Entwicklung und Einsatz eines intelligenten Agentensystems zur Optimierung der Injektion in den Speicherring der Synchrotronstrahlungsquelle DELTA

Dissertation zur Erlangung des Grades eines

Doktors der Naturwissenschaften

Dipl. Phys. Elke Zimoch

Angefertigt am Institut für
Beschleunigerphysik und Synchrotronstrahlung
der Universität Dortmund

8. Dezember 2003

für Dirk

Inhaltsverzeichnis

Kapitel 1

Einleitung

DELTA ist eine Synchrotronstrahlungsquelle der dritten Generation[1], die Synchrotronstrahlung für Experimente zur Verfügung stellt. Um eine hohe Verfügbarkeit der Beschleunigeranlage zu erzielen, ist es unumgänglich, möglichst viele Prozesse des Beschleunigerbetriebs zu automatisieren.

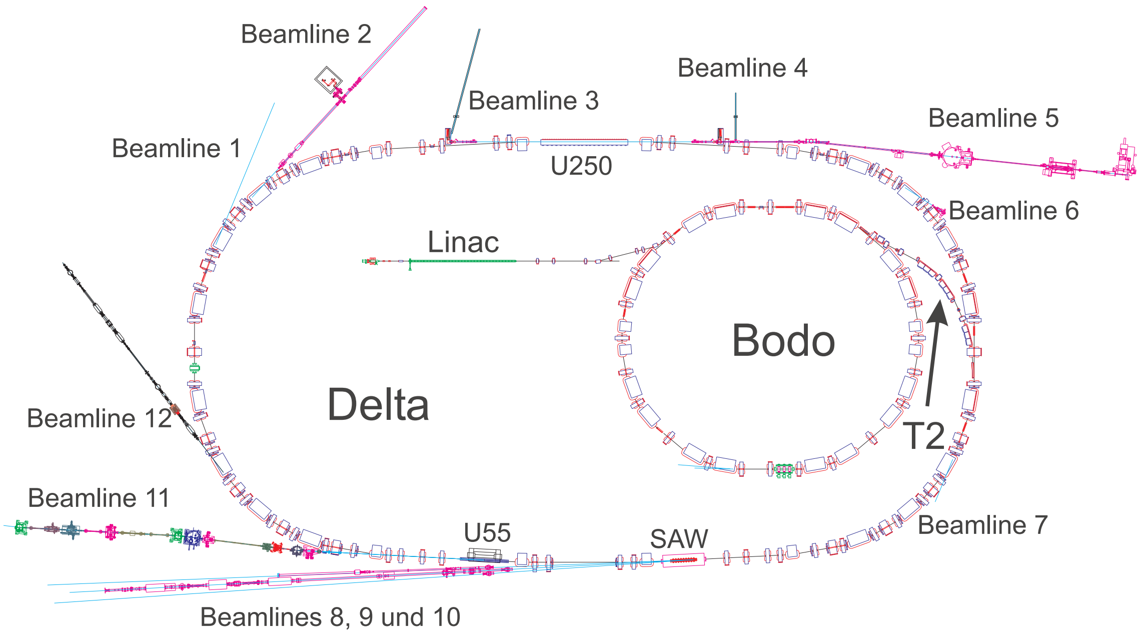


Abbildung 1.1: *Übersicht der Beschleunigeranlage DELTA*

Die Beschleunigeranlage (siehe Abbildung 1.1) besteht aus mehreren Teilen: Der Linearbeschleuniger (Linac) beschleunigt Elektronen bis zu einer Energie von 75 MeV. Der Transferkanal T1 leitet die Elektronen dann in den Beschleunigerring Bodo, wo sie auf ihre Endenergie beschleunigt werden, die zwischen 300 MeV und 1,5 GeV liegt. Nach der Beschleunigung werden die Teilchen über den Transferkanal T2 zum Speicherring Delta[2] ge-

[1]Synchrotronstrahlungsquellen der dritten Generation erzeugen Synchrotronstrahlung nicht nur mit Dipolmagneten, sondern haben Wiggler und Undulatoren (sogenannte *Insertion Devices*) mit speziellen Strahlungseigenschaften installiert [1].

[2]Die Schreibweise „DELTA“ (in Großbuchstaben) bezeichnet die Gesamtanlage, dagegen meint die Schreibweise „Delta“ nur den Speicherring.

leitet. Im Speicherring können typischerweise 120 mA Strahlstrom bei der Standardenergie von 1,5 GeV erreicht werden.

Die Synchrotronstrahlung, welche die Dipolmagnete und Spezialmagnete (Insertion Devices) des Speicherrings erzeugen, wird durch sogenannte Strahllinien (englisch: *Beamlines*) zu den Experimentierplätzen geführt. Es sind drei Spezialmagnete eingebaut: ein supraleitender asymmetrischer Wiggler (SAW), ein Permanentmagnet-Undulator (U55) und ein elektromagnetischer Undulator (U250), der auch als freier Elektronenlaser (FEL) betrieben werden kann. Synchrotronstrahlung wird bei DELTA vor allem zu Experimenten aus den Gebieten der Festkörperphysik und der Materialwissenschaften eingesetzt (siehe z.B. [2], [3], [4], [5]).

Um eine gleichbleibend hohe Intensität der Synchrotronstrahlung zu erreichen, müssen immer wieder Elektronen in den Speicherring injiziert werden, da zum Beispiel die Streuung an Restgasteilchen zu einer endlichen Strahllebensdauer führt. Die Dauer einer solchen Strahlstromauffrischung hängt unter anderem von der Güte des Ladungstransports zwischen dem Beschleunigerring Bodo und dem Speicherring Delta ab. Die Optimierung des Transferkanals T2 ist jedoch nicht automatisiert, sondern ist von der Erfahrung des Operateurs abhängig. Um die Abhängigkeit einer guten Optimierung des Ladungstransportes von einzelnen Personen zu vermindern, ist eine Vereinfachung oder Automatisierung des Prozesses notwendig.

Physikalische Probleme werden in der Regel durch die Bildung eines theoretischen Modells gelöst. Aufgrund des Modells können dann Vorhersagen gemacht werden, die wiederum Grundlage für eine Automatisierung sind. Dieses Vorgehen scheitert, wenn die Anpassung einer Theorie nicht möglich ist, weil die notwendigen Messungen unmöglich oder zu aufwändig sind. Zum Beispiel beeinträchtigen Messungen am Transferkanal den Betrieb der Beschleunigeranlage, da währenddessen keine Experimente mit Synchrotronstrahlung stattfinden können. Wenn es also nicht gelingt, aus bereits vorhandenen Daten oder einfachen Messungen ein Modell des Transferkanals zu entwickeln, müssen neue Alternativen gesucht werden.

Deshalb ist die zentrale Fragestellung dieser Arbeit, ob es möglich und sinnvoll ist, heuristische Methoden der künstlichen Intelligenz zur Automatisierung physikalischer Anwendungen zu verwenden. Solche Methoden werden als Lösung für die Automatisierung des Transferkanal T2 vorgestellt und erprobt.

Die Arbeit ist in zwei Teile gegliedert. Im ersten Teil wird der Aufbau des Transferkanals T2 beschrieben und gezeigt, dass es mit vertretbarem Aufwand nicht möglich ist, alle Parameter zu messen, die zu einer theoretischen Beschreibung notwendig sind. Als Grundlage werden zu Anfang kurz die verwendeten Begriffe und Formeln aus der Beschleunigerphysik zusammen gefasst. Zur Beurteilung der Güte des Strahltransportes wird die Transfereffizienz herangezogen, deren Messung und Beurteilung diskutiert werden. Die technischen Randbedingungen des Transferkanals sind in Kapitel 4 dargestellt, wobei bereits auf einige Problempunkte eingegangen wird. Im folgenden Kapitel werden die Schwierigkeiten einer theoretischen Beschreibung des Transferkanals an einigen Parametern exemplarisch gezeigt. Die durchgeführten Messungen sind auf den Betrieb der Anlage abgestimmt worden, der nicht zu sehr gestört werden sollte. Dies schließt zum Beispiel Umbaumassnahmen oder die Vermessungen von Magneten aus. Der erste Teil endet mit einer Zusammenfassung der Problematik, die sich für die Anpassung eines theoretischen Modells aus den beschriebenen Messungen ergibt.

Der zweite Teil dieser Arbeit beleuchtet die Automatisierung des Transferkanals T2 durch ein Agentensystem, welches eine Methode der künstlichen Intelligenz ist. Zunächst werden verschiedene Möglichkeiten einer Automatisierung besprochen und die Wahl der Methoden erläutert. Ein kurzer Überblick über das Kontrollsystem von DELTA stellt die Randbedingungen dar. Im Kapitel 9 wird dann das Agentensystem von DELTA vorgestellt und die Resultate aus dem Einsatz der Agenten präsentiert. Im Anschluss finden sich auch grundlegende Informationen zur Implementierung weiterer Agenten und Vorschläge für deren Einsatz. Die Zusammenfassung gibt einen abschließenden Überblick über die beiden Teile der Arbeit.

Kapitel 2

Motivation der Aufgabenstellung

In diesem Kapitel wird erläutert, warum eine Automatisierung des Injektionsvorgangs sinnvoll ist. Dazu wird zunächst der Ablauf einer Schichtwoche geschildert, um daraus die Einsatzmöglichkeiten einer Automatisierung abzuleiten. Im letzten Teil dieses Kapitels geht es dann um die Bedeutung der Injektion in den Speicherring.

2.1 Der Schichtbetrieb bei DELTA

Im Schichtbetrieb sind grundsätzlich zwei Modi zu unterscheiden: Der Nutzerbetrieb und der Beschleunigerphysik-Betrieb.

Der Nutzerbetrieb

Im Nutzerbetrieb wird Synchrotronstrahlung für Experimente (z.B. aus dem Bereich der Festkörperphysik) zur Verfügung gestellt. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf dem reibungslosen Ablauf von Standardsituationen. Diese sind derzeit:

Einschalten der Anlage
Injektionsphase
Speicherphase
Ausschalten der Anlage

Diese Situationen sollten vom Schichtleiter routinemäßig mit Unterstützung durch das Kontrollsystem beherrscht werden. Dazu sind vor allem einfache Programme vorhanden, die dem Schichtleiter das Umschalten zwischen Injektionsphase und Speicherphase ermöglichen. Zusätzlich gibt es eine Sammlung von Ein- und Ausschaltroutinen[1], die einzeln aufgerufen werden müssen.

[1] Der einzige Unterschied zwischen Routinen und Programmen besteht in der Komplexität. Routinen enthalten seltener Schleifen und greifen häufiger auf Betriebssystemfunktionen zu. Der Übergang zu Programmen ist fließend.

Gerade beim Einschalten benötigt die Schichtmannschaft häufig die Unterstützung des Physikers vom Dienst[2]. Auch bei Schwierigkeiten oder Veränderungen der Strahllage auf Nutzerwunsch ist die Schichtmannschaft auf Unterstützung durch erfahrene Operateure angewiesen.

Ein weiteres Problem sind Ausfälle, die nicht direkt bemerkt werden. Wenn ein Hardware-Ausfall nicht unmittelbar einen Strahlverlust zur Folge hat, wird er häufig erst in der nächsten Injektionsphase bemerkt. Wenn zum Beispiel ein Korrekturmagnet ausfällt und dies den Strahlbetrieb nicht sofort verhindert, sondern nur die Strahllage verschiebt, wird dies vermutlich nicht bemerkt. In der nächsten Injektionsphase würde die geänderte Strahllage zu einem schlechteren Ladungstransfer aus dem Beschleunigerring in den Speicherring führen. Je nachdem, ob nun das richtige Programm geöffnet ist oder nicht, bemerkt der Operateur dann die Ursache, oder kompensiert die Verschlechterung durch Variation der beschleunigenden Hochfrequenz oder der Magnetstärken im Transferkanal T2. Im ungünstigsten Fall führt dies zu völlig neuen und im Nutzerbetrieb unsinnigen Parameterkombinationen.

Der Beschleunigerphysik-Betrieb

Der Beschleunigerphysik-Betrieb dient zum Testen von neuen Komponenten, zu Messungen am Beschleuniger und zum Einstellen neuer Optiken. Damit ist in diesem Betrieb vor allem Flexibilität gefragt. Der Zustand der Maschine wird in der Regel über die gesamte Zeit von der Schichtmannschaft kontrolliert, so dass Fehler und Ausfälle meistens schnell bemerkt werden.

Die häufigsten Probleme sind Ausfälle an ungewöhnlicher Stelle und nicht dokumentierte Einstellungen, die zu Fehlern führen. Ungewöhliche Ausfälle treten vor allem bei neuen Einstellungen auf und werden nicht erkannt, weil keine Erfahrungswerte vorliegen. Wenn ungewöhnliche Änderungen vorgenommen werden, die nicht vollständig dokumentiert werden (z.B. im elekronischen Schichtbuch), dann kann die nachfolgende Schichtmannschaft den Zustand der Maschine nicht korrekt einschätzen.

Vom Kontrollsystem wird eine Sammlung von Programmen angeboten, mit denen je nach Bedarf einzelne Geräte oder Gerätegruppen angesteuert werden können. Abbildung 2.1 zeigt eine Sammlung von Programmen, die zur Optimierung des Transferkanals T2 nützlich sind. Jedes dieser Programme muss einzeln gestartet werden. Ein Problem ist die mangelnde Katalogisierung der Programme. Dadurch werden vorhandene Programme nicht effektiv genutzt oder das Vorhandensein eines Programms ist nicht jeder Schichtmannschaft bekannt.

2.2 Verbesserungen durch Automatisierung

Automatisierung soll in dieser Arbeit als eine Implementierung komplexer Algorithmen zur automatischen Steuerung von Abläufen im Betrieb der Anlage verstanden werden. Da die meisten Elemente der Beschleunigeranlage bereits über Computer gesteuert werden, ist damit nicht die Fernsteuerung der Anlage gemeint.

[2]Der Physiker vom Dienst (PvD) ist ein Physiker im Rufbereitschaftsdienst, der mit dem Beschleunigerbetrieb gut vertraut ist und dementsprechend als erfahrener Operateur gilt.

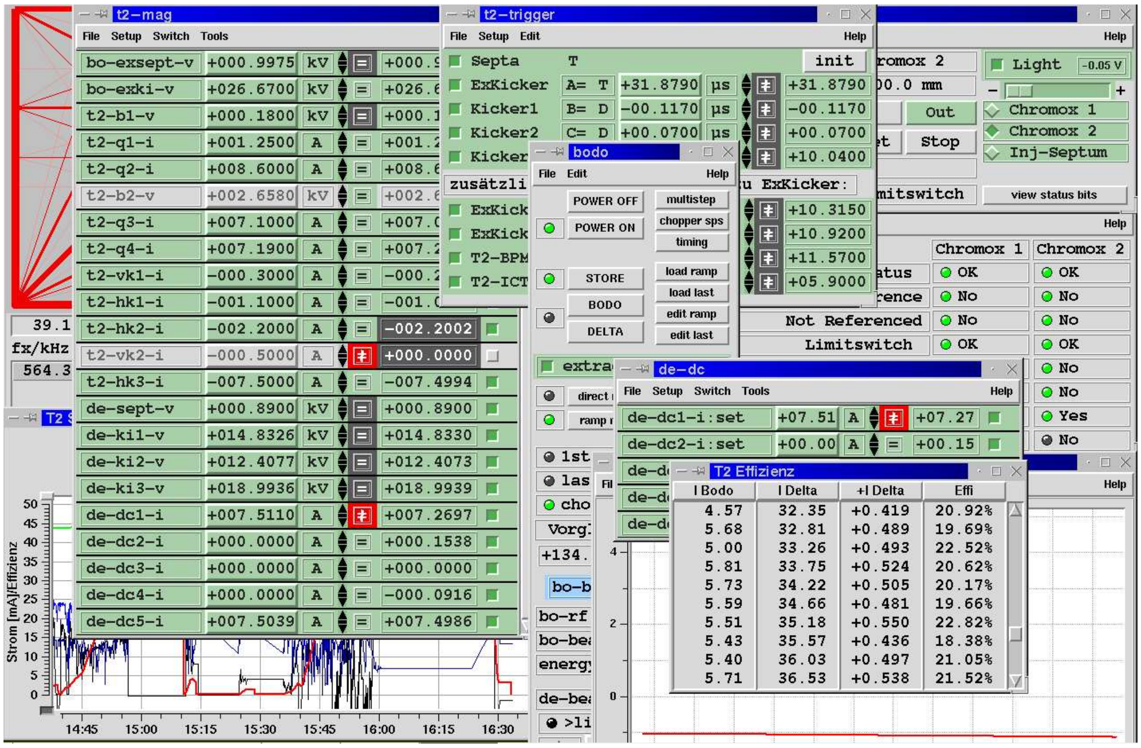


Abbildung 2.1: *Bildschirmdarstellung einiger Programme, die zur Optimierung des Transferkanal T2 hilfreich sind (die Darstellung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit).*

Schon bei der Beschreibung des Schichtbetriebs sind einige Problempunkte deutlich geworden, die eine weitergehende Automatisierung des Nutzerbetriebs sinnvoll erscheinen lassen. Verbesserungen in der Überwachung des Hardware-Zustandes sind notwendig, um Ausfälle schnell und zuverlässig zu detektieren. Desweiteren wäre eine Zusammenfassung und Beschreibung des Maschinenzustandes eine Verbesserung, weil geänderte Einstellungen besser erkannt würden. Eine Automatisierung der Injektionsoptimierung, welche die Funktionen des Transferkanals zwischen dem Beschleuniger Bodo und dem Speicherring Delta überwacht und regelt, ist eine Anwendung, die den Betrieb des Beschleunigers vereinfachen würde. In dieser Richtung wurden bereits einige Programme realisiert, wie zum Beispiel die Orbitkorrektur für den Speicherring [6].

Für den Beschleunigerphysik-Betrieb ist eine Automatisierung problematisch, da es in der Natur dieses Betriebszustandes liegt, dass neue und ungewöhnliche Anforderungen gestellt werden. Es sollte jedoch vorgesehen sein, Automatisierungen gemäß neuer Erkenntnisse aus dem Beschleunigerphysik-Betrieb zu erweitern.

2.3 Die Bedeutung des Transferkanals T2

Der Transferkanal T2 führt die beschleunigten Elektronen vom Beschleunigerring Bodo in den Speicherring Delta. Dabei ist ein möglichst vollständiger Transfer der Elektronen wünschenswert, um im Speicherring schnell den gewünschten Strahlstrom zu erreichen.

Der Transfer der Elektronen ist bei DELTA noch wichtiger als bei anderen Synchrotronstrahlungsanlagen, da ein Beschleunigungszyklus bis zu einer Energie von 1,5 GeV mindestens 6,5 s dauert, während an anderen Anlagen mit mehreren Hertz in den Speicherring injiziert wird. Die folgende Tabelle stellt einige Anlagen gegenüber:

Anlage	Energie	Zykluszeit der Injektion
BESSY	1,7 GeV	0,1 s
ESRF	6 GeV	0,1 s
SLS	2,4 GeV	0,32 s
ANKA	2,5 GeV	1 s
Spring-8	8 GeV	1 s
DELTA	1,5 GeV	6,5 s

Die Optimierung des Transferkanal T2 bei DELTA wurde bisher durch erfahrene Operateure vorgenommen. Um diese zu entlasten und auch in der Nachtschicht mit Hilfskräften eine erfolgreiche Injektionsphase durchzuführen, ist eine Automatisierung der Abläufe eine notwendige Voraussetzung.

Teil I

Der Transferkanal T2

Kapitel 3

Grundlagen der Beschleunigerphysik

In diesem Kapitel werden kurz die physikalischen Bezeichnungen und Zusammenhänge dargestellt, die für das weitere Verständnis dieser Arbeit notwendig sind. Weiterführende Informationen und Herleitungen zu den angegebenen Formeln finden sich in [1], [7].

3.1 Festlegung des Koordinatensystems

Im Rahmen dieser Arbeit sind vor allem die Dimensionen des Elektronenstrahls und die Abweichungen der Elektronen von der Sollbahn (typische Werte liegen im Millimeter-Bereich) von Interesse. Diese Größen sind klein im Vergleich zu den Dimensionen des Beschleunigers (z.B. beträgt der Umfang des Speicherrings Delta 115,2 m). Es ist daher sinnvoll, die Bewegung der Elektronen in einem Koordinatensystem zu beschreiben, das nur die unmittelbare Umgebung des Elektronenstrahls darstellt.

Gemäß der Konvention in der Beschleunigerphysik (siehe auch [1] oder [7]) wird in dieser Arbeit ein mitbewegtes Koordinatensystem $K(x, z, s)$ benutzt, dessen Ursprung der Bahn eines idealen Elektrons folgt. Dabei gibt die s-Koordinate die longitudinale Bewegungsrichtung wieder, während x und z die transversalen Ablagen von der Sollbahn angeben.

In Abbildung 3.1 sind die Richtungen veranschaulicht. Dementsprechend zeigt die positive x-Achse in den Ringbeschleunigern nach außen, während die positive z-Achse nach oben weist. Elektronen, die eine Kreisbahn im Uhrzeigersinn durchlaufen, werden in negative x-Richtung abgelenkt.

3.2 Lineare Strahloptik

Die lineare Strahloptik beschreibt die Bewegung geladener Teilchen durch eine Magnetstruktur.

In Beschleunigeranlagen werden die geladenen Teilchen durch Strahlführungsmagnete auf eine Sollbahn gelenkt. Die lineare Strahloptik berücksichtigt nur Dipol- und Quadrupolmagnete, bei denen die wirkenden Kräfte entweder transversal konstant sind (Dipol) oder linear mit dem transveralen Abstand zur Idealbahn zunehmen (Quadrupol). Aufgrund von Störungen und Feldfehlern bewegen sich die Elektronen im Allgemeinen nicht immer auf der Sollbahn. Die tatsächliche Bahn wird auch als *Orbit* bezeichnet.

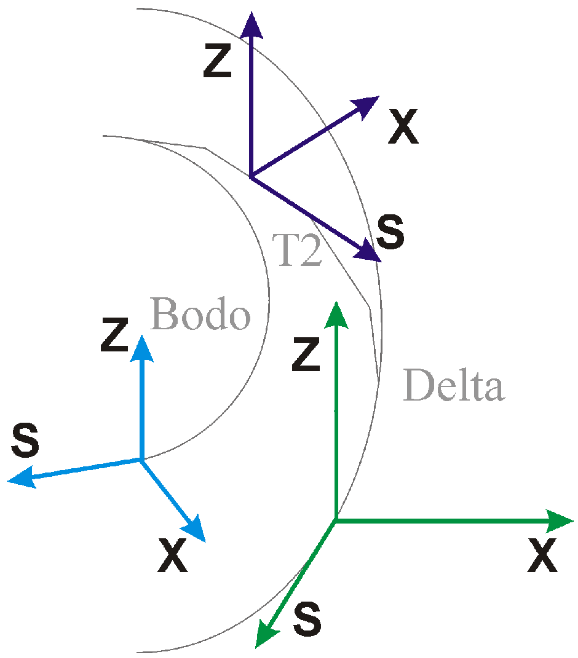


Abbildung 3.1: *Das mitbewegte Koordinatensystem, dargestellt an drei willkürlich gewählten Positionen.*

Die Bewegung der geladenen Teilchen wird durch die Bewegungsgleichungen (3.1) und (3.2) beschrieben, wenn man annimmt, dass es nur eine Ablenkung in der x-s-Ebene gibt.

$$x''(s) + \left(\frac{1}{R^2(s)} - k(s)\right) \cdot x(s) = \frac{1}{R(s)} \cdot \frac{\Delta p}{p} \tag{3.1}$$

$$z''(s) + k(s) \cdot z(s) = 0 \tag{3.2}$$

Die Ablenkung wird in diesen Gleichungen durch den ortsabhängigen Ablenkradius $R(s)$ beschrieben. Die Größe $k(s)$ gibt die Stärke der Fokussierung an, wobei im Rahmen dieser Arbeit gilt:

$k < 0$: horizontal fokussierender Quadrupol

$k > 0$: horizontal defokussierender Quadrupol

Dies stellt eine willkürliche Konvention dar, die in der Literatur zum Teil unterschiedlich festgelegt wird. Ein defokussierender Quadrupol hat nur in der horizontalen Richtung defokussierende Wirkung, in vertikaler Richtung fokussiert er den Strahl. Für den fokussierenden Quadrupol gilt Analoges.

Die Größe $\Delta p/p$ in Gleichung (3.1) ist die relative Impulsabweichung der Elektronen vom Sollimpuls. Dabei gilt die Gleichung nur für kleine Abweichungen, d.h. $\Delta p/p \ll 1$.

3.2.1 Transformationsmatrizen

Die Bewegungsgleichungen (3.1) und (3.2) können nur stückweise gelöst werden, da die Fokussierung und Ablenkung jeweils abhängig von s sind. Mit anderen Worten, je nach Anordnung und Stärke der Strahlführungsmagnete ändert sich die Lösung dieser Gleichungen.

Um zu einer Lösung zu kommen, teilt man daher die Bahn (also die s-Achse) in Abschnitte mit konstanter Fokussierung und Ablenkung auf. Dazu nimmt man vereinfachend an, dass die Wirkung der Magnete abrupt an einer Position einsetzt bzw. endet. Diese so genannte *Rechtecknäherung* ist normalerweise für eine generelle Beschreibung der Teilchenbewegung ausreichend. Allerdings muss man berücksichtigen, dass die „Kanten" der Magnetfelder nicht mit den Kanten der Magnete identisch sind. Man unterscheidet daher eine *mechanische* Länge von einer *effektiven* Länge, die aus Simulationen oder Magnetfeldmessungen zu bestimmen ist.

