

Ein Nachführsystem für Beschleunigerstrahlen auf Basis eines Mikrocomputers

R.Müller, R.Besold, H.W.Ortner
Universität Erlangen-Nürnberg

Zusammenfassung

Es wird ein Nachführsystem zur Kompensation von langsamen (~ 1 min) zeitlichen Schwankungen der Strahlposition an Teilchenbeschleunigern auf Basis eines Z80-ECB-Karten-Mikrocomputers und der multitasking Programmiersprache PEARL vorgestellt. Die Ablenkung des Teilchenstrahles erfolgt mit zusätzlichen rechnergesteuerten Dipolmagneten. Die Ortsdetektion wird am Beispiel von Szintillatortriblenden erläutert.

A regulation system for slowly (~ 1 min) drifting particle beams is presented. The system is based on a Z80 ECB-Mikrocomputer and programmed in the multitasking program language PEARL. For deflection are computercontrolled dipolmagnet used. The detection of the beamposition is shown at the example of szintillator strips near the beam.

1. Problemstellung

Bei physikalischen Experimenten an Teilchenbeschleunigern bereitet es häufig Schwierigkeiten die Strahlposition am Target zeitlich konstant zu halten. Gründe für Schwankungen liegen in veränderter Strahlage im Beschleuniger selbst, Drift der Magnetströme und Temperaturänderungen an den Ablenkmagneten, wodurch sich die Abbildungseigenschaften der Strahlführungselemente ändern. Derartig verursachte Störungen wirken sich besonders dann fatal aus, wenn die Wanderung sich in der Größenordnung der Ausdehnung des Targets (=Wechselwirkungszone) bewegt.

Am Beispiel des Antiprotonenexperiments PS185 am LEAR-Beschleuniger am europäischen Kernforschungszentrum CERN werden die Anforderungen an die Strahlqualität beschrieben.

Der Targetdurchmesser beträgt dort lediglich 2.5mm (vgl. Bild 1 und /FRAN&Z/) um das Reaktionszentrum möglichst klein zu halten. Die das Target umgebenden Szintillationsdetektoren ermöglichen die Generierung eines Signals, dass kein geladenes Teilchen die Targetregion verlässt. Hinter dem Target befinden sich eine Proportionalkammer (1mm Auflösung), ein Hodoskop und zwei Driftkammern zur Detektion der Spuren der Reaktionsteilchen.

Als problematisch erweisen sich die Szintilla-

tionsdetektoren direkt neben dem Target. Bei teilweiser oder gar vollständiger Bestrahlung eines dieser Zähler vergrößert sich die Zählrate um bis zu 2 Größenordnungen, wodurch neben der dann geringeren Ausnutzung der teuren Antiprotonen (ca. 50kSfr/h bei 1MHz Antiprotonen) zusätzlich Totzeit in der Elektronik produziert wird, da diese 'S2' genannten Detektoren für die Reaktionserkennung benutzt werden.

Weiter ist zu bedenken, dass durch eine Schwankung der Strahlage das Reaktionszentrum ungenauer bekannt ist. In der Auswertung werden mit Hilfe der Ortsinformation die Spuren der Reaktionsteilchen rekonstruiert. Bei genauer Kenntnis des Vertexpunktes (=Zerfallspunkt) können Untergrundereignisse erkannt und eliminiert werden. Der systematische Fehler des Apparates wird somit verkleinert.

