, welches ein *einzelnes* umlaufendes Teilchen erzeugt. Von hier aus kann dann später auf ein Ensemble von Teilchen übergegangen und somit eine Annäherung an die realen Verhältnisse im Beschleuniger erreicht werden.

Ein einzelnes in der Maschine auf Soll-Orbit umlaufendes punktförmiges Teilchen mit der Ladung e stellt einen Strom dar und kann somit durch die zeitabhängige lineare Ladungsdichte $\lambda(t)$ beschrieben werden (siehe z.B. [25]) :

$$\lambda(t) = \frac{e}{v} \sum_{k=-\infty}^{k=\infty} \delta(t - kT_0) \quad (3.18)$$

Hierbei beschreibt v die Geschwindigkeit des Teilchens und $T_0 = L/v = 2\pi\omega_0^{-1}$ die Umlaufzeit in der Maschine. Ein eventuell auftretender Phasen-Offset wird als 0 angenommen. k indiziert wie in den vorangegangenen Betrachtungen über x_β einen einzelnen Umlauf.

Da es sich bei $\lambda(t)$ um eine periodische Funktion (mit Periode T_0) handelt, kann der Ausdruck in eine Fourier-Reihe überführt werden. Es ergibt sich

$$\begin{aligned} \lambda(t) &= \sum_{n=0}^{\infty} A_n \cos \frac{n\pi t}{T_0/2} + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \sin \frac{n\pi t}{T_0/2} \\ &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n e^{i\omega_0 n t} \end{aligned}$$

Die Fourier-Koeffizienten a_n sind dabei eindeutig bestimmt durch

$$a_n = \frac{1}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} \lambda(t) e^{-\frac{i\pi n t}{T_0/2}} dt = \frac{1}{T_0} \frac{e}{v} \quad (3.19)$$

und die Darstellung von $\lambda(t)$ als Fourier-Reihe resultiert in der reellwertigen Funktion

$$\lambda(t) = \frac{e}{vT_0} \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{i\omega_0 n t} = \frac{e}{L} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \cos(n\omega_0 t) \quad (3.20)$$

In diesem Ausdruck erkennt man, daß das Spektrum von λ eine unendliche Anzahl von diskreten Frequenzen enthält. Es handelt sich um die Umlauffrequenz ω_0 der Maschine und positive bzw. negative Harmonische gleicher Amplitude.

In der jetzigen Stufe der Analyse soll nun zur Vereinfachung angenommen werden, daß es sich beim Monitor um einen Sensor handelt, der seine Information aus dem *elektromagnetischen Feld* bezieht, welches die umlaufende Punktladung mit sich führt. Ein solcher Monitor wäre z.B. ein kapazitiver Knopfmonitor, wie er bei ELSA eingesetzt wird. Für hochrelativistische Teilchen wird das elektromagnetische Feld in eine Ebene senkrecht zur Bewegungsrichtung gebündelt, wobei das Maß dieser Bündelung durch das Verhältnis von Teilchenenergie zu Ruheenergie $\frac{E}{E_0}$ gegeben ist. Bei Elektronen im GeV-Bereich kann man in guter Näherung von einer vollständigen Bündelung ausgehen. Der (idealisierte) Monitor erzeugt nun bei jedem Teilchenumlauf ein Signal exakt zu dem Zeitpunkt, an welchem das Teilchen die Stelle s_0 passiert. Das vom Monitor gelieferte Lagesignal ist hierbei proportional zur linearen Ladungsdichte $\lambda(t)$ und – was gerade die Aufgabe des Monitorsystems ausmacht – proportional zur *Position des Teilchens* relativ zum Soll-Orbit an der

Stelle s_0 in der Maschine. Idealerweise⁴ sollte für das vom Monitorsystem gelieferte Signal gelten:

$$d_{MON}(t) = M\lambda(t)x(t) \quad (3.21)$$

Hierbei bezeichnet $x(t)$ die *Ablage des Teilchens vom Soll-Orbit* und M eine willkürliche Proportionalitätskonstante. Der Begriff "Ablage" bezeichnet im weiteren immer die *horizontale* Ablage an der Stelle s_0 . Sie setzt sich zusammen aus einem festen *Offset* $x_{c.o.}$ und der momentanen

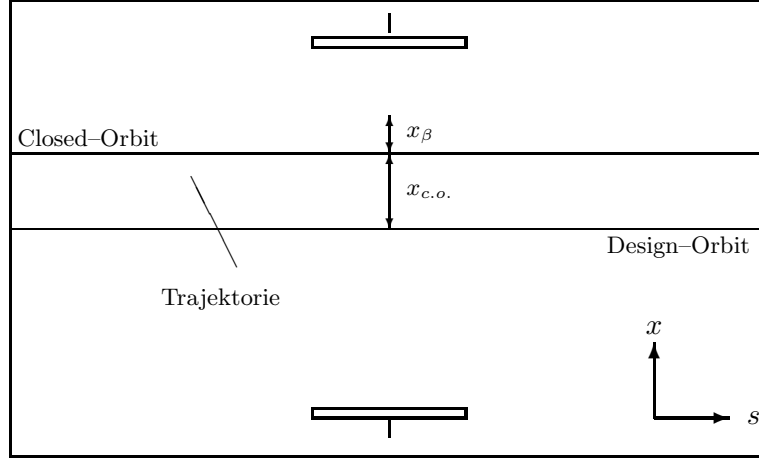


Abbildung 3.2: Monitor an der Stelle s_0

Schwingungsamplitude der Betatron-Schwingung x_β : $x = x_{c.o.} + x_\beta$. Der Offset kann durch eine an s_0 vorhandene Verschiebung des Closed-Orbit entstanden sein – läuft das Teilchen allerdings ohne Störung auf der Sollbahn, so ist $x_{c.o.} = 0$.

Das Ablagen-Signal $d_{MON}(t)$ läßt sich nun unter Berücksichtigung von Gleichung (3.16) schreiben als

$$d_{MON}(t_k) = x_{c.o.} M \frac{e}{L} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \cos(n\omega_0 t_k) + A_{\epsilon\beta s_0} M \frac{e}{L} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \cos(n\omega_0 t_k) \cos(\omega_\beta t_k) \quad (3.22)$$

Der zweite Summand beschreibt somit die horizontale Betatron-Schwingung eines Teilchens, gesehen durch den (idealisierten) Monitor an der Stelle s_0 , gemessen bei jedem Umlauf zur Zeit t_k . Der in (3.16) verwendete Phasenoffset ϕ_{0x} wurde zur Vereinfachung auf 0 gesetzt.

Bei der Bestimmung des Arbeitspunktes über die Bestimmung von ω_β kann der erste Summand für die weitere Betrachtung vernachlässigt werden ($x_{c.o.} = 0$). Beim zweiten Summanden handelt es sich um eine *amplitudenmodulierte Schwingung*, wobei ω_β die Modulations- und ω_0 die Trägerfrequenz angibt. Dieser Ausdruck läßt sich dann in zwei harmonische Teilschwingungen halber Amplitude wie folgt zerlegen:

$$\begin{aligned} & A_{\epsilon\beta s_0} M \frac{e}{L} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \cos(n\omega_0 t_k) \cos(\omega_\beta t_k) \\ & = \\ & \frac{1}{2} A_{\epsilon\beta s_0} M \frac{e}{L} \sum_{n=-\infty}^{\infty} (\cos((n\omega_0 - \omega_\beta)t_k) + \cos((n\omega_0 + \omega_\beta)t_k)) \end{aligned}$$

Im Spektrum zeigen sich die beiden Teilfrequenzen $(n\omega_0 - \omega_\beta)$ und $(n\omega_0 + \omega_\beta)$ als *Seitenbänder* zu jeder Harmonischen der Umlauffrequenz. *Die Umlauffrequenz selber taucht nicht mehr auf.*

⁴Natürlich kommt es immer zu einer kleinen "Versmierung", da der Monitor (insbesondere wegen der endlichen Ausdehnung) nicht exakt auf den Deltaimpuls des Teilchendurchganges reagieren kann. Diese Versmierung ist jedoch für die hier durchgeführten Betrachtungen unwesentlich.

Will man die Seitenbandstruktur des Spektrums klarer herausarbeiten, so kann man alternativ den zweiten Summanden aus (3.22) unter expliziter Aufführung des Arbeitspunktes Q schreiben als

$$d_{MON}(t_k) = A_{\epsilon\beta_{s_0}} M \frac{e}{L} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \cos[(n + Q)\omega_0 t_k]$$

Führt man nun die Aufspaltung von Q in den ganzzahligen Teil Q_i und den Nachkomma-Teil Q_f ein ($Q = Q_i + Q_f$), so zeigt sich sofort, daß Q_i lediglich in einer Indexverschiebung obiger Summe resultiert und folglich nicht aus dem Signal rekonstruiert werden kann:

$$d_{MON}(t_k) = A_{\epsilon\beta_{s_0}} M \frac{e}{L} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \cos[\underbrace{(n + Q_i)}_l + Q_f)\omega_0 t_k]$$

Zur Vereinfachung faßt man deshalb n und Q_i zum neuen Index l zusammen: $l = n + Q_i$. Betrachtet man nur die physikalisch relevanten positiven Frequenzen, so erhält man schließlich einen Ausdruck für die Frequenzkomponenten des Monitorsignals:

$$d_{MON}(t_k) = A_{\epsilon\beta_{s_0}} M \frac{e}{L} \left\{ \cos(Q_f \omega_0 t_k) + \sum_{l=1}^{\infty} \cos[(l \pm Q_f)\omega_0 t_k] \right\} \quad (3.23)$$

Das Spektrum (3.23) der Ablagenwerte d_{MON} besteht also aus paarweise auftretenden Seitenbändern zu den Harmonischen der Umlauffrequenz ω_0 . Dazu kommt noch eine Komponente mit der Frequenz $Q_f \omega_0$. *Der Abstand zwischen einem Seitenband und einer Harmonischen ist direktes Maß für den Nachkomma-Anteil Q_f des Arbeitspunktes Q . Der ganzzahlige Anteil des Arbeitspunktes ist nicht mehr rekonstruierbar.* Abbildung 3.3 skizziert das durch Gleichung (3.23) gegebene Spektrum für einen Nachkomma-Anteil $Q_f = 0.2$ bis zur achten Harmonischen der Umlauffrequenz. Zum besseren Verständnis sind die Vielfachen der Umlauffrequenz ($n\omega_0$) ebenfalls eingezeichnet. Die relative Höhe der Amplituden ist willkürlich gewählt. Zur genauen Zuordnung eines Seitenbandes

Abbildung 3.3: Frequenz-Spektrum der Ablagen-Werte für $Q_f = 0.2$

zu einer bestimmten Harmonischen der Umlauffrequenz benötigt man die Information, ob der Nachkomma-Anteil von Q größer oder kleiner als 0.5 ist. Aus dem Spektrum (3.23) ist ersichtlich, daß bei $Q_f < 0.5$ das direkt einer Harmonischen links und rechts benachbarte Seitenband zu genau dieser Harmonischen gehört. Im Falle von $Q_f > 0.5$ gehört dieses Seitenband jedoch zur

jeweils *gegenüberliegenden* Harmonischen, wogegen bei $Q_f = 0.5$ jeweils beide Seitenbänder einer Harmonischen zusammenfallen und nicht mehr getrennt werden können.

Im Beispiel von Abbildung 3.3 kann man – falls Q_f nicht bekannt ist – das Problem der Zuordnung eines speziellen Seitenbandes illustrieren: Aus der Lage der Seitenbänder allein kann man nicht zwischen $Q_f = 0.2$ oder $Q_f = 0.8$ unterscheiden. Dies zeigt deutlich, daß nur mit der Vorkenntnis, ob Q_f größer oder kleiner als 0.5 ist, der Nachkomma-Anteil korrekt ermittelt werden kann.

Übergang zum realen ELSA-Strahl

Bislang wurde davon ausgegangen, daß *ein* Teilchen *ohne Impulsabweichung* $\frac{p-p_0}{p_0}$ im Beschleuniger umläuft, wobei ein (idealisierter) elektromagnetischer Positionsmonitor die Ablage des Teilchens bei jedem Umlauf mißt. Um sich aber den im Beschleuniger ELSA herrschenden realen Verhältnissen weiter anzunähern und genaueren Aufschluß über das zu erwartende *reale* Signalspektrum zu erhalten, müssen darüber hinaus folgende Punkte beachtet werden:

Impulsabweichung und Hochfrequenz

Die Auswirkungen der durch die HF hervorgerufenen Synchrotron-Schwingungen ist quantitativ nur mit einem wesentlich komplizierteren mathematischen Apparat durchführbar. Eine einfache Ableitung des transversalen Strahlspektrums wie im vorangegangenen Abschnitt ist so im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich – es finden sich hierzu Darstellungen in der einschlägigen Literatur (siehe z.B. [25]). Allerdings läßt sich an dieser Stelle der Einfluß der HF zumindestens qualitativ gut beschreiben. Für die eigentliche Messung des Arbeitspunktes sind die folgenden Anmerkungen nur insofern von Betracht, als daß dem Frequenzspektrum eine sehr viel kompliziertere Struktur aufgeprägt wird, wobei jedoch die grundsätzliche Lage und Bedeutung der Betatron-Seitenbänder *unverändert* bleibt.

Bedingt durch das beschleunigende Wechselfeld der Hochfrequenz führt das in der Maschine umlaufende Teilchen *Synchrotron-Schwingungen* um die stabile Phase aus. Diese Phasenschwingung läßt sich auch als *Frequenzmodulation* der Umlauffrequenz beschreiben: Die Umlauffrequenz des Teilchens ist jetzt abhängig von seiner Impulsabweichung – im Falle einer ultrarelativistischen Bewegung kann die Änderung der Umlauffrequenz ω_0 beschrieben werden durch

$$\frac{d\omega}{\omega_0} \approx -\alpha_c \frac{dp}{p_0} \quad ,$$

wobei α_c den "momentum compaction factor" angibt (bei ELSA ca 6%). Diese Frequenzmodulation wird begleitet von periodischen Änderungen der Teilchenenergie, wobei die Frequenz dieser "Energieschwingung" ebenfalls durch die Synchrotron-Frequenz gegeben ist. Aufgrund der Phasenschwingungen muß man den Ausdruck für die lineare Ladungsdichte (vergleiche (3.18)) durch einen Zusatzterm, abhängig von der Synchrotronfrequenz Ω_{sync} , modifizieren:

$$\lambda(t) = \frac{e}{v} \sum_{k=-\infty}^{k=\infty} \delta(t - kT_0 - \tau(t, \Omega_{sync})) \quad (3.24)$$

Dieser zeitabhängige Zusatzterm führt bei einer Fourier-Zerlegung zu einer unendlichen Zahl von *Satelliten-Frequenzen* als Seitenbänder zu jeder Frequenzlinie im Spektrum des Ablage-Signals. Der Abstand der Satelliten vom jeweiligen Träger ist dabei gegeben durch $m\Omega_{sync}$, $m = 1, 2, 3, \dots$. Die *Höhe* der Satelliten wird bestimmt durch Besselfunktionen m -ter Ordnung. Ergänzend sei hier angemerkt, daß wegen des speziellen Verhaltens der Besselfunktion allerdings nur wenige Satelliten eine nennenswerte Höhe haben und somit im Spektrum erkennbar sind.

Berücksichtigt man die *Chromatizität* ξ der Maschine, das heißt die Verschiebung des Arbeitspunktes Q eines Teilchens abhängig von seiner Impulsabweichung gemäß

$$\Delta Q = \xi \frac{p - p_0}{p_0} \quad ,$$

so muß man den Ausdruck (3.24) für die Ladungsdichte durch einen von ξ abhängigen Term nochmals modifizieren. Als Konsequenz ergibt sich für das Spektrum, daß den aus der Synchrotron-Schwingung resultieren Satelliten der Betatron-Seitenbänder eine andere Amplitudenstruktur aufgeprägt wird. Für die Bestimmung des Arbeitspunktes ist aber auch hier wesentlich, daß sich die *Lage* der Betatron-Seitenbänder selbst nicht ändert.

Um die Auswirkung einer Dispersion an der Stelle des Positionsmonitors zu verstehen, muß man in Erinnerung rufen, daß das vom Monitor gelieferte Signal proportional zur linearen Ladungsdichte und zur Strahl-Ablage an der Stelle s_0 der Positionsmessung ist. Besitzt das Teilchen aber eine Impulsabweichung, so läuft es auf einer *Dispersionbahn*, die nicht mit der Sollbahn übereinstimmt, sofern nur $D(s)$ an der Stelle s_0 von 0 verschieden ist. Für Teilchen ohne Impulsabweichung ergibt sich kein Effekt. Da der Monitor nun für Teilchen mit Impulsabweichung eine höhere Signalamplitude liefert, ergibt sich im Spektrum des Signals eine *Anhebung* der Synchrotron-Satelliten. Fazit: je nachdem, welche Stelle s_0 für den Monitor gewählt wurde, treten die Synchrotron-Satelliten mehr oder weniger deutlich hervor.

Übergang von einem Teilchen zu einem gebunchten Elektronenstrahl

Die in den vorangegangenen Abschnitten durchgeführte Analyse galt für ein einzelnes Teilchen. Die Ergebnisse müssen jetzt im Falle eines gebunchten Strahls durch folgende Betrachtungen modifiziert werden:

- Bunchstruktur

Natürlich trägt weiterhin jedes einzelne Teilchen sein elektromagnetisches Feld bei jedem Umlauf am Monitor vorbei. Allerdings *überlagern* sich nun die Einzelfelder aufgrund linearer Superposition zu einem effektiven elektromagnetischen Feld. Der Monitor sieht also beim Durchgang eines Bunches keinen Nadelimpuls mehr, sondern ein zeitlich ausgedehntes elektromagnetisches Feld. Die zeitliche Ausdehnung ist dabei durch die Länge des Bunches gegeben. Im Spektrum resultiert ein gebunchter Strahl im Auftreten der HF-Frequenz und der entsprechenden Harmonischen. Die *Höhe* der einzelnen Frequenzkomponenten relativ zueinander hängt dabei im wesentlichen von der Bunchlänge ab.