Die stückweisen Lösungen der Bahngleichungen lassen sich als Transformation des Bahnvektors in Matrizenform angeben. Die hier gewählte Darstellung bezieht sich auf den vierdimensionalen Bahnvektor (x, x', z, z').

Die effektive Länge des jeweiligen Elements in Richtung der s-Achse ist als S angegeben.

1. Driftstrecke ($k = 0$ und $R = 0$):

$$M_{Drift} = \begin{pmatrix} 1 & S & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & S \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{3.3}$$

2. horizontal fokussierender Quadrupol ($\Omega = (\sqrt{|k|} \cdot S)$, $k < 0$ und $R = 0$):

$$M_{QF} = \begin{pmatrix} \cos\Omega & \frac{1}{\sqrt{|k|}}\sin\Omega & 0 & 0 \\ -\sqrt{|k|}\sin\Omega & \cos\Omega & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cosh\Omega & \frac{1}{\sqrt{|k|}}\sinh\Omega \\ 0 & 0 & \sqrt{|k|}\sinh\Omega & \cosh\Omega \end{pmatrix} \tag{3.4}$$

3. horizontal defokussierender Quadrupol ($\Omega = (\sqrt{k} \cdot S)$, $k > 0$ und $R = 0$):

$$M_{QD} = \begin{pmatrix} \cosh\Omega & \frac{1}{\sqrt{k}}\sinh\Omega & 0 & 0 \\ \sqrt{k}\sinh\Omega & \cosh\Omega & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos\Omega & \frac{1}{\sqrt{k}}\sin\Omega \\ 0 & 0 & -\sqrt{k}\sin\Omega & \cos\Omega \end{pmatrix} \tag{3.5}$$

4. Dipol, Sektormagnet ($k = 0$ und horizontale Ablenkung $R > 0$):

$$M_{Sektor} = \begin{pmatrix} \cos(S/R) & R \cdot \sin(S/R) & 0 & 0 \\ -\frac{1}{R}\sin(S/R) & \cos(S/R) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & S \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{3.6}$$

5. Kantenfokussierung (Eintrittswinkel zur Kante Ψ):

$$M_{Kante} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\tan\Psi}{R} & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\tan\Psi}{R} & 1 \end{pmatrix} \tag{3.7}$$

Der Bahnvektor am Ende einer Abfolge von Elementen E1 bis E4 ergibt sich dann aus dem Startvektor $\vec{x}_o$ durch eine Folge von Matrizenmultiplikationen:

$$\vec{x}_{Ende} = M_{E4} \cdot M_{E3} \cdot M_{E2} \cdot M_{E1} \cdot \vec{x}_o \ .$$

Da längere Magnetstrukturen zu aufwändigen Rechnungen führen, greift man hier im Allgemeinen auf Computerprogramme wie `Optics` [8] oder `MAD` [9] zurück.

3.2.2 Betafunktion und Dispersion

Der beschriebene Matrizenformalismus eignet sich, um die Bewegung einzelner, geladener Teilchen durch eine Magnetstruktur zu beschreiben. Im Allgemeinen ist es jedoch wichtig, Aussagen über die generelle Bewegung der Teilchen zu machen. Dazu kann man die Bewegungsgleichungen (3.1) und (3.2) zunächst so betrachten, dass die Ablenkung und die Impulsabweichung verschwinden.

$$1/R := 0 \qquad \text{und} \qquad \Delta p/p := 0$$

Damit erhält man die folgende Differentialgleichung vom Hill'schen Typ:

$$u''(s) - k(s) \cdot u(s) = 0 \tag{3.8}$$

Die Gleichung beschreibt eine Schwingung um die Idealbahn, die als *Betatronschwingung* bezeichnet wird. Die Lösung ist in Gleichung (3.9) gegeben, wobei u sowohl für x als auch für z stehen kann.

$$u(s) = \sqrt{\varepsilon \cdot \beta(s)} \ \cdot \ \cos\left[\Phi(s) + \phi\right] \tag{3.9}$$

Die Amplitude der Schwingung ist durch

$$E(s) = \sqrt{\varepsilon \cdot \beta(s)}$$

gegeben, wobei ε *Emittanz* genannt wird, von den Anfangsbedingungen abhängt und über die Bahn konstant ist. Dagegen ist $\beta(s)$, die so genannte *Betafunktion*, vom Ort s auf der Sollbahn abhängig. Die Phase der Schwingung ist

$$\Phi(s) = \int_0^s 1/\beta(\varsigma) \ d\varsigma$$

und ebenfalls vom Ort s abhängig.

Da in einem realen Beschleuniger die Impulsabweichung $\Delta p/p$ im Allgemeinen nicht verschwindet, müssen die Bewegungsgleichungen noch auf deren Einfluß untersucht werden. Wie Gleichung (3.1) zeigt, ist die Impulsabweichung vor allem in Ablenkmagneten wichtig, für die $R \neq 0$ gilt. Wenn man die Bewegungsgleichung in Ablenkmagneten löst, so erhält man für die Gesamtablage x_G zusätzlich zu Gleichung (3.9) einen so genannten *Dispersionsterm* $x_D = D(s) \cdot \Delta p/p$.

$$x_G = \sqrt{\varepsilon \cdot \beta(s)} \ \cdot \ \cos\left[\Phi(s) + \phi\right] \ + \ D(s) \cdot \frac{\Delta p}{p} \tag{3.10}$$

Die Größe $D(s)$ nennt man die *Dispersion*. Sie beschreibt die Bahn eines gedachten Teilchens mit einer Impulsabweichung von 100%.

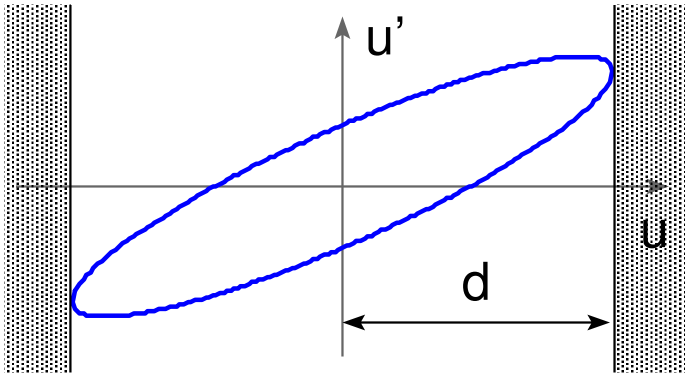


Abbildung 3.2: *Die Phasenellipse wird durch die Vakuumkammer beschränkt.*

3.2.3 Phasenellipse und Akzeptanz

Für Untersuchungen ob und wie gut ein Teilchenstrahl durch eine Struktur hindurch passt, betrachtet man die Abbildung des Strahls im Phasenraum in den verschiedenen Koordinaten. Für diese Arbeit sind nur die transversalen Koordinaten x und z interessant, die im Weiteren mit u abgekürzt werden. Der Strahl bildet im u-u'-Phasenraum eine Ellipse, deren Lage und Form sich mit dem Ort s ändert und durch die Magnetstruktur bestimmt wird. Die Fläche dieser Ellipse ist bis auf den Faktor π gleich der Emittanz.

In einem Teilchenstrahl liegen nun verschiedene Impulsabweichungen und Anfangsbedingungen für die verschiedenen Einzelteilchen vor. In seiner Gesamtheit ist der Strahl also nicht scharf begrenzt, es liegt vielmehr eine gaußförmige Verteilung der Teilchen vor [10]. Man definiert daher die Strahlbreite als eine Standardabweichung, die dann nach [11] gegeben ist durch

$$E_{STD} = \sqrt{\varepsilon \cdot \beta(s) + \left(D(s) \cdot \frac{\Delta p}{p}\right)^2}. \tag{3.11}$$

Da eine Standardabweichung nur 68% des Teilchenstrahls umschließt, ist ein vielfaches an Platz nötig um einen Strahl zu speichern. Man geht als Richtwert davon aus, dass die Strahllebensdauer bei etwa sieben Standardabweichungen nicht mehr beeinträchtigt wird. Um Bewegungsspielraum für Strahlkorrekturen zu haben, sieht man für einen Speicherring in der Regel deutlich mehr Platz vor [1].

Der Platz für den Teilchenstrahl ist zum einen durch die Vakuumkammer und zum anderen durch nichtlineare Magnetfelder von Randfeldern oder höheren Multipolmagneten begrenzt. Der dadurch begrenzte Platz wird *Apertur* genannt, wobei man je nach Begrenzungsart zwischen mechanischer und dynamischer Apertur unterscheidet.

Da die dynamische Apertur so eingestellt werden sollte, dass sie größer ist als die mechanische Apertur, oder zumindest in der gleichen Größe liegt, kann die Einschränkung des Teilchenstrahls durch die mechanischen Dimensionen der Vakuumkammer abgeschätzt werden. Wenn man die zur Verfügung stehende Breite mit d bezeichnet, kann man ein Verhältnis A definieren, das beschreibt, wie viele Strahlbreiten E in diese Breite hineinpassen. Dabei ist d in der Regel nicht über die gesamte Teilchenbahn konstant, sondern vom Ort

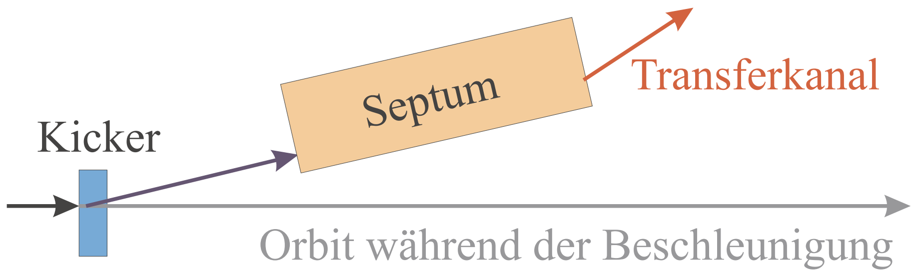


Abbildung 3.3: *Bei der Extraktion wird der Elektronenstrahl mit einem Kickermagneten in den Septumspalt verschoben.*

s abhängig.

$$A = \frac{d(s)}{\sqrt{\varepsilon \cdot \beta(s) + \left(D(s) \cdot \frac{\Delta p}{p}\right)^2}} \tag{3.12}$$

Dieses Verhältnis A wird auch als *Akzeptanz* bezeichnet. In der Literatur finden sich jedoch auch andere Definitionen. Entscheidend ist die minimale Akzeptanz innerhalb einer Magnetstruktur, da dies die optisch engste Stelle bezeichnet.

3.3 Extraktion und Injektion

Bei Speicherringanlagen und besonders bei Synchrotronstrahlungsquellen ist es nicht zweckmässig, die Elektronen im Speicherring auch zu beschleunigen, da dies nicht mit den geforderten Strahlqualitäten vereinbar ist. Statt dessen wird ein eigener Beschleunigerring benutzt und die Teilchen nach der Beschleunigung in den Speicherring transferiert. Die Elektronen werden zunächst aus dem Beschleuniger *extrahiert*, über einen Transportweg zum Speicherring geführt und dort *injiziert*.

Extraktion und Injektion werden jeweils mit einem Spezialmagneten, einem so genannten *Septum*, durchgeführt. Ein Septummagnet ist ein Ablenkmagnet, dessen Magnetfeld nur in einem begrenzten Raum wirkt, man nennt diesen Raum auch Septumspalt. Gegen den gespeicherten Strahl auf dem Sollorbit ist das Magnetfeld mit der *Septumschiene* abgeschirmt. Im Allgemeinen steht das Septum in einem Winkel zur Sollbahn des gespeicherten Strahls.

Bei der Extraktion wird der gespeicherte Elektronenstrahl im Beschleunigerring zunächst in die Nähe der Septumschiene verschoben, wobei noch keine nennenswerten Verluste auftreten. Dann werden die Elektronen mit Hilfe eines Kickermagneten, eines gepulsten Ablenkmagneten, in den Septumschlitz geschoben. Dort unterliegen sie der Wirkung des Magnetfeldes und werden in den Transferkanal gelenkt.

Der Extraktionskicker muss eine kurze Anstiegszeit für sein Magnetfeld haben, so dass die Elektronen bei ihrem letzten Umlauf vor der Extraktion noch nicht gestört werden. Die Anstiegszeit des Feldes darf daher höchstens eine Umlaufdauer im Beschleuniger betragen. Im Gegensatz dazu kann die Anstiegszeit eines Septummagneten lang gewählt werden, weil das Magnetfeld gegen den gespeicherten Strahl abgeschirmt ist.

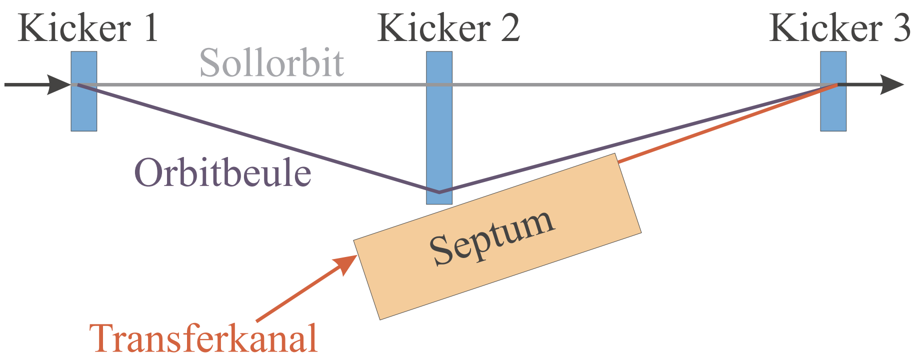


Abbildung 3.4: *Bei der Injektion wird der bereits gespeicherte Elektronenstrahl mit Hilfe einer Orbitbeule in die Nähe des Septums geschoben, so dass die injizierten Elektronen bereits innerhalb der Akzeptanz liegen.*

Die Injektion in einen Ringbeschleuniger oder Speicherring läuft fast wie eine rückwärts betrachtete Extraktion. Allerdings ist zu beachten, dass sich in der Regel bereits Elektronen im Ring befinden, die nicht verloren gehen sollen. Daher sind statt eines einzelnen Kickermagneten mindestens drei nötig, um den gespeicherten Teilchenstrahl am Injektionspunkt zu verschieben, ohne die Strahllage im restlichen Speicherring zu beeinflussen. Man nennt diese Verschiebung der Strahllage in einem begrenzeten Bereich eine abgeschlossene *Orbitbeule*.

Wenn der zu injizierende Strahl in das Septum einritt, wird mit den Kickermagneten der gespeicher Elektronenstrahl so weit an die Septumschiene geschoben, dass die Akzeptanzellipse bis in den Septumspalt hinein reicht. Das ist ohne großen Strahlverlust möglich, weil die Elektronen nur etwa sieben Standardabweichungen (siehe Gleichung (3.11)) belegen, die Akzeptanz eines Ringbeschleunigers aber eher in der Größenordung von dreißig bis fünfzig Standardabweichungen liegt.

Die injizierten Elektronen liegen also innerhalb der Akzeptanz, wenn sie in den Speicherring eintreten. Durch die Kickermagneten wird der Elektronenstrahl nun wieder auf die Sollbahn gelenkt. Die neu hinzugekommenen Elektronen führen Betatronschwingungen mit großer Amplitude um den Sollorbit aus, die durch Abstrahlung von Synchrotronstrahlung gedämpft werden.

Wenn der injizierte Elektronenstrahl nicht vollständig innerhalb der Akzeptanz liegt, gehen die Elektronen außerhalb der Akzeptanzellipse nach einigen Umläufen verloren. Die maximale Anzahl der Umläufe lässt sich über den nicht ganzzahligen Anteil des Arbeitspunktes abschätzen.

Der *Arbeitspunkt* ist die Anzahl der Betatronschwingungen, die der Elektronenstrahl pro Umlauf in einem Ringbeschleuniger durchläuft. Diese Zahl sollte nicht ganzzahlig sein, weil sich dann Dipolfehler verstärken würden. Auch andere Randbedingungen (halb- und drittelzahlige Resonanzen, Kopplung zwischen x- und z-Ebene) sind bei der Festlegung des Arbeitspunktes zu berücksichtigen. Der Kehrwert des nichtganzzahligen Anteils des Arbeitspunktes gibt an, wie oft die Elektronen umlaufen müssen, bis sie mindestens einmal an der engsten Stelle des Speicherrings nahe des Maximums ihrer Betatronschwingung waren. Irgendwann bis zu diesem Zeitpunkt sind Elektronen außerhalb der Akzeptanzellipse auf die Vakuumkammer getroffen und so verloren gegangen.

Es gibt natürlich noch eine kleine Wahrscheinlichkeit, dass ein Elektron durch Synchrotronstrahlungsdämpfung wieder in die Akzeptanz gelangt. Diese Wahrscheinlichkeit ist um

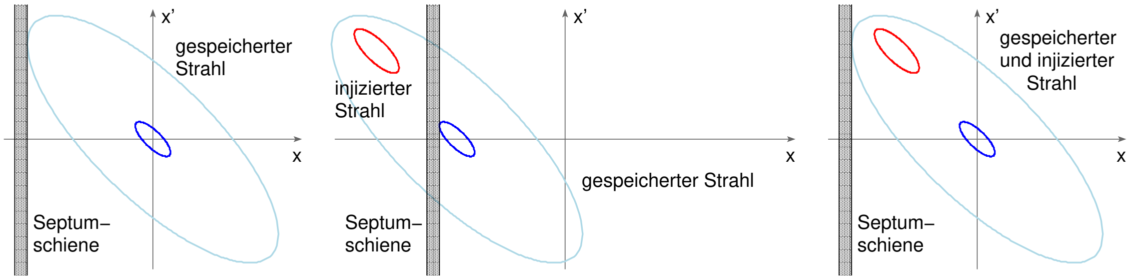


Abbildung 3.5: *Der Injektionsvorgang im Phasenraum: in dunkelblau die Phasenellipse von 7σ des gespeicherten Elektronenstrahls, in hellblau die Akzeptanzellipse für den gespeicherten Strahl und in rot die Phasenellipse des neu injizierten Strahls. Im ersten Bild ist der gespeicherte Elektronenstrahl nahe der Septumschiene. Im mittleren Bild wurde die Akzeptanzellipse mit Hilfe von Kickermagneten über die Septumschiene geschoben. Im rechten Diagramm sind neue Elektronen injiziert.*

so größer, je näher das Elektron schon an der Akzeptanzellipse war.

Insgesamt kann man daher erst einige Zeit nach der Injektion bestimmen, wie viele Elektronen tatsächlich injiziert wurden.

3.3.1 Besonderheiten von Transportstrecken

Während es in einem Speicherring für die Optik Randbedingungen in Form von Begrenzungen der Betafunktionen oder speziellen Strecken ohne Dispersion gibt, spielen für den Transferkanal vor allem die Parameter am Anfang und Ende der Transportstrecke eine Rolle [12]. Da die Elektronen den Transferkanal nur einmal durchqueren müssen, sind die Anforderungen an Maximalwerte oder Störungsfreiheit im Vergleich zum Speicherring gering. Dagegen müssen die Strahlparameter bei der Injektion in engen Grenzen liegen, damit möglichst viele Elektronen in die Akzeptanz des Speicherrings gelangen.

Da durch die mechanische Anordnung des Septums die Ablage des injizierten Strahls vorgegeben ist, bleiben als optimierbare Parameter

- die Größe (vor allem die Breite) des injizierten Strahls[1],
- der Winkel, unter dem die Elektronen aus dem Transferkanal in den Speicherring eintreten (Injektionswinkel),
- die Form der Phasenraumellipse (Drehwinkel und Lage der Extrema), die durch die Betafunktion und deren Ableitung bestimmt wird (siehe auch Kapitel 3.2.3).

Da die Breite des Elektronenstrahls von der Betafunktion und der Dispersion abhängt (siehe 3.2.3), bleiben fünf Größen anzupassen[2]: Die Betafunktionen β_x und β_z und ihre

[1] Die Höhe des injizierten Strahls ist unkritischer, wenn die Einschränkungen durch die Septumschiene in horizontaler Richtung liegen. Bei einer vertikalen Injektione muss die Höhe jedoch berücksichtigt werden.

[2] Theoretisch könnte noch die Emittanz angepasst werden, diese soll aber für Transportwege hier als konstant angesehen werden. Dies ist zulässig, da sich die Emittanz bei Elektronenbeschleunigern als Gleichgewicht zwischen Anregung und Dämpfung von Betatronschwingungen durch die Abstrahlung von Synchrotronstrahlung einstellt. Dämpfungszeiten liegen bei 1,5 GeV in der Größenordnung von Millisekunden, während die Durchflugzeit für Transferstrecken im Bereich von Nanosekunden liegt.

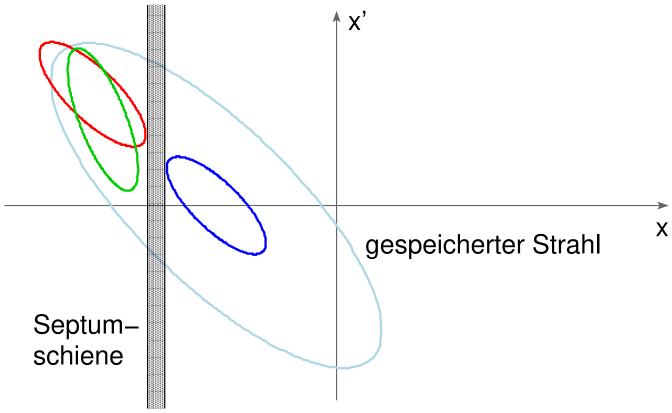


Abbildung 3.6: *Für eine optimale Injektion muss der injizierte Strahl möglichst vollständig in der Akzeptanz (hellblau) des gespeicherten Strahls liegen. Dies wird nicht unbedingt durch eine vollständige Anpassung der Strahlparameter an den gespeicherten Strahl erreicht (rote Ellipse), sondern durch eine gezielte Fehlanpassung (grüne Ellipse).*

Ableitungen

$$\alpha = -\beta'/2 \,,$$

sowie die horizontale Dispersion D_x. Der Injektionswinkel kann durch die Stärke des Magnetfeldes im Injektionsseptum variiert werden.

Die Anpassung der Magnete und Strahlparameter auf die Endbedingungen kann zu unterbestimmten Systemen führen. Die optischen Funktionen werden vor allem durch Quadrupolmagnete angepasst. Gibt es in der Transportstrecke zu wenig Quadrupolmagnete oder sind diese ungünstig angeordnet, so können die Betafunktionen und ihre Ableitungen unter Umständen nicht auf die Werte eingestellt werden, die im Speicherring am Injektionspunkt vorliegen. Es ist dann nicht mehr zweckmässig, alle Parameter möglichst gut anzupassen.

Wie in Abbildung 3.6 dargestellt, ist es auch dann nicht unbedingt sinnvoll, die optischen Parameter am Ende der Transportstrecke genau auf die Randbedingungen des Speicherrings anzupassen, wenn die Möglichkeit dazu besteht. Wie in [13] gezeigt, gibt es eine optimale Lage für den injizierten Strahl, die nicht mit den Parametern des gespeicherten Strahls identisch ist.

Generell kann man feststellen, dass die Optimierung der Injektion einfacher ist, wenn die beiden folgenden Bedingungen erfüllt sind:

1. Die Phasenraumellipse des gespeicherten Strahls sollte möglichst flach liegen, damit der Teil der Akzeptanzellipse maximal ist, der über die Septumschiene geschoben wird.

2. Der injizierte Strahl sollte eine möglichst hochkant stehende Phasenraumellipse aufweisen, damit der Großteil der Elektronen in der Nähe der Septumschiene liegt.

In Strahlparametern ausgedrückt, bedeutet dies für den gespeicherten Strahl eine minimale Ableitung der Betafunktion α und kleine Dispersion, während der injizierte Strahl eine kleine horizontale Betafunktion haben sollte.

3.4 Die Qualität einer Injektion

Mit einer *Injektion* ist hier der Transfervorgang von der Extraktion aus dem Beschleunigerring über die Injektion der Elektronen bis zur stabilen Speicherung im Speicherring gemeint. Unter einem *Injektionszyklus* versteht man den gesamten Beschleunigungsvorgang einschließlich des Transfervorgangs. Das heißt, die Dauer eines Injektionszyklus hängt im Wesentlichen vom Ramp-Vorgang im Beschleunigerring ab. Da im Allgemeinen nicht nur einmal injiziert wird, sondern zyklisch, bis ein gewünschter Strahlstrom im Speicherring erreicht ist, entstehen so genannte *Injektionsphasen*. Während die eigentliche Injektion nur wenige Nanosekunden dauert, braucht ein Injektionszyklus bei DELTA 6,5 s und eine Injektionsphase zwischen zehn und dreißig Minuten.

Um die Optimierung eines Transferkanals bewerten zu können, sind messbare Größen notwendig, welche die Qualität eines Injektionsvorgangs beschreiben. Im normalen Betrieb einer Synchotronstrahlungsquelle ist dabei die Zeit, die für eine Injektionsphase nötig ist, der letztendlich wichtige Parameter. Je kürzer die Zeit ist, bis der gewünschte Strahlstrom im Speicherring zur Verfügung steht, um so mehr Zeit bleibt für die Experimente.

Die so genannte *Füllzeit* Δt_{Max}, welche die Dauer einer Injektionsphase beschreibt, beruht auf dem Status der gesamten Anlage, da sie davon abhängt, ob die Injektionsphase bei einem Strahlstrom von $I = 0$ beginnt, oder ob es sich um eine so genannte Nachinjektion handelt. Eine Nachinjektion findet bei bereits gespeicherten Strahlstrom statt und braucht daher weniger Zeit bis zum Erreichen des Soll-Strahlstroms.