Wie aus Bild 1 ersichtlich, besteht der S2-Detektor aus vier gegeneinander isolierten Teilen. Damit konnte in einer Strahlzeit im Mai 1984 in diesem Experiment parallel zur Datenaufnahme die Wanderung der Strahlage durch die Zählratenasymmetrie der einzelnen S2-Detektorsegmente aufgezeichnet werden. Es zeigte sich, dass während eines Spills (=Strahlextraktionszyklus von ca. 60

Minuten Dauer) die Position keiner erkennbaren Gesetzmässigkeit folgend, um mehrere Millimeter wandert, sowie die Startposition von Spill zu Spill unterschiedlich ist. Beispiele für derartige Wanderungen sind in Bild 2 dargestellt. Die Driftgeschwindigkeit liegt in der Grössenordnung $1\text{mm}/10\text{min}$. Hier der Strahlschwerpunkt mit der statistischen Unsicherheit als Fehlerbalken eingezeichnet. Das Band deutet die Ausdehnung des Strahlflecks durch die Halbwertsbreite an (und wird als konstant angenommen). Die Lage des Targets ist durch die gestrichelte Linie markiert. Man erkennt, dass der Schwerpunkt meist noch am Target liegt, jedoch ein grosser Teil der Intensität den Szintillator trifft, bzw. das Target verfehlt.

Um nicht dauernd manuell Korrekturen an den Strahlführungselementen vornehmen zu müssen, erscheint es sinnvoll, diese Schwankungen automatisch zu kompensieren.

2. Regelkreis

Im folgenden werden nun die einzelnen Elemente (Sensor, Aktor, Regler) des Regelkreises vorgestellt und auf die physikalischen Anforderungen hin diskutiert.

2.1 Der Sensor

Es bieten sich verschiedene Methoden an, die Strahlposition zu ermitteln.

Bei niedriger Strahlrate kann eine direkte Zählung der einzelnen Strahlteilchen erfolgen. Mit zunehmender Intensität wird dies unmöglich und es kann lediglich eine indirekte Detektion über eine Wechselwirkung des Beschleunigerstrahls mit Materie durchgeführt werden. Bei sehr hohen Strahlströmen kann durch eine direkte Messung des makroskopischen elektrischen Stromes der Strahlpartikel auf den Strahlschwerpunkt geschlossen werden.

Der Sensor soll den Beschleunigerstrahl möglichst wenig beeinflussen (Versmierung der Strahlenergie durch unterschiedlich starke Wechselwirkungen, Streuung, Untergrund). Andererseits ist eine Messung stark mit einer Störung verknüpft (Massenbelegung). Dies ist besonders bei indirekten Messmethoden der Fall. Die derart erzeugte Störung darf auf keinen Fall die Strahlqualität in einer Art vermindern, dass die Messgrössen nennenswert beeinflusst werden.

Viele Experimente haben schon Detektoren integriert, die es erlauben, Signalen abzugreifen, die

auf den Strahlort schliessen lassen.

Im folgenden wird eine direkte Messmethode für Strahlintensitäten $<1\text{MHz}$ vorgestellt.

Es wird dünnes Szintillatormaterial in direkter Nähe der Sollposition des Teilchenstrahles positioniert und dessen Zählraten betrachtet (Bild 3). Die Diskriminatorsignale von Teilchen aus der Randzone des Strahles, die das Szintillatormaterial direkt treffen, werden gezählt. Die Asymmetriefunktion

$$A_x = \frac{\text{Zählrate rechts} - \text{Zählrate links}}{\text{Zählrate rechts} + \text{Zählrate links}}$$

hängt nun stark vom Strahlprofil ab.

Ein Vorteil ist die geringe Materialdichte (dünne Plastik-Szintillatoren), die nur einen geringen Energieverlust verursacht. Der durch diese zusätzliche Materie bedingte Untergrund kann durch eine Antikoinzidenzschaltung mit den Blendensignalen eliminiert werden. Die Ortsbestimmung kann weitgehend ohne Beeinflussung des Teilchenstrahles erfolgen, soweit die Strahlposition nahe der Sollposition liegt, da dann nur die Randzone (Fuss) des Strahls die Szintillatoren trifft. Bei einer Fehlstellung steigt die Zählrate in einem Detektor stark an. Somit ist eine nicht zentrische Position schnell erkennbar.

2.2 Aktor

Um den Teilchenstrahl in der Position zu korrigieren, benötigt man eine geeignete Korrekturereinrichtung, die präzise einstellbar sein muss.