- Füllung des Rings

Nimmt man nun an, daß die Maschine gleichmäßig mit Bunchen bevölkert ist, so kommen im Spektrum dennoch die Umlauffrequenz der Maschine und ihre Harmonischen dazu. Dies ist darauf zurückzuführen, daß niemals eine absolut gleichmäßige Füllung des Rings erreicht werden kann und daß deshalb ein Monitor immer eine gewisse Periodizität der umlaufenden Ladungsstruktur erkennt. Die Höhe der Amplituden der Umlauffrequenz und ihrer Harmonischen relativ zueinander hängt von der zeitlichen Struktur der Ringfüllung ab.

Natürlich schwingen nicht alle Teilchen in der Maschine mit exakt der gleichen Betatronfrequenz ω_β . Bedingt durch eine statistischen Anfangsverteilung der Impulsabweichung kommt es im Frequenzspektrum zu einer Verbreiterung der Komponenten für Umlauffrequenz, Betatron-Seitenbänder, Synchrotron-Satelliten und der entsprechenden Harmonischen: eine Frequenzlinie wird zum "Peak" mit bestimmter Breite. Das Zentrum eines Peaks steht dann für den "Mittelwert" der Impulsabweichung, also $\frac{p-p_0}{p_0} = 0$.

Kohärente Betatron-Schwingungen

Infolge der Superposition der elektromagnetischen Felder der einzelnen Teilchen ist der Positionsmontitor nur auf den *Ladungsschwerpunkt* der vorbeifliegenden Teilchenwolke sensitiv. Da aber unterschiedliche räumliche Verteilungen gegebenenfalls im gleichen Ladungsschwerpunkt resultieren, wäre die gewonnene Information zur Analyse von Schwingungen ungenügend: Das Problem ergibt sich beispielsweise dann, wenn zwar alle Teilchen eine gleichfrequente Schwingung um die Sollbahn durchführen, aber die einzelnen Schwingungs-Phasen der Teilchen relativ zueinander statistisch gleichmäßig verteilt sind. Die Überlagerung aller Schwingungen führt dazu, daß der Ladungsschwerpunkt des Ensembles auf der Sollbahn liegt, obwohl *alle* Teilchen schwingungsbedingte Ablagen zur Sollbahn besitzen. Eine Frequenzanalyse des Monitorsignals würde keinen Aufschluß über die Teilchenschwingung liefern.

Die Konsequenz obigen Sachverhalts für die Bestimmung des Arbeitspunktes aus dem Frequenzspektrum besteht darin, daß es nicht genügt, zu einem beliebigen Zeitpunkt das Spektrum des Strahls auszuwerten. Es muß vielmehr sichergestellt sein, daß der überwiegende Teil der Teilchen *gleichphasig* in Bezug zu einer gemeinsamen Startphase schwingt – nur dann ist auch die Position des Ladungsschwerpunktes durch die Schwingfrequenz der Teilchen moduliert. Im Falle von Betatron-Schwingungen, die es ja für die Arbeitspunktmessung zu analysieren gilt, spricht man von einer *kohärenten Betatron-Schwingung* des Teilchenensembles. Kohärente Betatron-Schwingungen können zum Beispiel durch einen schnellen Kicker-Magneten ausgelöst werden⁵.

Bei ELSA tritt eine kohärente Schwingung direkt nach der Injektion auf, da der Elektronenstrahl nicht auf dem Sollorbit eingeschossen wird und sofort eine Betatron-Schwingung startet. Die Startphase für die kohärente Schwingung ist näherungsweise durch den Triggerzeitpunkt der Synchrotronkicker gegeben.

Die kohärente Schwingung des Ladungsschwerpunktes klingt allerdings nach der Injektion ab. Zugrunde liegt hier die Tatsache, daß die Teilchen einer versetzt zur Umlaufbahn eingeschossenen Anfangsverteilung der Teilchenkoordinaten infolge unterschiedlicher Emittanzen auch geringfügig verschiedene Betatron-Frequenzen haben, was zu einem "Auseinanderlaufen" der Verteilung führt. Dieser Prozeß der "Dämpfung" des Ladungsschwerpunktes wird oft auch "Landau-Dämpfung" genannt. Es handelt sich aber nicht um einen Vorgang, bei dem einem schwingenden System Energie entzogen wird – die Landau-Dämpfung beschreibt vielmehr den Prozeß eines langsamen Abklingens einer kohärenten Schwingung vieler harmonischer Oszillatoren. Für die speziell in ELSA herrschenden Bedingungen hat A.Dreist in seiner Dissertation diese Dämpfung nach der Injektion durch Simulationsrechnungen ausführlich untersucht und experimentell überprüft [4]. Das Abklingen der Kohärenz ist bei ELSA nach wenigen hundert Mikrosekunden fast vollständig. Für die Spektralanalyse bedeutet dies, daß das verwertbare Ausgangssignal ebenfalls nur einige hundert Mikrosekunden lang ist. Eine weitere Beobachtung des Signals würde keine verwertbare Information mehr liefern.

3.3 Das Meßprinzip für die Bestimmung des Arbeitspunktes

Aus den in den vorangegangenen Abschnitten gesammelten Informationen kann nun zusammenfassend das Meßprinzip für die Bestimmung des ELSA-Arbeitspunktes abgeleitet werden:

Man messe das durch eine kohärente Betatronschwingung modulierte Ablagesignal eines Positionsmontitors an einer festen Stelle im Ring. Das Signal wird abgetastet und gespeichert, wobei die

⁵Es gibt auch andere Effekte, die eine kohärente Schwingung anregen können: Hierzu gehören eventuell Raumladungs- bzw. Ioneneffekte oder auch Impedanzeffekte in der Vakuumkammer [27].

Abtastrate des Datenerfassungssystems wegen des Abtasttheorems mindestens das Doppelte der Maschinen–Umlauffrequenz f_{ELSA} betragen muß. Ausgehend von den digitalisierten Ablagewerten berechne man nun das Frequenzspektrum des Signals. Das erwartete Spektrum⁶ hat in etwa das in Abbildung 3.4 gegebene Aussehen:

Abbildung 3.4: Teil des theoretisches Spektrums für realen Beam

Bei Vorkenntnis, ob der Nachkomma–Anteil Q_f größer oder kleiner als 0.5 ist, messe man folgende Frequenzabstände:⁷

- Fall 1: $Q_f < 0.5$

Den Frequenzabstand Δf_1 von $f = 0$ bis zum ersten Seitenband (1). Der Nachkomma–Anteil des Arbeitspunktes ist dann

$$Q_f = \frac{\Delta f_1}{f_{\text{ELSA}}}$$

- Fall 2: $Q_f > 0.5$

Den Frequenzabstand Δf_2 von $f = 0$ bis zum zweiten Seitenband (2). Der Nachkomma–Anteil des Arbeitspunktes ist dann

$$Q_f = \frac{\Delta f_2}{f_{\text{ELSA}}}$$

Zusammen mit der Kenntnis des ganzzahligen Teils von Q hat man somit den Arbeitspunkt Q der Maschine bestimmt.

Hat man *keine* Kenntnis⁸ über die Lage von Q_f relativ zu 0.5, so kann man das Spektrum des Strahls bei *zwei* geringfügig verschiedenen Arbeitspunkten bestimmen. Die Verschiebung von Q zu größeren oder kleineren Werten resultiert dann gemäß (3.23) in einer Verschiebung der Seitenbänder zu größeren oder kleineren Frequenzen.

⁶Synchrotron–Satelliten sind hier nicht eingezeichnet. Die Breite und Höhe der Peaks ist willkürlich gewählt, ebenfalls der Rauschpegel.

⁷Es ist einfacher und genauer, wenn man von $f = 0$ ausgehend mißt, als den Abstand eines Seitenbandes zur *Umlauffrequenz* f zu bestimmen. Andernfalls müßte man auch f messen, und dies würde einen zusätzlichen Fehler bei der Bestimmung des Frequenzabstandes hervorrufen. f ist aber durch die Hochfrequenz bekannt.

⁸Dies ist in der Regel nicht der Fall, da man aus den eingestellten Quadrupolströmen und gegebener Optik den theoretischen Soll–Arbeitspunkt berechnen kann. Kritisch sind nur Fälle sehr nahe bei $Q_f = 0.5$.

Erhöht man beispielsweise den Arbeitspunkt geringfügig und beobachtet die Lage des direkt $f = 0$ benachbarten Seitenbandes (1), so bedeutet eine Verschiebung dieses Seitenbandes in Richtung höherer Frequenz, daß Q_f kleiner als 0.5 ist. Wandert jedoch dieses Seitenband (1) nach links, so ist Q_f größer als 0.5. Durch dieses Verfahren können also in der Praxis die im Spektrum auftretenden Betatron-Seitenbänder identifiziert werden.

3.4 Die diskrete Fourier-Transformation

Durch den Meßprozeß hat man das Ablagesignal des Monitorsystems in der Form digitalisierter Daten erhalten. Die Berechnung des Frequenzspektrums kann durch eine *diskrete Fourier-Transformation* durchgeführt werden. Die für die Arbeitspunktmessung relevanten Eigenschaften einer solchen Transformation sollen im folgenden beschrieben werden.

Im allgemeinen kann ein physikalisches Signal $s(t)$ vom Zeitbereich in den Frequenzbereich $S(f)$ überführt werden, wobei der Übergang zwischen den beiden Darstellungen der Funktion s durch die komplexwertige, *kontinuierliche* Fourier-Transformation bewerkstelligt wird:

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)e^{2\pi ift} dt \quad (3.25)$$

und

$$s(t) = \int_{-\infty}^{\infty} S(f)e^{-2\pi ift} dt \quad (3.26)$$

Wird beispielsweise beim physikalischen Signal $s(t)$ die Zeit t in Sekunden gemessen, so erscheint f in der Transformation (3.25) als Frequenz in Hertz. Der Frequenzbereich erstreckt sich dabei von $f = -\infty$ bis $f = \infty$. Die Komplexwertigkeit von s und S deutet an, daß sowohl im Zeit- als auch im Frequenzbereich die Phaseninformation einzelner Teilschwingungen des Signals berücksichtigt wird.

Die obigen Transformationen sind auf den kontinuierlichen Variablen t und f definiert. Hat man aber in der Praxis lediglich eine diskrete und endliche Menge von Meßdaten (wie für das Ablagesignal durch die Digitalisierung gegeben), so muß man zum Übergang in den Frequenzbereich die Transformationen (3.25) und (3.26) diskretisieren.

Dazu nimmt man an, daß die Daten als Reihe von N Werten $s_k(t_k)$ vorliegen. Die *Meßrate* sei durch die Frequenz f_{sample} definiert. Die Diskretisierung bedeutet nichts anderes, als daß ein Signal $s(t)$ periodisch mit der Frequenz f_{sample} abgetastet wird und der jeweilige Meßwert s_k für den Zeitpunkt $k\Delta t$ gespeichert ist. Die Anzahl der so erhaltenen Meßwerte ist N .

$$s_k(t_k) = s(k\Delta t) \quad , \quad \text{mit } \Delta t = \frac{1}{f_{sample}} \quad , \quad k = 0, 1, 2, \dots, N - 1 \quad (3.27)$$

Durch die Diskretisierung der Daten s_k geht die Transformation in den Frequenzbereich abschließend über in die Näherung des Integrals (3.25) durch eine endliche Summe. Man erhält eine Transformation von N komplexen Werten des Zeitbereiches in N komplexe Werte des Frequenzbereiches:

$$S_n = DFT(s_k) := \sum_{k=0}^{N-1} s_k e^{2\pi i kn/N} \quad , \quad 0 \leq n \leq N - 1 \quad (3.28)$$

Der Frequenzbereich ist durch die Transformation ebenfalls diskretisiert. Die einem gewonnenen S_n zugeordnete Frequenz ist dabei bestimmt durch

$$f_n = \frac{n}{N} f_{sample} = \frac{n}{N \Delta t}, \quad 0 \leq n \leq N - 1 \quad (3.29)$$

Hierbei ist allerdings von entscheidender Bedeutung, daß die f_n nach der DFT nur den Frequenzbereich von $f = 0$ bis zur halben Abtastfrequenz wiedergeben. Dies ist eine Folge des Sampling-Theorems und wird im nächsten Abschnitt beschrieben werden.

Da es sich bei gemessenen Daten um reellwertige Zahlen handelt, müssen sie auf komplexe Zahlen abgebildet werden, damit die DFT durchgeführt werden kann. Dies geschieht in der Art, daß eine neue komplexe Zahl s_k aus den Meßdaten d_k gebildet wird durch

$$Re[s_k] := d_{k,gemessen}, \quad Im[s_k] := 0, \quad 0 \leq k \leq N - 1$$

Mit den so gewonnenen N Werten s_k wird die Transformation nach $S(n) = DFT(s_k)$ durchgeführt:

$$Re[S_n] = \sum_{k=0}^{N-1} \left(Re[s_k] \cos \frac{2\pi nk}{N} + Im[s_k] \sin \frac{2\pi nk}{N} \right)$$

$$Im[S_n] = - \sum_{k=0}^{N-1} \left(Re[s_k] \sin \frac{2\pi nk}{N} - Im[s_k] \cos \frac{2\pi nk}{N} \right)$$

Die direkte Berechnung obiger Ausdrücke zur Gewinnung der S_n ist äußerst zeitaufwendig, da es sich bei der DFT um einen Berechnungsalgorithmus handelt, dessen Rechenzeit proportional zum *Quadrat* der Anzahl der Datenwerte N ist [19]. Es existieren jedoch eine Reihe von sogenannten FFT-Algorithmen⁹, die alle bedeutende Einsparungen an Rechenzeit erzielen können. Der bekannteste dieser Algorithmen stammt aus der Mitte der sechziger Jahre und wurde von J.W.Cooley und J.W.Tukey [3] entwickelt; er ist vom Rechenzeitverhalten proportional zu $N \log_2 N$. Dieser Algorithmus wird von EPOS für die Arbeitspunktbestimmung verwendet.

Hat man über die FFT die N komplexen Zahlen S_n bestimmt, so kann man die Anteile A_n und Phasenlage P_n der einzelnen Frequenzkomponenten berechnen, wobei die Zuordnung zu den nun diskreten Frequenzen über den Index n und die Beziehung (3.29) erfolgt:

$$A_n := |S_n| = \sqrt{Re[S_n]^2 + Im[S_n]^2}, \quad 0 \leq n \leq N - 1 \quad (3.30)$$

$$P_n := \arctan \frac{Im[S_n]}{Re[S_n]}, \quad 0 \leq n \leq N - 1 \quad (3.31)$$

3.5 Fehlerquellen und Fehlerkorrektur bei der Frequenzbestimmung

Es stellt sich natürlich die wichtige Frage, ob durch die Diskretisierung des Signals $s(t)$ in die Werte s_k der Informationsgehalt (sprich: alle Teilfrequenzen) des Ausgangssignals unverändert übernommen wurde¹⁰. Mit genau diesem Problem der diskreten Abtastung kontinuierlicher Signale beschäftigt sich das *Sampling-Theorem* (siehe etwa [19],[17]) :

⁹FFT = "Fast Fourier Transform"

¹⁰Dies ist für die Bestimmung des Arbeitspunktes deshalb besonders wichtig, weil die Bestimmung der Betatronfrequenz aus den Daten s_k erfolgen muß, und zum Zeitpunkt der Analyse außer diesen auch keine weiteren Informationen zur Verfügung stehen.

Falls die höchste in einem kontinuierlichen Signal $s(t)$ auftretende Frequenz f_{MAX} ist und das Signal mit einer Abtastrate von $f_{sample} > 2f_{MAX}$ diskretisiert wird, dann kann $s(t)$ aus den diskreten Werten s_k *exakt* rekonstruiert werden durch die Beziehung

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} s(n\Delta t)g(t - n\Delta t) \quad , \quad g(t) = \frac{\sin(\pi f_{sample}t)}{\pi f_{sample}t} \quad , \quad \Delta t = \frac{1}{f_{sample}} \quad (3.32)$$

Die Frequenz $\frac{1}{2}f_{sample}$ heißt *Nyquist-Frequenz*.

Aus dem Sampling-Theorem sieht man sofort, daß es für die praktische Frequenzanalyse mit konkreten physikalischen Signalen zwei bedeutende Problempunkte gibt:

- Das Signal ist normalerweise nicht durch die Nyquist-Frequenz bandbreitenbegrenzt.
- Die Anzahl der in praxi gemessenen Werte ist *nicht unendlich*, sondern N .

Aliasing

Nach dem Sampling-Theorem kommt es durch die Diskretisierung der Daten zur einer Beschränkung des Frequenzbereiches bis zur Nyquist-Frequenz. Enthält das Ausgangssignal Frequenzen, die über der Nyquist-Grenze liegen, so können diese nicht mehr rekonstruiert werden. Sie werden vielmehr in den Frequenzbereich von $f = 0$ bis $f = f_{Nyquist}$ *abgebildet*. Diesen Effekt nennt man auch *Aliasing*.

Die Beschränkung geschieht bereits durch die diskrete Messung und nicht erst durch die Fourier-Transformation. Gibt es nämlich zwei Frequenzen f_1 und f_2 , die sich lediglich um ein Vielfaches von $\frac{1}{\Delta t}$ unterscheiden, so ergeben *beide* Schwingungen $e^{2\pi i f_{1,2}t}$ bei einem Abtastintervall von Δt die gleichen Amplitudenwerte. Wird beispielsweise (siehe Abb. 3.5) eine 6-MHz-Schwingung mit 10 MHz abgetastet, so wird diese Frequenz nach der Diskretisierung als Komponente von 4 MHz rekonstruiert. Die Grafik überlagert die 6 und 4 MHz Schwingung – man erkennt, daß bei einer Abtastung mit 10MHz beide Schwingungen die gleichen Meßwerte, gekennzeichnet durch die Balken, ergeben.

Abbildung 3.5: Aliasing zweier Schwingungen

Für die Spektralanalyse ist wegen der eindeutigen Frequenzbestimmung nur der Bereich von $f = 0$ bis $f = f_{Nyquist}$ relevant. Trägt man für diesen Bereich die aus der DFT resultierenden Anteile

A_n gegen die Frequenz f_n bzw. n auf (siehe Abb. 3.6), so äußert sich der Aliasing-Effekt im "Herüberklappen" aller Frequenzen $f > f_{Nyquist}$ in den Teil unterhalb der Grenzfrequenz, wodurch es hier zur Überlagerung des eigentlichen Spektrums kommt. Dies und die Indexzuordnung der f_n wird in Abbildung 3.6 deutlich.