Eine Größe zur Beschreibung einer Injektionsphase, die aus der Füllzeit abgeleitet wird, ist die *Füllgeschwindigkeit*

$$V = \frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

Da die Füllgeschwindigkeit näherungsweise unabhängig vom derzeit gespeicherten Strahlstrom ist, ist diese Größe besser geeignet, um verschiedene Injektionsphasen miteinander zu vergleichen. Da es sich bei der Injektion jedoch um einen diskontinuierlichen Vorgang handelt, muss die Zeit Δt groß gegenüber einem Injektionsvorgang gewählt werden. Damit eignet sich die Füllgeschwindigkeit nicht für eine Optimierung des einzelnen Injektionszyklus.

Um die Qualität eines einzelnen Injektionsvorganges zu bewerten, wird die Transfereffizienz eingeführt (siehe [14]):

$$G = \frac{\Delta Q_{Speicherring}}{Q_{Beschleuniger}} \tag{3.13}$$

Dabei ist $\Delta Q_{Speicherring}$ die Änderung der gespeicherten Ladungsmenge im Speicherring und $Q_{Beschleuniger}$ die aus dem Beschleunigerring extrahierte Ladungsmenge.

Kapitel 4

Beschreibung des Transferkanals T2

In diesem Kapitel werden die einzelnen Komponenten des Transferkanals T2 beschrieben, der den Beschleunigerring Bodo mit dem Speicherring Delta verbindet. Für die Zukunft sind mehrere Umbauten am T2 vorgesehen. Komponenten, die bereits eingebaut wurden, jedoch noch nicht angesteuert werden können oder deren Ansteuerung noch nicht zuverlässig ist, wurden zwar in die Beschreibungen aufgenommen, jedoch nicht für Messungen im Rahmen dieser Arbeit verwendet.

4.1 Bezeichnungen der Geräte

Es gibt bei DELTA grundsätzlich zwei Namenskonventionen, die von unterschiedlichen Betrachtungsweisen ausgehen und daher nicht durch die jeweils andere Konvention ersetzbar sind.

Die so genannten *Einbaunamen* beziehen sich auf einzelne Magnete oder Komponenten der Anlage. Im Allgemeinen geben diese Namen Aufschluss über den Standort und die generelle Klasse des Geräts.

Die im Kontrollsystem verwendeten Namen (*Kontrollsystemnamen*) beziehen sich auf steuerbare Geräte, z.B. Netzgeräte. Ein Netzgerät kann jedoch mehrere Magnete versorgen, so dass zu einem Kontrollsystemnamen mehrere Einbaunamen gehören können. Zusätzlich werden im Kontrollsystem die angesprochenen Eigenschaften, wie Strom oder Ansteuerspannung, an den Namen angehängt [15].

Als Beispiel sei der „lange" Dipol im Transferkanal T2 betrachtet: Der Magnet ist in drei Teilmagnete aufgeteilt, deren Einbaunamen `T2MDM039`, `T2MDM055` und `T2MDM084` sind. Die Zahl am Ende des Namens ist der Abstand des jeweiligen Elementes zum Anfang des T2 in Dezimetern. Die drei Magnete sind baugleich und werden, in Reihe geschaltet, von einem Netzgerät versorgt. Vom Kontrollsystem aus ist nur dieses Netzgerät ansteuerbar, das den Namen `t2-b2` für den zweiten Dipol (engl. **b***ending magnet*) im T2 trägt. Vollständige Kontrollsystem-Bezeichnungen wären dann `t2-b2-v`, für die Ansteuerspannung (engl.**v***oltage*), oder `t2-b2-sw`, für den Schaltzustand des Netzgerätes (engl. **sw***itch*).

Im Rahmen dieser Arbeit finden vor allem die Kontrollsystemnamen Verwendung. Die Zuordnung für die in dieser Arbeit relevanten Magnete ist in der Tabelle 4.1 aufgeführt.

s-Position [m]	Kontrollsystem	Einbauname	
bo 13,42	bo-exki	B2MKI113	Extraktionskicker
t2 0,00/bo 17,89	bo-exsept	B2MSE069	Extraktionsseptum
t2 1,15	t2-b1	T2MDM012	kurzer Dipol
t2 1,85	t2-q1	T2MQM017	erster Quadrupol
t2 2,44	t2-vk1	T2MVK024	vertikaler Korrektor
t2 2,77	t2-q2	T2MQM026	zweiter Quadrupol
t2 3,72	t2-hk1	T2MHK037	horizontaler Korrektor
t2 3,83	t2-b2	T2MDM039	langer Dipol (Teil I)
t2 5,35	t2-q3	T2MQM052	dritter Quadrupol
t2 5,49	t2-b2	T2MDM055	langer Dipol (Teil II)
t2 6,83	t2-hk2	T2MHK068	horizontaler Korrektor
t2 7,51	t2-vk2	T2MVK073	vertikaler Korrektor
t2 7,51	t2-hk3	T2MHK073	horizontaler Korrektor
t2 8,04	t2-q4	T2MQM079	vierter Quadrupol
t2 8,33	t2-b2	T2MDM084	langer Dipol (Teil III)
t2 10,49/de 59,04	de-sept	D3MSE007	Injektionsseptum
de 52,23	de-dc1	D2MDC054	erster DC-Ablenkmagnet
de 53,34	de-ki1	D2MKI040	erster Kicker
de 54,88	de-dc2	D2MDC022	zweiter DC-Ablenkmagnet
de 56,44	de-ki2	D2MKI010	zweiter Kicker
de 56,96	de-dc3	D3MDC007	dritter DC-Ablenkmagnet
de 60,33	de-dc4	D3MDC022	vierter DC-Ablenkmagnet
de 61,86	de-ki3	D3MKI041	dritter Kicker
de 62,97	de-dc5	D3MDC054	fünfter DC-Ablenkmagnet

Tabelle 4.1: Einbaunamen und Kontrollsystemnamen für die Transferelemente. Die Reihenfolge entspricht der Anordnung der Elemente in Strahlrichtung. In der Spalte s-Position bezieht sich der Zahlenwert auf Bodo (bo), den T2 (t2) oder auf Delta (de) je nach genannter Abkürzung, wobei jeweils die Position angegeben ist, bei der das Element beginnt.

4.2 Aufbau des T2

Den Anfang des 11,3 m langen Transferkanals T2 bildet das Extraktions-Septum von Bodo, ein gepulster Dipolmagnet, der den Elektronenstrahl aus Bodo in den T2 lenkt. Um den Elektronenstrahl in den Schlitz des Septummagneten zu schieben, gibt es im Beschleunigerring einen Kickermagneten, der aber nicht zum T2 zählt, auch wenn er für die Extraktion notwendig ist. Drei Dipolmagnete, die den Elektronenstrahl in Bodo mit Hilfe einer abgeschlossenen Beule näher an das Septum legen, sind zwar ebenfalls für eine vollständige Extraktion notwendig, können jedoch nicht ohne Aufwand als Optimierungsparameter für den T2 herangezogen werden, da sie in die Rampen-Steuerung des Beschleunigers Bodo integriert sind.

Die Strahlführung im T2 erfolgt im weiteren Verlauf durch vier Dipolmagnete, von denen drei über ein gemeinsames Netzgerät gesteuert werden („langer" Dipol), und vier Quadrupolmagnete, wobei zwei Magnete horizontal und die beiden anderen vertikal fokussieren. Aus Platzgründen wurden die Dipolmagnete als gepulste Magnete realisiert, die ohne Kühlung auskommen.

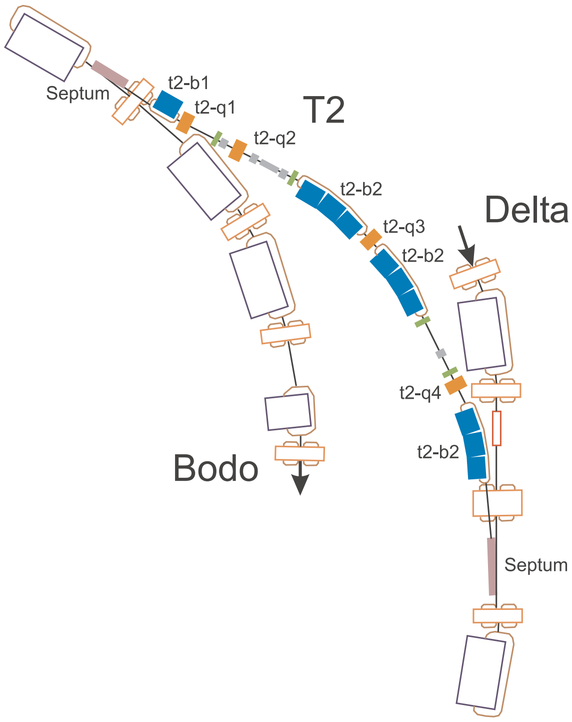


Abbildung 4.1: *Aufbau des Transferkanals T2: die Dipolmagnete sind in blau eingezeichnet, Quadrupolmagnete orange, die Septa violett, Diagnoseelemente grau und Korrekturspulen grün.*

Den Abschluss bildet das Injektions-Septum des Speicherrings Delta, das den zu injizierenden Strahl mit den bereits gespeicherten Elektronen zusammenführt. Auch zur Unterstützung der Injektion sind zusätzlich Kickermagnete im Speicherring nötig, die aber analog zur Extraktion aus Bodo nicht zum T2 gezählt werden.

Zur Korrektur der Strahllage im Transferkanal wurden zusätzlich zu den oben erwähnten Strahlführungsmagneten noch fünf Korrekturmagnete eingebaut, wobei drei die horizontale und zwei die vertikale Lage korrigieren können. In nächster Zukunft wird noch eine weitere Korrekturspule installiert werden.

4.2.1 Beschreibung der Dipolmagnete

Da Bodo innerhalb von Delta liegt, bleibt für den Transferkanal sehr wenig Platz. Diese Vorgabe spiegelt sich nicht nur in der Auslegung der Dipole als gepulste Magnete wieder, sondern auch in der Bauweise dieser Magnete.

Der erste Dipolmagnet im T2 heißt `t2-b1` und ist ein gepulst betriebener Rechteckmagnet. Er dient dazu, den Elektronenstrahl weiter vom Beschleunigerring zu entfernen und wurde beim Entwurf des Transferkanals als Teil des Extraktionsseptum (Hauptseptum) betrachtet [16]. Der theoretische Ablenkwinkel beträgt 4,0°.

Das Eisenjoch jedes Teilstücks des `t2-b2` besteht aus drei rechteckigen Modulen, die zueinander im Winkel von 6,3° stehen und von einer gemeinsamen Spulenwicklung magnetisiert werden [17]. Dadurch entsteht ein Quasi-Sektormagnet, dessen Ein- und Austrittswinkel gegenüber einem reinen Rechteckmagneten halbiert sind. Diese kostengünstige Variante eines Sektormagneten führt allerdings zu kleinen Feldfehlern durch die Spalte zwischen den

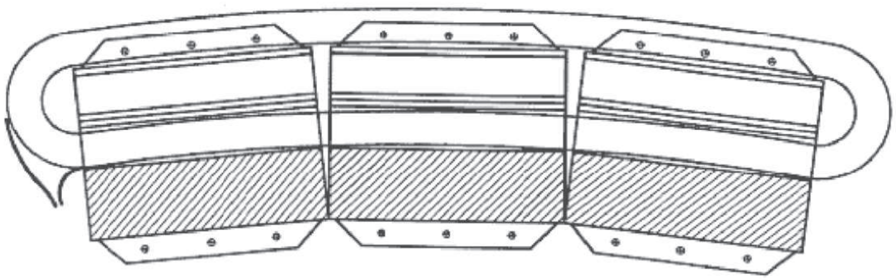


Abbildung 4.2: *Ein Teilstück des „langen“ Dipolmagneten im Transferkanal T2. Insgesamt werden drei solche Teilstücke in Reihe an einem Netzgerät betrieben.*

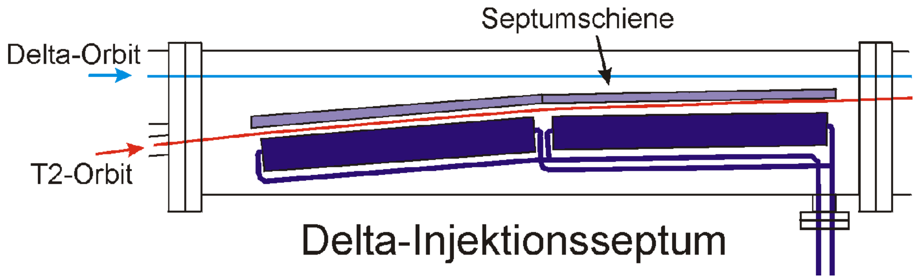


Abbildung 4.3: *Das Delta-Injektionsseptum besteht aus zwei Blöcken, die unter einem Winkel von 3,5° zueinander stehen.*

Modulen, die nach außen größer werden. Ein resultierender Effekt aufgrund von Feldfehlern ist damit von der Bahn der Elektronen abhängig. Jedes Teilstück des „langen“ Dipolmagneten erzeugt einen theoretischen Ablenkwinkel von -18,8° (Ablenkung nach „innen“).

4.2.2 Beschreibung der Septa

Die Septummagnete des Transferkanals T2 wurden bei DELTA speziell für die vorliegenden Anforderungen entwickelt und gebaut [18]. Es handelt sich um C-Magnete, deren Stromleiter auf der strahlabgewandten Seite um das Eisenjoch herum geführt sind. Das Magnetfeld wird durch ein Kupferblech (Septumschiene) vom gespeicherten Strahl abgeschirmt. Wird der Magnet gepulst betrieben, so entstehen in dem Abschirmblech Wirbelströme, deren Feld dem Streufeld des Magneten entgegen wirkt.

Das Extraktionsseptum (`bo-exsept`), mit dem die Elektronen aus Bodo in den Transferkanal geleitet werden, ist 57 cm lang (Eisenlänge) und in einem Winkel von 0,99° zur Sollbahn von Bodo eingebaut. Der Sollablenkwinkel beträgt 6,5°. Mit einer Höhe von 8 mm und einer Breite von 7 mm ist der Schlitz des Extraktionsseptums die mechanisch engste Stelle des T2.

Das Injektionsseptum (`de-sept`), mit dem die Injektion in den Speicherring realisiert wird, ist aus zwei Blöcken aufgebaut (siehe Abbildung 4.3). Die Blöcke sind jeweils 40 cm lang und stehen in einem Winkel von 3,5° zueinander. Der zweite Block ist mit einem Winkel von 0,90° zur Sollbahn von Delta eingebaut. Der Sollablenkwinkel des gesamten Injektionsseptums beträgt $-4{,}76°$. Der injizierte Elektronenstrahl sollte theoretisch das Septum

Gerät	Theoriewerte	Setzwerte
bo-exsept	$\alpha = 0{,}1676\ \frac{rad\ GeV}{kV} \cdot \frac{U}{E}$	$U = 5{,}9663\ \frac{kV}{rad\ GeV} \cdot \alpha \cdot E$
t2-b1	$\alpha = 0{,}5375\ \frac{rad\ GeV}{kV} \cdot \frac{U}{E}$	$U = 1{,}8603\ \frac{kV}{rad\ GeV} \cdot \alpha \cdot E$
t2-b2	$\alpha = 0{,}1816\ \frac{rad\ GeV}{kV} \cdot \frac{U}{E}$	$U = 5{,}506\ \frac{kV}{rad\ GeV} \cdot \alpha \cdot E$
t2-qx	$\lvert k\rvert = 0{,}535\ \frac{GeV}{m^2\ A} \cdot \frac{I}{E}$	$I = 1{,}869\ \frac{m^2\ A}{GeV} \cdot \lvert k\rvert \cdot E$
t2-hk1/hk2/vk1	$\alpha = 0{,}381 \cdot 10^{-3}\ \frac{rad\ GeV}{A} \cdot \frac{I}{E}$	$I = 2625\ \frac{A}{rad\ GeV} \cdot \alpha \cdot E$
t2-vk2/hk3	$\alpha = 0{,}165 \cdot 10^{-3}\ \frac{rad\ GeV}{A} \cdot \frac{I}{E}$	$I = 5051\ \frac{A}{rad\ GeV} \cdot \alpha \cdot E$
de-sept	$\alpha = 0{,}1508\ \frac{rad\ GeV}{kV} \cdot \frac{U}{E}$	$U = 6{,}631\ \frac{kV}{rad\ GeV} \cdot \alpha \cdot E$
de-kin	$\alpha = 0{,}167 \cdot 10^{-3}\ \frac{rad\ GeV}{kV} \cdot \frac{U}{E}$	$U = 5988\ \frac{kV}{rad\ GeV} \cdot \alpha \cdot E$
de-dc1/5	$\alpha = 0{,}376 \cdot 10^{-3}\ \frac{rad\ GeV}{A} \cdot \frac{I}{E}$	$I = 2660\ \frac{A}{rad\ GeV} \cdot \alpha \cdot E$
de-dc2/4	$\alpha = \frac{0{,}523}{f_{\text{sätt}}}\ \frac{rad\ GeV}{A} \cdot \frac{I}{E}$	$I = \frac{f_{\text{sätt}}}{0{,}523}\ \frac{A}{rad\ GeV} \cdot \alpha \cdot E$

Tabelle 4.2: Umrechnung zwischen Theoriewerten und Setzwerten des Kontrollsystems. Die Werte sind in folgenden Einheiten einzusetzen: E [GeV]; α [rad]; k [$\frac{1}{m^2}$]; I [A]; U [kV]. Der Faktor $f_{\text{sätt}}$ ist eine Sättigungskorrektur, die bei 1,5 GeV den Wert 1,59 und bei 1 GeV den Wert 1 hat. Für den 3. DC-Ablenkmagneten (`de-dc3`) liegen derzeit noch keine Werte vor.

parallel zur Septumschiene verlassen. Obwohl der Schlitz des Injektionsseptums mit 10 mm (Höhe) mal 30 mm (Breite) deutlich mehr Platz lässt als das Extraktionsseptum, ist der Injektionspunkt eine Engstelle im Transferkanal, da der injizierte Elektronenstrahl möglichst nahe an der Septumschiene liegen sollte.

4.2.3 Umrechnungsformeln zwischen Setzwert und Theorie

In den theoretischen Berechnungen kommt es auf die Stärke der Fokussierung und auf den Ablenkwinkel an. Bei der Steuerung des Beschleunigers werden dagegen Stromwerte und Ladespannungen eingestellt. Die Umrechnung ist natürlich von den technischen Parametern der Magnete abhängig, die in den letzen Abschnitten beschrieben wurden.

In Tabelle 4.2 sind die Umrechnungsformeln zusammengestellt. Dabei wird der Ablenkwinkel α in Radiant angegeben, alle Ladespannungen U in Kilovolt, die Ströme I in Ampere und die Energie E in Giga-Elektronenvolt (GeV). Die Stärke der Fokussierung k wird in $1/m^2$ angegeben, jedoch ohne Berücksichtigung des Vorzeichens, d.h. es ist vom Anschluß des Magneten an das Netzgerät abhängig, ob ein horizontal fokussierender oder defokussierender Quadrupol der angegebenen Stärke vorliegt.

Die Werte für die Korrekturspulen konnten im Rahmen dieser Arbeit durch Messungen untermauert werden [19]. Bei den Korrekturmagneten `t2-hk1`, `t2-hk2` und `t2-vk1` handelt es sich um C-Magnete, während die Korrektoren `t2-vk2` und `t2-hk3` durch einen ehemaligen Quadrupolmagneten gebildet werden, der um 45° gedreht eingebaut wurde und dessen Spulen jeweils zu gegenüberliegenden Paaren verschaltet wurden.

Bei der Berechnung der Feldstärke in den Septummagneten muss die Energieaufnahme durch das Wirbelstromschild mit berücksichtigt werden. Es ist daher davon auszugehen,

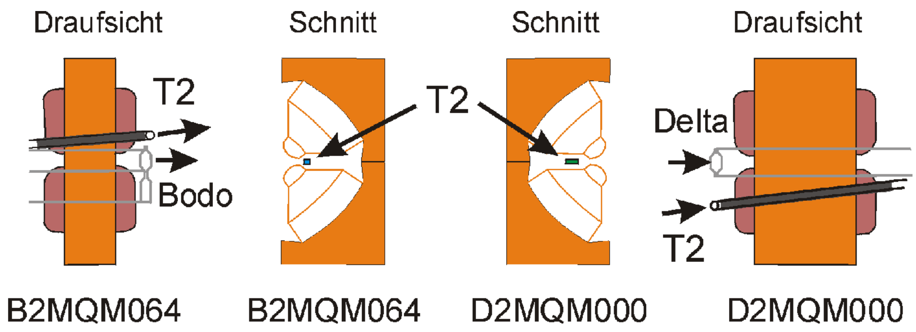


Abbildung 4.4: *Durchführung des Transferkanals durch je einen Quadrupolmagneten von Bodo (*`B2MQM064`*) und Delta (*`D2MQM000`*).*

dass die tatsächlich vorliegenden Felder kleiner sind als die aus der Ladespannung berechneten Felder [20].

4.2.4 Die Quadrupoldurchführungen

Ebenfalls aus Platzgründen wurde der T2 am Anfang und am Ende jeweils durch einen Quadrupol von Bodo bzw. Delta geführt. Die Passage erfolgt im nichtlinearen Feldbereich der Quadrupolmagnete `B2MQM064` und `D2MQM000` (siehe Abbildung 4.4). Die notwendige Abschirmung [16] wurde durch einen rechteckigen Eisenmantel mit 5 mm Wandstärke realisiert.

Für den Quadrupol in Delta wurde im Rahmen dieser Arbeit überprüft, ob diese Abschirmung ausreichend ist. Dazu wurde der injizierte Elektronenstrahl auf den Schirmmonitor (siehe Kapitel 4.3) im Injektionsseptum gelenkt. Dann wurde der Quadrupol durch Zusatzbestromungen von ± 2 A in seiner Stärke variiert (bei einer normalen Bestromung von 23,7 A).

Der Strahlfleck auf dem Schirmmonitor zeigte keine Bewegung oder Formänderungen. Damit kann festgestellt werden, dass die Abschirmung für Veränderungen während des Strahlbetriebs ausreichend ist. Dies schließt zum Beispiel Veränderungen des Quadrupolstroms im Rahmen von Arbeitspunktanpassungen ein.

Bei stark unterschiedlichen Einstellungen, wie dem Wechsel von Optik oder Energie in Delta, kann ein Einfluss jedoch nicht ausgeschlossen werden. Das kann bedeuten, dass Einstellungen für den Transferkanal nicht durch theoretische Anpassungen, z.B. Skalierung der Ansteuerungen bei Energieänderungen, ermittelt werden können.

4.3 Diagnose und Messmöglichkeiten im T2

Beim Abschluss dieser Arbeit befanden sich ein Strommonitor und mehrere Strahllage-Messplätze noch im Aufbau, so dass deren Messmöglichkeiten in dieser Arbeit nicht berücksichtigt werden konnten.

Im Transferkanal T2 gibt es zwei fahrbare Schirmmonitore und einen unbeweglich eingebauten Schirm im Injektionsseptum nach Delta. Die Schirmmonitore bestehen aus dem Fluoreszenzmaterial Chromox6, einer Al_2O_3 Keramik, die mit Chrom-Aktivatorzentren dotiert ist [21]. Durch auftreffende Elektronen wird das Material zur Fluoreszenz angeregt. Die Fluoreszenzerscheinungen leuchten mehrere Sekunden nach, so dass eine einfache Kamera ausreicht, um ein Bild des Strahlflecks zu erhalten. Leider verhindert die eintretende Sättigung eine Profilauswertung, so dass lediglich Aussagen zur relativen Position und generellen Strahlform möglich sind.

Die Chromox-Schirme `t2-chromox1` und `t2-chromox2` sind mit einem Koordinatenkreuz versehen, dessen Marken 5 mm Abstand haben. Eine quantitative Positionsangabe oder auch nur die quantitative Angabe einer Positionsänderung ist jedoch kaum möglich. Damit die Koordinatenkreuze sichtbar werden, müssen die Schirme durch Lampen beleuchtet werden, die sich ausserhalb der Vakuumkammer befinden. Da die Intensität der Fluoreszenz von der auftreffenden Ladungsmenge abhängt, sind kleine Strahlströme bei eingeschalteter Beleuchtung kaum zu erkennen. Durch Reflexionen der Beleuchtung können ausserdem Bereiche überbelichtet werden, so dass auch intensive Strahlbilder nicht erkannt werden.

Im Injektionsseptum von Delta ist auf der Innenseite ein Chromox-Schirm fest installiert. Man kann durch eine Erhöhung der Ladespannung des Septums den injizierten Strahl auf diesen Schirm lenken.

Alle Schirmmonitore im Transferkanal T2 sind strahlzerstörend, so dass eine gleichzeitige Beobachtung der Strahllage und der Transfereffizienz nicht möglich ist.

4.4 Zeitliche Abstimmung der gepulsten Magnete

Alle Ablenkmagnete im Transferkanal T2 werden mit einem Pulsstrom betrieben. Die Pulslängen variieren je nach Typ des Magneten.

Die längsten Pulse werden für die eigentlichen Ablenkmagnete im T2 benötigt. Die Netzgeräte liefern eine komplette Sinuswelle von 100 ms Dauer. Durch den Einsatz einer vollständigen Sinuswelle werden Hystereseeffekte vollständig unterdrückt, da sicher gestellt ist, dass die Magneterregungen immer vom gleichen Wert aus angefahren werden.

Die Septa (Bodo Extraktionsseptum und Delta Injektionsseptum) werden mit einer halben Sinuswelle von 88 μs und 83 μs erregt. Da die Durchflugzeit der Elektronen durch den Transferkanal nur 38 ns beträgt, sind diese Zeiten immer noch lang gegenüber möglichen Schwankungen des Transferzeitpunktes.