Ein Beschleunigerstrahl besteht aus geladenen Teilchen. Bewegte elektrische Ladungen gehorchen der Lorentzkraft:

$$\underline{F} = q (\underline{E} + \underline{v} \times \underline{B})$$

q : Ladung des Teilchens
 \underline{E} : äusseres elektrisches Feld
 \underline{v} : Teilchengeschwindigkeit
 \underline{B} : äusseres Magnetfeld
 \underline{F} : resultierende Kraft

Mit den Bezeichnung aus Bild 4 und $\underline{v} = (0,0,v_z)$ ergibt sich durch ausmultiplizieren:

$$\begin{aligned}
 F_x &= q (E_x - v_z B_y) \\
 F_y &= q (E_y + v_z B_x) \\
 F_z &= q E_z \quad (\text{keine Ablenkung !})
 \end{aligned}$$

Im folgenden wird nur noch die Ablenkung in der x-z-Ebene betrachtet. Die Ablenkung in der y-z-Ebene ist analog.

Der Ablenkwinkel α ergibt sich zu:

$$\text{tg } \alpha = \frac{v_x}{v}$$

mit

$$v_x = \frac{1}{m} \int_{z_0}^{z_0+1} F_x(z) dz = \frac{q l}{m v_z} (E_x - v_z B_y)$$

und damit ($v = v_z$; $p = p_z$)

$$\text{tg } \alpha = \frac{2 q l E_x}{E_{kin}} - \frac{q l B_y}{p}$$

Eine Ablenkung kann einerseits mit Ablenkmagneten (= Steerermagnete) und andererseits mittels Plattenkondensatoren erfolgen. Um gleiche Brechkraft zu erreichen benötigt man beispielsweise die Äquivalente aus Tabelle 1. Die Werte aus Tabelle 1 gelten für eine Entfernung der Wechselwirkungszone zur Detektorebene von 3m, eine Wechselwirkungsstrecke von 10cm angenommen und eine Ablenkung um 1cm.

Teilchen	kin. Energie	Impuls	B	oder E
	MeV	MeV/c	Gauss	kV/m
Protonen	10	137	151	329
Protonen	831	1500	1666	2757

Tabelle 1: Brechkraftäquivalente

Obwohl Steerermagnete für die Regelung ungünstige Effekte, wie

- Hysterese
- Remanenz
- Selbstinduktion

zeigen, findet man selten elektrische Felder zur Strahlführung. Dies liegt an der Problematik bei der Handhabung der grossen Spannung für das E-Feld (Vakuum, Überschlag).

2.3 Der Regler

Dieser Teil des Regelsystems beschäftigt sich mit

dem zentralen Modul, der die vom Sensor gelieferten Daten mit den Sollwerten vergleicht und bei Unstimmigkeit eine Korrekturgrösse (Stellwert) produziert. Diese Funktion kann auf unterschiedliche Weise realisiert werden. Einerseits ist eine Hardwarelösung durch eine (Analog-) Schaltung möglich und andererseits kann ein Programm diese Aufgabe erfüllen.

2.3.1 Hardwarelösung

Im einfachsten Fall des Regelproblems (der proportionalen Korrektur) besteht der Regler aus einem Differenzverstärker mit einstellbarer Verstärkung. Eine Berücksichtigung von nichtlinearen Effekten bereitet enorme Schwierigkeiten, da dann Funktionsgeneratoren für die jeweilige Kennlinie zu erstellen sind. Der grosse Vorteil derartiger Lösungen liegt in der extrem kurzen Reaktionszeit, die es erlaubt, auch extrem schnelle Schwankungen ($\sim 10\mu s$) zu kompensieren.

Allerdings kann bei einer anderen Kennlinie (Sensor, Aktor) der Regler eventuell vollkommen neu gebaut werden müssen, da die Kennlinie fest verdrahtet ist.