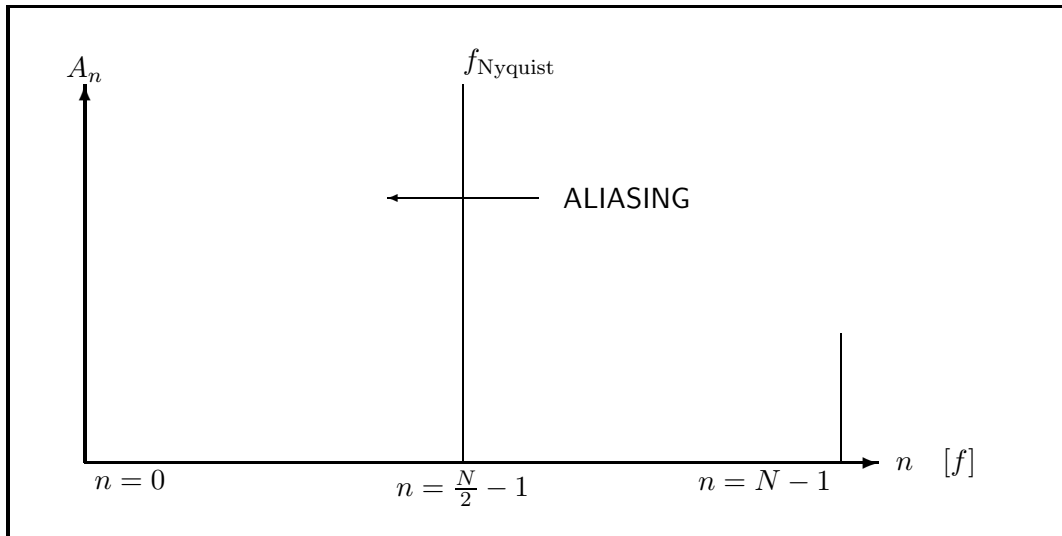


Abbildung 3.6: Aliasing im Spektrum der diskreten Transformation

Um eine Verfälschung des Spektrums durch Aliasing zu verhindern, muß das zu messende Signal bereits *vor der Diskretisierung* in seiner Bandbreite auf die Nyquist-Frequenz des Abtastsystems begrenzt werden. Für die Arbeitspunktmessung geschieht dies durch einen vorgeschalteten, steilflankigen Tiefpassfilter, dessen Abschneidefrequenz auf die Meßrate der Monitorelektronik abgestimmt ist. Hierauf wird im Kapitel 4. genauer eingegangen.

Spectral Leakage

Die Anzahl der in einer realen Situation gewonnenen Meßwerte s_k ist immer endlich. Der Frequenzbereich des gemessenen Signals wird durch die Diskretisierung und Aliasing auf den Bereich bis zur Nyquist-Frequenz abgebildet. Auf diesen Bereich entfallen nach der Transformation wegen der Symmetrie der DFT genau die Hälfte der diskreten Frequenzen f_n (vergleiche die Indexzuordnung für die f_n in Abb. 3.6). Man hat also $\frac{N}{2}$ diskrete Werte f_i für das *kontinuierliche* Frequenzintervall $0 < f < f_{Nyquist}$.

Die Fourier-Transformation besteht abstrakt darin, die Entwicklungskoeffizienten für die "neue" Basis der Sinus- und Cosinus-Funktionen zu finden (nämlich die Fourierkoeffizienten). Dies kann aber wegen der begrenzten Zahl der Koeffizienten nicht eindeutig geschehen: Von dem kontinuierlichen Frequenzintervall des Signals werden nur die Komponenten eindeutig *einem* Basisvektor zugeordnet, die genau mit dem jeweiligen Vektor zusammenfallen. Alle anderen Frequenzen ergeben nichtverschwindende Anteile, die sich auf alle anderen Basisvektoren verteilen. Vereinfacht kann man sagen, daß eine im Signal enthaltene Teilfrequenz durch die Fourier-Transformation in der Regel auf alle Anteile A_n der diskreten Frequenzen f_n umgelegt wird. Nur in dem Falle, wo die Teilfrequenz exakt mit einer der diskreten Frequenzen f_n (3.29) zusammenfällt, ist die Zuordnung zu A_n eindeutig. Die Fourier-Transformation bewirkt also eine "Verschmierung" des Frequenzspektrums des gemessenen Signals. Diesen Effekt nennt man "Spectral Leakage". Zur quantitativen Analyse geht man so vor:

Die Auswahl einer diskreten und endlichen Menge von Meßwerten s_k aus einer im Zeitbereich vorliegenden unendlichen Zahl von Werten läßt sich durch die Multiplikation der zunächst zeitlich unbegrenzt vorliegenden Funktion \hat{s} mit einer sog. *Fensterfunktion* $w(t)$ der Dauer T_w modellieren. Das hier zu verwendende Fenster ist das *Rechteckfenster* w_R :

$$s(t) = w_R(t)\hat{s}(t) , \quad w_R(t) = \begin{cases} 0 & : t < 0 \\ 1 & : 0 \leq t \leq T_w \\ 0 & : t > T_w \end{cases} \quad (3.33)$$

Die Multiplikation der Funktion \hat{s} mit der Fensterfunktion ist im Frequenzbereich äquivalent zur *Faltung* der Fourier–Transformierten $S(f)$ des Original–Signals \hat{s} und der Transformierten $W(f)$ der Fensterfunktion [8].

Als Resultat ergibt sich für die in der Zeit auf die Dauer von T_w beschränkte Ausgangsfunktion $s(t)$ die Transformierte

$$S_w(f) = \int_{-\infty}^{\infty} S(\tau)W(f - \tau)d\tau \quad (3.34)$$

Die Transformierte $W(f)$ ist bekannt. Normiert man den Frequenzbereich für $W(f)$ auf das Intervall von $-\pi$ bis π [8], so erhält man bei einer Diskretisierung auf N Werte den sogenannten

Abbildung 3.7: Dirichlet–Kern für $N = 64$

Dirichlet–Kern der Transformation, von dem hier nur der Amplitudenterm aufgeführt ist:

$$W(\theta) = \frac{\sin \frac{N}{2}\theta}{\sin \frac{\theta}{2}} \quad (3.35)$$

Abbildung 3.7 zeigt das logarithmisch aufgetragene Power–Spektrum des Kerns (3.35) für $N = 64$. Das Spektrum ist symmetrisch um $\theta = 0$. Der zentrale Peak ist etwa 13dB höher als die nächstliegenden Seitenbänder. Nimmt man nun beispielsweise an, daß das Ausgangssignal nur eine Frequenz f enthält, so liefert die Fourier–Transformation durch die Faltung (3.34) den Dirichlet–Kern¹¹, verschoben an die Stelle f . Die Frequenz f taucht also nicht als Linie im Spektrum auf, sondern wurde verschmiert. Die Verschmierung ist allerdings exakt quantifizierbar – diese Tatsache führt zur Möglichkeit einer Korrektur des durch die DFT gewonnenen Spektrums.

¹¹Die Amplituden werden natürlich entsprechend der Stärke des Ausgangssignals bewertet sein.

Korrektur des Spectral Leakage für eine Frequenz

Da die diskrete Fouriertransformation lediglich einzelne äquidistante Frequenzen f_n liefert, sieht man im Spektrum der DFT natürlich nicht den ganzen, kontinuierlichen Dirichlet-Kern. Vielmehr ist die Größe der jedem f_n zugeordneten Anteile A_n gegeben durch den Wert des Dirichlet-Kerns an der betreffenden Stelle.

Abbildung 3.8: Verschmierung durch Spectral Leakage

Für den Fall einer einzelnen Frequenz im Ausgangssignal ergibt sich ein diskretes Spektrum, welches am besten durch ein Balkendiagramm dargestellt werden kann. Im Beispiel von Abbildung 3.8 beschreibt die Grafik eine Schwingung von 750 kHz, die mit 5 MHz auf 256 Stellen abgetastet wurde. Aufgetragen sind alle Frequenzen bis 2 MHz (Nyquist-Frequenz: 2.5 MHz). Dieses Beispiel macht besonders schön deutlich, wie eine einzelne Frequenzkomponente, bedingt durch die endliche Beobachtungsdauer, von der Linie zu einem "Peak" verschmiert wird.

Es gibt nur *eine Ausnahme* von der Verschmierung: Immer dann, wenn die Beobachtungsdauer ein ganzzahliges Vielfaches der Periodendauer der zu analysierenden Schwingung beträgt, fallen alle diskreten Frequenzen f_n in die Nullstellen des Dirichlet-Kerns. Nur die Schwingungsfrequenz allein fällt mit dem Zentrum des Kerns zusammen. Hierdurch tritt dann im diskreten Spektrum auch nur eine Linie auf, die *exakt* die Ausgangsfrequenz beschreibt.

Die genaue Kenntnis des Dirichlet-Kerns liefert den Ansatz zu einer entscheidenden Korrektur: Da die Höhe der Anteile A_n des Frequenzspektrums an der Stelle f_n gegeben ist durch den Wert des Kerns an genau dieser Stelle, kann man zwischen zwei Punkten im diskreten Spektrum *interpolieren*. Der Verlauf der Interpolationskurve ist gegeben durch die Form des Kerns (3.35). Man sucht die Stelle f , die zum Zentrum des Kerns gehört, da die Lage des Zentrums die korrekte Signalfrequenz beschreibt¹².

Die Herleitung der Interpolationsformel für das diskrete Spektrum soll an dieser Stelle vermieden werden. Edgar Asseo hat für Arbeitspunktmessungen bei LEAR am CERN folgende einfache Korrekturvorschrift hergeleitet [2]:

Voraussetzung ist das Vorhandensein eines genügend stark¹³ ausgeprägten Peaks im Spektrum. Der unkorrigierte Frequenzwert entspricht der Lage des höchsten Frequenzbins. Für die Korrektur

¹²Diese Tatsache muß bei der Auswertung des diskreten Spektrums speziell berücksichtigt werden.

¹³Was dies in der Praxis bedeutet, wird in Kapitel 4. beschrieben werden.

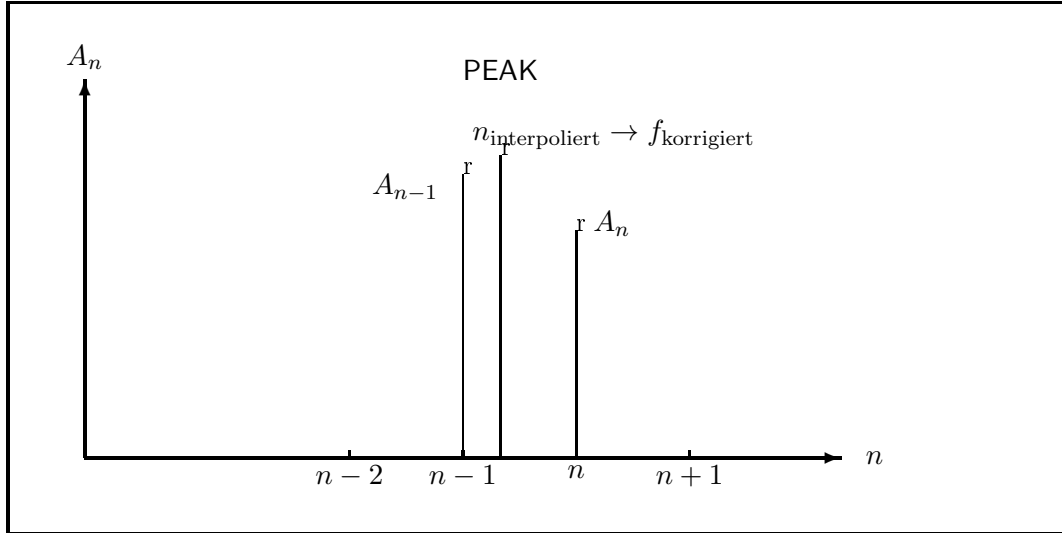


Abbildung 3.9: Korrektur des Spectral Leakage

nimmt man nun die *zwei höchsten, direkt benachbarten* Bins des Peaks. Sie seien durch $(n-1, A_{n-1})$ und (n, A_n) bezeichnet. Der verbesserte Frequenzwert f_{korr} ist dann nach [2] gegeben durch

$$f_{korr} = \frac{f_{sample}}{N} \left(n - 1 + \frac{A_n}{A_{n-1} + A_n} \right) \quad (3.36)$$

und die korrigierte Amplitude wird berechnet durch

$$A_{korr}(f_{korr}) = A_n \frac{\pi(n - n')}{\sin(n - n')}, \text{ mit } n' = n + \frac{A_n}{A_{n-1} + A_n} \quad (3.37)$$

Die Phasenlage der Frequenzkomponente f_{korr} kann man ebenfalls durch eine Interpolationsformel ermitteln. Man findet hier die Beziehung:

$$\phi_{korr} = P_n + \pi \left(1 + \frac{A_n}{A_{n-1} + A_n} \right) \quad (3.38)$$

Die Phase P_n für die Frequenz f_n wurde hier gemäß der Vorschrift (3.31) berechnet.

Ein Fall, bei dem auf die Interpolation verzichtet werden muß, ist das Vorhandensein einer starken zweiten Frequenzkomponente im Spektrum, deren Abstand von der zu bestimmenden Frequenz einen bestimmten Wert unterschreitet. In diesem Fall addiert sich nämlich die Verschmierung der zweiten Komponente auf die Bins der ersten (und umgekehrt). Somit ist die Höhe der einzelnen A_n nicht mehr allein durch den Dirichlet-Kern gegeben, und die Interpolation ist nicht zulässig. Ein Beispiel analog zu Abbildung 3.10 zeigt das Zusammenlaufen der zwei Peaks sehr deutlich. Auch hier ist eine Frequenzkomponente wiederum 750 kHz, die benachbarte Komponente ist 790 kHz. Abgetastet wurde wieder mit 5 MHz auf 256 Stellen. Zwischen beiden Frequenzen liegen etwa 2 Bins.

Das Zusammenlaufen zweier Frequenzen mit gegebenem Abstand kann nur durch eine Vergrößerung der Stützstellen der Fouriertransformation erreicht werden. Je mehr Bins zwischen beiden Peaks liegen, desto geringer sind die Anteile, die sich durch Spectral Leakage auf jeden einzelnen Bin hinzuaddieren, und desto genauer wird eine Interpolation. Die Festlegung der minimalen Binanzahl für die Trennung zweier Peaks bei Anwendung der Interpolation ist von vielen Randbedingungen der konkreten Messung abhängig.

Abbildung 3.10: Zwei nahe Peaks – hier ist keine Interpolation möglich

Entscheidend für das Gelingen der Korrektur ist, abgesehen von obiger Einschränkung, natürlich das Vertrauen in die Korrektheit der A_n . Die Höhe der A_n ist in der Praxis natürlich nicht allein durch den Dirichlet-Kern gegeben, sondern wird z.B. durch Signalrauschen oder Rundungsfehler bei der numerischen Berechnung der DFT leicht modifiziert. Die Interpolation funktioniert also nur als *Näherung*, die einen wahrscheinlicheren Wert für die im Signal enthaltene Frequenz liefert. Falls kein ausgeprägter Peak im Spektrum vorliegt, oder falls störende Einflüsse wie Rauschen etc. zu stark werden, muß auf die Interpolation verzichtet werden. Eine genauere Abschätzung der auftretenden Fehler wird in Kapitel 4. erfolgen. Es sei hier jedoch vorweggenommen, daß die Korrektur des Spektrums gemäß (3.36) in der Praxis eine Genauigkeit liefert, die typisch etwa um zwei bis drei Größenordnungen besser ist als die Genauigkeit, die nur durch die DFT allein erreicht wird.

4. Die Automatische Messung des Arbeitspunktes

Dieses Kapitel beschreibt zunächst den Einfluß des verwendeten Monitorsystems auf die erwarteten Strahlagedaten. Ausgehend von dem im vorangegangenen Kapitel vorgestellten theoretischen Konzept zur Bestimmung des Arbeitspunktes soll dann die Implementierung der Fourier-Transformation, die Vermessung des Spektrums und die Korrektur der Fehler durch entsprechende EPOS-Operatoren vorgestellt werden. Die Anwendung der Operatoren zur automatischen Arbeitspunktmessung wird in einem gesonderten Abschnitt dieses Kapitels erläutert.

4.1 Einfluß des Monitorsystems auf die Ausgangsdaten

Die Verarbeitung der von den ELSA-Positionsmonitoren gelieferten Signale zieht folgende Punkte nach sich, die sich direkt oder indirekt auf das Signal und damit auch das auszuwertende Frequenzspektrum auswirken:

- Das ELSA-Monitorsystem kann aus technischen und konzeptionellen Gründen nur einen sehr begrenzten Frequenzbereich des gesamten Signalspektrums verarbeiten. Die aus der HF-Elektronik nach der Demodulation resultierende Bandbreite von 10 MHz läßt jedoch eine zeitliche Auflösung von etwa 100 nsec zu. Damit kann man Strukturen erkennen, deren Dauer deutlich kürzer als ein Maschinenumlauf (ca. 550 nsec) ist. Die vorliegende Bandbreite ist für die Arbeitspunktmessung mehr als ausreichend.
- Die Verarbeitung des Monitorsignals erfordert erheblichen HF/NF-Schaltungsaufwand, wodurch Rauschen, zusätzliche Bandbreitenbegrenzungen und evtl. ein nichtlinearer Frequenzgang eingehen. In dem für die Arbeitspunktmessung relevanten Frequenzbereich kann allerdings von guter Linearität des Frequenzganges der beteiligten Komponenten ausgegangen werden [24].
- Der Zusammenhang zwischen Signalamplitude und Strahlablage ist bei größeren Abweichungen des Strahls vom Mittelpunkt des Knopfmonitors nicht mehr ausreichend linear, sondern muß durch Interpolationen und Eichkurven (abhängig von der Monitorgeometrie) linearisiert werden. Für kleine Ablagen kann jedoch meistens von ausreichender Linearität ausgegangen werden [24]. Daher ist hier für die Bestimmung des Arbeitspunktes auf eine zusätzliche Kalibration der Daten verzichtet worden. Auch die (lineare) Umrechnung der gelieferten Werte in "Ablagen in Millimetern" erscheint deshalb nicht erforderlich. Es genügt die Rechnung mit den Rohdaten.
- Bedingt durch die spezielle Monitorgeometrie und die HF-Elektronik könnte es bei der Bildung des Differenzsignals zu einer *Kopplung zwischen der x- und z-Ebene* der Teilchenbewegung kommen. Das Lagesignal für die horizontale Ebene enthielte Komponenten (wenn auch geringer Stärke), die der vertikalen Bewegung zuzuordnen sind. Dadurch können im horizontalen Lagespektrum die Betatronseitenbänder der vertikalen Bewegung auftauchen.