Die kürzesten Zeitstrukturen haben die Kickermagnete. Der Extraktionskicker von Bodo muss innerhalb eines Umlaufs der Elektronen in Bodo (168 ns) eine Ablage am Septum erzeugen, die den Elektronenstrahl aus Bodo heraus in den Septummagneten schiebt. Die drei Injektionskicker von Delta haben eine ähnliche Aufgabe, da sie den bereits gespeicherten Elektronenstrahl kurzzeitig so nah an die Septumschiene heranlegen, dass der injizierte Strahl innerhalb der Akzeptanz liegt. Bei Delta ist zusätzlich zur zeitlichen Abstimmung gegenüber dem injizierten Strahl auch die Abstimmung der drei Injektionskicker untereinander wichtig.

Die verschiedenen Zeiten der Pulse sind in der Tabelle 4.3 noch einmal als Übersicht aufgeführt.

Kontrollsystemname	Einbauname	Pulsdauer	Beschreibung
bo-exki	B2MKI113	ca. 350 ns	Bodo Extraktionskicker
bo-exsept	B2MSE069	88 μs	Bodo Extraktionsseptum
t2-b1	T2MDM012	0,1 s	„kurzer“ T2 Dipol
t2-b2	T2MDM039	0,1 s	„langer“ T2 Dipol
	T2MDM055		
	T2MDM084		
de-sept	D3MSE007	83 μs	Delta Injektionsseptum
de-ki1, de-ki2, de-ki3	D2MKI040	860 ns	Delta (Injektions-) Kicker
	D2MKI010		
	D3MKI041		

Tabelle 4.3: Pulsdauern der gepulsten Magnete, die für den Ladungstransfer durch den Transferkanal T2 relevant sind.

4.5 Die Messung der Transfereffizienz

Die Transfereffizienz, wie sie in Gleichung (3.13) definiert wurde, ist von vielen verschiedenen Parametern abhängig.

So werden die Ladungsmengen Q_{Bodo} und ΔQ_{Delta} bei DELTA durch Messungen der Strahlströme ermittelt. Da der Strahlstrom als Ladungsmenge pro Umlaufzeit definiert ist, müssen die Umlaufzeiten der Elektronen im jeweiligen Ring der Anlage berücksichtigt werden:

$$Q_{Bodo} = I_{Bodo} \cdot 168 \text{ ns}$$

und analog

$$Q_{Delta} = I_{Delta} \cdot 384 \text{ ns}.$$

Für die Transfereffizenz ergibt sich nach diesen Überlegungen:

$$G = \frac{I_{Delta}(nach\ Injektion) - I_{Delta}(vor\ Injektion)}{I_{Bodo}(vor\ Extraktion)} \cdot \frac{384 \text{ ns}}{168 \text{ ns}} \tag{4.1}$$

Da der injizierte Elektronenstrahl im Speicherring während der ersten Umläufe gedämpft wird und erst nach mehreren Umläufen die Elektronen, die außerhalb der Akzeptanz injiziert worden sind, verloren gehen, darf die Strommessung erst einige Zeit nach der Injektion erfolgen. Zur Abschätzung dieser Zeit kann der Arbeitspunkt herangezogen werden, wie in Kapitel 3.3 erläutert wurde. Eine grobe Grenze sind etwa 1000 Umläufe, was bei Delta einer Zeit von 384 μs entspricht.

Alternativ kann man auch von den Dämpfungszeiten ausgehen, die angeben, nach welcher Zeit ein neuinjizierter Strahl durch Abstrahlung von Synchrotronstrahlung auf die Strahlparameter des gespeicherten Strahls gedämpft wird. Die Dämpfungszeiten liegen bei einer Strahlenergie von 1,5 GeV bei 9 ms.

Desweiteren ist zu beachten, dass der Strahlstrom in Bodo am Anfang der Beschleunigungsrampe stark abnimmt. Die Messung des Strahlstroms sollte daher erst kurz vor der Extraktion erfolgen. Für verschiedene Endenergien in Delta sind verschiedene Beschleunigungsrampen für Bodo vorhanden, die vor allem in ihrem Extraktionszeitpunkt stark variieren. Es ist darauf zu achten, dass der gewählte Zeitpunkt vor der Extraktion auch beim frühesten Extraktionszeitpunkt noch deutlich nach der Injektion in den Beschleunigerring Bodo liegt.

In dieser Arbeit wird die Transfereffizienz in Prozent angegeben. Die Größen $I_{Delta}(\textit{vor Injektion})$ und $I_{Bodo}(\textit{vor Extraktion})$ werden gleichzeitig etwa 500 ms vor dem Ladungstransfer und $I_{Delta}(\textit{nach Injektion})$ etwa 500 ms nach dem Ladungstransfer gemessen. Diese Zeit ist zwar sehr groß im Vergleich zu der oben angegebenen Abschätzung, berücksichtigt jedoch Verschiebungen der Messung, die durch Verzögerungen im Kontrollsystem auftreten können.

Nimmt man eine exponentielle Abnahme des gespeicherten Strahlstroms an, so ergibt sich für die Stromabnahme ΔI nach einer Zeit Δt und mit einer Strahllebensdauer von τ

$$\Delta I = I_{vorher} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau}}\right) \tag{4.2}$$

wobei I_{vorher} der Strom vor der Abnahme ist. Bei einer Messzeit Δt von 1 s ergibt sich für einen Strahlstrom von 150 mA eine Stromabnahme von 0,042 mA bei einer Lebensdauer von einer Stunde (τ=3600 s).

Wie stark sich diese Stromabnahme durch die Lebensdauer auf die gemessene Transfereffizienz auswirkt, hängt vom Strahlstrom in Bodo ab. Abbildung 4.5 zeigt die effektive Transfereffizienz bei einem tatsächlichen Ladungstransfer von 100%. Die angenommenen Werte stellen zur Veranschaulichung der auftretenden Fehler in der Messung extreme Bedingungen dar, wie sie bei DELTA im Standardbetrieb nicht vorkommen.

Um den entstehenden Fehler zu berücksichtigen, müsste die Stromabnahme aus der Transfereffizienz herausgerechnet werden. Da die Lebensdauermessung jedoch über eine Strommessung mit einer Genauigkeit von ±0,005 mA erfolgt und die Strahllebensdauer in Delta normalerweise bei vier bis sechs Stunden bei 100 mA liegt, sind für genaue Lebensdauermessungen Messzeiten von 20 s oder länger erforderlich. Bei einer Injektionsdauer von 6,5 s ist dies zu lang, um jedesmal die Lebensdauer genau bestimmen zu können.

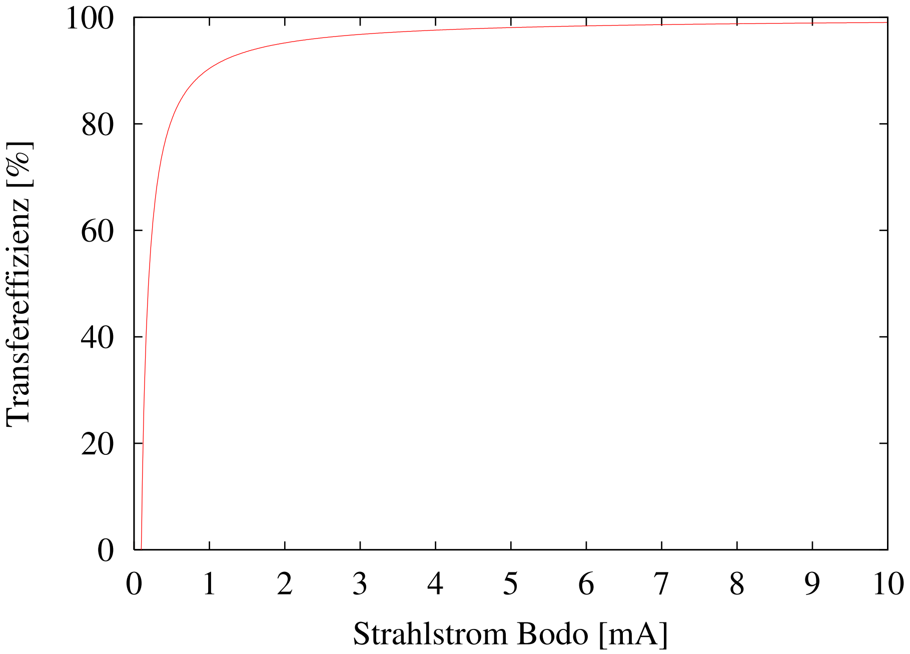


Abbildung 4.5: *Die effektive Transfereffizienz wird durch die Lebensdauer des Elektronenstrahls in Delta vermindert. Die Kurve zeigt die Effizienz unter der Voraussetzung einer tatsächlichen Transfereffizienz von 100% bei einer Stromabnahme in Delta von 0,042 mA/s, was einer Lebensdauer von einer Stunde bei 150 mA Strahlstrom in Delta entspricht.*

Eine Methode, um Fehler durch die endliche Strahllebensdauer zu minimieren ist, die Injektionen bei denen weniger als 1 mA Strahlstrom in Bodo gemessen wird, aus den Bewertungen herauszunehmen. Dies eliminiert auch sofort jene Injektionen, bei denen gar kein Strahlstrom in Bodo gemessen wurde, was z.B. am Beginn einer Injektionsphase geschehen kann, wenn zwar der Transferkanal bereits gepulst wird, aber noch keine Elektronen nach Bodo injiziert wurden.

Die gemessenen Transfereffizienzen in dieser Arbeit beziehen sich immer auf Strahlströme von mehr als 1 mA in Bodo (soweit nicht explizit anders angemerkt). Der Fehler durch die endliche Strahllebensdauer in Delta ist damit kleiner als 10% für Lebensdauern von mehr als einer Stunde bei Strahlströmen in Delta von weniger als 150 mA.

Kapitel 5

Theoretische Parameter des T2

In diesem Kapitel werden exemplarisch einige Parameter des Transferkanals T2 untersucht. Die Anforderungen an die Verfügbarkeit der Beschleunigeranlage DELTA erlauben allerdings keine vollständige Charakterisierung des Transferkanals, da die nötigen Messungen zu aufwendig sind.

5.1 Parameter von Bodo und Delta

Die Berechnungen zum Transferkanal T2 beginnen mit den Parametern des Strahls bei seiner Extraktion aus dem Beschleunigerring Bodo und müssen auf die Strahlparameter des Speicherrings bei der Injektion angepasst werden. Die Werte in den Tabellen 5.1 und 5.2 wurden bei den weiteren Rechnungen in dieser Arbeit als Schnittstellenparameter betrachtet. Die Werte stammen aus der Dissertation von B. Keil [22], von M. Grewe [23] und aus der Diplomarbeit von S. Strecker [24].

Außer den Schnittstellenparametern müssen in Bodo und Delta natürlich noch weitere Randbedingungen erfüllt sein, damit es einen erfolgreichen Ladungstransfer geben kann. In den folgenden Überlegungen wird nicht berücksichtigt, dass auch Einstellungen bei Delta und Bodo, wie z.B. die Einstellungen der Hochfrequenz und der Korrekturspulen, eine Rolle für die Transfereffizienz spielen können.

Es wird in dieser Arbeit davon ausgegangen, dass sowohl Bodo als auch Delta so eingestellt sind, dass optimale Bedingungen für die Akkumulation vorliegen. Die Messungen, die in diesem Kapitel diskutiert werden, zeigen jedoch zum Teil eine Abhängigkeit der maximal erreichbaren Transfereffizienz von der Schichtwoche in der die Messung durchgeführt wurde. Da die Parameter des Transferkanals soweit möglich kontrolliert wurden, liegt die Ursache vermutlich im Beschleungerring Bodo oder im Speicherring Delta.

5.2 Optikrechnungen zum Transferkanal T2

Den Optikrechnungen liegt die im Anhang A beschriebene Magnetstruktur (engl. *lattice*) zugrunde. Es sind allerdings für die nächste Zukunft Umbauten im Bereich der Korrekturspulen geplant.

Parameter	Wert
s-Koordinate	$s_{Bodo} = 17{,}89$ m
	$s_{T2} = 0{,}0$ m
Emittanz	$\varepsilon = 95$ nm rad
Betafunktionen	$\beta_x = 4{,}39$ m
	$\alpha_x = -1{,}86$
	$\beta_z = 4{,}18$ m
	$\alpha_z = 1{,}75$
Dispersion	$D_x = 0{,}81$ m

Tabelle 5.1: Optische Parameter von Bodo bei der Extraktion.

Parameter	Wert
s-Koordinate	$s_{Delta} = 59{,}04$ m
	$s_{T2} = 11{,}33$ m
Emittanz	$\varepsilon = 28$ nm rad
Betafunktionen	$\beta_x = 1{,}60$ m
	$\alpha_x = 1{,}21$
	$\beta_z = 4{,}40$ m
	$\alpha_z = -2{,}47$
Dispersion	$D_x = 0{,}52$ m

Tabelle 5.2: Optische Parameter von Delta bei der Injektion.

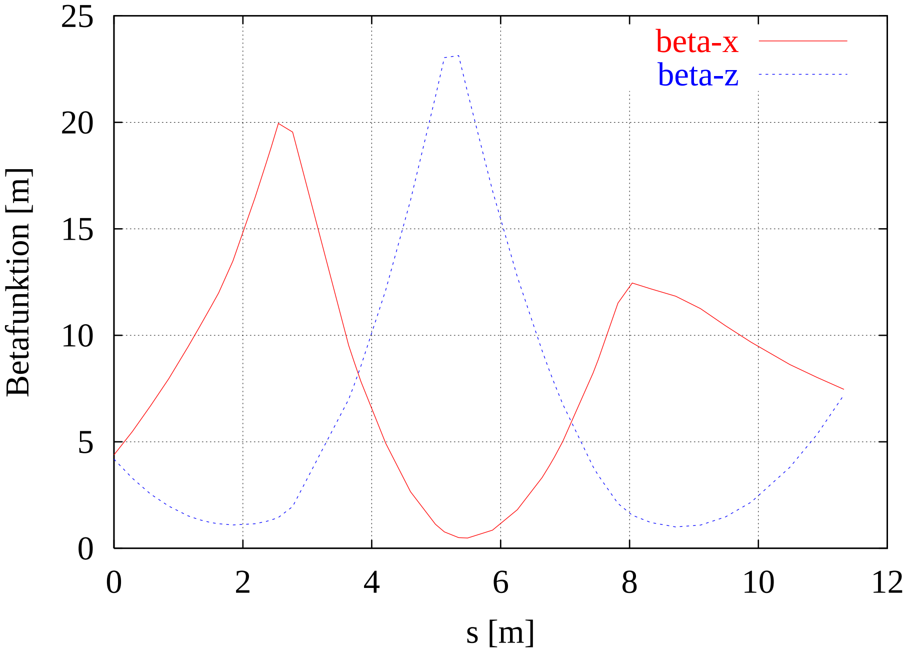


Abbildung 5.1: *Theoretische Betafunktionen des Transferkanals T2.*

Wie in Kapitel 3.3.1 beschrieben wurde, gibt es drei Größen, von denen eine optimale Injektion abhängt: die Strahlbreite, den Winkel zwischen injiziertem und gespeichertem Strahl und die Form der Phasenellipse (Drehwinkel und Lage der Extrema).

Dabei wird die Größe des Strahls in transversaler Richtung von der Akzeptanz bestimmt (siehe Kapitel 3.2.3 zur Definition der Akzeptanz). Die Abmessungen der Vakuumkammer sind im Extraktionsseptum am kleinsten, so dass es dort zu einem Engpass kommen kann. Wie in [25] berechnet, können etwa $2{,}7\sigma_x$ durch das Extraktionsseptum von Bodo in den Transferkanal gelangen. Dies berücksichtigt jedoch nicht, dass es bei der Injektion sinnvoll ist, den injizierten Strahl so nah wie möglich an die Septumschiene zu legen und damit möglichst weit in die Vakuumkammer des Speicherrings hinein.

Dementsprechend ist das Delta-Injektionsseptum die mechanisch engste Stelle und der transferierte Strahlanteil liegt vermutlich unter $2{,}7\sigma_x$. Eine genaue Bestimmung des transferierten Strahlanteils scheitert an der unbekannten horizontalen Lage des injizierten Strahls im Septummagneten (siehe auch Kapitel 5.5).

Der Winkel, unter dem die Elektronen aus dem Transferkanal in den Speicherring eintreten, hängt in erster Linie vom Injektionsseptum ab. Die Stärke des Magnetfeldes im Septumschlitz und der mechanische Winkel, mit dem der Septummagnet eingebaut ist, wirken dabei zusammen. Allerdings spielt auch der Eintrittswinkel des zu injizierenden Elektronenstrahls in das Septum eine Rolle. Dabei sind die im nächsten Absatz beschriebenen Feldfehler und Fehlaufstellungen von entscheidender Bedeutung. Messungen mit verschiedenen Feldstärken im Septum werden in Kapitel 5.5 vorgestellt.

Die Form und Lage der Phasenraumellipse hängen von drei optischen Parametern ab (siehe Kapitel 3.2.3): der Betafunktion β, ihrer Ableitung $\alpha = -\beta'/2$ und der Emittanz ε. Im Gegensatz zu Ringbeschleunigern wird die Betafunktion nicht durch eine periodische Lösung bestimmt, die von jedem Element im Ring abhängt. In einem Transferkanal wirken nur die optischen Elemente vor der betrachteten Position auf die Betafunktion. Am Ende des Transferkanals sind das natürlich alle Elemente und die Randbedingungen aus dem Beschleuniger Bodo. Aus Bodo stammt auch die Emittanz des Elektronenstrahls (siehe auch Fußnote auf Seite 24).

Der Verlauf der Betafunktionen in x- und z-Ebene ist in Abbildung 5.1 dargestellt. Dieser Berechnung liegt die Standardeinstellung der Quadrupole für den Transferkanal T2 zugrunde:

$$\begin{array}{ll} \text{t2-q1} & k = 0{,}410\ \text{m}^{-2} \\ \text{t2-q2} & k = -2{,}702\ \text{m}^{-2} \\ \text{t2-q3} & k = 2{,}529\ \text{m}^{-2} \\ \text{t2-q4} & k = -1{,}964\ \text{m}^{-2} \end{array}$$

($k < 0$ horizontal fokussierender Quadrupol)

Diese Standardeinstellungen wurden aus einer theoretisch optimierten Optik von B. Keil [25] entwickelt. Änderungen wurden im Laufe von Monaten durch Operateure zur Optimierung der Transfereffizienz vorgenommen und schließlich in den derzeitigen Standard-Satz von Sollwerten übernommen.

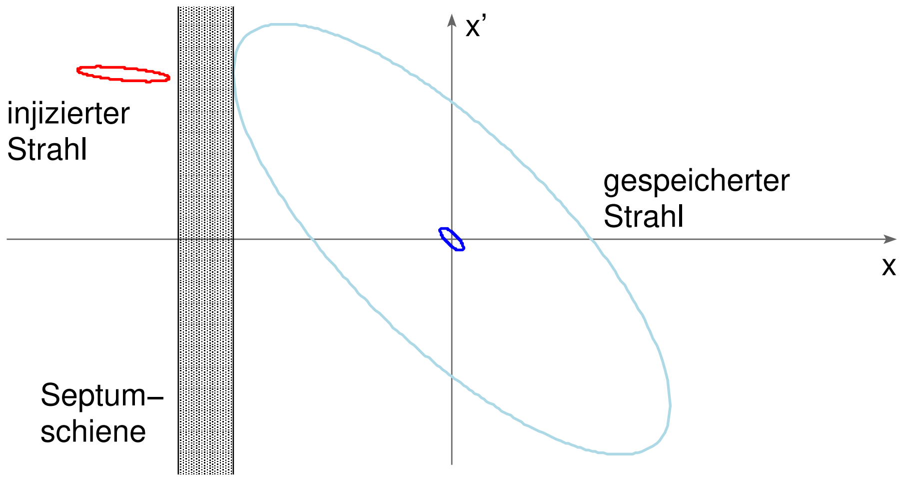


Abbildung 5.2: *Die Größenverhältnisse und Orientierungen der Phasenraumellipsen bei der Injektion mit willkürlich gewählten Ablagen für den gespeicherten und den injizierten Strahl. Blau der gespeicherte Strahl, hellblau die Akzeptanzellipse (nach [26]) und rot der injizierte Strahl. Die Septumschiene hat eine Breite von 1 mm.*

Daraus ergeben sich die folgenden empirisch emittelten optischen Parameter am Injektionspunkt (s_{T2}=11,33 m):

$$\begin{aligned} \beta_x &= \ \ 7{,}46 \text{ m} \\ \alpha_x &= \ \ 0{,}65 \\ \beta_z &= \ \ 7{,}20 \text{ m} \\ \alpha_z &= -2{,}42 \\ D_x &= \ \ 1{,}12 \text{ m} \end{aligned}$$

Aufgrund der in Kapitel 3.3.1 dargestellten Überlegungen entsprechen die Werte nicht den Parametern des Speicherrings am Injektionspunkt.

Die horizontale Phasenellipse bei der Injektion ist in Abbildung 5.2 dargestellt. Die Ablage des injizierten Strahls ist willkürlich gewählt. Die Abbildung soll die Formen der Phasenellipsen und die Größenverhältnisse zur Septumschiene[1] darstellen.

Die Abbildung zeigt, dass die Akzeptanzellipse des gespeicherten Strahls groß genug ist, um den injizierten Strahl zu umschließen. Die Phasenellipse des injizierten Strahls liegt sehr flach und damit eigentlich ungünstig. Dass die Einstellungen auf empirischen Optimierungen beruhen, bedeutet, dass kleine Veränderungen in den Parametern zu schlechteren Transfereffizienzen führen. Dieses Verhalten ist aus der Abbildung nur bei großen Verschiebungen des injizierten Strahls zu erklären. Drehungen der Phasenellipse sollten die Transfereffizienz sogar noch verbessern, oder zumindest den optimalen Parameterbereich vergrößern. Dass dies nicht der Fall ist, lässt darauf schließen, dass es Einflüsse gibt, die in den theoretischen Betrachtungen nicht berücksichtigt sind.

In den nächsten Abschnitten werden verschiedene Faktoren untersucht, die einen Einfluss auf die Transfereffizienz haben.

[1]Die Septumschiene hat im Bereich der Injektion eine Dicke von 1 mm.

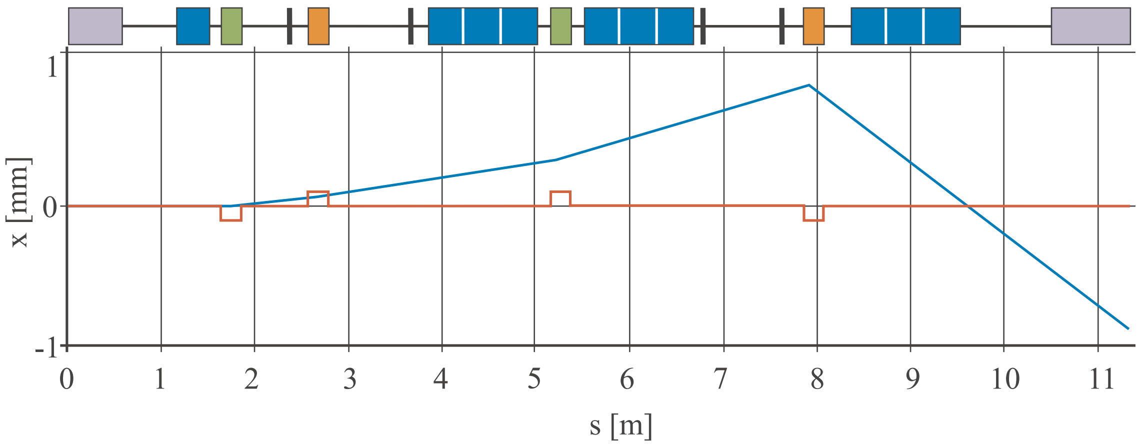


Abbildung 5.3: *Verschiebung des Orbits in horizontaler Richtung bei einer Fehlaufstellung der Quadrupolmagnete um $-0,1$ mm (t2-q1), $+0,1$ mm (t2-q2), $+0,1$ mm (t2-q3) und $-0,1$ mm (t2-q4).*

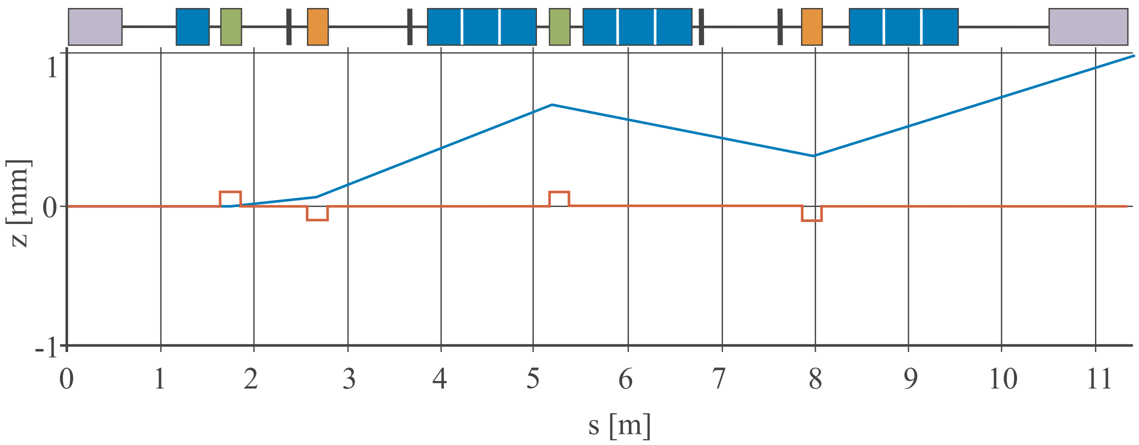


Abbildung 5.4: *Verschiebung des Orbits in vertikaler Richtung bei einer Fehlaufstellung der Quadrupolmagnete um $+0,1$ mm (t2-q1), $-0,1$ mm (t2-q2), $+0,1$ mm (t2-q3) und $-0,1$ mm (t2-q4).*

5.3 Fehlaufstellung und Feldfehler

Die Positionen der Magnete im Transferkanal T2 sind nur unzureichend bekannt, daher sind Fehlaufstellungen nicht auszuschließen. Eine Vermessung der Magnetpositionen ist jedoch mit einem nicht unerheblichen Aufwand verbunden, der den Betrieb der Beschleunigeranlage für einige Zeit völlig verhindern würde.