2.3.2 Softwarelösung

Die Erstellung der Stellgrösse mit Hilfe eines Mikroprozessors erfordert zusätzlichen Aufwand bei der Adaption der analog arbeitenden Teile des Regelkreises. Analoge Eingangssignale müssen digitalisiert werden, sowie die nach einem Zyklus erzeugte digitale Stellgrösse oft in ein analoges Referenzsignal für die nachfolgende Stelleinrichtung gewandelt werden.

Die Reaktionszeit auf eine Störung ist durch die Taktfrequenz des Computers, sowie dem notwendigen Operationsaufwand festgelegt. Bei wenigen Operationen kann die Stellgrösse schon nach einigen 100 μs vorliegen. Wenn komplizierte Berechnungen durchgeführt werden, ergeben sich Zykluszeiten von $\sim 100ms$.

Der Vorteil einer Softwarelösung liegt

- in den vielfältigen Möglichkeiten auch komplizierte Sensorsysteme (MWPC, Hodoskop) benutzen zu können.
- darin, externe Nichtlinearitäten in der Abbildungsfunktion leicht berücksichtigen zu können.
- darin, ein anderes Sensorsystem ohne grössere Probleme an den Regler anschliessen zu können.
- in der freien Wahl für die Parameter der

Abbildungsfunktion.

- darin, dass Programme leichter auf eine andere Funktion anpassbar sind, als eine Hardwarelösung.

3. Die Implementierung

In Anbetracht der grossen Driftzeiten im vorliegenden Problem und der langen Einstellzeit für den Magnetstrom (grosse Induktivität der Wicklung) sind kürzere Reaktionszeiten als 100ms nicht sinnvoll.

Daher wurde das Regelprogramm auf einem Mikrocomputer erstellt. Als Programmiersprache empfahl sich PEARL wegen seiner Unterstützung bei Ansteuerung von Prozessperipherie. Darüber hinaus konnte durch Ausnutzung der Multitaskingfähigkeit eine Diagnostikfunktion für den Regelautomaten leicht installiert werden.

Die Spezifikation des gesamten Problems erfolgte in PASS (=Parallel Activities Spezifikation Scheme /FLEI84/). Als Zielrechner wurde ein Z80-ECB-System gewählt, da für diese (preiswerte) Maschine ein komplettes PEARL-System verfügbar war.

Vom eigentlichen Regelprogramm wurde als Vorlauf-funktion die Aufnahme der Eichfunktion abgetrennt. Dies erwies sich als sinnvoll, da die Charakteristik der Strahlführung über einen grösseren Zeitraum unverändert bleibt.

Aus der Kommunikationsstruktur (Bild 5) ist das Zusammenspiel der 20 Prozesse leicht zu erkennen. Von diesen 20 parallelen Aktivitäten sind lediglich die Prozesse 'BEDIE', 'DISPL', 'PROTO', 'HAND', 'REGLE' und 'PROTO' als PEARL-Tasks implementiert. Die weiteren Prozesse sind durch Hardware realisiert.

Die Task 'BEDIE' wickelt den gesamten Benutzerdialog ab (Start/Stop, Parameter einstellen, ...). Die Task 'DISPL' sorgt für die Anzeige des aktuellen Systemzustandes auf einem Statusschirm. Für

eine Dokumentation der Regelvorgänge können alle wichtigen internen Daten auf einen Protokoll-drucker oder File von der Task 'PROTO' abgeschrieben werden. Die Task 'HAND' (=manuelle Steuerung) liest ein Tastenfeld ein und verstellt dann den Magnetstrom entsprechend der Tasteninformation zur Vorgabe der Sollposition. Die Task 'REGLE' startet bei Regelbetrieb die 4 Zähler 'Z1'-'Z4' und liest diese zyklisch aus, berechnet die Regelgrösse aus der Zählratenasymmetrie und der Eichfunktion, wenn eine signifikante Fehlstellung (statistische Fehler!) erkannt wurde. Diese neue Regelgrösse wird dann sofort an die Stelleinrichtung (DAC liefert Referenzspannung für Magnetstromversorgung) ausgegeben. Anschliessend startet ein neuer Regel-zyklus. Die Task 'POSDI' liest zyklisch die Zähler 'Z5'-'Z8' und gibt die sich daraus ergebende Strahllage als Asymmetriewert an die Task 'DISPL' weiter. Wenn 'Z5'-'Z8' mit den gleichen Signalen versorgt werden wie 'Z1'-'Z4', dann ist so eine unabhängige Messung der Strahlposition gegeben. Der Experimentator kann sich so von der ordnungs-gemässen Funktion überzeugen.