- Die Abtastrate des Monitorsystems ist mit 10 MHz weit mehr als doppelt so hoch wie die Umlauffrequenz des Strahls in ELSA (etwa 1.82 MHz). Daher ist garantiert, daß das Frequenzspektrum bis 5 MHz eindeutig rekonstruiert werden kann, was die Erfassung der zweiten Harmonischen der Umlauffrequenz sicherstellt. Die Messung des Arbeitspunktes erfordert jedoch nur die Analyse des Spektrums bis zur eigentlichen Umlauffrequenz von 1.8 MHz. Das verwendete Anti-Alias-Filter wurde so ausgelegt, daß er alle Frequenzkomponenten oberhalb von 1.9 MHz steilflankig abschneidet. Aus diesem Grund kann man die Wandlerelektronik auch optional bei 5 MHz betreiben, da die Grenzfrequenz von 2.5 MHz immer noch über der Tiefpassfrequenz liegt.
- Durch die endliche Auflösung der Analog-Digital-Wandler von 8 Bit kommt es zu einer relativ groben Quantisierung der Amplituden des Monitorsignals. Hierdurch überlagert sich dem eigentlichen Signalspektrum noch ein hochfrequentes Rauschspektrum. Ein Teil des Rauschspektrums wird zusätzlich durch ein trotz Tiefpassfilter verbleibendes Rest-Aliasing in den für die Messung wichtigen Bereich geklappt und führt dort zu einer leichten Anhebung des Rauschpegels. Dies wirkt sich auf die Genauigkeit der Lagedaten aus. Eine Abschätzung des resultierenden Pegels ließ allerdings keine nennenswerten Störungen erkennen [10].
- Bei einer Wandlerrate von 10 MHz entspricht die Zeitdifferenz zwischen zwei Lagewerten 100 nsec. Da nur die Vermessung einer kohärenten Betatronschwingung physikalisch verwertbare Informationen liefert, muß die Anzahl der vom Monitorsystem angeforderten Datenwerte auf die Dauer der Strahlkohärenz abgestimmt sein. Bei ELSA kann man von etwa 350– bis 400 μ sec Kohärenzdauer ausgehen. Die Anzahl der Datenpunkte sollte daher auf ca. 4000 Werte begrenzt werden.

Im folgenden Abschnitt werden nun die Instrumente beschrieben, die EPOS eine Bestimmung des Arbeitspunktes aus den Monitordaten ermöglichen.

4.2 Arbeitsweise der beteiligten EPOS-Operatoren

Zur Bestimmung des Nachkomma-Anteils des Arbeitspunktes sind drei Schritte notwendig:

1. Einlesen der Strahllagedaten eines Positionsmonitors
2. Berechnung des Frequenzspektrums aus den Daten
3. Vermessung des auftretenden Betatronpeaks

Der erste Schritt wurde bereits in Kapitel 2. beschrieben: Durch einen speziellen EPOS-Befehl kann man sich für einen ausgewählten Monitor die Strahllagedaten in eine komplexe EPOS-Variable auslesen lassen. Damit stehen die Daten in standardisierter Form zur Verfügung. Eine Kalibration der Werte ist nicht mehr erforderlich.

Zur Berechnung des Frequenzspektrums aus den Daten wurde ein Befehl FFT zur Ausführung schneller Fourier-Transformation entwickelt. Dieser Befehl soll den gesamten Bereich der Spektralberechnungen in EPOS abdecken und ist daher nicht ausschließlich auf die Arbeitspunktmessung abgestimmt. Vielmehr bietet FFT eine Reihe von Möglichkeiten, die über die Anforderungen der Messung hinausgehen. Insbesondere ist das Befehlsformat und die Arbeitsweise so allgemein wie möglich implementiert worden. Man erhält so ein *universelles* Werkzeug zur Berechnung beliebiger Spektren.

Hat man das Spektrum ermittelt, so erfordert die Arbeitspunktbestimmung die Suche und genaue Frequenzvermessung des Betatron-Peaks. Hierzu gehört auch die angesprochene Fehlerkorrektur. Zu diesem Zweck wurde das EPOS-Kommando PEAKSEARCH implementiert. Auch hier gilt,

daß dieses Kommando als *universelles* Instrument zur Analyse beliebiger Daten dienen soll. Die Aufgabenstellung ist daher allgemeiner formuliert als, es zur Bestimmung des Arbeitspunktes notwendig wäre.

Der FFT-Befehl

Der FFT-Befehl verwendet den von Cooley und Tukey entwickelten Algorithmus zur schnellen Berechnung diskreter Fourier-Transformationen [3] (siehe Kapitel 3.). Für die Programmierung der eigentlichen Transformation wurde eine spezielle FORTRAN-Version aus [7] verwendet. Der einfachste Aufruf des Befehls kann beispielsweise so aussehen:

```
FFT SAMPLE1 SPEKTRUM
```

Der Befehl nimmt die Eingangsdaten der komplexen Variablen SAMPLE1 (angenommen, diese Variable enthält zuvor ausgelesene Ablagedaten des Monitorsystems), transformiert sie und speichert das erhaltene Frequenzspektrum in der komplexen Zielvariablen SPEKTRUM. Das Spektrum steht somit zur weiteren Analyse mit EPOS zur Verfügung.

Bevor die eigentliche Transformation — die ja auf komplexwertigen Daten definiert ist — vorgenommen werden kann, bietet FFT folgende Möglichkeiten, die über Optionen angegeben werden können:

- **Lineare Transformation der Eingangsdaten**

Jeder Datenwert d_i der Eingangsdaten kann in einen Wert $\hat{d}_i = \alpha d_i + \beta$ überführt werden. Damit läßt sich eine Anpassung an verschiedene Signalquellen mit stark unterschiedlichem Amplitudenverhalten (Offsets, Verstärkungen etc.) erreichen.

- **Auswahl der Datenpunkte**

FFT kann bis etwa 32000 Datenpunkte transformieren. In der Regel ist allerdings eine so große Anzahl von Punkten in der Transformation in folgenden Fällen nicht erwünscht:

- Das Signal enthält physikalisch verwertbare Information nur im ersten Teil der Daten.
- Die Rechenzeit muß möglichst kurz sein. Daher soll nur die kleinstmögliche Anzahl von Werten berücksichtigt werden.

Der Operator erlaubt die beliebige Begrenzung der Anzahl der Daten durch einfache Angabe der auszuwertenden Punktzahl.

- **Verbot des "Zero-Paddings"**

Der verwendete Algorithmus ist nur auf einer Anzahl von Eingangswerten definiert, die durch eine Zweierpotenz 2^k gebildet werden können. Fällt die Anzahl der zu transformierenden Werte nicht mit einer Zweierpotenz zusammen, bieten sich zwei Möglichkeiten:

1. Die Anzahl der Daten wird auf die nächst kleinere Zahl 2^k begrenzt. Folglich verliert man Eingangsdaten und durch die geringere Punktzahl auch an Präzision.
2. Die Daten werden bis zur nächst höheren Zweierpotenz 2^{k+1} "verlängert", indem man 0-Werte angehängt ("paddet"). Hierdurch wird die Präzision nur scheinbar erhöht, da der ursprüngliche Informationsgehalt der Daten erhalten bleibt.

Der FFT-Befehl führt standardmäßig das Zero-Padding aus, falls die Zahl der Datenpunkte näher an der nächst größeren Zweierpotenz liegt. Ansonsten wird auf die nächst kleinere Potenz begrenzt. Das "Verlängern" der Daten kann explizit verboten werden.

- **Applikation einer besonderen Fensterfunktion**

Vor der eigentlichen Transformation können die Datenwerte mit einer Fensterfunktion multipliziert werden. Implementiert wurden das Blackman-Harris-, das Hamming- und das Sinus-Fenster. Auf die genaue Art der Transformation soll hier nicht näher eingegangen werden.

Die Verwendung dieser Fensterfunktionen kann die Trennung von nahe beieinander liegenden Spektralpeaks stark verbessern [8].

Nach der oben beschriebenen Behandlung der Eingangsdaten führt der FFT-Operator die Transformation durch. Dabei werden alle reellen Datenpunkte in den Realteil entsprechend komplexwertiger Zahlen übernommen. Die eigentliche Berechnung erfolgt mit den komplexen Daten. Als Resultat werden wieder reellwertige Zahlen gebildet. Hierbei sind folgende Einstellungen möglich:

- **Berechnung der Phase oder des Spektrums**

Die Phase kann durch die in Gleichung (3.31) auf Seite 38 gegebene Beziehung für die P_n berechnet werden. Für das Spektrum der A_n gilt Gleichung (3.30).

- **Lineare oder logarithmische Skalierung der Amplituden**

Wird eine Berechnung des *Spektrums* vorgenommen, so bildet FFT bei Bedarf das "Power-Spektrum" des Signals. Hierbei werden die diskreten Amplituden A_n für eine bestimmte Frequenz in *dBm* ausgedrückt. FFT erreicht dies durch die Auswertung von

$$A_n^{dBm} = 20 \log_{10} \left(\frac{A_n}{0.316} \right)$$

Durch diese Umrechnung lassen sich die Resultate von FFT direkt mit den dBm-Anzeigen anderer Meßgeräte vergleichen.¹

An dieser Stelle muß darauf hingewiesen werden, daß wegen des Abtast-Theorems und der Symmetrie der Transformation nur die erste Hälfte des berechneten Spektrums physikalisch relevante Daten enthält. FFT speichert daher in der Zielvariablen nur die Werte bis zur Nyquist-Frequenz.

Die folgenden Beispiele illustrieren den Gebrauch oben beschriebener Optionen:

```
FFT/MAGNITUDE/POINTS=1000/NOZEROPAD SAMPLE1 SPEKTRUM
```

Dieses Kommando berechnet das Frequenzspektrum in linearer Skalierung ("Magnitude"). Die angegebene Zahl von 1000 Werten ist keine Zweierpotenz. FFT würde daher den Wert automatisch auf $2^{10} = 1024$ verlängern. Dies ist aber durch NOZEROPAD verboten worden. Daher nimmt der Operator die Zahl $2^9 = 512$. Die Variable SPEKTRUM enthält dann 256 Werte.

```
FFT/POINTS=4096/PHASE/MULTIPLY=2.0 SAMPLE1 PHASEDATA
```

Dieser Befehl berechnet die Phasenlage der einzelnen Frequenzkomponenten des in SAMPLE1 enthaltenen Signals und speichert die Resultatswerte in PHASEDATA. Es werden nur 4096 Punkte transformiert, und vor der Transformation wird jeder Wert mit 2 multipliziert. Die Variable PHASEDATA enthält nach der Ausführung 2048 Werte.

Neben den oben vorgestellten Optionen ist FFT mit zusätzlichen Möglichkeiten ausgestattet. Insbesondere gestattet eine Option die Berücksichtigung von Interpolationsdaten analog Gleichung (3.38) über eine zuvor von PEAKSEARCH gefüllte Variable. Dies kann zur Korrektur von berechneten Phaseninformationen dienen: Die Verwendung von FFT und PEAKSEARCH zur experimentellen Bestimmung des Phasenvorschubs bei ELSA wird in [18] näher erläutert.

Der FFT-Befehl arbeitet in der aktuellen Version von EPOS nur auf Sample-Variablen. Die Ergebnisse werden wiederum in Sample-Variablen abgelegt. Dabei werden die Strukturfelder der Zielvariablen mit den entsprechenden Information über das Spektrum gefüllt. Hierzu gehören neben den Daten auch die Angabe der Skalierung (linear oder logarithmisch) und der Frequenzabstand zwischen 2 Bins sowie die Nyquistfrequenz. Durch die Verwendung entsprechender Grafik-Befehle kann EPOS unverzüglich ein Diagramm des berechneten Spektrums erzeugen.

¹In dieser Normierung ist 0 dBm definiert über eine Sinus-Schwingung von $0.316V_{peak}$ mit 1mW in 50Ω [12].

Der PEAKSEARCH-Befehl

Hat man durch FFT ein Spektrum der Strahlagedaten errechnet, kann man den PEAKSEARCH-Befehl zur Analyse des Spektrums einsetzen. Der Befehl führt im wesentlichen zwei Operationen aus:

- Suche nach einem Peak, das heißt einer deutlichen Amplitudenüberhöhung in den übergebenen Daten.
- Vermessung eines gefundenen Peaks und Berechnung der Koordinaten des Peak-Maximums. Optionale Korrektur der hierbei erhaltenen Werte durch ein bestimmtes Korrekturverfahren.

Der PEAKSEARCH-Operator arbeitet wie FFT auf Sample-Variablen. Der einfachste Aufruf könnte beispielsweise lauten:

```
PEAKSEARCH SPEKTRUM
```

Dieser Befehl würde das gesamte Spektrum (gespeichert in SPEKTRUM) nach dem *höchsten* auftretenden Peak absuchen und die gefundenen Koordinaten des Maximums ausdrucken. Allerdings kann man PEAKSEARCH auch zusätzlich zwei einfache Zahlen-Variablen mitgeben, in die die gefundenen Koordinaten abgelegt werden können:

```
PEAKSEARCH SPEKTRUM FREQ AMPL
```

Nach Ausführung obigen Kommandos enthalten FREQ bzw. AMPL die Koordinaten des gefundenen Maximums und sind damit zur weiteren Verarbeitung durch EPOS verfügbar.

Der Bereich der Ausgangsdaten, in dem nach einem Peak gesucht werden soll, kann durch verschiedene Optionen eingeschränkt werden. Dadurch kann man *Ausschnitte* des Spektrums besser vermessen und einzelne Peaks isolieren. PEAKSEARCH sucht immer den *höchsten* Peak im angegebenen Bereich. Mögliche Optionen sind:

- /START=Wert, z.B. /START=1000.0
Die Suche startet beim angegebenen Wert. Im Beispiel startet PEAKSEARCH bei einem Wert von 1000 Hz.
- /STOP=Wert, z.B. /STOP=5000.0
Die Suche stoppt beim angegebenen Wert. Im Beispiel endet die Suche bei 5000 Hz.
- /CENTER=Wert, z.B. /CENTER=2000.0
Die Suche erfolgt symmetrisch um den angegebenen Wert. Die Intervallbreite beträgt in der Voreinstellung 10% der Gesamtbreite des Ausgangsbereichs. Die Breite des Bereichs kann aber durch SPAN geändert werden:
- /SPAN=Wert, z.B. /SPAN=100.0
Die Angabe dieser Option ist nur dann sinnvoll, wenn auch CENTER angegeben wurde. Der angegebene Wert definiert dann das Suchintervall links und rechts vom gegebenen CENTER-Wert.

Hat PEAKSEARCH einen Peak gefunden, so kann die genaue Vermessung erfolgen. Gibt der Benutzer keine besonderen Optionen an, so wird der Bin mit dem höchsten Wert als Zentrum des Peaks interpretiert. Ausgegeben werden dann die Koordinaten dieses Bins. Hat man dagegen Informationen über das Spektrum, die eine Korrektur der Werte ermöglichen, bietet PEAKSEARCH *zwei* Optionen:

- **Korrektur eines angenommenen Spectral-Leakage-Effekts**
Der Operator verwendet das in Kapitel 3 dieser Arbeit auf Seite 43 vorgestellte Korrekturverfahren zur Interpolation zwischen einzelnen Bins im Spektrum. Die Berechnung der Näherung erfolgt automatisch, falls die Option /SPECTRAL angegeben wurde.

– **Gewichtete Mittelwertbildung**

Die Vermessung des Peaks erfolgt durch die Bildung eines gewichteten Mittelwertes in einer angegebenen Zone, die symmetrisch um das gefundene Maximum liegt. Durch die Einbeziehung mehrerer Werte rechts und links vom eigentlichen Maximum können Auswirkungen von Rauschen auf die Bestimmung der Koordinaten vermindert werden. Der Bereich, über den gemittelt werden soll, kann durch die Option /MEAN spezifiziert werden, beispielsweise 50 Hz zu beiden Seiten eines gefundenen Maximums:

```
PEAKSEARCH/MEAN=50.0 SPEKTRUM
```

Bevor PEAKSEARCH eine Interpolation durchführt, wird in jedem Fall die genaue Struktur des gefundenen Peaks analysiert. Tritt zum Beispiel eine vollkommen symmetrische Struktur des Peakzentrums zutage, so kann auf eine Interpolation verzichtet werden.

Der PEAKSEARCH-Befehl arbeitet wie FFT auf Sample-Variablen. Die Anwendung ist aber nicht auf berechnete Spektren begrenzt. Vielmehr kann jede Datenmenge auf auftretende Peaks untersucht werden, unabhängig davon, ob es sich um durch ein mittels FFT berechnetes Spektrum handelt oder nicht. EPOS erlaubt beispielsweise auch die Analyse der von einem Spektrum-Analysator ausgelesenen Daten mit dem PEAKSEARCH-Befehl.

4.3 Automatisierung der Arbeitspunktmessung

Nachdem nun mit den beschriebenen EPOS-Befehlen das zur Bestimmung des ELSA-Arbeitspunktes erforderliche Werkzeug vorhanden ist, kann die eigentliche Durchführung der Messung durch ein EPOS-Programm erfolgen. Hierbei wird natürlich ein funktionsfähiges Monitormodul vorausgesetzt.

Dem entwickelten Programm "QMESS" liegt das in Kapitel 3 vorgestellte Meßprinzip zur Bestimmung des Arbeitspunktes zugrunde. Der genaue Ablauf für eine *einzelne Messung* wird durch das Flußdiagramm in Abbildung 4.1 skizziert. Der Programmtext befindet sich im Anhang der Arbeit.