Eine longitudinale Fehlaufstellung der Quadrupolmagnete spielt so gut wie keine Rolle gegenüber einer transversalen Verschiebung, die im folgenden untersucht wird.

Um die Größe möglicher Fehler abzuschätzen, wurden Fehlaufstellungen mit dem `Optics` Programm [8] simuliert. Zunächst wurde jeder Quadrupolmagnet einzeln um $+0,1$ mm verschoben und die daraus resultierenden Orbitverschiebungen beobachtet, anschließend wurde eine Kombination aus Positionsabweichungen von $\pm 0,1$ mm gesucht, die einen maximalen Fehler am Ende des Transferkanals erzeugt. Die Resultate aus dieser Maximierung sind in den Abbildungen 5.3 und 5.4 dargestellt. Für diese Orbitverschiebungen wurden

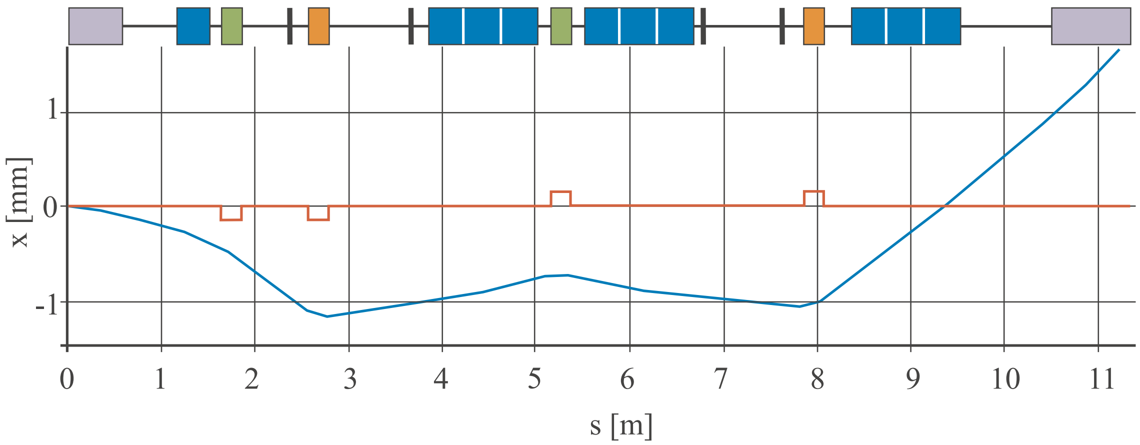


Abbildung 5.5: *Verschiebung des Orbits in horizontaler Richtung bei einer Fehlaufstellung der Quadrupolmagnete um -0,1 mm (t2-q1), -0,1 mm (t2-q2), +0,1 mm (t2-q3) sowie +0,1 mm (t2-q4) und angenommenen Feldfehlern von +0,50% (bo-exsept), +0,50% (t2-b1), +0,04% (t2-b2) sowie +1,00% (de-sept).*

folgende Positionsfehler angenommen:

Quadrupolmagnet	Δx [mm]	Δz [mm]
t2-q1	$-0{,}1$	$+0{,}1$
t2-q2	$+0{,}1$	$-0{,}1$
t2-q3	$+0{,}1$	$+0{,}1$
t2-q4	$-0{,}1$	$-0{,}1$

Da für die Strahlführungsmagnete des Transferkanals T2 keine Feldvermessungen vorliegen, kann es hier fertigungsbedingte Abweichungen zwischen der Theorierechnung und den realen Magneten geben. Für die Abschätzung des Effektes von Feldfehlern spielen vor allem die Dipolmagnete eine Rolle, da hier besonders hohe Felder (im Vergleich zu den Quadrupolmagneten) erreicht werden.

Die Größe der Feldfehler wurde über übliche Variationen der Sollwerte bestimmt, mit denen ein erfahrener Operateur die Transfereffizienz optimiert. Durch die folgenden Abweichungen wurde im Ergebnis eine horizontale Ablage von +1,31 mm am Ende des Transferkanals hervorgerufen:

Dipolmagnet	$\Delta B/B$
bo-exsept	+0,50%
t2-b1	+0,50%
t2-b2	+0,04%
de-sept	+1,00%

Dabei ist zu beachten, dass der `t2-b2` Dipolmagnet aus drei separaten Teilen besteht, sich der angegebene Fehler also dreimal auswirkt.

Kommen zu diesen Feldfehlern ungünstige Fehlaufstellungen der Quadrupolmagnete hinzu, so kann der Strahl am Ende des Transferkanals bis zu 1,8 mm Ablage zu seinem Sollorbit haben. In Abbildung 5.5 ist der Orbitverlauf für eine derart ungünstige Konstellation dargestellt, wobei die Quadrupolfehlaufstellungen wieder im Bereich von ±0,1 mm liegen.

Fehlaufstellungen der Quadrupole von nur ±0,1 mm sind eine optimistische Annahme für den Transferkanal. Da Abweichungen von 1 mm zum Sollorbit am Ende des Transferkanals schon deutliche Unterschiede in der Transfereffizienz bedeuten können, wäre es erstrebenswert, die Feldfehler und Fehlaufstellungen zu messen. Ohne diese Messungen ist eine gesicherte Aussage über die Lage des injizierten Elektronenstrahls auf der Basis eines theoretischen Modells nicht möglich.

5.4 Die Ablenkfreiheit der Quadrupolmagnete

Durch die geometrischen Randbedingungen sind die Winkel festgelegt, die durch die Dipolmagnete erzeugt werden müssen. Damit stehen nur die Quadrupolmagnete als einstellbare Parameter für verschiedene Optiken zur Verfügung.

Damit die Quadrupolmagnete nicht zusätzlich zu ihrer Fokussierung noch eine Ablenkung erzeugen, muss der Elektronenstrahl durch die Mitte des Magneten geführt werden. An einer realen Maschine sind dazu in der Regel Korrekturen nötig, die mit Hilfe der Korrekturmagnete durchgeführt werden. Dies ist vor allem deshalb sinnvoll, weil eine Änderung der Fokussierung die Phasenellipse nur drehen soll, eine Ablenkung jedoch zusätzlich eine Positionsänderung des Strahlschwerpunktes nach sich zieht.

Im Transferkanal T2 stehen dafür bei jedem Quadrupolmagneten andere Möglichkeiten zur Verfügung:

- `t2-q1`: Die horizontale Lage kann mit dem Extraktionskicker von Bodo `bo-exki`, dem Extraktionsseptum `bo-exsept` oder dem Dipolmagneten `t2-b1` korrigiert werden. Die vertikale Lage kann nur über eine Änderung der Strahllage im Beschleunigerring Bodo variiert werden.

- `t2-q2`: Für eine horizontale Lagekorrektur stehen die selben Magnete zur Verfügung wie für den Quadrupolmagneten `t2-q1`, während die vertikale Strahllage auch mit dem Korrekturmagneten `t2-vk1` variiert werden kann.

- `t2-q3`: Dieser Quadrupolmagnet befindet sich zwischen zwei Teilen des „langen“ Dipolmagneten `t2-b2`, der daher zur horizontalen Strahlverschiebung genutzt werden kann. Zusätzlich kann für die horizontale Lage auch der Korrekturmagnet `t2-hk1` eingesetzt werden. Eine Variation der vertikalen Strahllage ist weiterhin nur mit dem Korrekturmagneten `t2-vk1` möglich.

- `t2-q4`: Neben dem „langen“ Dipolmagneten `t2-b2` stehen für diesen Quadrupolmagneten die Korrekturspulen `t2-hk2` und `t2-hk3` für die horizontale Korrektur zur Verfügung. In vertikaler Richtung läßt sich die Strahllage mit der Korrekturspule `t2-vk2` variieren.

Änderungen in der Strahllage können derzeit nur optisch mit Hilfe der Chromox-Schirme detektiert werden.

Es wurde im Rahmen dieser Arbeit verifiziert, dass im derzeitigen Standardbetrieb lediglich der erste Quadrupolmagnet ablenkfrei ist. Bei diesem Magneten ist die Lage des Elektronenstrahls stark von der Lage in Bodo während der Extraktion abhängig. Da der schmale Septumschlitz nur einen kleinen Spielraum bietet, kann durch Variation der Septumstärke auch kaum eine Lageänderung erzielt werden. Die Lagen in den anderen drei Quadrupolmagneten sind jedoch von den Einstellungen der beiden Dipolmagnete abhängig, deren Ablenkwinkel aus der Ladespannung berechnet werden kann. Die Rechnung beruht ausschließlich auf der Magnetkonstruktion, so dass Ungenauigkeiten aufgrund der Fertigung nicht berücksichtigt werden. Hinzu kommen die möglichen Fehler in der Positionierung der Quadrupolmagnete, die im letzten Abschnitt untersucht wurden.

Für den letzen Quadrupol im Transferkanal (`t2-q4`) wurden im Rahmen dieser Arbeit zwei verschiedene Methoden erprobt, mit denen sich eine ablenkfreie Einstellung finden lassen sollte:

1. Die Ablenkfreiheit wurde durch den „langen" Dipolmagneten `t2-b2` herbeigeführt.
2. Die Strahllage wurde ausschließlich mit Korrekturmagneten verändert.

Im Prinzip ist die zweite Methode vorzuziehen, da durch die Änderung des Dipolmagneten auch der dritte Quadrupol betroffen ist, der zwischen dem ersten und dem zweiten Teilstück des Dipolmagneten positioniert ist. Allerdings kann mit der zweiten Methode keine völlige Ablenkfreiheit erreicht werden, da die maximale Feldstärke der Korrekturmagnete nicht ausreicht.

Zunächst sollte festgestellt werden, in welche Richtung die Strahlposition verändert werden muss. Dazu ist ein Schirmmonitor hinter dem Quadrupolmagneten nötig. Im Falle des `t2-q4` wurde der Schirmmonitor im Septummagneten von Delta genutzt. Die Bewegungsrichtung des Strahlflecks auf dem Schirm beim Erhöhen oder Erniedrigen des Spulenstroms gibt dann Aufschluss über die Fehlpositionierung. Bewegt sich der Strahlfleck nicht oder kaum, so liegt der Elektronenstrahl im Zentrum des Quadrupolmagneten, der Magnet ist also ablenkfrei.

Die Ablenkfreiheit kann auch über eine Messung der Transfereffizienz in Abhängigkeit vom Spulenstrom abgeschätzt werden. Wenn der Magnet nicht ablenkfrei ist, so wird zusätzlich zu einer Fokussierungsänderung die Strahllage im Injektionsseptum verschoben. Dies führt dazu, dass sich der Schwerpunkt der Phasenellipse bei der Injektion verschiebt. Eine reine Fokussierungsänderung würde dagegen nur die Ellipsenform verändern. Wenn die Phasenellipse bereits teilweise innerhalb der Akzeptanz des Speicherringes lag, also eine positive Transfereffizienz gemessen wurde, erzeugt eine leichte Drehung der Ellipse kaum Änderungen für die Transfereffizienz. Kommen aber Verschiebungen hinzu, so können schon kleine Änderungen dazu führen, dass keine Akkumulation mehr möglich ist. In einem Diagramm in dem die Transfereffizienz gegen den Spulenstrom aufgetragen ist, ist also die Breite der Kurve ein Maß dafür, wie ablenkfrei der Quadrupolmagnet ist.

Abbildung 5.6 zeigt eine Messung, die ohne Korrektur der Strahllage durchgeführt wurde. Die Breite der Kurve liegt bei etwa 1 A und durch Beobachtung des Strahlbildes wurde verifiziert, dass der Magnet nicht ablenkfrei ist.

Um die Bewegungsrichtung des Strahlbildes auf einem Schirmmonitor zu verifizieren, sollten die Spulenströme einer horizontalen und einer vertikalen Korrekturspule variiert werden. Eine horizontale Korrekturspule bewegt den Elektronenstrahl nach außen (positive x-Achse), wenn sie positiv bestromt wird; eine vertikale Korrekturspule bewegt den Strahlfleck bei positiver Bestromung nach oben[2]. Diese Vergleichsmessung ist nötig, um Fehler

[2]Dies gilt nur unter der Bedingung, dass sich zwischen der Korrekturspule und dem Schirmmonitor kein Quadrupolmagnet befindet.

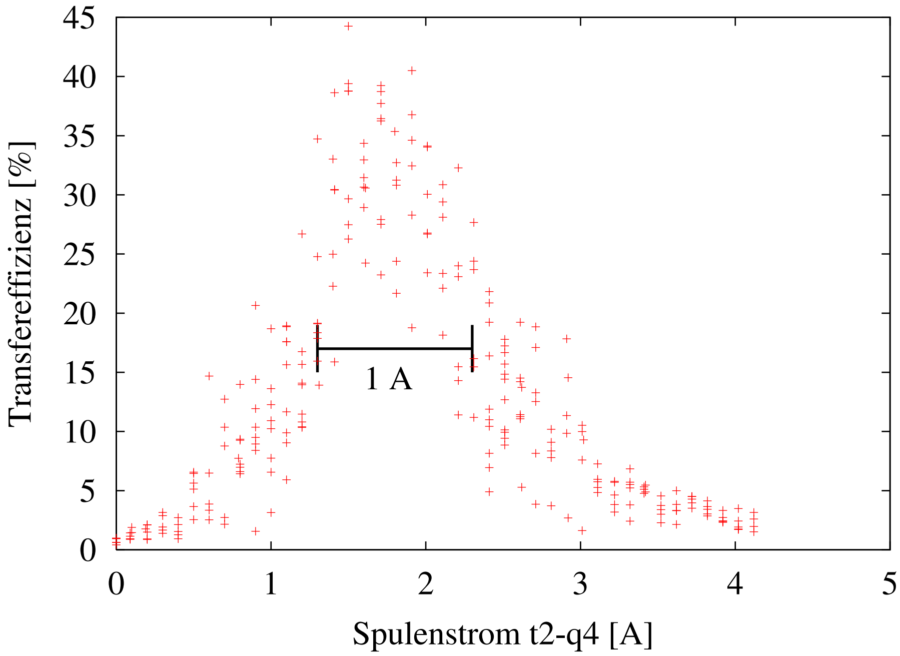


Abbildung 5.6: *Transfereffizienz aufgetragen gegen den Spulenstrom des vierten Quadrupolmagneten im Transferkanal T2. Die Messung wurde vor den Versuchen zur Ablenkfreiheit durchgeführt. Die Breite der Kurve von etwa 1 A lässt darauf schließen, dass sich mit dem Spulenstrom nicht nur die Fokussierung ändert.*

durch die Kamerapositionierung am Schirmmonitor auszuschließen. Außerdem kann durch die beobachtete Positionsänderung später abgeschätzt werden, in welcher Größenordung die Spulenströme der Korrekturspulen verändert werden müssen.

Die folgende Tabelle fasst die Bewegungsrichtungen des Strahlflecks zusammen, unter den Annahmen, dass

1. der Spulenstrom des Quadrupolmagneten erhöht wurde und
2. sich kein anderer Quadrupolmagnet zwischen dem Schirmmonitor und dem vermessenen Magneten befindet.

In der Regel liegt der Elektronenstrahl nicht unbedingt nur in einer Ebene außerhalb des Quadrupolzentrums, was zur Folge hat, dass sich der Strahlfleck diagonal bewegt.

Quadrupolmagnet	Bewegungsrichtung	Strahllage
horizontal fokussierend	nach innen	zu weit außen
	nach außen	zu weit innen
	nach oben	zu hoch
	nach unten	zu tief
vertikal fokussierend	nach außen	zu weit außen
	nach innen	zu weit innen
	nach unten	zu hoch
	nach oben	zu tief

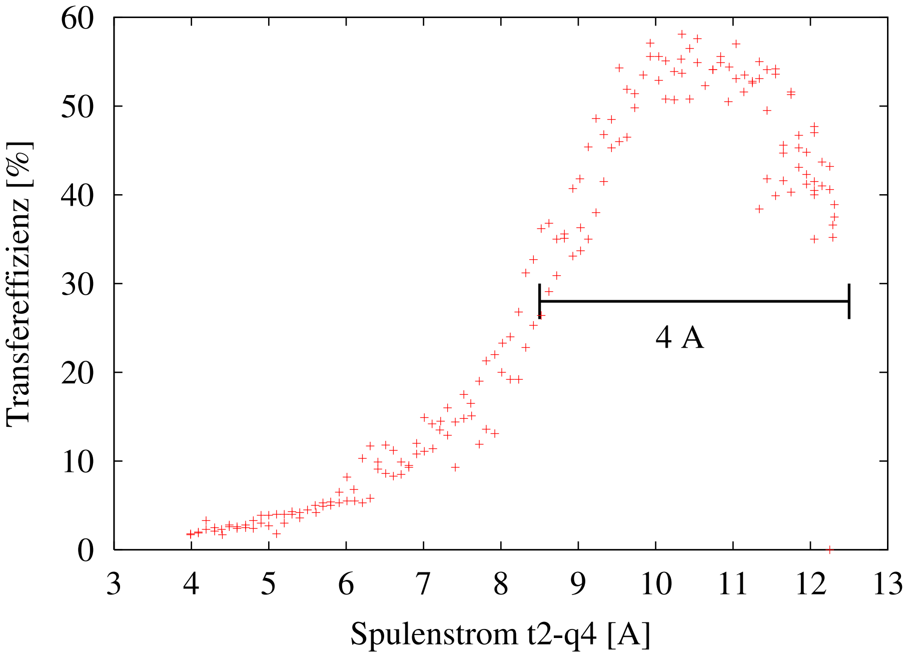


Abbildung 5.7: *Transfereffizienz aufgetragen gegen den Spulenstrom des vierten Quadrupolmagneten im Transferkanal T2, nachdem die Ablenkfreiheit des Magneten durch Veränderungen des Dipolmagneten t2-b2 hergestellt wurde. Die Breite der Kurve lässt auf eine weitgehende Ablenkfreiheit schließen.*

Vertikale Fehlpositionierungen lassen sich im Transferkanal T2 nur durch vertikale Korrekturspulen korrigieren. Alle anderen Elemente wirken in vertikaler Richtung höchstens fokussierend oder defokussierend, haben aber keinen Einfluss auf die Strahllage[3]. Da es derzeit nur zwei vertikale Korrekturspulen im T2 gibt, kann dies dazu führen, dass die Lage nicht in allen Quadrupolen vollständig korrigiert werden kann. In diesem Fall wäre die Verschiebung der Quadrupolmagnete notwendig.

Für die Messung im Rahmen dieser Arbeit ergab sich, dass der Elektronenstrahl im Quadrupolmagneten `t2-q4` etwas zu tief und zu weit innen lag. Das Bild des Strahls wurde für die Messung auf dem Schirmmonitor im Injektionsseptum beobachtet. Die vertikale Fehlpositionierung konnte durch die Korrekturspule t2-vk2 behoben werden.

Abbildung 5.7 zeigt die Transfereffizienz gegen den Spulenstrom, nachdem die Strahllage durch den Dipolmagneten `t2-b2` korrigiert wurde. Die Ladespannung musste um 0,006 kV reduziert werden, was nach der Tabelle in Kapitel 4.2.3 einem Ablenkwinkel von 0,04° entspricht. Um die Strahlposition für die Injektion konstant zu halten, wurde der Spulenstrom der Korrekturspule `t2-hk3` um -6 A verändert. Die Korrekturspule befindet sich unmittelbar vor dem Quadrupolmagneten, so dass es innerhalb des Magneten noch nicht zu einer signifikanten Lageänderung kommt. Anschließend wurde die Ladespannung des Septums `de-sept` variiert, um die Transfereffizienz zu optimieren.

Beobachtungen des Strahlbildes zeigten eine weitgehende Ablenkfreiheit, was durch die

[3]Vertikale Ablagen des Elektronenstrahls innerhalb der Quadrupolmagnete führen natürlich auch zu vertikalen Strahllageänderungen. Es ist aber nicht empfehlenswert, die vertikale Fehlpositionierung innerhalb eines Quadrupolmagneten durch eine gezielte vertikale Verschiebung in einem anderen Quadrupolmagneten zu „korrigieren“.

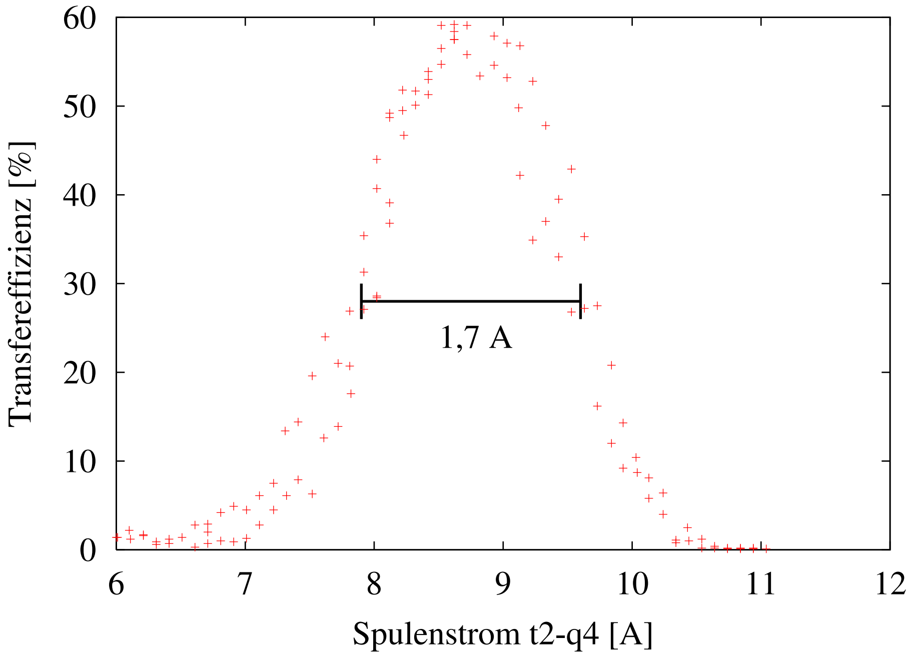


Abbildung 5.8: *Transfereffizienz aufgetragen gegen den Spulenstrom des vierten Quadrupolmagneten im T2, nachdem mit Hilfe der Korrekturspulen die Strahllage im Quadrupolmagneten korrigiert wurde. Die Breite der Kurve von etwa 1,7 A lässt im Vergleich mit den anderen Messungen (siehe Abbildung 5.7) darauf schließen, dass die Ablenkfreiheit nicht vollständig erreicht wurde.*

Kurvenbreite in Abbildung 5.7 bestätigt wird. Die Messung konnte für größere Spulenströme nicht fortgesetzt werden, da der Quadrupolmagnet und sein Netzgerät nur bis nominell 11 A ausgelegt sind. Die Messwerte oberhalb dieses Wertes sind dementsprechend bereits mit Vorsicht zu bewerten, da die Steuerung des Netzgerätes möglicherweise die eingestellten Sollwerte nicht mehr realisieren konnte.

Die zweite Korrektur der Strahllage (ausschließlich mit Hilfe der Korrekturmagnete) erfolgte aufgrund der gleichen Ausgangssituation wie die Korrektur mit dem Dipolmagneten. Mit dem Korrektor `t2-hk2` wurde eine Ablenkung nach außen erzeugt, und jeweils die Wirkung mit dem Schirmmonitor überprüft. Beim maximalen Spulenstrom des Korrektormagneten von 10 A, was einem Ablenkwinkel von 0,15° entspricht, war noch keine vollständige Ablenkfreiheit gegeben. Dies lässt sich auch an der Kurvenbreite in Abbildung 5.8 feststellen, die mit etwa 1,7 A deutlich schmaler ist, als die Kurve in Abbildung 5.7 mit 4 A.

Auch wenn die Erzielung der Ablenkfreiheit mit Hilfe der Korrekturspulen die bessere Methode ist, weil nur ein Quadrupol betroffen wäre, führt sie nicht zum gewünschten Ergebnis. Die Ablenkung muss in diesem Fall wesentlich stärker sein, da sie erst kurz vor dem Quadrupolmagneten erzeugt wird und daher stoßen die Korrekturmagnete an ihre technischen Grenzen.

Um nach der Optimierung erfolgreich injizieren zu können, ist es ratsam, die Position des Elektronenstrahls auf dem Schirmmonitor im Injektionsseptum zu beobachten[4], um immer wieder auf die Ausgangsposition korrigieren zu können. Die Korrektur sollte möglichst

[4]Der Strahlfleck muss bei einer Strahlenergie von 1,5 GeV durch eine Erhöhung der Ladespannung des Septummagneten um etwa 200 V auf den Schirm geschoben werden.