4. Erfahrungen

Das System war im August 1985 am Antiprotonenstrahl des CERN cirka eine Woche lang ohne Unterbrechung im Einsatz. Dabei zeigte sich, dass die Rechenleistung des Z80-Mikroprozessors für dieses Regelproblem voll ausreichte und der Algorithmus in der Lage war selbst mit unvorhergesehenen Ansprechverhalten des Sensors zufriedenstellend arbeitete. Auf diese Art gelang es den sehr teuren Antiprotonenstrahl auf ca. 0.05mm genau auf der Sollposition zu halten, und damit die optimalen Bedingungen für das Experiment herzustellen. Lediglich eine Kopplung zum Datenaufnahmerechner (hier VAX 750) ist für die endgültige Version der Regelapparatur noch zu installieren.

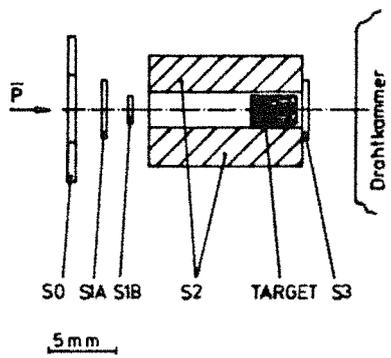


Bild 1: Targetregion des LEAR-Experimentes
S1 - S3 sind Szintillationsdetektoren

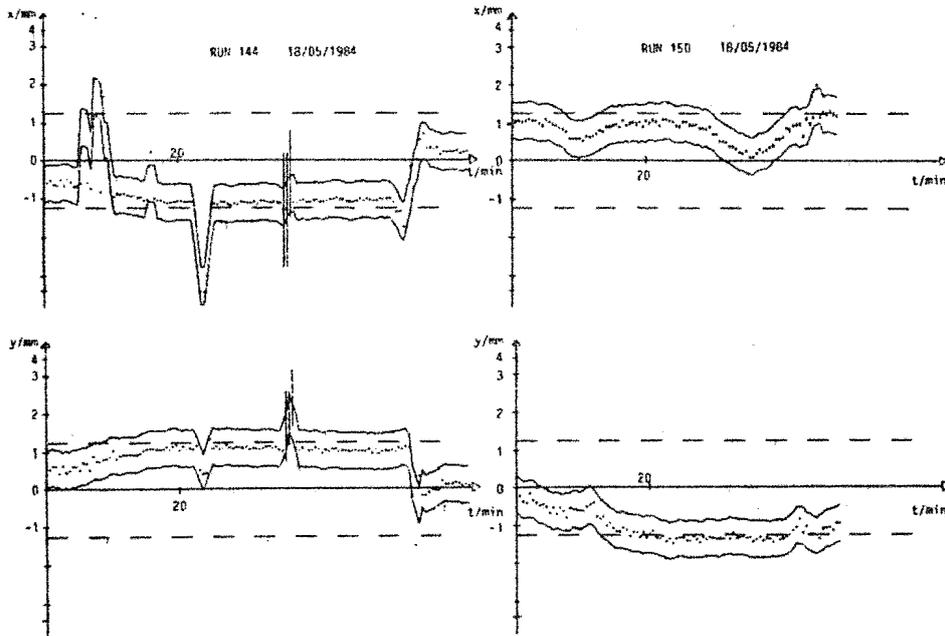


Bild 2: Strahlposition am Target

- +— Strahlposition mit statistischem Fehler
- - - Halbwertsbreite der Strahlintensität
- - - Targetbegrenzung