Der Kern des Meßprogramms besteht im wesentlichen aus folgenden Programmzeilen:

```
READSAMPLE/DIFF 1 SAMPLEDATA (a)  
FFT/MAGNITUDE/POINTS=4096 SAMPLEDATA SPECTRUM (b)  
PEAKSEARCH/SPECTRAL/START=0.911E+06/STOP=1.823E+06 SPECTRUM BETAFREQ AMPL (c)  
DIVIDE BETAFREQ 1823825.0 QF (d)
```

Im diesem Beispiel wird angenommen, daß der Nachkommateil des Arbeitspunktes größer als 0.5 ist. Folgende Operationen werden in (a)–(d) durchgeführt:

- (a) Das Ablagesignal von Monitor 1 (in Halbzelle 1) wird ausgelesen. "DIFF" gibt an, daß das Differenzsignal geliefert werden soll. Der Monitor in der ELSA-Halbzelle 1 wurde gewählt, da an dieser Stelle die Dispersionsfunktion D_x nur einen sehr kleinen Wert besitzt und daher eventuell störende Synchrotronsatelliten stark unterdrückt sind.

Die Variable "SAMPLEDATA" enthält nach Ausführung des Kommandos 8192 Lagewerte, codiert als Zahlen zwischen 0 und 255, was der 8-Bit Auflösung entspricht. Die Wandlerelektronik ist auf eine Abtastrate von 10 MHz eingestellt. Daher repräsentieren diese Daten einen Zeitbereich vom Triggerzeitpunkt bis etwa $800\mu\text{sec}$ und damit etwa die ersten 1600 Umläufe nach der Injektion. Die Datennahme startet durch den Triggerpuls, der aus dem Triggersignal der Synchrotron-Kicker gewonnen wurde.

- (b) Das Frequenzspektrum der Lagedaten wird berechnet. Dabei werden aber nur die ersten 4096 Werte (eine Zweierpotenz) verwendet, da eine Kohärenz der Betatronschwingung nach

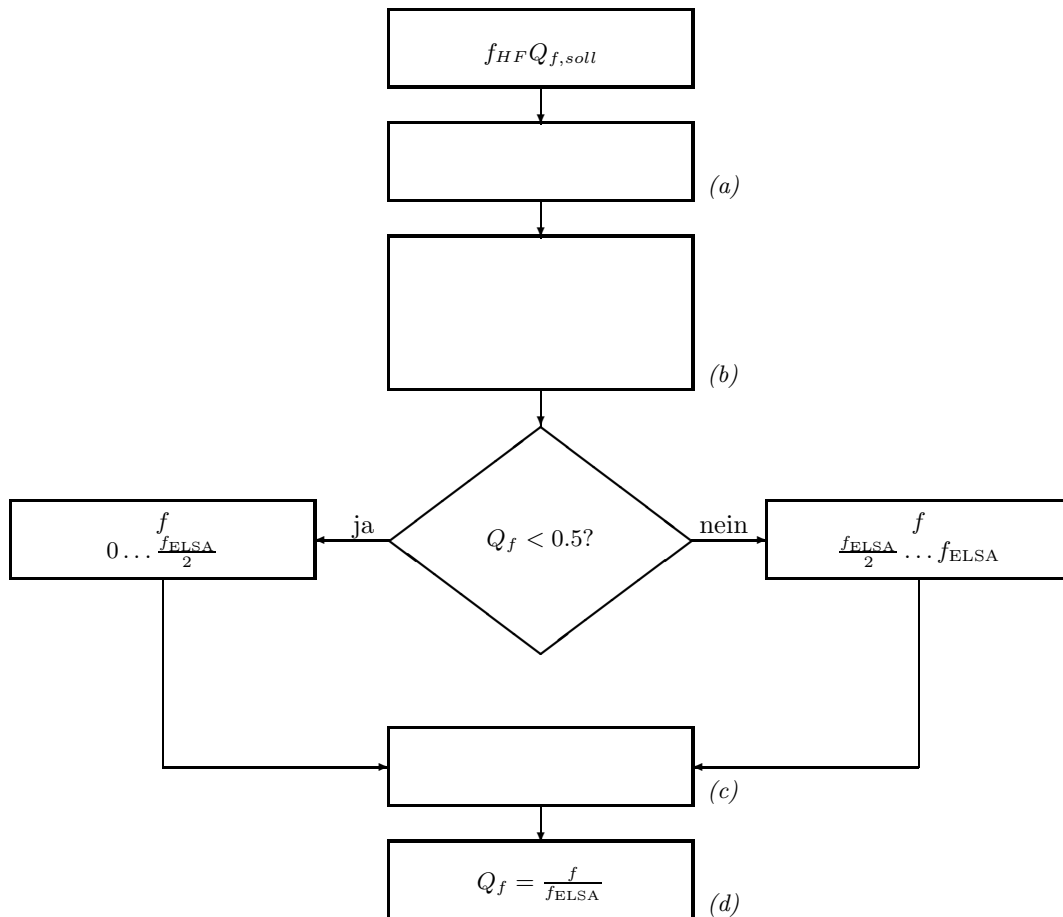


Abbildung 4.1: Flußdiagramm zur Arbeitspunktmessung durch EPOS

maximal etwa $400\mu\text{sec}$ abgeklungen ist. Die Einschränkung der Werte ist daher physikalisch notwendig. Durch Angabe von "MAGNITUDE" wird das Spektrum nicht logarithmisch in dBm ausgedrückt. Dies ist eine zwingende Voraussetzung für die Fehlerkorrektur. Die erhaltenen Daten werden in "SPECTRUM" gespeichert. Diese Variable enthält nach Ausführung des Kommandos genau 2048 Frequenzwerte, die einem Bereich von 0 Hz bis zur Grenzfrequenz von $\frac{10}{2}$ MHz entsprechen.

- (c) Dieser Befehl sucht im relevanten Frequenzbereich nach dem höchsten vorhandenen Peak. Abgesehen vom Umlaufspeak ist dieser Peak unter normalen Betriebsbedingungen (kein Akkumulationsmode) der Betatron-Peak. Die Option "SPECTRAL" initiiert die Korrektur des durch die FFT entstandenen Spectral-Leakage Effekts. PEAKSEARCH liefert die korrigierte Frequenz an die Variable "BETAFREQ" und die interpolierte Maximalamplitude des Peaks in "AMPL". Im Beispiel erstreckt sich der Suchbereich von $\frac{f_{\text{ELSA}}}{2}$ bis f_{ELSA} .
- (d) Durch Division der so erhaltenen Frequenz durch die Umlauffrequenz in ELSA kann der Nachkomma-Anteil des eingestellten Arbeitspunktes bestimmt werden. Das Ergebnis wird in "QF" gespeichert. Als Umlauffrequenz wird dazu der von der Hochfrequenz vorgegebene Wert verwendet, da sich der Strahl dieser Frequenz exakt anpaßt. Der Frequenzwert wird vom Programm QMESS zu Beginn der Messung vom Bediener angefordert; im Beispiel ist der Wert allerdings explizit ausgeschrieben.

Der hier vorgestellte zentrale Teil des Programms ist wiederum selbst in eine Programmschleife eingebettet, die die automatische Wiederholung einer Einzelmessung ermöglicht. Der Bediener des

Programms kann angeben, wieviele Einzelmessungen hintereinander durchgeführt werden sollen. EPOS bildet aus den vorgenommenen Einzelmessungen eine Meßreihe und berechnet den Mittelwert des Arbeitspunktes sowie die zugehörige Standardabweichung. Durch die so erreichte Statistik kann die Zuverlässigkeit der Messung deutlich gesteigert werden. Tauchen während der Messung unvorhergesehene Schwierigkeiten auf (etwa bedingt durch plötzlichen Strahlverlust), so kann das Programm abgebrochen und erneut aufgerufen werden. Nach Abschluß einer Meßreihe werden die Daten zur Sicherheit auf eine Plattendatei gespeichert.

Das Programm liefert abschließend den gemessenen Arbeitspunkt mit Angabe des statistischen Fehlers. Der so gewonnene Wert ist in einer EPOS-Variablen gespeichert und steht so zur weiteren Bearbeitung zur Verfügung. Die bei den Messungen an ELSA erhaltenen Resultate von QMESS werden in Kapitel 5. beschrieben.

4.4 Fehlerabschätzung durch Simulation

Die Abschätzung der bei der Arbeitspunktmessung auftretenden Fehler ist zwingend notwendig, um die in der Praxis durch EPOS ermittelten Werte für Q einordnen zu können und ein gewisses Vertrauen in die Zuverlässigkeit der automatischen Messung zu gewinnen.

Wie in Kapitel 3. bereits angesprochen wurde, handelt es sich bei der Korrektur der durch die Diskretisierung hervorgerufenen Fehler um eine *Näherung*, da die durch die Fourier-Transformation erhaltenen Amplitudenwerte selbst wiederum fehlerbehaftet sind. Dadurch kann die Interpolation nur bedingt präzise arbeiten.

Das Meßprinzip zur Bestimmung von Q reduziert das Problem auf die genaue Bestimmung einer einzelnen Frequenz. Insgesamt ist damit die Arbeitspunktmessung mit EPOS folgenden Fehlerquellen ausgesetzt:

- Fehler bei der Bestimmung der Strahlablage durch den Monitor. Sie können hervorgerufen sein durch ungenaue Kalibration des Monitors und der Elektronik sowie Rauschen.
- Fehler, die durch die Digitalisierung des Lagesignals auftreten. Bei den für ELSA verwendeten Sample-Modulen beträgt die Auflösung 8 Bit bei 0 bis 2 Volt. Damit entfallen auf ein Bit ca. 8 Millivolt, was einer Ungenauigkeit von etwas weniger als 1 % entspricht. Hierbei ist ein Bitflip der Wandler von einem LSB ("least significant bit") angenommen. Die Digitalisierung an sich liefert ein zusätzliches Rauschspektrum, welches dem eigentlich gemessenen Spektrum überlagert wird.
- Fehler, die durch ein restliches Aliasing auftreten. Obwohl der eingesetzte Anti-Alias-Tiefpass so steilflankig wie möglich ausgesucht wurde, bleibt natürlich ein Rest der Frequenzkomponenten überhalb der Cutoff-Frequenz erhalten und überlagert sich dem Bereich bis zur Nyquist-Frequenz.
- Numerische Fehler bei der Berechnung der Fourier-Transformation. Obwohl in EPOS alle wichtigen Größen mit doppelter Genauigkeit berechnet werden, kommt es zu Rundungsfehlern. Dadurch werden die einzelnen Amplitudenwerte des Spektrums beeinflusst.
- Die Durchführung der Korrektur der bereits fehlerbehafteten Eingangsdaten erzeugt wiederum einen zusätzlichen Fehler bei der Frequenzbestimmung.

Das Hauptproblem bei der Abschätzung des effektiven Gesamtfehlers der Q -Messung gestaltet sich deshalb schwierig, da sich von den oben beschriebenen Fehlerquellen nur eine einzige quantitativ erfassen läßt, nämlich die Fehlerfortpflanzung durch Anwendung der Korrekturformel. Tatsächlich ist aber nicht einmal die Ungenauigkeit der Eingangsdaten der Korrektur (die A_n) quantifizierbar.

Aus diesem Grund erscheint die analytische Abschätzung der auftretenden Ungenauigkeiten als nicht praktikabel.

Um dennoch Aufschluß über die Qualität des Meßverfahrens zu erhalten, wurde die Messung von Frequenzen mit EPOS *simuliert*. Zwei Bereiche wurden dabei abgedeckt:

- *Software*

Man kann durch ein entsprechendes mathematisches Modell die Werte einer digitalisierten harmonischen Schwingung simulieren und als Ausgangsdaten in die Fourier–Transformation FFT einspielen. Durch Vergleich der simulierten Ausgangsfrequenz mit dem Resultat der Messung erhält man Aufschluß über die Genauigkeit der verwendeten Software. Dies umfaßt die Kombination von FFT– und PEAKSEARCH–Befehl.

- *Hardware und Software kombiniert*

Durch Verwendung eines hochgenauen Signalgenerators kann man direkt ein analoges Signal in den Eingangskanal eines Wandlermoduls geben. Die Amplitude ist dabei so gewählt, daß sie möglichst genau der von der restlichen Monitorelektronik gelieferten Signalstärke entspricht. Dieser Ansatz bietet die wertvolle Möglichkeit, bereits das fertige Meßprogramm QMESS einzusetzen, da EPOS natürlich nicht unterscheiden kann, ob die Daten durch einen Generator simuliert wurden oder aus realen Betriebsbedingungen an ELSA resultieren. Der Vergleich der gemessenen mit der simulierten Frequenz erlaubt damit die Abschätzung des effektiven Gesamtfehlers für die Bestimmung des Arbeitspunktes. Darin eingeschlossen sind auch die Fehler, die durch die Digitalisierung des Lagesignals hervorgerufen werden.

Abbildung 4.2 gibt einen Überblick über den zur Simulation verwendeten Aufbau von Hard– und Software.

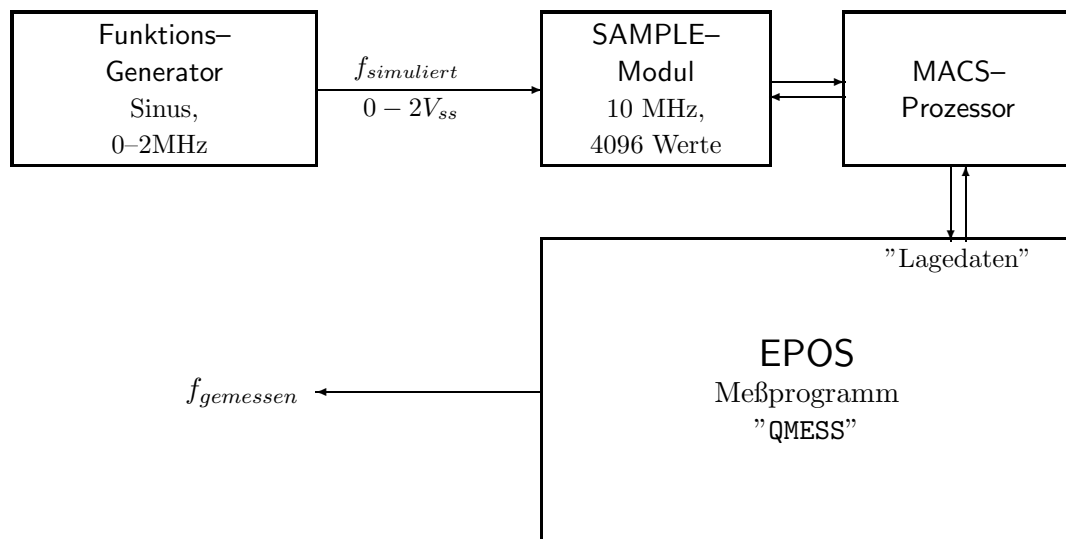


Abbildung 4.2: Simulation zur Fehlerabschätzung

Auf einen Punkt muß allerdings hingewiesen werden: Die durch die Simulation bereitgestellten Daten entsprechen jeweils einer *einzelnen* harmonischen Schwingung. Das reale Spektrum des ELSA–Strahls enthält aber eine Vielzahl einzelner (wenn auch schwacher) Frequenzkomponenten, die alle zu einem Spektrum überlagert sind. Dadurch kann die Messung der Betatronfrequenz mit EPOS nicht ganz so präzise arbeiten, wie durch die Simulation ermittelt wurde:

Die in Kapitel 3 vorgestellte Korrektur des Spectral–Leakage durch Verwendung einer *Interpolationsformel* geht davon aus, daß nur *eine* Frequenzkomponente im Ausgangssignal vorliegt. Nur in diesem Fall ist die Korrektur vollständig. Ist die Frequenz des Ausgangssignals nicht diskret, sondern liegt eine von einer Deltafunktion $\delta(f - f_0)$ abweichende *Verteilung* der Ausgangsfrequenzen in einem "Peak" vor, so arbeitet die Korrektur lediglich als *Näherung*. Diese Näherung ist aber nur dann physikalisch gerechtfertigt, wenn angenommen werden kann, daß die Frequenzverteilung des Peaks im Ausgangssignal *symmetrisch* um die Hauptkomponente liegt. Nur dann entspricht die Hauptfrequenz auch dem Zentrum des Peaks. Ist der Peak dagegen im Zentrum asymmetrisch, so erzeugt die Verwendung der Korrekturformeln einen *systematischen* Fehler bei der Frequenzbestimmung. Die Abschätzung dieses systematischen Fehlers hängt von der jeweiligen Peakform ab und kann nicht allgemein angegeben werden.

Die Verwendung eines hochgenauen Signalgenerators ergibt die bestmögliche Annäherung an eine deltaförmige Frequenzverteilung im Ausgangssignal. Aus diesem Grund kann die Korrektur des Spectral–Leakage in der *Simulation* maximal effektiv arbeiten. Für Messungen am realen ELSA–Strahl muß aber immer zuerst festgestellt werden, ob die Form der auszumessenden Peaks im Bereich des Maximums ausreichend symmetrisch ist. Ist dies nicht der Fall, so muß auf eine Interpolation verzichtet werden. In diesem Fall kann die Genauigkeit des Meßverfahrens nur durch die Auflösung der diskreten Fouriertransformation gegeben sein, was sich in einer größeren Streuung der Meßwerte bemerkbar macht. Der PEAKSEARCH–Operator überprüft aus oben genannten Gründen immer die Form des Peaks, bevor eine Korrektur versucht wird. Ist das Peakzentrum asymmetrisch, wird eine Warnung ausgegeben. Bei "pathologischen" Peaks muß auf eine Korrektur ganz verzichtet werden.

Bei allen durchgeführten Simulationen wurden die Fourier–Transformation und die Vermessung des Spektralpeaks mit genau den Optionen der Befehle FFT und PEAKSEARCH vorgenommen, die auch für die eigentliche Messung des Arbeitspunktes eingestellt werden müssen.

Abbildung 4.3: Übersicht über das Ergebnis einer kombinierten Simulation

Resultat der Simulation:

Das Resultat einer Fehlerbestimmung durch eine kombinierte Simulation unter Verwendung eines Signalgenerators und der für die Arbeitspunktmessung eingesetzten Wandlerelektronik gibt Abbildung 4.3 an. Aufgetragen ist die gemessene Abweichung der ermittelten Frequenz für jeweils eine simulierte Sollfrequenz.