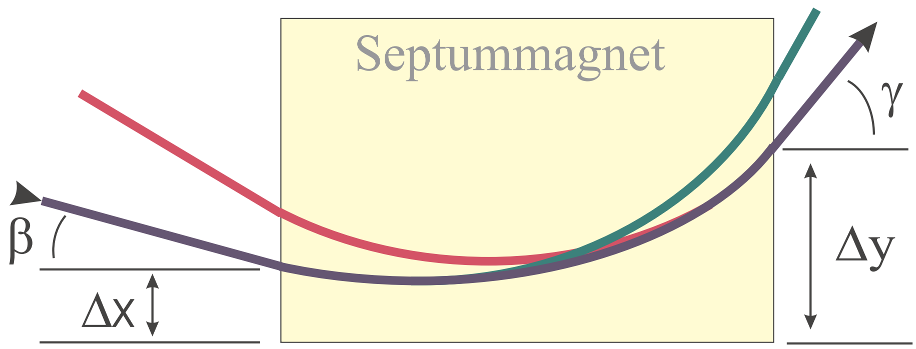


Abbildung 5.9: *Die dunkelblaue Kurve veranschaulicht die Referenzbahn der Elektronen im Septummagneten. Wenn die Stärke des Septummagneten erhöht wird, ändert sich entweder (bei konstantem Austrittswinkel) der Eintrittswinkel β (rote Kurve) oder (bei konstantem Eintrittswinkel) der Austrittswinkel γ (grüne Kurve). Gleichzeitig mit dem Winkel ändert sich auch die entsprechende Ablage Δx bzw. Δy.*

mit Korrekturmagneten erfolgen, die in Strahlrichtung weiter am Ende des T2 liegen, als der korrigierte Quadrupolmagnet. Dies schließt zwar eine Winkeländerung des injizierten Strahls im Injektionssepum nicht aus, ist jedoch wenigstens ein Anhaltspunkt. Der Winkel kann dann über Variationen der Ladespannung des Septummagneten korrigiert werden, was im nächsten Abschnitt näher untersucht wird.

5.5 Das Injektionsseptum von Delta

Das Injektionsseptum von Delta beeinflusst die Transfereffizienz in mehreren Punkten: Zum einen hängt die Strahllage des injizierten Strahls in Winkel und Ablage von der Stärke des Septummagnetfeldes ab, zum anderen wird das Septum zur engsten Stelle des Transferkanals, wenn der injizierte Strahl so dicht wie möglich an die Septumschiene gelegt wird. Dies ist sinnvoll, um den injizierten Strahl möglichst vollständig in die Akzeptanzellipse des Speicherrings zu legen.

Der optimale Injektionswinkel hängt von der Strahllage im Speicherring, bzw. von der Position und dem Drehwinkel des Teils der Akzeptanzellipse ab, die in den Septumschlitz hineinragt (wie in Kapitel 3.3 beschrieben). Da eine Veränderung der Septumstärke immer auch eine Lageänderung des injizierten Strahls bedeutet, ist eine isolierte Änderung des Winkels jedoch unmöglich.

Da die Lage des Elektronenstrahls vor dem Septummagneten nicht bekannt ist, kann keine Aussage darüber gemacht werden, wie der Strahl den Septumschlitz verlässt. Wie aus Abbildung 5.9 zu ersehen ist, führt die Veränderung der Septumstärke zu einem geänderten Austrittswinkel, wenn der Transferkanal vor dem Septum nicht verändert wird. Auf der anderen Seite muss die Stärke des Septummagneten angepasst werden, um bei einem veränderten T2 die gleiche Lage auf der Austrittsseite des Septums zu erzielen.

Abbildung 5.10 zeigt eine Messung der Transfereffizienz in Abhängigkeit von der Stärke (Ladespannung) des Septummagneten. Die Transfereffizienz nimmt abseits eines Optimums schnell ab, was nichts anderes bedeutet, als dass die Lage der Phasenellipse des injizierten Strahls so stark verändert wird, dass sie aus der Akzeptanzellipse des Speicherrings heraus geschoben wird. Der Ablenkwinkel, der sich aus dieser Ladespannung nach den Formeln

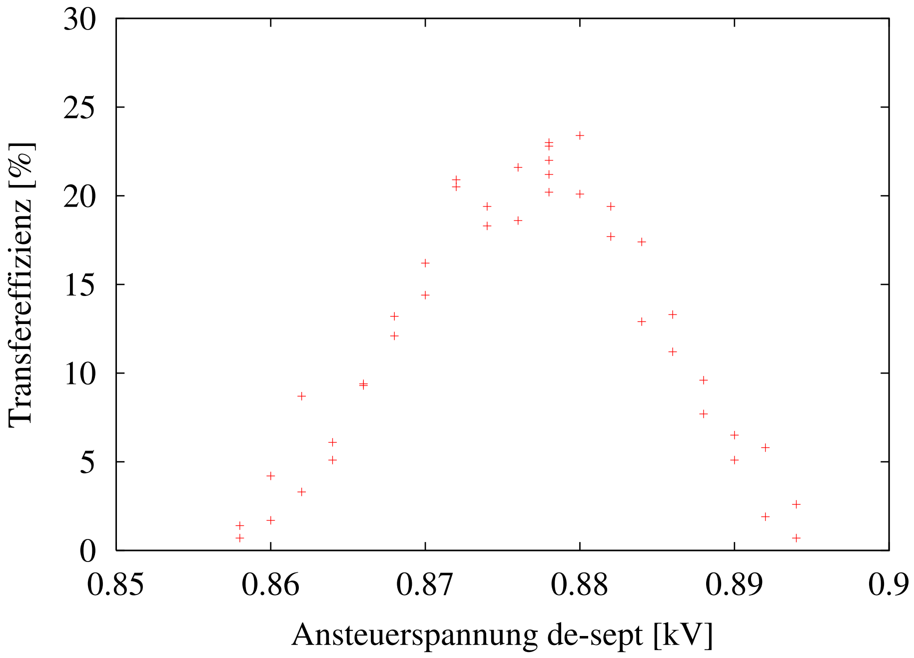


Abbildung 5.10: *Die gemessene Transfereffizienz in Abhängigkeit von der Ladespannung des Delta Injektionsseptums für die Standardeinstellung des Transferkanal T2.*

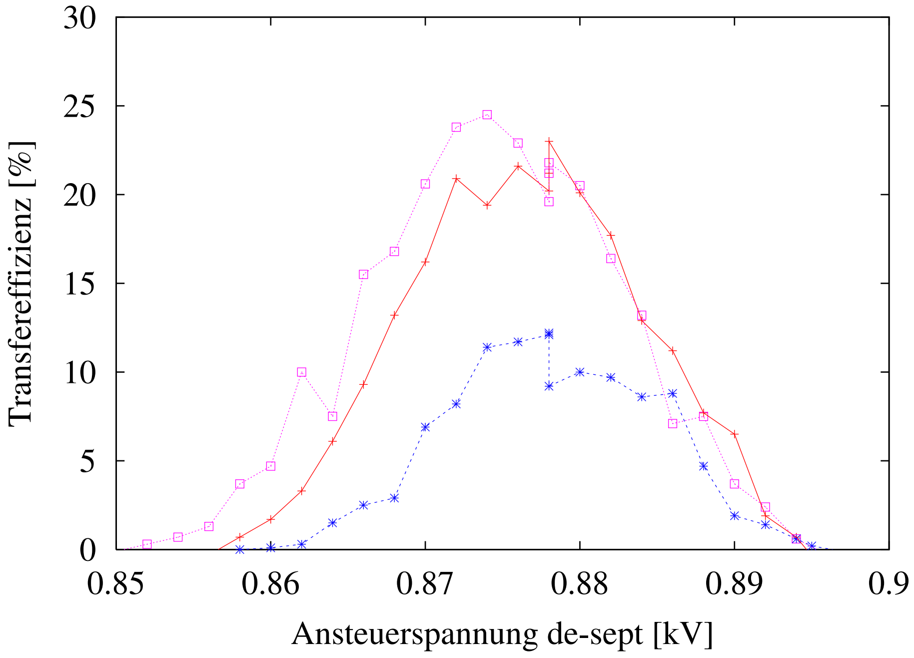


Abbildung 5.11: *Die Transfereffizienz in Abhängigkeit von der Ladespannung des Delta Injektionsseptums bei verschiedenen Ladespannungen des „langen“ Dipolmagneten* `t2-b2`*. Die Ladespannung des Dipolmagneten lag bei den Messungen bei 2,6646 kV (blaue Kurve), 2,6656 kV (rote Kurve) und 2,6666 kV (rosa Kurve). Bei ungünstigen Einstellungen sinkt die gesamte Transfereffizienz (blaue Kurve) und kann durch Variation der Septumspannung auch nicht ausgeglichen werden. Die Verbindungslinien zwischen den Messpunkten dienen nur der Zuordnung, haben aber keine physikalische Bedeutung.*

aus Kapitel 4.2.3 berechnet, beträgt 5,1° bei 0,88 kV. Der theoretische Sollwinkel nach dem Design des Transferkanals beträgt 4,76° [27].

Auf der einen Seite wurde in den Formeln die Energieaufnahme durch das Wirbelstromschild des Septummagneten nicht berücksichtigt. Daher ist der reale Winkel vermutlich kleiner als berechnet. Auf der anderen Seite ist keine Aussage darüber möglich, ob der Elektronenstrahl unter einem zu großen Winkel eintritt, oder ob der Strahl aus dem Magneten unter einem Winkel austritt, obwohl das Design einen Austritt parallel zur Septumschiene vorsieht (das Septum ist mit einem Winkel von 0,9° zur Sollbahn von Delta eingebaut).

In der Messung zu Abbildung 5.11 wurde die Ladespannung des „langen“ Dipolmagneten variiert und dann die Transfereffizienz in Abhängigkeit von der Ladespannung des Septummagneten aufgenommen. Durch die Variation des Dipolfeldes wird der Eintrittswinkel des Elektronenstrahls in den Septummagneten verändert. Um den Austrittswinkel konstant zu halten sind daher andere Ladespannungen des Septummagneten notwendig.

Das Optimum für die Ladespannung des Septummagneten verschiebt sich mit steigendem Dipolfeld zu kleineren Werten hin. Der Elektronenstrahl muss also bei stärkerer Ablenkung durch den Dipolmagneten im Setpum schwächer abgelenkt werden. Der Eintrittswinkel wird also kleiner, wenn der Dipol stärker ablenkt.

Außerdem müssen aber noch andere Einflüsse auftreten, da für die blaue Kurve die Transfereffizienz deutlich hinter den anderen Messreihen zurückbleibt. Dies hat mit der Lageänderung des Austrittspunktes des Elektronenstrahls aus dem Septum zu tun. Selbst wenn die Veränderung des Eintrittswinkels keine gleichzeitige Lageänderung mit sich brächte, würde der Elektronenstrahl den Septummagneten an anderer Position verlassen. Wenn gleichzeitig noch der Eintrittsort verschoben wird, liegt der Strahl beim Austritt völlig anders.

Da an keiner Seite des Septummagneten eine sichere Bestimmung von Ablage oder Winkel des injizierten Strahls möglich ist, sind quantitative Aussagen über den Einfluss des Septums nicht möglich. Es bleibt festzuhalten, dass ein erfahrener Operateur die Transfereffizienz unter anderem mit Hilfe des Septummagneten optimieren kann und dass Änderungen am restlichen Transferkanal in den meisten Fällen eine Anpassung der Septumsstärke notwendig machen.

5.6 Streuung der Effizienzmessung

Nach der gaußschen Fehlerfortpflanzung ergibt sich für die Berechnung der Transfereffizienz G nach der Formel (4.1) der Ausdruck

$$s_G^2 = s_I^2 \cdot G^2 \cdot \left(\frac{2}{(\Delta I_{Delta})^2} + \frac{1}{(I_{Bodo})^2} \right) \tag{5.1}$$

unter der Annahme, dass der Messfehler s_I der Strommessung für alle Strahlstrommessungen identisch ist.

Dabei ist ΔI_{Delta} die Differenz des Strahlstroms in Delta durch die injizierte Ladung aus Bodo:

$$\Delta I_{Delta} \quad = \quad I_{Delta}(nach\ Injektion) - I_{Delta}(vor\ Injektion)$$

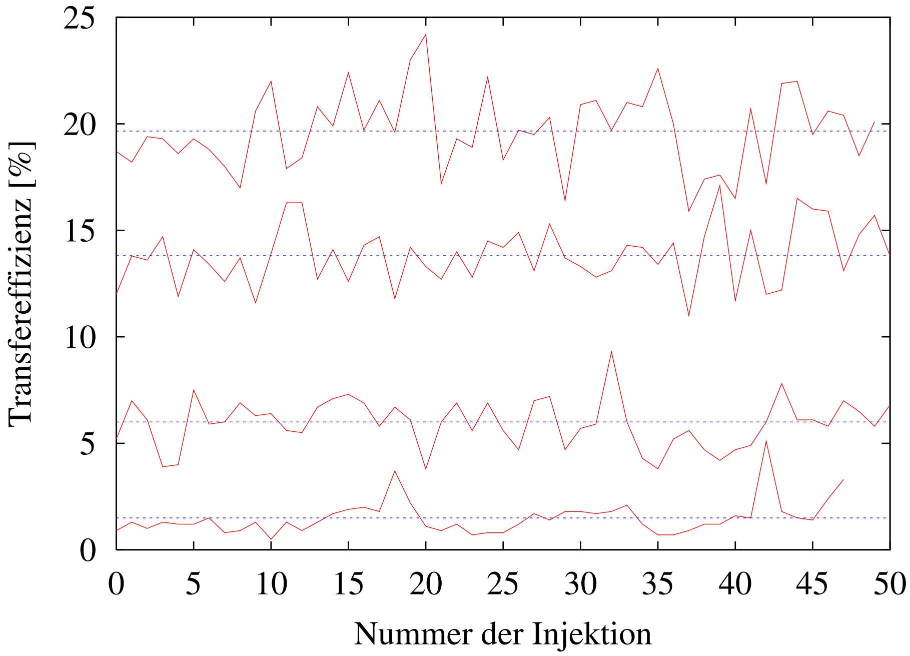


Abbildung 5.12: *Die Transfereffizienz (rot) streut um die berechneten Mittelwerte 19,7 %, 13,8 %, 6,0 % und 1,5 % (blaue Linien). Dabei überschneiden sich die Schwankungsbereiche, so dass eine eindeutige Bestimmung der Transfereffizienz aufgrund einer einzelnen Injektion mit einem großen Fehler behaftet ist. Die Verbindungslinien zwischen den einzelnen Meßpunkten dienen nur der Veranschaulichung und haben keine physikalische Bedeutung.*

Mittelwert	Extremwerte der Messung	
19,7 %	min. 15,9 %	max. 24,2 %
13,8 %	min. 11,0 %	max. 17,1 %
6,0 %	min. 3,8 %	max. 9,3 %
1,5 %	min. 0,5 %	max. 5,1 %

Tabelle 5.3: Die gemessenen maximalen Abweichungen der Transfereffizienz vom Mittelwert.

Der absolute Fehler der Effizienzmessung wird also durch zwei Faktoren vergrößert:

1. durch Strahlströmen von weniger als 1 mA im Beschleunigerring Bodo (was bereits in Kapitel 4.5 für die hier betrachteten Messungen ausgeschlossen wurde)

2. durch hohe Strahlströmen im Speicherring Delta, wenn die endliche Strahllebensdauer über die Messzeit ΔI_{Delta} deutlich verringert

Mit einer Ungenauigkeit von $s = \pm 0{,}005$ mA in den einzelnen Strahlstrommessungen erhält man bei einer Transfereffizienz von $G = 100\%$ und einem Strahlstrom in Bodo von $I_{Bodo} = 1$ mA einen absoluten Fehler von 1,7% unter Vernachlässigung der endlichen Strahllebensdauer in Delta. Berücksichtigt man eine Stromabnahme von 0,042 mA/s, was einer Lebensdauer von einer Stunde bei 150 mA entspricht, so vergrößert sich der Fehler auf 1,9%.

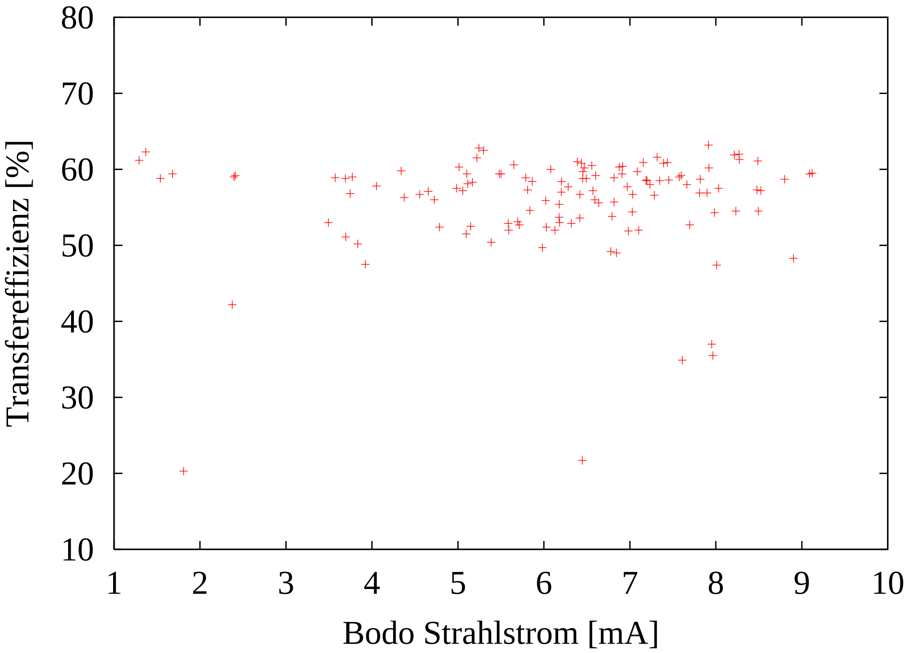


Abbildung 5.13: *Die gemessene Transfereffizienz in Abhängigkeit vom Strahlstrom in Bodo vor der Extraktion. Ursachen für die signifikant kleineren Effizienzwerte konnten nicht beobachtet werden.*

In der Abbildung 5.12 sind gemessene Schwankungen der Transfereffizienz bei verschiedenen Mittelwerten dargestellt, die durch Veränderungen der Ladespannung des „langen" Dipolmagneten herbeigeführt wurden. Die Verbindungslinien zwischen den Messpunkten dienen in der Abbildung nur der Zuordnung des Messpunktes zu einer Messreihe, sie haben keine physikalische Bedeutung. Die berechneten Mittelwerte lagen jeweils bei 19,7 %, 13,8 %, 6,0 % und 1,5 %. Vergleicht man die maximalen Abweichungen (siehe Tabelle 5.2) mit dem oben berechneten Wert von 1,9 % für den ungünstigsten Fall, so wird deutlich, dass es noch andere Gründe für die Schwankung der Transfereffizienz geben muss, außer der Ungenauigkeit der Strahlstrommessungen.

Die Abbildungen 5.13 und 5.14 untersuchen einen möglichen Zusammenhang zwischen der Transfereffizienz und den Strahlströmen von Bodo und Delta direkt vor dem Injektionsvorgang. Eine signifikante Abhängigkeit kann dabei nicht festgestellt werden.

Die Schwankungen der Transfereffizienz hängen also noch von anderen Faktoren ab, die den Überlapp der Phasenellipsen von injiziertem und gespeichertem Strahl verändern. Als Ursache kommen hier vor allem die gepulsten Elemente des Transferkanals und die Kickermagnete in Frage. Es ist bekannt, dass vor allem die Dipolmagnete und Septa, die jeweils spannungsgeregelt sind, durch eine Temperaturdrift am Beginn einer Injektionsphase einen veränderten Strom und damit ein verändertes Magnetfeld aufweisen. Dieser Effekt macht sich jedoch durch eine Verschiebung der Transfereffizienz über mehrere Injektionen hinweg bemerkbar und erklärt nicht die großen Schwankungen zwischen zwei aufeinander folgenden Injektionen.

Die Näherung, dass sich eine gut optimierte Transfereffizienz nicht in Abhängigkeit von I_{Delta} ändert, vernachlässigt Änderungen durch störende Einflüsse in Delta, wie z.B. Instabilitäten durch so genannte Coupled Bunch Moden, die bei höheren Strahlströmen auf-

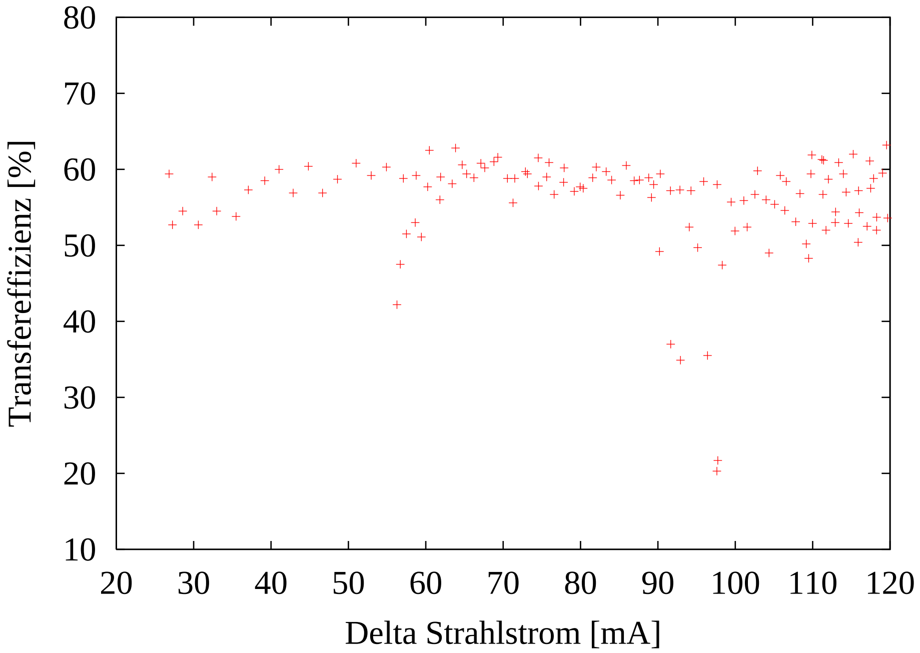


Abbildung 5.14: *Die gemessene Transfereffizienz in Abhängigkeit vom Strahlstrom in Delta vor dem Injektionsvorgang. Die zum Teil signifikant kleineren Werte der Transfereffizienz bei 60 und 100 mA Strahlstrom könnten auf Instabilitäten im Speicherring deuten.*

treten [28]. Um diese Instabilitäten als Ursache für Schwankungen der Transfereffizienz auszuschließen, wurden die Messungen zu dieser Arbeit nur bei Strahlströmen von bis zu 30 mA in Delta durchgeführt (sofern nicht anders angegeben). Dies ist natürlich keine praktikable Grenze für den Nutzerbetrieb, schließt jedoch bei Messungen eine mögliche Fehlerquelle aus.

Kapitel 6

Probleme und Folgerungen

Wie im letzten Kapitel exemplarisch gezeigt wurde, existieren mehrere Probleme, die dazu führen, dass die theoretischen Berechnungen zur Optik des Transferkanals T2 mit unbekannten Fehlern behaftet sind:

- Es wurden keine Vermessungen der Magnetfelder der Transferkanalmagnete durchgeführt. Dies erzeugt vor allem bei dem „langen“ Dipolmagneten eine Unsicherheit, dessen drei Teilstücke jeweils aus drei Modulen aufgebaut sind. Die auftretenden Randfelder der drei Rechteckmagnete überlagern sich und zusätzlich wird die Feldstörung in positiver x-Richtung größer, der Fehler hängt also von der Bahn der Elektronen ab.

- Die Magnete des Transferkanals wurden nicht genau bezüglich ihrer Positionierung vermessen. Da Bodo und Delta separat vermessen und eingerichtet wurden, ist eine Fehlaufstellung des T2 entweder zum Berschleunigerring oder zum Speicherring wahrscheinlich.

- Im T2 sind derzeit nur drei Leuchtschirme zur Diagnose verfügbar. Damit ist eine Überprüfung der theoretischen Betrachtungen praktisch unmöglich. Lediglich das Endergebnis, die transferierte Ladungsmenge, lässt sich über die Strahlstrommonitore von Bodo und Delta ermitteln. In Zukunft werden ein Strahlstrommonitor und drei Strahllagemonitore im Transferkanal diese Situation verbessern.

- Die Ablage und der Winkel des gespeicherten Elektronenstrahls sind im Injektionsbereich von Delta nicht exakt bekannt. In diesem Punkt wird sich jedoch die Situation in nächster Zukunft verbessern, da zusätzliche Strahllagemonitore und Korrekturmagnete installiert werden.

- Die Kickermagnete sind in ihrem Zeitverhalten nicht stabil, so dass es zu Schwankungen der Zündzeitpunkte in den Ansteuerelektroniken (Thyratrons) kommt, was wiederum zu Magnetfeldänderungen zum Zeitpunkt des Transfers führen kann [22].

- Der Spulenstrom der Transferdipolmagnete wird im Pulsmaximum nicht konstant gehalten. Es wird lediglich die Ansteuerspannung geregelt, was zu thermisch bedingten Veränderungen des Magnetfeldes führen kann. Die derzeitige Messung des Spulenstroms am „langen“ Transferdipol `t2-b2` ist nicht genau genug, um die kleinen Änderungen sicher zu detektieren und darauf basierend eine Regelung aufzubauen.

Das gleiche Problem tritt bei den Septa und vermutlich auch bei den Kickermagneten auf.

- Aufgrund der fehlenden Magnetfeldmessungen am Injektionsseptum ist es nicht möglich, die Lage des injizierten Elektronenstrahls zu berechnen. Änderungen in der Ansteuerspannung wirken sich in einer Winkel- und einer Lageänderung von nicht genau bekannter Größe aus.

Zusammenfassend kann man feststellen, dass der Transferkanal T2 im momentanen Zustand nicht hinreichend genau durch die Theorie beschrieben werden kann. Es gibt zu viele freie Parameter, um eine Anpassung der Theorie vornehmen zu können.

Die Transfereffizienz ist eine Größe, mit der sich eine einzelne Injektion bewerten lässt. Aufgrund der großen Schwankungen ist jedoch Geduld und Erfahrung nötig, um eine Optimierung durchführen zu können.