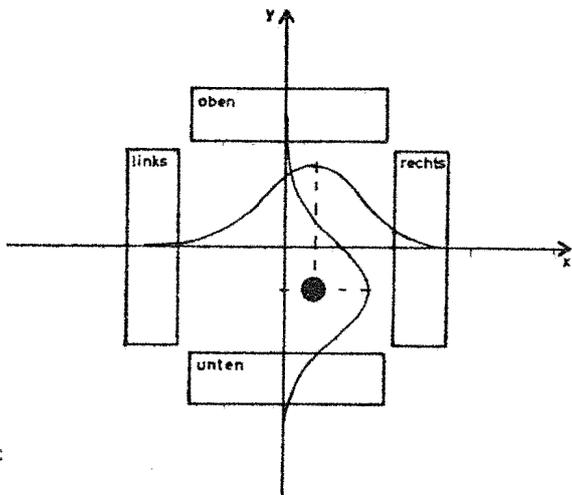


Bild 3: Geometrie der Szintillatorblenden mit eingezeichnetem Strahlprofil

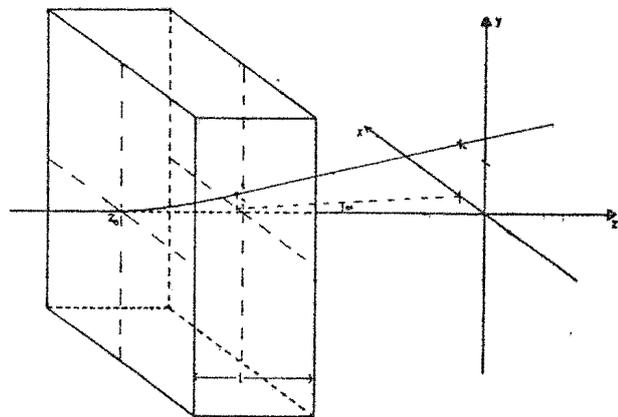


Bild 4: Koordinatensystem im Aktor

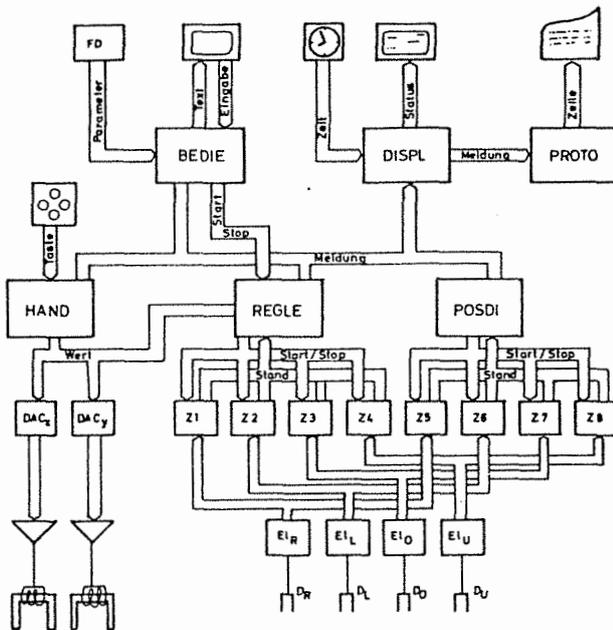


Bild 5: Kommunikationsstruktur des Regelprogramms in PASS

Schrifttum:

/FLEI84/: A.Fleischmann
 Ein Konzept zur Darstellung und Realisierung von verteilten Prozessautomatisierungssystemen
 Dissertation Erlangen 1984

/FRAN83/: R.v.Frankenberg
 Ein triggeraktives Targetsystem
 Diplomarbeit, Physikal. Inst.,
 Erlangen 1983

Adresse:

Universität Erlangen-Nürnberg
 Physikalisches Institut Abt. III
 z. Hdn. Rainer Müller
 Erwin Rommelstr. 1
 8520 Erlangen

Telefon: 09131/85-7080