- Die Abweichung wird generell etwas größer, je größer die zu messende Frequenz ist. Dies

ist verständlich, da bei einer festen Abtastrate bei einer niedrigen Frequenz relativ viele Meßpunkte pro Periode gewonnen werden, bei höheren Frequenzen jedoch immer weniger. Dadurch kommt es hier durch die Fouriertransformation zu größeren Fehlern, als es bei kleinen Frequenzen der Fall wäre. Aus diesem Grund bleibt der *relative Fehler* $|\frac{\Delta f}{f}|$ etwa konstant.

- Der relative Frequenzfehler des Meßverfahrens liegt unter den idealisierten Bedingungen (diskrete harmonische Eingangsfrequenz etc.) bei etwas weniger als $|\frac{\Delta f}{f}| \approx 10^{-5}$.

Zur Demonstration der Auswirkung des verwendeten Korrekturverfahrens dient die folgende kleine Meßreihe. Sie listet jeweils eine simulierte Frequenz und die von EPOS gemessene Frequenz mit und ohne Korrektur. Die simulierte Frequenz konnte durch den verwendeten Signalgenerator mit einer Präzision von besser als $|\frac{\Delta f}{f}| \approx 10^{-7}$ generiert werden [20]. Die Ergebnisse der exemplarisch aufgenommenen Reihe sprechen für sich:

<i>f simuliert</i>	<i>f ohne Korrektur</i>	<i>f mit Korrektur</i>
100000.0 Hz	100097.6 Hz	100001.1 Hz
300000.0 Hz	300292.9 Hz	299996.5 Hz
500000.0 Hz	500488.3 Hz	499995.2 Hz
700000.0 Hz	699462.8 Hz	699994.5 Hz
900000.0 Hz	899658.2 Hz	900000.0 Hz
1100000.0 Hz	1099853.5 Hz	1100010.0 Hz
1300000.0 Hz	1300048.8 Hz	1300008.6 Hz
1500000.0 Hz	1500244.1 Hz	1500009.9 Hz
1700000.0 Hz	1700439.5 Hz	1699995.5 Hz
1900000.0 Hz	1899414.1 Hz	190005.9 Hz

Die Tabellenwerte zeigen, daß das verwendete Korrekturverfahren eine Verbesserung der Genauigkeit um etwa den Faktor 10^3 ermöglicht. Dadurch gelangt die erreichte Präzision der Arbeitspunktmessung in den Rahmen der in der Aufgabenstellung geforderten Genauigkeit.

Um das Vertrauen in die automatische Messung zu erhöhen, mißt das verwendete EPOS-Programm den Arbeitspunkt *bei gleichen Einstellungen* mehrfach. Nach Durchführung von beispielsweise 30 aufeinanderfolgenden Messungen wird dann der Mittelwert und die Standardabweichung (als statistischer Fehler des Mittelwertes) berechnet. Die durch die 1σ -Breite der Gauss-Verteilung angezeigte Streuung der einzelnen Arbeitspunktwerte gibt damit ein *statistisches* Maß für die Genauigkeit der Messung — vorausgesetzt, der Beschleuniger arbeitet während der Einzelmessungen stabil.

Zusammenfassend kann bei allen Arbeitspunktmessungen mit hoher Wahrscheinlichkeit davon ausgegangen werden, daß der relative Fehler der Messung etwa $|\frac{\Delta f}{f}| \approx 10^{-5}$ beträgt. Dies sollte in der Praxis durch die Streuung der Meßwerte um den entsprechenden Betrag verifiziert werden können. Bei schlechteren Eingangsvoraussetzungen – wie zum Beispiel starkem Rauschen etc. – erwartet man eine entsprechend größere Streuung.

5. Ergebnisse der Messungen an ELSA

Anmerkung zur Durchführung der Messungen

Bei allen in diesem Kapitel vorgestellten Messergebnissen wurde ELSA im Stretchermode betrieben. Der Elektronenstrahl wurde im Synchrotron auf eine Energie von 1.0 GeV beschleunigt und alle 20 Millisekunden nach ELSA transferiert. Hier wurde der Strahl bis zur neuen Injektion gespeichert. Das Tastverhältnis war bei allen Messungen auf 1:0, d.h. auf die Aufnahme jedes Synchrotron-Zyklus, eingestellt. Damit konnte gezeigt werden, daß die Bestimmung des Arbeitspunktes mit EPOS problemlos während des Normalbetriebs der Maschine durchgeführt werden kann. Die verwendete Hard- und Software entsprach in Aufbau und Zusammensetzung dem für den späteren ELSA-Routinebetrieb geplanten System.

Zur Bestimmung der Strahlablage wurde ein funktionsfähiges Monitormodul, bestehend aus HF- und NF-Teil sowie einem Prototyp der von M.Kiesheyer entwickelten Wandlerelektronik verwendet. Das Modul wurde an den Knopfmonitor in Halbzelle 1 angeschlossen, da hier aufgrund der kleinen Dispersionsfunktion mit keinen Störungen durch Synchrotronsatelliten gerechnet werden mußte. Die Monitorelektronik wurde von einem MACS-Prozessor überwacht und gesteuert. Die Steuerparameter waren durch das Kontrollsystem und EPOS zugänglich. Hierbei handelt es sich im wesentlichen um die Abtastrate, die Meßebeine und die Verstärkerparameter *Gain* und *Offset*. Die Abtastrate wurde auf 10 MHz fixiert, gemessen wurde (mit einer Ausnahme) in der x -Ebene des Strahls.

Die Monitorlelektronik wurde durch ein Signal getriggert, welches direkt der Triggerstufe der Synchrotron-Extraktionskicker entnommen war. Die Wandler waren so initialisiert worden, daß die Datennahme mit diesem Trigger *startete*. Dies stellte sicher, daß die Elektronik das Lagesignal des Elektronenstrahls während der ersten ELSA-Umläufe erfasst.

Für die korrekte Durchführung der Messung mußten nach einem notwendigen Phasenabgleich der HF-Elektronik (zusammen mit M.Schillo) die Verstärkerparameter *Gain* und *Offset* eingestellt werden. Hierzu beobachtet man durch die Grafik von EPOS das Aussehen des erfassten Monitor-Differenzsignals unmittelbar nach der Injektion. *Gain* und *Offset* wurden nun so eingestellt, daß das beobachtete Signal optimal im Erfassungsbereich der Wandlerelektronik zu liegen kam: Das Signal durfte nicht zu klein sein, da sonst die Amplitudenauflösung der Wandlerelektronik nicht ausreicht, und nicht zu groß, da sonst die Wandler übersteuert werden. Nach Einstellung der subjektiv besten Parameterwerte konnte mit den eigentlichen Messungen begonnen werden. Während der Messungen mußte die Lage des Signals im Amplitudenbereich der Wandler überwacht werden, damit es nicht – bedingt durch Intensitätsschwankungen des aus dem Synchrotron extrahierten Strahls – zu einer Unter- oder Übersteuerung der Elektronik kam.

Lagedaten des Monitorsystems

Vor Beginn der eigentlichen Arbeitspunktmessungen wurde das vom Monitorsystem gelieferte Signal mit den EPOS-Grafikwerkzeugen angezeigt und überprüft. Abbildung 5.1 gibt exemplarisch ein

Beispiel für das Aussehen der zu analysierenden Lagedaten. Die Landau-Dämpfung der Amplitude ist nach ca. 350 μsec fast vollständig. Danach ist keine kohärente Schwingung mit ausreichender Amplitude mehr zu erkennen. Die Gesamtstärke des Signals paßt sehr gut in den 8-Bit-Wandlerbereich von 0...255. Damit ist die Auflösung der Amplitudenwerte (fast) optimal. Die in ELSA beobachtete Strahlintensität betrug etwa 0.4 mA.

Abbildung 5.1: Vom Monitorsystem erfasste x -Lagedaten

Die ELSA-Umlauffrequenz

Eine Auswertung von 100 Einzelspektren zur Messung der ELSA-Umlauffrequenz ergab einen Wert von

$$f_{\text{ELSA}} (\text{gemessen}) = 1.823825 \text{ MHz} \pm 8 \text{ Hz}$$

Der so bestimmte Wert für die ELSA-Umlauffrequenz weicht etwa 230 Hz vom theoretisch eingestellten Wert ab. Dieser Wert läßt sich aus den eingestellten Frequenzen der bei ELSA und dem 2.5-GeV-Synchrotron verwendeten HF-Synthesizer und der ELSA-Harmonischenzahl (274) ableiten. Man erhält dann

$$f_{\text{ELSA}} (\text{theoretisch}) = 1.823593 \text{ MHz}$$

Die Ergebnisse der EPOS-Messung zeigen, daß die theoretisch eingestellte Frequenz *nicht exakt* der auf den Elektronenstrahl einwirkenden HF-Frequenz entspricht. Die Abweichung von ca. 230 Hz könnte durch Frequenzfehler der beiden Synthesizer oder einen systematischen Fehler bei der Korrektur des Spectral Leakage (vergl. Kapitel 4) *in diesem Fall* bedingt sein. Die genaue Analyse der Peakform der Umlauffrequenz im Spektrum ließ jedoch keinen Hinweis auf einen systematischen Fehler erkennen. Die Verifikation des genauen Wertes muß der Messung (möglichst direkt am HF-Resonator) mit einem hochgenauen Frequenzanalysator vorbehalten bleiben. Für die Berechnung des ELSA-Arbeitspunktes wird der *gemessene* Frequenzwert verwendet.

Berechnete Strahlspektren und der Arbeitspunkt

Das Resultat der Anwendung des FFT-Operators auf die Daten gibt Abbildung 5.2 wieder. Gezeigt ist der Frequenzbereich von 0 bis 2 MHz bei einer logarithmischen Angabe der jeweiligen Stärke. Deutlich sichtbar sind die drei stärksten Komponenten des Signals: Die ELSA-Umlauffrequenz

Abbildung 5.2: Durch FFT berechnetes Frequenzspektrum

von ca. 1.82 MHz und die beiden Betatron-Seitenbänder, hier bei etwa 0.65 und 1.1 MHz. Damit entspricht das Strahlspektrum weitestgehend der in Kapitel 3. theoretisch abgeleiteten Form. Der eingestellte Soll-Arbeitspunkt war $Q_x = 4.632$, $Q_z = 4.596$. Die genaue Vermessung (mit Korrektur) der zwei Seitenbänder durch PEAKSEARCH ergibt folgende Frequenzen:

- Betatron-Seitenband (1): $f_1 = 0.675112$ MHz
- Betatron-Seitenband (2): $f_1 = 1.148554$ MHz

Nach dem im Kapitel 3. vorgestellten Meßprinzip entspricht obiges Spektrum einem ELSA-Arbeitspunkt von

$$Q_x = 4.62975 \pm (\text{geschätzt}) 1 * 10^{-5}$$

bei Verwendung der *gemessenen* Umlauffrequenz. Die Abweichung des Sollwerts vom Istwert beträgt damit absolut etwa nur 0.02. Erst die mehrfache Wiederholung der Messung kann aber Auskunft über die Stabilität und die Streuung der Messwerte liefern. Dies wird in diesem Kapitel noch demonstriert werden.

Vermessen der Synchrotron-Schwingung

In Abbildung 5.2 erkennt man bei näherer Betrachtung der Betatron-Seitenbänder das Erscheinen (wenn auch stark unterdrückter) Synchrotron-Satelliten. Vergrößert man den Ausschnitt um das

zweite Betatron-Seitenband bei etwa 1.1 MHz, und trägt man die Frequenzanteile linear auf, so kann man die Synchrotron-Schwingung der Elektronen im ELSA-Strahl vermessen. Das Spektrum zeigt Abbildung 5.3. Aufgrund der niedrigen Amplituden der Satellitenpeaks wurde hierbei allerdings von

Abbildung 5.3: Betatron-Seitenband mit Synchrotron-Satelliten

einer Fehlerkorrektur abgesehen. Als Ergebnis erhält man bei der Einbeziehung beider Satelliten einen Wert von

$$\Omega_{sync} \approx 37.0 \pm 0.1 kHz$$

Aus der gemessenen Cavity-Leistung und der Shunt-Impedanz kann im Prinzip die Frequenz der Synchrotronschwingung für eine gegebene ELSA-Einstellung ermittelt werden. Dies soll hier aber nicht demonstriert werden.

Bestimmung des vertikalen Arbeitspunktes

Ein besonderer Versuch galt der Möglichkeit der Bestimmung des z -Arbeitspunktes aus dem Strahlage-Spektrum. Hierzu ist die Anregung einer kohärenten *vertikalen* Betatron-Schwingung nötig. Dies konnte näherungsweise dadurch erreicht werden, daß die im Transferkanal zwischen Synchrotron und ELSA befindlichen Strahlschieber-Magnete durch absichtliche falsche Einstellung einen vertikal dejustierten Einschuß in ELSA erzeugten. Nach Einstellung der Monitorelektronik auf die z -Ebene konnte man dann die *vertikale Strahlage* gewinnen. Die anschließend vorgenommene Fourier-Transformation lieferte das in Abbildung 5.4 *zusammen mit dem x -Spektrum* gezeigte Frequenzmuster. Die Vermessung des z -Spektrums liefert einen Arbeitspunkt von

$$Q_z = 4.55116 \pm (\text{geschätzt}) 1 * 10^{-5} , Q_{z,soll} = 4.596$$

Damit konnte gezeigt werden, daß — wenn auch mit Mühe — die Bestimmung des vertikalen Arbeitspunktes mit EPOS ebenfalls durchführbar ist. Das Meßverfahren ist allerdings für den Routinebetrieb nicht geeignet.

Durch die Überlagerung beider Spektren wird insbesondere deutlich: Im x -Spektrum tauchen die Betatron-Seitenbänder der vertikalen Bewegung auf, und umgekehrt. Der Effekt ist zwar schwach, läßt aber auf *Kopplungen* entweder der beiden transversalen Phasenräume schließen, oder auf eine z -Abhängigkeit des horizontalen Lagesignals der Monitore. Dies wurde bereits in Kapitel 4 angedeutet und kann nun aufgrund der gemessenen Daten nicht mehr ausgeschlossen werden. In der Tat haben die von M.Schillo durchgeführten Kalibrations- und Eichmessungen für die Monitore deutliche Kopplungen zwischen dem z - und x -Lagesignal ergeben, welche die Größenordnung des beobachteten

Abbildung 5.4: Vergleich von x - und z -Lagespektrum

Effektes erklären können. [24].¹ Die hypothetische Annahme der Kopplung von horizontalem und vertikalem Phasenraum gibt den Ansatz zu weiteren maschinenphysikalischen Untersuchungen, die in dieser Arbeit nicht durchgeführt wurden. Dies gilt auch für die Identifikation von im Spektrum auftauchenden schwächeren Peaks (sofern es sich nicht um unterdrückte Alias-Peaks handelt).

Die Stabilität des Meßverfahrens

Nachdem in den vorangegangenen Abschnitten prinzipiell die Bestimmung des Arbeitspunktes durch Anwendung der Operatoren FFT und PEAKSEARCH illustriert worden ist, kann nun zur *automatischen Messung* mit dem speziell entwickelten EPOS-Programm "QMESS" übergegangen werden. Ein erster Schritt war hierbei die automatische *Mehrfachmessung* eines Q -Wertes. Die einzelnen Meßwerte wurden dabei von EPOS in eine Meßreihe aufgenommen. Durch Bestimmung von Mittelwert und Standardabweichung kann man das Verfahren verbessern und darüber hinaus auch abschätzen, mit welcher Genauigkeit die gemessenen Werte reproduziert werden können. Die Streuung der Einzelwerte um den Mittelwert kann dabei Aufschluß über die Genauigkeit des Verfahrens liefern, unter der Annahme, daß der reale Arbeitspunkt keinen meßbaren Schwankungen unterworfen ist. Abbildung 5.5 zeigt die Resultate einer zehnfachen Messung bei einer ELSA-Intensität von

¹Eine Kopplung der Monitorsignale kann natürlich auch durch einen leicht um die Mittelachse gedrehten Monitor ausgelöst werden. Dies ist aber bei der hier nachgewiesenen Größenordnung sehr unwahrscheinlich.

Abbildung 5.5: Stabilität der Messung für einen Q -Wert

etwa 2 mA. Eine einzelne Messung dauerte etwa 3 Sekunden. Es wurde darauf geachtet, daß der Beschleuniger während des Meßzeitraumes mit gleichbleibender Strahlintensität lief. Der Mittelwert der Meßdaten ergibt $Q_x = 4.629819$ mit einer Streuung von $\Delta Q \approx 0.9 \cdot 10^{-5}$. Nimmt man einen nichtstreuenden realen Arbeitspunkt an, so könnte hiermit der Fehler der Arbeitspunktmessung als etwa absolut $\Delta Q \approx 10^{-5}$ abgeschätzt werden. Dies entspricht einem relativen Fehler von

$$\frac{\Delta Q}{Q} \approx 2 \cdot 10^{-6}$$

Eine Streuung von absolut etwa $\Delta Q \approx 10^{-5}$ konnte bei *fast allen Arbeitspunktmessungen* beobachtet werden. Dies ist ein Indiz dafür, daß EPOS ein stabiles und hochgenaues Meßverfahren zur Bestimmung von Q liefert. Anders interpretiert: Tritt eine Streuung der Meßwerte von deutlich mehr als 10^{-5} auf, so wäre dies ein Zeichen dafür, daß der ELSA-Arbeitspunkt meßbar schwankt (natürlich nicht dramatisch, doch nachweisbar). Dies gibt den Ansatz zu weiteren Untersuchungen beispielsweise über die Stabilität der verwendeten Quadrupolnetzgeräte. Derartige Untersuchungen wurden in der vorliegenden Arbeit nicht durchgeführt.