Zur Verbesserung der Situation wäre eine Vermessung der mechanischen Positionierung der Magnete im Transferkanal wünschenswert. Dann sollten die Magnete auf ihre Sollposition geschoben werden, so dass sicher gestellt ist, dass alle Elemente auf gleicher Höhe stehen (vertikal) und ausserdem keine unerwünschten Winkel in horizontaler Richtung auftreten. Anschließend könnte die Strahllage in den Quadrupolmagneten mit Hilfe der hier vorgestellten Methode so korrigiert werden, dass diese ablenkfrei sind, wenn sich dies nicht schon durch die Verschiebung der Magnete ergibt. Alle weiteren Verbesserungen wären nur durch erheblichen Aufwand (z.B. Vermessung der Magnetfelder oder Neukonstruktion der Ansteuerung der Kickermagnete) zu erreichen.

Für die erwähnten Verbesserungen ist es notwendig, den Betrieb des Beschleunigers für längere Zeit zu unerbrechen. Zusätzlich muss ein nicht unerheblicher personeller Aufwand betrieben werden. Beides ist nicht mit der geforderten Verfügbarkeit der Synchrotronstrahlungsquelle zu vereinbaren.

Um die Optimierung des Transferkanals im derzeitigen Zustand auch durch unerfahrene Operateure möglich zu machen, muss eine Methode gefunden werden, die nicht ausschließlich auf einer theoretischen Berechnung der Optik beruht. Die Automatisierung der Injektionsoptimierung ist daher auf der Basis heuristischer Mittel realisiert worden.

Teil II

Das Agentensystem

Kapitel 7

Automatisierung der Steuerung

7.1 Motivation und Problemstellung

Während es im ersten Teil der vorliegenden Arbeit um eine Darstellung der Injektion und des Transferkanals T2 ging, soll nun die Automatisierung der Optimierung der Transfereffizienz beschrieben werden. Zuerst werden die Voraussetzungen und Anforderungen an eine Automatisierung geklärt. Im Anschluss werden Methoden der Informatik kurz auf ihre Anwendbarkeit im vorliegenden Fall geprüft. Dann werden die Realisierung der Automatisierung mittels eines Agentensystems für DELTA und die damit erzielten Ergebnisse präsentiert.

7.1.1 Begriffe der Informatik

In den folgenden Abschnitten werden einige Begriffe benuzt, die in der Informatik eine Bedeutung haben, die leicht von der umgangssprachlichen Bedeutung abweichen kann. Diese Bezeichnungen sollen hier kurz erläutert werden.

Zunächst soll der Unterschied zwischen *Wissen*, *Informationen* und *Daten* geklärt werden. *Daten* sind Werte, z.B. Zahlenwerte oder Wahrheitswerte, die gemessen oder berechnet werden. Reine Daten sind unverständlich und wertlos. Erst die Verknüpfung von verschiedenen Daten erzeugt *Informationen*. Aus den Daten „Strahlstrom“, „mA“ und „120“ kann durch Verknüpfung die Information „Der Strahlstrom beträgt 120 mA“ gewonnen werden. Weitere Verknüpfungen, vor allem Vergleiche mit früheren Informationen und Zusammenfassung von Informationen, machen aus Informationen *Wissen*. Aufgrund von Wissen sind Vorhersagen über zukünftige Daten und Informationen möglich.

Ein Computerprogramm kann Daten messen oder sie vom Benutzer erfragen. Informationen und Wissen werden daraus durch Verarbeitung erzeugt, z.B. durch Fallunterscheidungen und Bedingungen. Diese Verarbeitungsprozeduren müssen dem Programm durch den Programmierer mitgegeben werden oder aufgrund von so genannter *generischer* Programmierung aus Daten erzeugt werden. So können Bedingungen zum Beispiel aus Benutzereingaben oder aus gespeicherten Konfigurationen zusammengesetzt werden. Generische Programmierung kann einfacher auf veränderte Randbedingungen angepasst werden, als statisch einprogrammierte Bedingungen.

Unter *Kommunikation* versteht man in der Informatik den Austausch von Daten, Informationen oder Wissen. Dabei unterscheiden sich *Wahrnehmung* und echte Kommunikation dadurch, dass bei einer Kommunikation beide Seiten Daten oder Informationen übermitteln, während Wahrnehmung nur eine aktive Partei voraussetzt. Die Unterschiede verwischen jedoch schnell, wenn man bedenkt, dass jedes Netzgerät, das seinen Strom übermittelt, Daten zu Verfügung stellt, obwohl man eine Stromabfrage auch als Wahrnehmung interpretieren kann. Was als Wahrnehmung definiert wird und wann man von Kommunikation spricht, kommt auf den Standpunkt an und darauf, ob man den aktiven Charakter betonen möchte. Ein Datenaustausch mit einem menschlichen Benutzer wird dabei immer als Kommunikation bezeichnet.

Auch der Begriff der *Selbständigkeit* ist sehr auslegungsfähig. Im Allgemeinen versteht man unter selbständigen Programmen solche, die ohne Benutzereingabe ablaufen können. Man spricht auch davon, dass sie „im Hintergrund" laufen. Dies bedeutet jedoch nicht zwingend, dass diese Programme nicht aktiv gestartet werden müssen, sei es durch den Benutzer oder durch andere Programme, die auch das Betriebssystem sein können.

Häufig werden die Attribute „Kommunikation" und „Selbständigkeit" mit *Intelligenz* gleich gesetzt. In dieser Arbeit sollen sie jedoch nur als zwei Merkmale unter anderen gelten.

Alan Turing definierte 1950 eine künstliche Intelligenz dadurch, dass ein Benutzer keinen Unterschied zu einem Menschen feststellen könne (A. Turing: *Computing Machinery and Intelligence*, 1950). Dies bezog sich auf eine sprachliche Kommunikation über den Bildschirm oder sogar über Lautsprecher und Mikrofon. Um eine derartige Imitation geht es in dieser Arbeit nicht. Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Programme sollen einen *erfahrenen* Operateur ersetzen, jedoch nicht einen menschlichen Operateur generell. Verantwortung für den korrekten und gefahrlosen Betrieb der Beschleunigeranlage können und sollen die hier vorgestellten Programme nicht übernehmen.

7.1.2 Anforderungen an eine Automatisierung

Die Forderung nach hoher Verfügbarkeit einer Synchrotronstrahlungsquelle führt zu einer weitgehenden Automatisierung des Beschleunigerbetiebs. Allerdings sind dabei einige Rahmenbedingungen zu beachten, die im Folgenden kurz beschrieben werden.

Zunächst muss eine Automatisierung von den Schichtmannschaften akzeptiert werden. Dies bedeutet zum einen, dass die Bedienung einfach und intuitiv sein muss, und zum anderen, dass die Vereinfachungen die Probleme der Umstellung auf ein neues System überwiegen müssen. Zum Beispiel sollten Mitteilungen des Systems im Klartext und in der den Operateuren gebräuchlichen Sprache (bei DELTA also Deutsch) dargestellt werden.

Des Weiteren dürfen schädliche Einstellungen (z.B. an der Leistungsgrenze der Netzgeräte) nicht oder nur nach ausdrücklicher Warnung möglich sein. Dies bedeutet eine Fehlertoleranz gegenüber Eingaben, sowie ein Erkennen und Abfangen von fehlerhaften Einstellungen.

Generell müssen Kontrollsysteme mit fehlenden oder zeitweise ausgefallenen Komponenten angemessen umgehen können. Übertragungsfehler oder ungültige Werte dürfen nicht zu Programmabstürzen oder zu schädlichen Fehleinstellungen führen. Wenn also z.B. die Strahllage an einem Strahlpositionsmonitor falsch ausgelesen worden ist, dann sollte das nicht dazu führen, dass diese falsche Lage durch Korrekturmagnete zu korrigieren versucht wird, was unter ungünstigen Umständen zu Strahlverlust führen kann.

Für Programme, die eigenständig Einstellungen vornehmen, ist außerdem zu fordern, dass jeder Schritt nachvollziehbar bleiben muss. Es ist wenig hilfreich, wenn eine Automatisierung die Beschleunigeranlage in einen undefinierten Zustand bringt und zudem die durchgeführten Veränderungen nicht dokumentiert. Dies kann, zusätzlich zu der offensichtlichen

Fehlerquelle, bei den Operateuren zu einem Gefühl der Überforderung führen, was wiederum zu sinkender Akzeptanz des Systems führt.

Einfache Erweiterungsmöglichkeiten der Automatisierung, um auf neue Anforderungen und Erkenntnisse reagieren zu können, sind vorzusehen. Die schnelle Entwicklung auf dem Gebiet der Informatik und der Netzwerktechnik macht es nötig, sowohl einen Ausbau des Systems, als auch eine teilweise Neuprogrammierung in so fern zu unterstützen, dass die Schnittstellen wohldefiniert, flexibel und gut dokumentiert sind.

Zusammenfassend kann man also feststellen, dass eine effektive Automatisierung sowohl benutzerfreundlich und fehlertolerant, als auch erweiterbar und verständlich sein sollte.

Diese Voraussetzung gilt generell für Kontrollsysteme komplexer Anlagen. Zusätzlich soll hier für die Automatisierung der Injektionsoptimierung ein intelligentes Verhalten gefordert werden. Wie genau Intelligenz zu definieren ist, wird von unterschiedlichen Fachbereichen und auch von unterschiedlichen Autoren in der Informatik verschieden gesehen.

In dieser Arbeit soll unter einem intelligenten Verhalten folgendes verstanden werden:

1. Die Automatisierung soll die Umgebung (also den Beschleuniger) wahrnehmen und auf unterschiedliche Zustände angemessen reagieren (man spricht auch von *Dateninteraktivität*).
2. Über längere Zeiträume soll das System erfolgreiches Verhalten lernen.
3. Das System soll einen erfahrenen Operateur für die Injektionsoptimierung ersetzen können.
4. Das System soll über verschiedene Möglichkeiten der Kommunikation verfügen.
5. Das System soll getroffene Entscheidungen erklären/begründen können.
6. Die Automatisierung soll unabhängig vom Benutzer arbeiten können.

Gerade der letzte Punkt stellt natürlich eine zweischneidige Voraussetzung dar. Aus Sicherheitsgründen sollten aktive Veränderungen am Beschleuniger nur auf ausdrückliche Aufforderung durch den Operateur vorgenommen werden. Andererseits ist es durchaus wünschenswert, automatisch auf Änderungen, z.B. Ausfälle aufmerksam gemacht zu werden. Das System muss also den Zustand des Beschleunigers kennen, bewerten und bei Bedarf kommunizieren.

7.2 Wissensbasierte Systeme

In der Informatik sind mehrere Konzepte zur Lösung der hier vorgestellten Problematik entwickelt worden. Dieses Kapitel soll eine Auswahl von drei verschiedenen Ansätzen vorstellen und ihre Anwendbarkeit in der vorliegenden Problemstellung beleuchten. Den Abschluss dieses Kapitels bildet die Konzeptionierung der realisierten Lösung.

Die dargestellten Konzepte wurden im Hinblick auf die Problemstellung ausgewählt.

Unter *wissensbasierten Systemen* versteht man in der Informatik Programme, die aufgrund von gespeichertem Wissen und generischer Programmierung in der Lage sind, flexibel auf Änderungen ihrer Umwelt zu reagieren. Das gespeicherte Wissen kann dabei einmal durch den Programmierer zur Verfügung gestellt werden oder durch das Programm gelernt werden - dann muss die Programmierung die Lernmethoden zur Verfügung stellen.

Die Entwicklung wissensbasierter Systeme und ihre Erforschung sind eines der Kerngebiete der Erforschung der künstlichen Intelligenz, die wiederum ein Teilgebiet der Informatik darstellt. Als Methoden werden in wissensbasierten Systemen sowohl theoretische Modelle der Umwelt[1], als auch heuristische Verfahren eingesetzt.

7.2.1 Sammlungen nützlicher Programme

Ein Problem mit vielen verschiedenen Aspekten und Anforderungen führt bei einer nicht im Voraus konzeptionierten Bearbeitung in der Regel zu einer Sammlung von Hilfsmitteln.

Man spricht auch von einer *Werkzeugsammlung* oder im Englischen von einer *Toolbox*. Diese Werkzeugsammlung besteht aus einzelnen Programmen, die jeweils ein Teilproblem behandeln.

Diese Lösung wird an allen Beschleunigeranlagen verwendet. Dabei ist es durchaus üblich, ein Generalprogramm zu haben, von dem aus die verschiedenen Werkzeuge gestartet werden.

Auch das Kontrollsystem von DELTA basiert auf einer Werkzeugsammlung, die über eine Schaltfläche zugänglich ist. Neue Programme, die den Operateuren zur Verfügung gestellt werden sollen, werden über ein Symbol und eine Bezeichnung eingebunden. Ein unerfahrener Operateur steht daher mehr oder weniger vor einer Liste von Begriffen, die nur grob die Funktionalität der Programme andeutet.

Ohne Einweisung ist eine Programmsammlung nicht verwendbar. Selbst ein erfahrener Operateur ist nicht unbedingt über alle neuen Programme informiert und bedient sich daher unter Umständen älterer Programme. Im Laufe der Zeit entwickelt jeder Operateur einen eigenen Stil, trifft also eine persönliche Auswahl unter den angebotenen Programmen, die nicht unbedingt optimal sein muss.

Daher ist eine Sammlung von Programmen zwar flexibel und ausbaufähig, nicht jedoch benutzerfreundlich.

7.2.2 Expertensysteme

Expertensysteme sollen aufgrund von einprogrammierten Informationen das Wissen von Experten für Laien zugänglich machen. Am bekanntesten ist MYCIN, ein Expertensystem aus der medizinischen Diagnostik [30].

Ein Expertensystem basiert auf einer Regelmenge, die von einem so genannten Wissensingenieur zusammen mit einem Experten erarbeitet wird. Die Regeln werden häufig als
`WENN ... DANN ...`
Bedingungen dargestellt und implementiert.

Der größte Nachteil der Expertensysteme war in der Vergangenheit die Wissensdarstellung als Bedingungsgeflecht. Während für klar abgegrenzte Wissensbereiche ein einfacher Entscheidungsbaum aufgestellt werden kann, sind größere oder komplexere Bereiche nur

[1] In der Informatik bezeichnet der Begriff „Umwelt“ die vom Programm „wahrgenommenen“ Informationen. Darunter kann sowohl eine reine Softwareumgebung zum Finden von Algorithmen verstanden werden, als auch eine visuelle Wahrnehmung der realen Welt.

durch entsprechend unübersichtliche Verknüpfungen darstellbar. Die Erweiterung solcher Entscheidungsnetze aufgrund von neuen Entwicklungen stellte sich als schwer bis unmöglich heraus. Eine Erweiterung führte daher oft zu einer Neuprogrammierung.

So genannte *Expertensystemhüllen* enthalten keine Wissens- oder Regelbasis, sondern nur die Oberfläche (*Dialogkomponente*) und den Regelinterpreter, also den Algorithmus, nach dem die Regeln ausgewertet werden. Versuche mit der Expertensystemhülle `D3` der Universität Würzburg [31] im Rahmen dieser Arbeit haben gezeigt, dass die Expertensystemhülle nicht im Bereich des Beschleunigers einsetzbar ist. Von der Inkompatibilität des Betriebsystems abgesehen, sind keine Schnittstellen zur direkten, fehlertoleranten Messwerterfassung vorgesehen. Einfache Regelsysteme zur Erstellung von Diagnosen aufgrund von Benutzereingaben lassen sich dagegen leicht erstellen.

Expertensysteme sind nur für Teilbereiche in der Steuerung eines Beschleunigers einsetzbar und sollten auf ein überschaubares Einsatzgebiet begrenzt werden.

7.2.3 Agentensysteme

Der Begriff *Agent* wird hier im Sinne von „Agentur“ und nicht im Sinne von „Spion“ verwendet. Gemeint sind Programme, die den Auftrag eines Benutzers selbständig im Sinne des Benutzers ausführen. Welche Kriterien ein Programm zu einem Agenten machen, wird von unterschiedlichen Autoren unterschiedlich definiert:

- Caglayan, Harrison: [Ein Softwareagent ist] *eine Softwareentität, die vom Anwender delegierte Aufgaben autonom erfüllt.* [29]
- Klügl: *Für ein Verständnis des Wesens des Agentenkonzepts ist eine Beschreibung der Eigenschaften, die das Agentsein impliziert, sehr hilfreich. Die wichtigsten Merkmale reichen dabei von „Situatedness“, Reaktivität, Autonomie, Fähigkeit zur sozialen Interaktion, rationales Verhalten bis hin zu Menschenähnlichkeit.* [...] *Welche dieser Eigenschaften Agenten* [...] *besitzen, ist zum einen eine Frage des Abstraktionsniveaus des Modells. Zum anderen bestimmt das im Modell abzubildende System, welche Eigenschaften bei den modellierten Bestandteilen erkennbar sein sollen.* [32]
- Kühnel: *Die Diskussion darüber, was genau unter dem Begriff „Agent“ zu verstehen ist, wurde auf entsprechenden Konferenzen und in der Literatur ausgiebig geführt.* [...] *Letztlich ist der Begriff „Agent“ aber eine Metapher, die in den unterschiedlichen Gebieten, die mittlerweile den Begriff verwenden, jeweils für unterschiedliche Eigenschaften steht.* [33]
- Cawsey: *Ein intelligenter Agent ist etwas, was unabhängig agieren kann, mit wohl definierten Zielen ausgestattet ist und normalerweise für einen menschlichen Benutzer Aufgaben durchführt. Der Agent sollte in der Lage sein, basierend auf den Informationen, die er von seiner Umgebung oder von anderen Agenten empfängt, das, was er tut, anzupassen.* [34]

Die zuletzt genannte Definition soll in dieser Arbeit ein Agenten-Programm kennzeichnen.

Wenn es mehrere Agenten gibt, die miteinander kommunizieren, um ihre Aufgaben zu lösen, dann spricht man auch von einem *Agentensystem*. Arbeiten alle Agenten an einer gemeinsamen Aufgabe, so kooperiert das Agentensystem, ansonsten konkurrieren die Agenten.

Die Kommunikation der Agenten kann über mehrere Methoden realisiert werden:

1. ein so genanntes „schwarzes Brett“, also eine zentrale Verwaltung aller Nachrichten, aus denen jeder Agent die für ihn relevanten Informationen auswählt
2. eine Punkt zu Punkt Verbindung über Netzwerkports, bei der jeweils zwei Agentenprogramme miteinander direkt kommunizieren
3. eine Broadcast-Verteilung, bei der jeder Agent im System jede Nachricht empfängt und selbst entscheiden muss, ob die Nachricht für ihn relevant ist

Der Vorteil eines Agentensystems ist die Fexibilität. Wird das Problem erweitert, so kann man zusätzliche Agenten dem System hinzufügen. Ändert sich ein Teilproblem grundlegend, so reicht es, den zuständigen Agenten auszutauschen, anstatt das ganze System neu zu errichten.

Der Aufbau eines Agentensystems ist vergleichbar mit dem Aufbau einer Werkzeugsammlung. Da Agenten jedoch in der Lage sind, weitgehend selbständig zu agieren, können sie durch das Betriebssystem automatisch gestartet werden, so dass der Operateur nicht mehr selbst entscheiden muss, welche Programme er nutzt. Ein weiterer Unterschied ist der Verarbeitungsgrad der Informationen: Ein Agent liefert Informationen, während ein Programm einer Werkzeugsammlung meist nur Daten zur Verfügung stellt. Das bedeutet, dass der Operateur bei der Verwendung eines Agenten nicht so viel eigene Erfahrung einbringen muss, wie bei Programmen aus einer Werkzeugsammlung.

7.3 Resümee

Für DELTA wird eine flexible, leicht erweiterbare Grundstruktur gesucht. Dafür bietet sich das Modell des Agentensystems an. Zur Lösung spezieller Probleme, wie der Injektionsoptimierung, sind Expertensysteme nützlich, die in das Agentensystem eingebettet werden können.

Die neue Struktur eines Agentensystems lässt sich parallel zu der bisher verwendeten Werkzeugsammlung aufbauen. Je nach Bedarf können einzelne Werkzeuge zu Agenten umprogrammiert werden, da der generelle Aufbau der Systeme ähnlich ist. Dies bedeutet für den Operateur kaum Umstellungen auf neue Programme. Die bekannten Programme bieten einfach mehr Funktionalität an.

Einzelne Agenten können verschiedene Stufen an intelligentem Verhalten erreichen und dabei trotzdem zum gleichen System gehören. Eine grundsätzliche Intelligenz kann als realisiert gelten, wenn jedes einzelne Programm auf Veränderungen in seiner Umwelt sinnvoll reagieren kann.

Kapitel 8

Das Kontrollsystem von DELTA

Das Kontrollsystem von DELTA ist ein so genanntes Drei-Schichten-System (siehe Abbildung 8.1). Die drei namensgebenden Schichten sind:

1. **Die Darstellungsrechner**
   Die Darstellungsrechner befinden sich im Kontrollraum und erlauben es dem Operateur, die Anlage zu steuern. Bei DELTA werden im Wesentlichen PCs (eng. **P***ersonal* **C***omputer*) mit dem Betriebssystem Linux verwendet.

2. **Die Kontrollrechner**
   Die Kontrollrechner bilden das eigentliche Herzstück des Kontrollsystems und übernehmen die Umsetzung von Daten der Geräte zu Informationen für die Darstellungsrechner. Momentan finden sich auf dieser Ebene vor allem Industriecomputer mit VME-Bus[1], die unter dem Betriebssystem VxWorks der Firma WindRiver laufen.

3. **Die Geräte**
   Unter Geräten ist hier die ansteuerbare Hardware des Beschleunigers zu verstehen, also Netzgeräte, Diagnoseinstrumente, Ventilsteuerungen, etc. Dabei muss immer berücksichtigt werden, dass man bei theoretischen Überlegungen (wie z.B. beim Design neuer Magnetoptiken) zwar davon ausgeht, dass man zum Beispiel Magnetfelder verändert, real aber nur den Sollstrom des zugehörigen Netzgeräts einstellen kann.

Die Verbindung zwischen den Darstellungsrechnern und den Kontrollrechnern und innerhalb der beiden Schichten wird durch ein Ethernet gebildet [35]. Die Geräte sind über verschiedene Feldbussysteme mit den Kontrollrechnern verbunden, wobei Can-Bus und IEEE488 (GPIB) am häufigsten verwendet werden.

Die Kontrollsystem-Software wurde während der Erstellung dieser Arbeit von einer im Hause entwickelten Lösung, die den Anforderungen an Effizienz und Wartbarkeit nicht mehr gewachsen war, auf EPICS (**E**xperimental **P**hysics and **I**ndustrial **C**ontrol **S**ystem) umgestellt [36]. Dieses System wird bereits an vielen Beschleunigern und anderen großen Forschungseinrichtungen eingesetzt [37].

[1] **V***ersatile* **M***odule* **E***urope* ist ein Bus der Firma Motorola

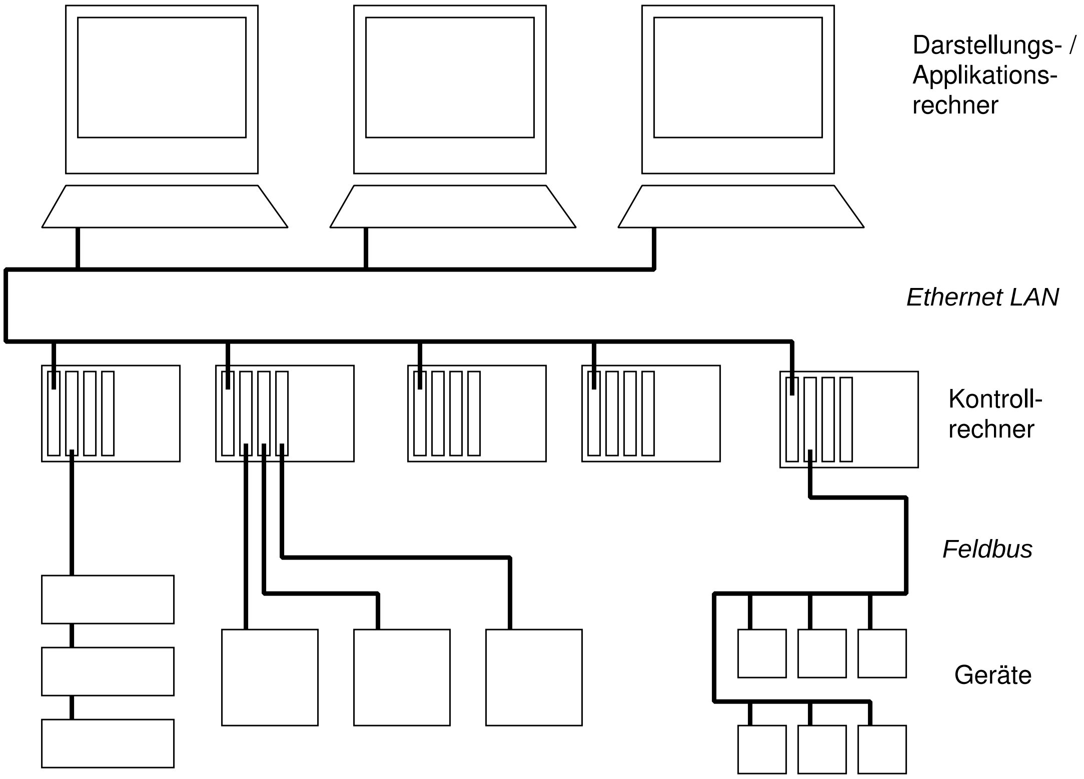


Abbildung 8.1: *Drei-Schichten Kontrollsystem imÜberblick*

8.1 Grundlagen von EPICS

EPICS stellt eine Softwareumgebung mit definierten Schnittstellen inklusive Netzwerkprotokoll zur Verfügung, welche durch Gerätetreiber und Anwendungsprogramme ergänzt werden kann (siehe [38] und [39]). Dokumentation findet sich auf den EPICS Websites im Internet (z.B. `http://www.aps.anl.gov/epics/`).