Bestimmung des horizontalen Arbeitspunkts zwischen 4.4 und 4.9

Die verwendete Version von "QMESS" erlaubte nun die vollautomatische Messung des x -Arbeitspunktes im Intervall von $Q_x = 4.4$ bis $Q_x = 4.9$. Hierbei wurden die für den Routinebetrieb von ELSA besonders wichtigen Arbeitspunkte nahe der $4\frac{2}{3}$ -Resonanz besonders berücksichtigt. Bei der Messung wurde zunächst der Soll-Arbeitspunkt über das Kontrollsystem eingestellt und ELSA dann durch die "Normierung" von Dipolen und Quadrupolen² auf einen definierten Maschinenzustand gesetzt. Das Programm QMESS protokollierte automatisch den eingestellten Sollwert und nahm Sollwert sowie Mittelwert und Streuung des jeweils gemessenen Arbeitspunktes in eine Meßreihe auf. Diese Meßreihe erlaubt so den *direkten Vergleich* von Soll- und Istwert des Arbeitspunktes.³ Die Abbildung 5.6 zeigt die Resultate der Messung. Für jeden eingestellten Sollwert wurde der Arbeitspunkt zehnfach gemessen, die Abbildung zeigt daher insgesamt etwa 370 einzelne Messungen.

²Die "Normierung" besteht im einmaligen Anfahren des maximalen Magnetstroms und Zurücknehmen des Stroms auf den augenblicklich eingestellten Wert. Dadurch erreicht der Magnet eine definierte und reproduzierbare Stärke des Magnetfeldes.

³Als Sollwert wird der vom Kontrollsystem angezeigte Wert bezeichnet.

Abbildung 5.6: Der ELSA-Arbeitspunkt Q_x

Die durchgezogene Linie entspricht einer exakten Übereinstimmung von Soll- und Meßwert. Es zeigt sich eine hervorragende Übereinstimmung der vom Kontrollsystem eingestellten Sollwerte mit den Meßwerten. Die relative Abweichung liegt im Schnitt bei weniger als 0.3 % des eingestellten Sollwertes, aber stets in Richtung auf einen kleineren Q -Wert. Diese einseitige Abweichung legt den Verdacht auf systematische Fehler bei der Einstellung des Soll-Arbeitspunktes durch das Kontrollsystem nahe: Zum Setzen des ELSA-Arbeitspunktes verwendet die ELSA-Software eine vom MAD-Simulationsprogramm berechnete Interpolationstabelle von Arbeitspunkten und Quadrupolströmen. Grundlage der Berechnungen ist die theoretische Optik der Maschine, die nicht unbedingt die reale Optik mit der hier geforderten Genauigkeit wiedergeben kann. Ungenauigkeiten der vom Kontrollsystem verwendeten linearen Interpolation können ebenfalls nicht ausgeschlossen werden. Für den praktischen ELSA-Betrieb rechtfertigen die Ergebnisse die einfache Regel, daß der reale Arbeitspunkt dem angezeigten Sollwert, vermindert um 0.01, entspricht.

Bei allen einzelnen Meßreihen des Q -Wertes betrug die (absolute) Streuung um den jeweiligen Mittelwert im Schnitt etwa $\Delta Q \approx 3 * 10^{-5}$. Allerdings gab es auch Mehrfachmessungen mit einer Schwankungsbreite von deutlich über 10^{-4} . Dies würde nach den Beobachtungen des vorangegangenen Abschnitts bedeuten, daß hier eine Schwankung des realen Arbeitspunktes vorgelegen hätte. Dies kann aber auch daher rühren, daß ELSA bei bestimmten Arbeitspunkten eine deutlich verkürzte Strahllebensdauer zeigt und die Länge des für die Frequenzanalyse verwertbaren Signals sowie das stark verringerte Signal-Rausch-Verhältnis zur präzisen Messung nicht ausreicht. In der

Tat ergeben sich insbesondere beim Anfahren der $2/3$ -Resonanz Schwankungen um etwa $3 * 10^{-4}$. Zur Bestimmung des Arbeitspunktes in diesem Bereich müßte man deshalb wahrscheinlich die Zahl der in der Fouriertransformation berücksichtigten Punkte stark verringern. Das Ausmaß der Reduzierung muß dann aber gegen den Verlust an Genauigkeit abgeschätzt werden. Diese Punkte bleiben späteren Untersuchungen vorbehalten und sind im Rahmen dieser Arbeit nicht angegangen worden.

Die genauen Meßdaten und die Gegenüberstellung der Sollwerte mit den gemessenen Q -Werten werden im Anhang der Arbeit aufgelistet.

Bestimmung der Arbeitspunktverschiebung durch Luftquadrupole

Abschließend wurde exemplarisch der Einfluß der in ELSA eingebauten Luftquadrupole auf den horizontalen Arbeitspunkt untersucht. Die Luftquadrupole dienen zur gezielten Verschiebung des

Abbildung 5.7: die Q -Verschiebung durch die Luftquadrupole

Maschinenarbeitspunktes über die $\frac{2}{3}$ -Resonanz und sind damit das entscheidende Element für die langsame Resonanzextraktion aus ELSA. Die verwendeten Magnete wurden von H. Ebeling im Rahmen seiner Diplomarbeit konzipiert und eingebaut [5]. Für die Messung wurde durch EPOS ein Luftquadrupolstrom zwischen 0 und 120 A gesetzt und der jeweilige Maschinenarbeitspunkt gemessen. Beteiligt waren die in Serie geschalteten Quadrupole in Halbzelle 32 und Halbzelle 1. Die Auswirkung dieses Paares auf den Arbeitspunkt zeigt Abbildung 5.7. Jeder Arbeitspunktwert

wurde durch QMESS zehnfach gemessen. Die Streuung der Einzelwerte betrug im Schnitt etwa $\Delta Q \approx 2 \cdot 10^{-5}$. Die Verschiebung des Arbeitspunktes Q_x durch das Quadrupolpaar wurde ermittelt als

$$\frac{\Delta Q}{I_{\text{Paar}}} \approx \frac{0.001}{10A}$$

und erwies sich als sehr stabil über den vermessenen Bereich von 0 bis ca. 120 Ampere. Der verschiebende Effekt der Luftquadrupole auf den Arbeitspunkt und damit die Einsatzmöglichkeit für die langsame Resonanzextraktion aus ELSA wurde somit einwandfrei nachgewiesen. Ein genauer Vergleich der erhaltenen Daten mit der theoretischen Verschiebung ΔQ , ausgehend von den in [5] angegebenen Quadrupolgradienten und der β -Funktion am Ort der beiden Luftquadrupole, muß noch durchgeführt werden.

Probleme bei den Messungen

Während einer Arbeitspunktmessung mit EPOS können im wesentlichen zwei Probleme auftreten, die besonders berücksichtigt werden müssen.

- Die Intensität des in ELSA injizierten Elektronenstrahls ist manchmal stärkeren Schwankungen unterworfen. Dadurch ist die Amplitude des von den Monitoren erfassten Lagesignals stark unterschiedlich. Wird die Amplitude sehr klein, so reicht die 8 Bit-Auflösung der Wandler nicht aus, um eine präzise Frequenzanalyse durchführen zu können – die Frequenzpeaks im Lagespektrum sind kaum noch erkennbar. Dadurch kann der Arbeitspunkt nur relativ ungenau bestimmt werden. Bei einer Übersteuerung der Wandler durch zu hohe Strahlintensität werden erhebliche Bereiche des Lagesignals in der Amplitude begrenzt. Dadurch wird die Vermessung der Frequenzpeaks sehr viel ungenauer. Außerdem erhöht sich das Rauschspektrum erheblich. Während der Messung sind die oben aufgeführten Effekte durch eine große Schwankungsbreite der Einzelwerte erkennbar. In diesem Fall sollte die Messung unter stabileren Betriebsbedingungen wiederholt werden.
- Bei den Messungen an ELSA zeigte sich, daß der gemessene Arbeitspunktwert von der jeweiligen Strahlintensität abhängt. Die Abhängigkeit des Arbeitspunktes besteht in einer Verschiebung zu höheren Werten um einen Betrag von etwa 10^{-3} für jeweils etwa 4–5 mA mehr Strahlintensität. Bei geringen Intensitäten unterhalb von etwa 2 mA ist keine Verschiebung feststellbar. Die genaue Klärung und Einordnung des Effekts muß späteren Untersuchungen vorbehalten bleiben. Die in dieser Arbeit durchgeführten Messungen wurden alle bei einer Intensität zwischen 0.5 und 1–2 mA vorgenommen.

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit befaßt sich mit der Konzeption und der Entwicklung des Programmpaketes "EPOS" und seiner Anwendung für die automatische Arbeitspunktmessung an ELSA.

Das bisher für ELSA eingesetzte computergestützte Kontrollsystem gestattet zwar die Einstellung des Beschleunigers für den Routinebetrieb im Stretcher- und Akkumulationsmode, bietet jedoch keine Erfassungs- und Verarbeitungsmöglichkeiten der vom ELSA-Monitorsystem gelieferten Daten über den Elektronenstrahl. Möglichkeiten zur Automatisierung von Meß- und Steueraufgaben und zur grafische Aufbereitung und Visualisierung von Meßdaten sind ebenfalls nicht vorhanden. Aus diesem Grund konnten bisher wichtige Aufgaben der Strahldiagnostik — wie beispielsweise die genaue Messung des Arbeitspunktes oder die Vermessung und Korrektur der Gleichgewichtsbahn — nicht praktikabel gelöst werden. Damit waren z.B. maschinenphysikalische Untersuchungen zur Optimierung der Resonanzextraktion aus ELSA stark eingeschränkt.

Durch die Erweiterung des Kontrollsystems mit EPOS steht jetzt ein universelles Werkzeug für die Beschleunigerphysik an ELSA zur Verfügung. Es integriert die Steuerung des Beschleunigers, die Verarbeitung von Monitorsignalen und Automatisierung von Meßaufgaben zusammen mit einem Paket zur Datenanalyse in einer einheitlichen, leicht zu bedienenden Umgebung.

Die Funktionstüchtigkeit des neuen Systems wurde durch die automatische Arbeitspunktmessung während des Routinebetriebs demonstriert. Ausgehend von einem theoretisch abgeleiteten Meßprinzip zur Bestimmung von Q konnten die nötigen Berechnungen in das allgemeine Arbeitskonzept von EPOS integriert werden. Ein spezielles Interpolationsverfahren zur Fehlerkorrektur bei der Spektralanalyse gestattet die Verbesserung der erzielten Genauigkeit bei der Bestimmung von Q um etwa drei Größenordnungen auf $\frac{\Delta Q}{Q} \approx 10^{-6}$. Die algorithmische Formulierung des Meßprinzips führte zur Entwicklung eines EPOS-Programms "QMESS", welches die vollautomatische Durchführung der eigentlichen Messungen vornimmt. Ergebnisdaten und Spektren können durch das Grafiksystem von EPOS jederzeit angezeigt werden. Die gemessenen Werte des Arbeitspunktes können in EPOS für weitere Analyse- oder Steueraufgaben weiterverarbeitet werden.

Durch die mit EPOS gewonnenen Möglichkeiten kann jetzt die Optimierung des Tastverhältnisses und anderer Qualitäten des an die Experimente gelieferten extrahierten Strahls unter stark verbesserten Randbedingungen angegangen werden.

Anhang

Listing des EPOS-Programms "QMESS"

Das folgende Listing enthält den Originaltext des für die automatische Arbeitspunktmessung an ELSA verwendeten Programms.

```
! Program zur automatischen Arbeitspunktmessung bei ELSA
!
! Ablauf fuer EINE Messung:
!
! - vom Kontrollsystem wird der aktuelle SOLL-Arbeitspunkt
!   angefordert
! - ein flag wird gesetzt, je nachdem, ob der Nachkomma-Anteil
!   des Sollwerts groesser oder kleiner als 0.5 ist
! - das Ablage-Signal fuer Monitor HZ1 wird gelesen
! - durch eine FFT und anschliessende Korrektur
!   wird die Lage des relevanten Betatron-Seitenbands ermittelt
! - diese Frequenz wird in den gemessenen Q-Wert
!   umgerechnet und dargestellt. Der Wert wird in eine
!   Messreihe aufgenommen.
! - der gemessene Q-Wert mit Fehler wird in die
!   Ergebnisvektoren uebernommen. Danach startet
!   die neue Messung.
! Falls die Werte fuer EIN Q nicht gut waren, wird
!   nochmal gemessen (nach Bestaetigung)

! wir deklarieren die Variablen fuer dieses Mess-Programm
VARDECLARE/ELSA off1d e$monitor_m01_w$offsd_soll
VARDECLARE/float elsa_q
VARDECLARE/int elsa_q_i
VARDECLARE/float beta_f
VARDECLARE/float look_f
VARDECLARE/float meas_q
VARDECLARE/float meas_f
VARDECLARE/float meas_frac
VARDECLARE/float elsa_turn
VARDECLARE/sample s1
VARDECLARE/sample s2
VARDECLARE/int flag
VARDECLARE/float temp
VARDECLARE/int count
VARDECLARE/vector=100 reihe
VARDECLARE/vector=100 qsoll
VARDECLARE/vector=100 qwert
VARDECLARE/vector=100 qfehler
VARDECLARE/FLOAT qavg
VARDECLARE/float qerr
VARDECLARE/int num
VARDECLARE/int weiter
VARDECLARE/int wertok
VARDECLARE/int qanz
```

```

! Schirm loeschen un "Hallo"
CLEARSCREEN
FPRINT/BEEP "EPOS Q-Messprogramm Version 1.1"

! initialisiere Variablen
INPUT "Wieviele Messungen pro Q ? " count
INPUT "Umlaufs-Frequenz ELSA in Hz ? " elsa_turn
VARSET qanz 0
VECTOR/CLEAR reihe
VECTOR/CLEAR qsoll
VECTOR/CLEAR qwert
VECTOR/CLEAR qfehler
VARSET flag 0
VARSET wertok 0
VARCOPY count num
ELSAREAD off1d

! hier beginnt die Messung fuer einen eingestellten Q-Wert
NEUESQ:

VARCOPY num count

! hier beginnt die Messung fuer EINEN Q-Wert
MESSUNG:

! setze Monitor 1 Offset
ELSAWRITE off1d

! fordere Soll-Arbeitspunkt an
ELSAVALUE/VARIABLE e$rampen_-$qx1_soll elsa_q

! bestimme Vorkomma-Anteil
! und setze flag, wenn Nachkomma-Anteil > 0.5 ist
ADD elsa_q 0.0 elsa_q_i
ADD elsa_q 0.5 temp
ADD temp 0.0 flag
SUBTRACT flag elsa_q_i flag

! Daten einlesen und fourier-transformieren
! Das ergibt das Beam-Spektrum im relevanten
! Bereich (4096 Punkte bei 10MHz Sampling)
! Durch die Landau-Daempfung ist der relevante Puls
! kuerzer als 400 usec, typisch 200-350 usec lang
READSAMPLER/CHANNEL=0/TRGFLAG=2/POINTS=4096 1 s1
FFT/MAGNITUDE s1 s2

! falls der Nachkomma-Anteil groesser 0.5, springe zur
! alternativen Auswertung
IF flag SECOND

! der Nachkomma-Anteil ist kleiner als 0.5
PEAKSEARCH/START=0.01e6/STOP=0.9116e6/SPECTRAL/WARN s2 meas_f
JUMP F_OK

SECOND:

```

```

! der Nachkomma-Anteil ist groesser als 0.5
PEAKSEARCH/START=0.9116e6/STOP=1.820e6/SPECTRAL/WARN s2 meas_f

F_OK:

! wir berechnen den Arbeitspunkt und nehmen ihn in die Messreihe auf
DIVIDE meas_f elsa_turn meas_frac
ADD meas_frac elsa_q_i meas_q
VECTOR/APPEND reihe meas_q
FPRINT/FRAC=6 "Q gemessen = #" meas_q

! noch eine Messung fuer dieses Q erforderlich ?
DECREMENT count
IF count MESSUNG

! Ende der Messungen fuer DIESEN Q-Wert erreicht.
FPRINT ""
FPRINT/NOCR "#-te Arbeitspunkt-Messung:" qanz
VECTOR/AVERAGE reihe qavg
VECTOR/STDDEV reihe qerr
FPRINT/NOCR/FRAC=3 " Q-Soll= #, " elsa_q
FPRINT/FRAC=6 "Q= # +- #" qavg qerr
FPRINT ""

! ist die Messung einwandfrei gewesen ?
CONFIRM "Diese Messung wiederholen ?" weiter
IF weiter NEUESQ

! wir nehmen den neuen Messwert
!in die allgemeine Messreihe auf:
VECTOR/APPEND qsoll elsa_q
VECTOR/APPEND qwert qavg
VECTOR/APPEND qfehler qerr
INCREMENT qanz

! neues Q eingestellt?
CONFIRM "Neue Messreihe starten ?" weiter
IF weiter NEUESQ

! Ende der Messungen
FPRINT "ENDE des Programms QMESS (# Werte).
FPRINT "Bitte diese Variablen abspeichern..."

```

Meßdaten der Arbeitspunktmessung $Q_x = 4.4 \dots 4.9$

Die folgende Tabelle enthält die an ELSA gemessenen Arbeitspunktdaten in der Gegenüberstellung von Soll- und Istwert. Der Sollwert ist hierbei der vom Kontrollsystem angezeigte (und für die Berechnung der Quadrupolströme verwendete) Wert. Der statistische Fehler der Meßdaten beträgt im Schnitt ca. $3 * 10^{-5}$. Beim Sollwert von $Q_x = 4.504$ war kaum eine Messung möglich. Die halbzahlige Resonanz verhinderte eine für die Frequenzanalyse ausreichende Lebensdauer des Strahls. Hier wurde die mit Abstand kürzeste Strahllebensdauer beobachtet. Beim Sollwert von $Q_x = 4.680$ wurde ebenfalls eine sehr kleine Strahllebensdauer gemessen. Der für den Arbeitspunkt ermittelte Wert von $Q_x = 4.671$ zeigt, daß es sich eindeutig um die $4\frac{2}{3}$ -Resonanz handeln muß. Jede Arbeitspunktmessung ist auf den jeweiligen Wert der Umlauffrequenz in ELSA und damit auf den an den HF-Muttergeneratoren eingestellten Frequenzwert zu beziehen, falls spätere Ergebnisse mit den hier tabellierten Daten verglichen werden sollen. Bei den hier gezeigten Werten liegt eine Umlauffrequenz von $f_{\text{ELSA}} = 1.823825$ MHz zugrunde.

Q_x Sollwert	Q_x gemessen	Q_x Sollwert	Q_x gemessen
4.410	4.40232	4.570	4.55996
4.421	4.41252	4.581	4.57480
4.431	4.42206	4.591	4.58190
4.440	4.43261	4.600	4.59015
4.450	4.44215	4.619	4.60940
4.455	4.45023	4.640	4.62988
4.458	4.45129	4.650	4.64048
4.460	4.45260	4.659	4.65152
4.464	4.45648	4.663	4.65662
4.470	4.46216	4.667	4.65629
4.480	4.47216	4.671	4.66153
4.490	4.48202	4.680	4.67138
4.499	4.49108	4.690	4.67989
4.504	4.493	4.700	4.69104
4.520	4.51159	4.750	4.73912
4.530	4.51842	4.780	4.76996
4.541	4.53102	4.800	4.79007
4.551	4.54123	4.850	4.83980
4.560	4.55300	4.900	4.88795

Liste verfügbarer EPOS-Kommandos

Dieser Teil des Anhangs enthält eine nach Bereichen geordnete Liste von in EPOS verfügbaren Kommandos (Version 1.0 vom August 1990). Falls die Zuordnung eines Kommandos zu einem Bereich nicht eindeutig ist, wurde der Name mehrfach eingetragen. Angegeben sind der Kommandoname, eine kurze Beschreibung und das zur Ausführung benötigte Privileg.

EPOS System-Kommandos

- ARGINFO — Hilfsoperator zu Testzwecken. Privileg: **USER**.
- BACKTASK — DCL Kommando im Hintergrund ausführen. Privileg: **USER**.
- BREAKLEVEL — Definiere EPOS BREAK-Level. Privileg: **USER**.
- CHATLEVEL — Definiere EPOS Ausgabeinformationsdichte. Privileg: **USER**.
- CLS — Bildschirm löschen. Privileg: **USER**.
- COMMANDS — Zeige eine Liste der definierten EPOS Kommandos an. Privileg: **USER**.
- CONFIRM — Warte auf Benutzer Bestätigung. Privileg: **USER**.
- DATAPATH — Verzeichnis und Extension fuer EPOS Variable definieren. Privileg: **USER**.
- DCL — VAX DCL Kommando ausführen. Privileg: **USER**.
- EDIT — Texteditor EVE. Privileg: **USER**.
- EVE — Texteditor EVE. Privileg: **USER**.
- FPRINT — Formatierte Ausgabe. Privileg: **USER**.
- FSCAN — Formatierte Eingabe. Privileg: **USER**.
- HELP — Hilfe-System aktivieren. Privileg: **USER**.
- INPUT — Lese Wert in Variable ein. Privileg: **USER**.
- LOGCLOSE — Schliesse EPOS Logdatei. Privileg: **USER**.
- LOGOPEN — Oeffne EPOS Logdatei. Privileg: **USER**.
- MAILREAD — Lese Eingaben aus der EPOS Eingabe-Mailbox. Privileg: **USER**.
- MAILWRITE — Schreibe in die EPOS Ausgabe-Mailbox. Privileg: **USER**.
- MODES — Globale EPOS-Einstellungen anzeigen. Privileg: **USER**.
- NORMALMODE — Super-Mode ausschalten, Normalmode aktivieren. Privileg: **USER**.
- PASSWORD — Neues Passwort definieren. Privileg: **USER**.
- PRINTS — Zeige eine Zeichenkette an. Privileg: **USER**.
- PROGPATH — Verzeichnis und Extension fuer EPOS Programme definieren. Privileg: **USER**.
- SETDEFAULT — Arbeitsverzeichnis definieren. Privileg: **USER**.
- SUPERMODE — Super-Mode aktivieren. Privileg: **USER**.
- SYSTEM — Zeige EPOS System-Zustand. Privileg: **USER**.
- TIME — Aktuelle Zeit ausgeben. Privileg: **USER**.
- WAIT — Unterbreche die Arbeit fuer ein bestimmtes Zeitinterval. Privileg: **USER**.
- WHOAMI — Benutzerinformation. Privileg: **USER**.

Kommandos der Programmverwaltung

- EXECUTE — Rufe ein EPOS Programm auf. Privileg: **USER**.
- LOAD — Lade ein EPOS Programm. Privileg: **USER**.
- PRGDELETE — Loesche ein residentes EPOS Programm. Privileg: **USER**.
- PROGRAMS — Liste alle EPOS residenten Programme. Privileg: **USER**.

Kommandos der Kontrollsystemeinheit

- ACCELMODE — ELSA in Nachbeschleunigungs-Modus setzen (Rampen). Privileg: **WRITE**.
- CONNECT — Verbindung mit ELSA herstellen. Privileg: **READ**.
- DISCONNECT — Verbindung mit ELSA abbrechen. Privileg: **READ**.
- ELSSABASE — ELSA Datenbank Informationen. Privileg: **READ**.
- ELSSALIST — Liste Geraete- und Parameter-Informationen. Privileg: **READ**.
- ELSSAPASSWORD — Neues Passwort fuer ELSA-Parameter definieren. Privileg: **SYSTEM**.
- ELSSAPID — Finde PID fuer einen ELSA Parameternamen. Privileg: **READ**.
- ELSSAPROTECTION — Zeige ELSA-Password-Schutz. Privileg: **USER**.
- ELSSAREAD — Lese einen ELSA Parameter. Privileg: **READ**.
- ELSSASET — Setze einen ELSA Parameter. Privileg: **WRITE**.
- ELSSASWEEP — Fahre einen ELSA Parameter kontinuierlich. Privileg: **WRITE**.
- ELSSAVAKUUM — Zeige ELSA Vakuum-Status. Privileg: **READ**.
- ELSSAVALUE — Zeige den Wert eines ELSA Parameters an. Privileg: **READ**.
- ELSSAWRITE — Schreibe ELSA Parameter aus einer Variablen. Privileg: **WRITE**.
- LOGSCREEN — Schreibe Zeichenkette auf ELSA Log-Monitor. Privileg: **WRITE**.
- MACSRESET — Setze einen MACS Prozessor zurueck. Privileg: **WRITE**.
- MACSSTAT — MACS Statistik ausgeben. Privileg: **READ**.
- SLOWRAMP — Rampe Strahlenergie langsam bis Endwert. Privileg: **WRITE**.
- STRETCHMODE — ELSA in Stretcher-Modus setzen. Privileg: **WRITE**.
- SYLIMODE — ELSA in SYLI-Modus setzen (Rampen). Privileg: **WRITE**.

Kommandos der Monitorverwaltung

- CALNF — Kalibration der NF Verstaerker. Privileg: **WRITE**.
- CALPHASE — Phaseneinstellung der Lagemonitore. Privileg: **WRITE**.
- MONSCALE — Skalieren Sampledaten zu Lagedaten. Privileg: **USER**.
- READSAMPLER — Lese ELSA-Sampler aus. Privileg: **READ**.
- SAMPLEMAN — Manipuliere Sample-Buffer. Privileg: **USER**.
- SETSAMPLER — Verwaltung SAMPLER der BPMs. Privileg: **WRITE**.

Kommandos des Orbit-Korrektursystems

CGET — Lese Orbit Optik Werte. Privileg: **USER**.
CINIT — Initialisiere Orbit Korrektur Daten. Privileg: **USER**.
CMAKE — Berechne optische Funktionen fuer COCPIT. Privileg: **USER**.
CPRINT — Drucke Orbit Korrektur Daten nach LIST. Privileg: **USER**.
CPUT — Setze Orbit Optik Werte. Privileg: **USER**.
CSET — Setze Orbit Korrektur Daten. Privileg: **USER**.
CSHOW — Zeige Orbit Korrektur Daten an. Privileg: **USER**.

Kommandos der Graphikverwaltung

DEFGRAPH — EPOS Graph definieren. Privileg: **USER**.
GRAFIKINIT — Initialisiere GKS Grafik-System. Privileg: **USER**.
GRAPHPARA — EPOS Graph Parameter setzen. Privileg: **USER**.
GRDECLARE — Definiere einen GRAPHEN. Privileg: **USER**.
GRINFO — Zeige Informationen zu bekannten GRAPHen an. Privileg: **USER**.
GRSET — Setze GRAPH Daten. Privileg: **USER**.
PLOT — Plote eine GKS-Workstation. Privileg: **USER**.
REDRAW — Zeichne alle Diagramme neu. Privileg: **USER**.
SETGRAPH — EPOS Graphen entsprechenden Workstations zuordnen. Privileg: **USER**.
WINDOW — Lege ein Plot-Window an. Privileg: **USER**.
WSDECLARE — Definiere eine WORKSTATION. Privileg: **USER**.
WSINFO — Zeige Informationen zu bekannten WORKSTATIONs an. Privileg: **USER**.
WSSET — Setze WORKSTATION Daten. Privileg: **USER**.

Kommandos der Variableneinheit

CONVERT — Konvertiere Variablen. Privileg: **USER**.
READDATA — Lese Daten von ASCII Datei in EPOS Variable ein. Privileg: **USER**.
VARCOPY — Variable kopieren. Privileg: **USER**.
VARDECLARE — Erzeuge eine EPOS Variable. Privileg: **USER**.
VARDELETE — Loesche eine EPOS Variable. Privileg: **USER**.
VARIABLES — Liste alle EPOS Variable. Privileg: **USER**.
VARIDENT — In Datei gespeicherte Variable identifizieren. Privileg: **USER**.
VARINFO — Information ueber EPOS Variable. Privileg: **USER**.
VARLOAD — Eine oder mehrere Variable laden. Privileg: **USER**.
VARSAVE — Eine oder mehrere Variable abspeichern. Privileg: **USER**.
VARSET — Belege eine EPOS Variable mit einem Wert. Privileg: **USER**.
WRITEDATA — Schreibe EPOS-Variable in eine ASCII Datei. Privileg: **USER**.

Kommandos zur Signalanalyse

FFT — Schnelle Fourier-Transformation (FFT). Privileg: **USER**.

FILTER — Digitale Filter-Operationen. Privileg: **USER**.

FIT — LSQ-Fit/Polynomfit auf Datenvariablen. Privileg: **USER**.

FSAMAN — Manipuliere FSA Buffer. Privileg: **USER**.

PEAKSEARCH — Peak-Vermessung. Privileg: **USER**.

RANDOM — Zufallszahlen-Generator. Privileg: **USER**.

SAMPLEMAN — Manipuliere Sample-Buffer. Privileg: **USER**.

SIGNALSIM — Signal-Simulator. Privileg: **USER**.

NEWPHASE — Selektiere Sampledaten nach Umlaufen in ELSA. Privileg: **USER**.

NORMPHASE — Generiere normalisierten Phasenraum. Privileg: **USER**.

PHASESPACE — Selektiere Sampledaten nach Umlaufen in ELSA. Privileg: **USER**.

Rechenkommandos

ADD — Addiere Werte. Privileg: **USER**.

DECREMENT — Dekrementiere Integer-Variable. Privileg: **USER**.

DIVIDE — Dividiere Werte. Privileg: **USER**.

EVALUATE — Berechnung mathematischer Ausdruecke. Privileg: **USER**.

HISTOGRAM — Histogramm-Generator. Privileg: **USER**.

INCREMENT — Inkrementiere Integer-Variable. Privileg: **USER**.

MULTIPLY — Multipliziere Werte. Privileg: **USER**.

SAMPLEMAN — Manipuliere Sample-Buffer. Privileg: **USER**.

SUBTRACT — Subtrahiere Werte. Privileg: **USER**.

VECTOR — Vektor-Operationen. Privileg: **USER**.

Kommandos der Meßgeräteverwaltung

FSAMAN — Manipuliere FSA Buffer. Privileg: **USER**.

IECONFIG — IEC-Definitionen ausgeben. Privileg: **USER**.

IECLOCAL — Setze bekanntes IEC-Geraet auf LOCAL. Privileg: **READ**.

IECMODIFY — IEC-Definitonen aendern. Privileg: **USER**.

IECREAD — Lese IEC Zeichenkette von bekanntem IEC-Geraet ein. Privileg: **READ**.

IECREMOTE — Setze bekanntes IEC-Geraet auf REMOTE. Privileg: **READ**.

IECRESET — Setze bekanntes IEC-Geraet zurueck. Privileg: **READ**.

IECSEND — Sende eine IEC Zeichenkette an ein bekanntes IEC-Geraet. Privileg: **READ**.

IECTALK — Fuehre eine Unterhaltung mit einem bekannten IEC Geraet. Privileg: **READ**.

READFSA — Lese FSA Sepktrum Analysator aus. Privileg: **READ**.

READLECROY — Lese LECROY aus. Privileg: **READ**.

READNMR — Lese NMR Geraet aus, Magnetfeld in ELSA Dipolen. Privileg: **READ**.

SAMPLEMAN — Manipuliere Sample-Buffer. Privileg: **USER**.

SETSAMPLER — Verwaltung SAMPLER der BPMs. Privileg: **WRITE**.

Kommandos der Sicherheitsverwaltung

ACCOUNTING — EPOS Accounting Manager. Privileg: **SYSTEM**.

ELSAPASSWORD — Neues Password fuer ELSA-Parameter definieren. Privileg: **SYSTEM**.

ELSAPROTECTION — Zeige ELSA-Password-Schutz. Privileg: **USER**.

PASSWORD — Neues Passwort definieren. Privileg: **USER**.

UAFMAN — EPOS UAF Manager. Privileg: **SYSTEM**.

Kommandos der Symbolverwaltung

SYMALIAS — Setze ein EPOS Symbol. Privileg: **USER**.

SYMBOLS — Liste all EPOS Symbole. Privileg: **USER**.

SYMDELETE — Loesche ein EPOS Symbol. Privileg: **USER**.

Weitere Kommandos

CALCULATOR — Taschenrechner. Privileg: **USER**.

HELP — Hilfe-System aktivieren. Privileg: **USER**.

Literaturverzeichnis

- [1] K.H.Althoff et. al. — *Das 2.5 GeV Elektronen-Synchrotron der Universität Bonn*, Sonderdruck aus dem Jahrbuch 1969 des Landesamtes für Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen, Westdeutscher Verlag Köln Opladen.
- [2] E.Asseo — *Causes et corrections des erreurs dans la mesure des caracteristiques des oscillations betatroniques obtenues a partir d'une transformation de fourier*, CERN PS 85-9 (LEA), Decembre 1985
- [3] J.Cooley, J.Tukey — *An Algorithm for the Machine Computation of Complex Fourier Series*, Math.Comp. Vol.19, pp.297-301, April 1965
- [4] A.Dreist — *Das Injektionssystem des Strecherringes ELSA*, Dissertation BONN-IR-89-26
- [5] H.Ebeling — *Konzeption, Bau und Test eisenloser Quadrupole für die Resonanzextraktion aus ELSA*, Diplomarbeit BONN-IR-87-35.
- [6] *ELSA – Ein neuer Beschleuniger der Mittelenergiephysik*, BONN-IR-87-30, Phys.Inst. Uni Bonn, 1987. ISSN-0172-8741
- [7] P.Flannery, H.Press, A.Teukolsky, T.Vetterling — *Numerical Recipes – The Art of Scientific Computing*, Cambridge University Press 1986
- [8] F.Harris — *On the use of windows for harmonic analysis with the discrete fourier transform*, Proceedings of the IEEE, VOL.66, No.1, January 1978
- [9] D.Husmann — *The ELSA Stretcher Ring*, Lecture Notes in Physics No.234, Springer Verlag Berlin Heidelberg New York Tokyo
- [10] N.B.Jones — *Digital Signal Processing*, IEE Control Engineering Series 22, 1982
- [11] M.Kiesheyer — *Entwicklung und Test eines Datenerfassungsmoduls für das ELSA-Kontrollsystem*, Diplomarbeit, Mai 1989
- [12] *The Lecroy Model 9400 Digital Oscilloscope*, Operators Manual, Seite 11-15
- [13] R.Littauer — *Beam Instrumentation*, in: Physics of High Energy Particle Accelerators. Editor: M.Month – AIP Conference Proceedings No. 105.
- [14] M.Neckenig — *Der Einfluß von Synchro-Betatron Koppelresonanzen auf den extrahierten Strahl des Strecherringes ELSA*, BONN-IR-87-34
- [15] M.Neckenig — Dissertation in Vorbereitung.
- [16] M.Neckenig — private Mitteilung, März 1990
- [17] A.V.Oppenheim, A.S.Willsky, I.T.Young — *Signals and Systems*, Prentice Hall International Editions 1983.

- [18] M.Picard — *Die Rekonstruktion des ELSA-Phasenraums mit EPOS*, Diplomarbeit, Oktober 1990
- [19] J. Proakis, D.Manolakis — *Introduction to Digital Signal Processing*, MacMillan Publishing Company, New York 1988
- [20] Rhode&Schwarz Signalgenerator — *Betriebshandbuch*
- [21] M.Sands — *The Physics of Electron Storage Rings – An Introduction*, SLAC Report No.121 1970
- [22] M.Schillo — *Entwicklung und Test eines Mikroprozessormoduls für das ELSA-Kontrollsystem*, Diplomarbeit BONN-IR-84-33, August 1984
- [23] M.Schillo — *Das Strahlmonitorsystem des Stretcherrings ELSA*, Dissertation in Vorbereitung
- [24] M.Schillo — private Mitteilung, August 1990
- [25] M.Serio — *Transverse Betatron Tune Measurements*, Conference Proceedings for "Frontiers of Particle Beams; Observation, Diagnosis and Correction", Anacapri, Italy 1988
- [26] K.Steffen — *Basic Course on Accelerator Optics*, in: CERN accelerator school Vol. 1, Gif-sur-Yvette, CERN 85-19
- [27] G.A.Voss — *Single Beam Collective Phenomena in Electron Storage Rings – Diagnosis and Cures*, in: Theoretical Aspects of the behaviour of beams in accelerators and storage rings, Proceedings CERN 77-13, July 1977
- [28] J.Wenzel — *Korrektur des Closed-Orbit bei ELSA*, Diplomarbeit, September 1990
- [29] C.Wermelskirchen — *Das Kontroll- und Steuersystem der Bonner 3.5 GeV-Elektronen-Stretcher-Anlage ELSA*, Dissertation BONN-IR-88-31, Juli 1988