Das Konzept von EPICS beruht auf so genannten *Records*. Jede Prozessvariable, das heißt jeder Messwert, jeder Setzwert und jede davon abgeleitete Größe, wird durch ein Record dargestellt. Dieses Record enthält neben dem Wert der Prozessvariablen noch weitere zu der entsprechnenden Größe gehörende Attribute, wie die physikalische Einheit, untere und obere Grenzen, Anzahl der gültigen Stellen und vieles mehr. Die Records werden dezentral auf den Kontrollrechnern verwaltet.

Records können immer dann ihren Wert ändern, wenn sie „prozessiert" werden. Je nach Konfiguration geschieht das durch Benutzereingaben (vor allem bei Setzwerten), angeregt durch andere Records (über so genannte *Links*), durch Gerätetreiber angestoßen oder periodisch. Wenn sich der Wert eines Records ändert, sollte diese Information auch auf den Darstellungsrechnern zur Verfügung stehen. Dazu stehen zwei Mechanismen zur Auswahl:

1. Zum einen kann ein Programm vom Darstellungsrechner aus regelmäßig den Wert des Records abfragen und mit vorherigen Werten vergleichen. Dies nennt man auch einen *synchronen* Zugriff. Der Nachteil dieser Methode ist einerseits die hohe Netzwerkbelastung, die auch dann auftritt, wenn sich der Wert nicht ändert, und andererseits kann nicht gewährleistet werden, dass jede Änderung erfasst wird, wenn sich der Wert sehr schnell ändert.

2. Die andere Zugriffsmethode wird als *asynchron* bezeichnet und findet in Kooperation zwischen dem Darstellungsrechner und dem Kontrollrechner statt. Der Darstellungsrechner gibt bekannt, dass Interesse an den Werten eines Records besteht (es wird ein *Monitor* gesetzt) und der Kontrollrechner gibt nun automatisch jede Veränderung weiter, die eine einstellbare Schwelle überschreitet. Für das DELTA-Agentensystem ist diese Zugriffsmethode an vielen Stellen eine Voraussetzung.

Für das DELTA-Kontrollsystem wurde eine existierende Schnittstelle zwischen EPICS und der Programmiersprache Tcl/Tk weiterentwickelt, um einen unkomplizierten Zugriff auf die Daten eines Record zu ermöglichen [40].

Die Setzwerte für einige Gruppen von Geräten wurden zu so genannten *Setups* zusammengefasst. Zu diesen Setups wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Record-Struktur entwickelt, die zum Beispiel den Vergleich zwischen den gespeicherten Setup-Werten und den aktuell eingestellten Werten erlaubt.

Derzeit sind für folgende Gerätegruppen diese Statusrecords eingerichtet:

li-mag	Magnete des Linearbeschleunigers
li-trigger	Zeitliche Abstimmung zwischen Linearbeschleuniger und Bodo
t2-mag	Magnete des Transferkanals T2
t2-trigger	Zeitliche Abstimmung zwischen Delta und T2
de-steerer	Korrekturmagnete von Delta
de-rf	Hochfrequenz von Delta
de-haupt	Dipol- und Quadrupolmagnete von Delta

8.2 Die Oracle-Datenbank

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine relationale Datenbank der Firma ORACLE in das Kontrollsystem von DELTA integriert. Die Datenbank läuft auf einem der Darstellungsrechner und ist von jedem der Darstellungsrechner aus mit den gleichen Methoden zu erreichen. Der tatsächliche Installationsort ist nicht wichtig für den Zugriff auf die Daten. Diese Datenbank erfüllt im Rahmen des Agentensystems zwei Funktionen: zum einen dient sie als Schnittstelle zwischen den Agenten innerhalb der Agentenkommunikation, zum anderen werden die Konfigurationen der Agenten in der Datenbank gespeichert.

In einer relationalen Datenbank liegen die Informationen in Tabellenform vor, die mit Hilfe der Datenbanksprache SQL (eng. **s***tructured* **q***uery* **l***anguage*) ausgelesen und verändert werden können. Verknüpfungen zwischen den verschiedenen Tabellen ermöglichen Relationen zwischen den Daten und z.B. automatische Aktionen beim Ändern von verknüpften Daten.

Einführungen in das Gebiet der relationalen Datenbanken finden sich in [41] und [42], Details zur Datenbank von Oracle in [43] und Details zur Oracle-Datenbank bei DELTA in [44].

Für das DELTA-Kontrollsystem wurde im Rahmen dieser Arbeit eine existierende Schnittstelle zwischen der Oracle-Datenbank und der Programmiersprache Tcl/Tk weiterentwickelt. Die Kenntnisse der Datenbanksprache SQL sind jedoch weiterhin erforderlich.

8.3 Anforderungen an Benutzeroberflächen

Die Benutzeroberflächen laufen auf den Darstellungsrechnern und werden bei DELTA in der Programmiersprache Tcl/Tk geschrieben. Einführungen finden sich in [45] oder [46]. Die Sprache erlaubt die Zusammenfassung von häufiger verwendeten Programmfunktionen zu so genannten Paketen. Diese Pakete können dann in beliebige Tcl/Tk-Programme eingebunden werden, so dass die darin enthaltenen Funktionen im Programm zur Verfügung stehen. Solche Pakete kann man entweder von anderen Entwicklern übernehmen und erweitern oder komplett selbst anlegen. Im Rahmen dieser Arbeit werden vor allem die Pakete `Oralib` zum Ansprechen der Oracle-Datenbank und `Epics` für den Zugriff auf EPICS Records verwendet.

Die generellen Richtlinien für Benutzeroberflächen im Kontrollsystem wurden in [15] festgelegt. Die einfache Bedienbarkeit und Übersicht soll dabei noch einmal betont werden.

Die Dokumentation der Programme findet über das Intranet statt. Zusätzlich gibt es für die Programmiersprache Tcl/Tk ein mitgeliefertes Hilfe-Programm, in das man auch die Beschreibung von zusätzlichen Paketen einbinden kann.

Kapitel 9

Das Agentensystem von DELTA

Um den speziellen Aufbau des Agentensystems bei DELTA zu verstehen, werden nach einem generellen Überblick zunächst die Agenten-Komponenten beschrieben, die für alle Agenten gleich sind. Anschließend wird auf die einzelnen Agenten im Detail eingegangen. Dabei wurde eine Reihenfolge gewählt, die den Informationsaustausch zwischen den Agenten berücksichtigt. Am Ende des Kapitels werden die Ergebnisse zur Optimierung der Transfereffizienz durch das Agentensystem präsentiert.

9.1 Das Agentensystem im Überblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurde zum einen ein Tcl-Paket entwickelt, das die Entwicklung von Agenten vereinfacht, indem es die dazu notwendigen Funktionen zur Verfügung stellt. Zum anderen wurde ein System aus fünf Agentenprogrammen entwickelt, welches die notwendigen Rahmenbedingungen für eine heuristische Optimierung des Transferkanal T2 schafft.

Abbildung 9.1 zeigt einen Überblick über das Agentensystem und die bestehenden Verbindungen zur Oracle-Datenbank und zu EPICS. Das Agentensystem ist so konzipiert, dass Erweiterungen einfach zu realisieren sind. Ideen für weitere Agenten sind im Kapitel 10 aufgezeigt. Die Dokumentation zum Agenten-Paket enthält neben einer ausführlichen Beschreibung der einzelnen Funktionen auch Informationen zu den benutzten Datenbank-Tabellen und zwei einfache Beispiele für Agentenimplementierungen. Diese dienen aber nur der Veranschaulichung von Funktionsweisen und werden daher in dieser Arbeit nicht besprochen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden fünf Agenten implementiert:

- der Alarmagent
- der Meldungsagent
- der Statusagent
- der Darstellungsagent
- der T2-Experte

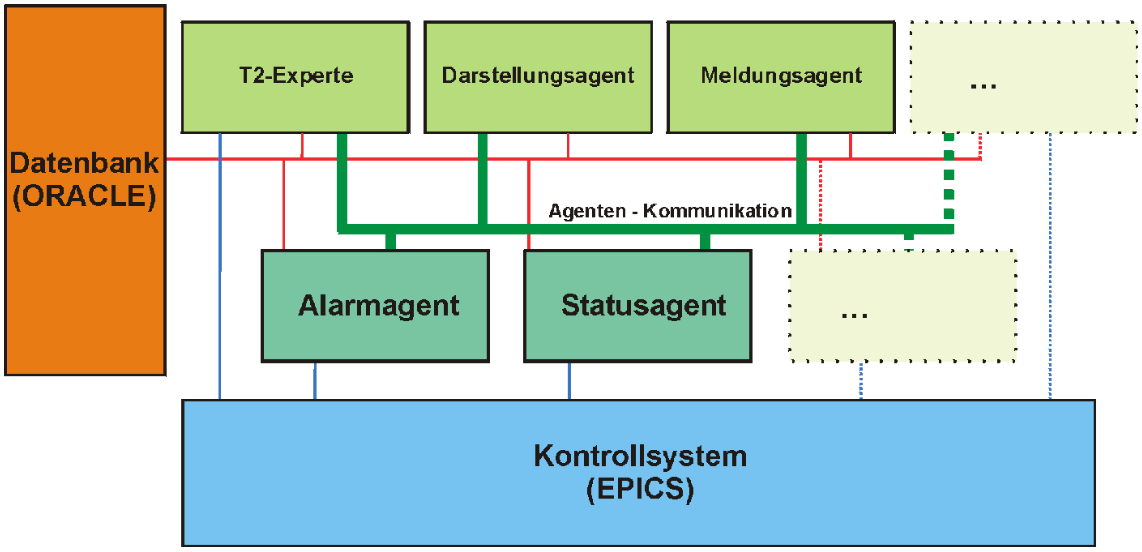


Abbildung 9.1: *Überblick über das derzeitige Agentensystem bei DELTA*

Der Alarmagent und der Statusagent laufen im Hintergrund, haben also keine direkte Benutzeroberfläche. Diese Oberflächen werden durch den Meldungsagenten und den Darstellungsagenten zur Verfügung gestellt. Der T2-Experte ist das Expertenprogramm, das die eigentliche Optimierung der Transfereffizienz vornimmt, dazu jedoch mit den anderen Agenten kommuniziert.

9.1.1 Grundstruktur eines Agenten

Ein Agent im DELTA-Kontrollsystem ist in der Programmiersprache Tcl geschrieben, wobei zum Teil auch auf die grafische Erweiterung Tk zurückgegriffen wurde. Ein Agent kann also, muss aber keine Benutzeroberfläche haben.

Die Agenten stellen sich gegenseitig Informationen zur Verfügung. Um klar zu unterscheiden, wer in diesem Prozess der Informant und wer der Fragende ist, wurde eine so genannte *Client-Server-Struktur* aufgebaut.

Ein Server-Agent bietet dabei Informationen an, während ein Client-Agent die angebotenen Informationen nutzt. Ein Agent kann dabei sowohl als Server als auch als Client agieren. Da in einer allgemeineren Sicht ein Server-Angebot aus mehr als nur Informationen bestehen kann, spricht man auch von *Diensten*, die angeboten und genutzt werden.

Zum Beispiel bietet der Meldungsagent an, Meldungen auf der Benutzeroberfläche anzuzeigen, in dieser Hinsicht ist er also ein Server. Auf der anderen Seite fragt der Meldungsagent beim Alarmagenten nach anliegenden Alarmen, um diese darzustellen, ist also auch ein Client-Agent.

Zusätzlich zu dieser Agentenkommunikation, auf die im nächsten Abschnitt noch ausführlicher eingegangen wird, haben die Agenten im DELTA-Kontrollsystem eine Verbindung zur Oracle-Datenbank und eine EPICS-Schnittstelle. Dabei ist die Datenbankverbindung obligatorisch, da die Agentenkommunikation darauf zugreift.

Zusätzlich wird die Oracle-Datenbank von den meisten Agenten auch als Speicher für Konfigurationen benutzt. Dies ermöglicht einen flexiblen Aufbau der Konfiguration und

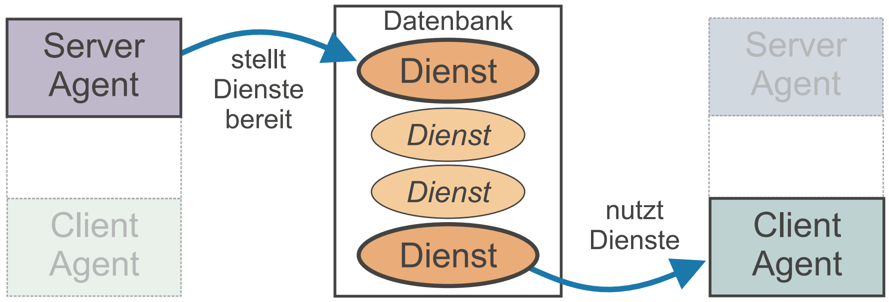


Abbildung 9.2: *Ein Agent kann ein Server-Agent sein, der Dienste anbietet, ein Client-Agent, der Dienste nutzt, oder beides.*

die Möglichkeit, Agenten den variablen Bedingungen bei DELTA anzupassen. So ist die Liste der Prozessvariablen (EPICS-Records und ihre verschiedenen Felder), die vom Alarmagenten überwacht werden, in der Datenbank gespeichert und kann mit einem Konfigurationsprogramm verändert werden. Ein weiterer Vorteil, der durch die Speicherung der Konfiguration in der Datenbank erzielt wird, ist die zentrale Verwaltung der Daten. Gerade die Agenten zum Darstellen von Informationen können mehrfach auf verschiedenen Darstellungsrechnern laufen. Es ist essenziell, dass alle Agenten dabei auf die gleiche Konfiguration zugreifen.

9.1.2 Die Agentenkommunikation

Im Einzelnen findet die Kommuikation zwischen den Agenten über das Netzwerk (Ethernet) statt. Dazu werden so genannte *TCP-Socket*-Verbindungen[1] genutzt, die vom Betriebsystem Linux zur Verfügung gestellt werden. Die Programmiersprache Tcl beinhaltet Funktionen, die einen einfachen Zugriff auf diese Sockets ermöglichen.

Um die Entwicklung von Agenten zu vereinfachen, übernimmt das Agenten-Paket, das im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurde, die Details der Kommunikation. Der Programmierer braucht weder zu wissen, auf welchem Rechner des Kontrollsystems der Agent läuft, zu dem er einen Kontakt aufbauen möchte, noch braucht er sich um den Verbindungsaufbau zu kümmern.

Ein Server-Agent stellt einen Dienst zur Verfügung, indem ein entsprechender Prozeduraufruf in einem vorgegebenen Namensraum angelegt wird. Der Programmierer muss also eine Prozedur schreiben, deren Name zum Teil festgelegt ist (der erste Namensteil ist vorgegeben als `::agent::services::`). Beim Aufruf der Initialisierung für einen Server-Agenten wird im Programmcode nach derartigen Namen gesucht und die gefundenen Prozeduren mit den nötigen Parametern in die Oracle-Datenbank eingetragen. Ist ein Dienst in der Datenbank eingetragen, so kann jeder Client-Agent darauf zugreifen.

Ein Client-Agent verfügt über eine Funktion namens `::agent::use`, mit der er Agentendienste aufrufen kann. Dabei ist lediglich wichtig, dass zum Zeitpunkt des Aufrufs irgendein Server-Agent den Dienst anbietet. Wo dieser Agent läuft, ist nicht relevant. Als Sonderfall kann der Dienst sogar vom selben Agenten angeboten werde, ohne dass sich an der Abwicklung des Dienstes etwas ändert. Dadurch ist gewährleistet, dass Dienste von einem Agentenprogramm zu einem anderen verschoben werden können, ohne dass alle Nutzer

[1] TCP ist ein Netzwerkprotokoll-Standard und steht für **T**ransmission **C**ontrol **P**rotocol [35]

dieses Dienstes umprogrammiert werden müssen. Dies ist vor allem mit Blick auf einen weiteren Ausbau des Agentensystems eine nützliche Eigenschaft.

Jeder Server-Agent verfügt automatisch über zwei Dienste, die es ermöglichen, Fehlermeldungen und Angaben zum Programmstatus von einem Client-Agenten aus zu lesen. Damit ist dem Entwickler eine Möglichkeit der Fehlerdiagnose gegeben, auch wenn sein Agent nicht über eine Benutzeroberfläche verfügt. Diese Dienste sind im Agenten-Paket enthalten und werden mit der Initialisierung als Server-Agent automatisch nutzbar.

9.2 Der Alarmagent

Der Alarmagent basiert von seiner Idee her auf dem Alarmhandler von EPICS (siehe z.B. [38]). Mit Hilfe von EPICS-Monitoren werden Records und ihre Felder auf konfigurierbare Bedingungen hin überwacht. Der Alarmagent hat selbst keine Benutzeroberfläche, um zu verhindern, dass er durch Schließen des Fensters versehentlich beendet wird.

Die vom Alarmagenten erkannten Alarmzustände können auch dann wichtig sein, wenn gerade keine Benutzeroberfläche diese Meldungen anzeigt (siehe auch Kapitel 9.3). Daher werden alle detektierten Änderungen in einer Protokolldatei[2] mitgeschrieben. So kann zumindest im Nachhinein der Fehlerzustand rekonstruiert werden.

Die Alarmbedingungen, also die Voraussetzungen, die zum Auslösen einer Fehlermeldung vorliegen müssen, werden in der Oracle-Datenbank definiert.

Die Beschreibung einer Alarmbedingung erscheint auf den ersten Blick leicht, wird aber bei genauerer Berachtung schnell komplex. Anhand eines Beispiels soll dies hier verdeutlicht werden:

> **Es soll ein Alarm erzeugt werden, wenn das Netzgerät einer Korrekturspule ausfällt.**
>
> Zunächst muss geklärt werden, wie überhaupt der Ausfall einer Korrekturspule mit dem Kontrollsystem detektiert werden kann. Am häufigsten sind die beiden folgenden Symptome:
>
> 1. Das Netzgerät kann nicht mehr über das Kontrollsystem angesprochen werden und die zugehörigen EPICS-Records wechseln in einen Fehlerzustand (der Statuswert wechselt von `NO_ALARM` auf `INVALID`). Dieser Fehlerzustand löst auch einen Monitor aus und kann daher asynchron detektiert werden.
> 2. Die Korrekturspule wird nicht mehr bestromt, und das Netzgerät meldet den Ist-Stromwert Null an das Kontrollsystem. Dieses Verhalten ist nicht am Statuswert zu erkennen. Vielmehr müsste in diesem Fall der Setzwert mit dem zurück gelesenen Wert verglichen werden und große Abweichungen an das Kontrollsystem weitergeleitet werden. Ein solcher Soll-Istwert-Vergleich ist im Kontrollsystem von DELTA für viele Geräte durch ein EPICS-Record realisiert.
>
> Es sind auch andere Möglichkeiten für das Verhalten eines defekten Gerätes denkbar. Entweder aus der Dokumentation des Gerätes oder aus der Erfahrung ergibt sich, wie ein defektes Gerät detektierbar ist. Im vorliegenden Beispiel einer Korrekturspule tritt die erste Reaktion ein: Das Netzgerät kann nicht mehr angesprochen werden.
>
> Aufgrund dieses Wissens kann nun die Alarmbedingung formuliert werden:
> `Wenn Status der Korrekturspule xy INVALID, dann Alarm`
> Tritt diese Bedingung ein, so sollte eine Fehlermeldung angezeigt werden, die auch einem unerfahrenen Operateur Rückschlüsse erlaubt, also z.B. „`Die Korrekturspule xy ist ausgefallen`".

[2] Protokolldateien werden häufig auch als *Log-Dateien* bezeichnet.

> Implementiert man diese Bedingung, so fällt nach kurzem Einsatz auf, dass immer wieder für kurze Zeit ein Alarm für verschiedene Korrekurmagnete anliegt, ohne dass dies irgendwelche Konsequenzen hat, wie zum Beispiel einen Strahlverlust. Die Meldungen verschwinden auch wieder, ohne dass Maßnahmen ergriffen werden. Dieses Verhalten wird durch Auslesefehler erzeugt, die kurzzeitig dazu führen, dass eine Korrekturspule nicht angesteuert werden kann. Auslesefehler können aus verschiedenen Gründen auftreten. Häufigste Ursache sind Übertragungsfehler der Signale vom Gerät zum Kontrollrechner und fehlerhafte oder verzögerte Meldungen des Gerätes. Der nächste Ausleseversuch ist im Allgemeinen erfolgreich. Wie lange der Auslesefehler vorliegt, hängt vom Gerät und von der Konfiguration der EPICS-Schnittstelle ab. In der Regel findet ein weiterer, erfolgreicher Ausleseversuch innerhalb von einigen Sekunden statt. Die Alarmbedingung sollte demnach leicht modifiziert werden zu `Wenn Status der Korrekturspule xy länger als 10 Sekunden INVALID, dann melde „Die Korrekturspule xy ist ausgefallen“`.
>
> Wenn nun diese Alarmbedingung für jede Korrekturspule von Delta definiert werden soll, dann hat man 56 fast gleiche Bedingungen, die sich jeweils nur im Namen der Korrekturspule unterscheiden. Dies vermeidet der Alarmagent, indem jede Bedingung für eine Gruppe von Geräten (eigentlich eine Gruppe von EPICS Records) definiert wird. Gruppen mit nur einem Gerät sind als Sonderfall enthalten.

Der Alarmagent berücksichtigt die oben skizzierten Probleme und erlaubt es, eine Alarmbedingung für eine Gruppe von Geräten zu definieren, die jeweils einen beliebigen Vergleich zwischen einem EPICS Wert und einer Konstanten durchführt. Diese Bedingung muss dann für eine definierbare Zeit anliegen, bevor die konfigurierte Klartextmeldung weitergegeben wird. Zusätzlich kann zu jeder Alarmbedingung ein Hilfstext angegeben werden, der dem Operateur Hinweise zur Behebung des Fehlers gibt.

Eine Gruppe, für die eine Alarmbedingung gelten soll, kann dabei sowohl aus nur einem Element bestehen, als auch weitere Gruppen umfassen. Es ist also möglich, eine Gruppenhierarchie aufzubauen.

Zusätzlich gibt es Alarmbedingungen, die nur dann wirksam werden, wenn alle Alarmbedingungen einer Gruppe erfüllt sind. Wenn zum Beispiel alle Netzgeräte der Quadrupolmagnete gleichzeitig ausfallen, weil die gemeinsame Spannungsversorgung fehlerhaft ist, dann ist es für den Operateur nicht hilfreich, wenn über zwanzig Fehlermeldungen gleichzeitig aktiv werden. Stattdessen kann eine spezielle Bedingung definiert werden, so dass nur eine Meldung erscheint, z.B. „`Alle Netzgeräte der Quadrupolmagnete ausgefallen`“.

Ein spezieller Fehler ist der Ausfall eines Kontrollrechners. Auch in diesem Fall wäre mit einer Flut von Fehlermeldungen zu rechnen. Da aber jeder Kontrollrechner über einen unterschiedlichen Satz an angeschlossenen Geräten verfügt, und ein Rechnerausfall grundsätzlich EPICS Fehler für alle Monitore erzeugt, die auf diesen Rechner zugreifen, ist dieser Fehler gesondert abgefangen. Beim Ausfall eines Kontrollrechners wird ein fest einprogrammierter Fehler angezeigt, der den Namen des ausgefallenen Rechners nennt. Alle Folgefehler werden unterdrückt.

Die Festlegung einer Alarmbedingung bleibt einem erfahrenen Operateur vorbehalten, da bekannt sein muss, wie das Kontrollsystem den Fehler darstellt und wie das Gerät reagiert. Um die Definition so weit wie möglich zu vereinfachen, wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Editor für die Alarmbedingungen entwickelt.

Dieser Editor (die Abbildungen 9.3 und 9.4 zeigen die grafische Oberfläche) ermöglicht das neue Anlegen, das Löschen und die Modifikation von Alarmbedingungen und schreibt die Parameter in die Oracle-Datenbank, so dass immer nur eine Quelle für diese Daten existiert. Ein Konsistenzcheck ermöglicht das Auffinden von Fehlern vor dem Starten des

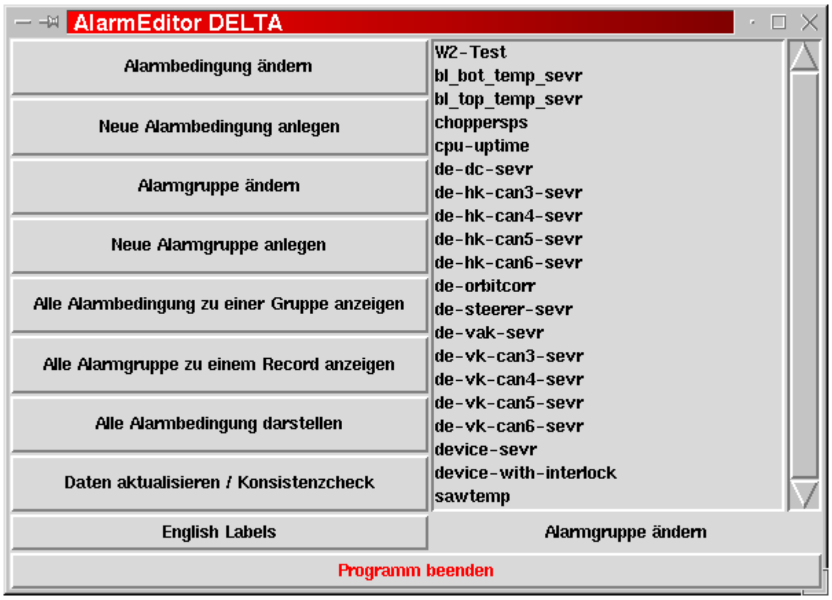


Abbildung 9.3: *Hauptfenster des Editors für Alarmbedingungen. Auf der rechten Seite wird eine Namensliste der bereits existierenden Alarmgruppen angezeigt.*

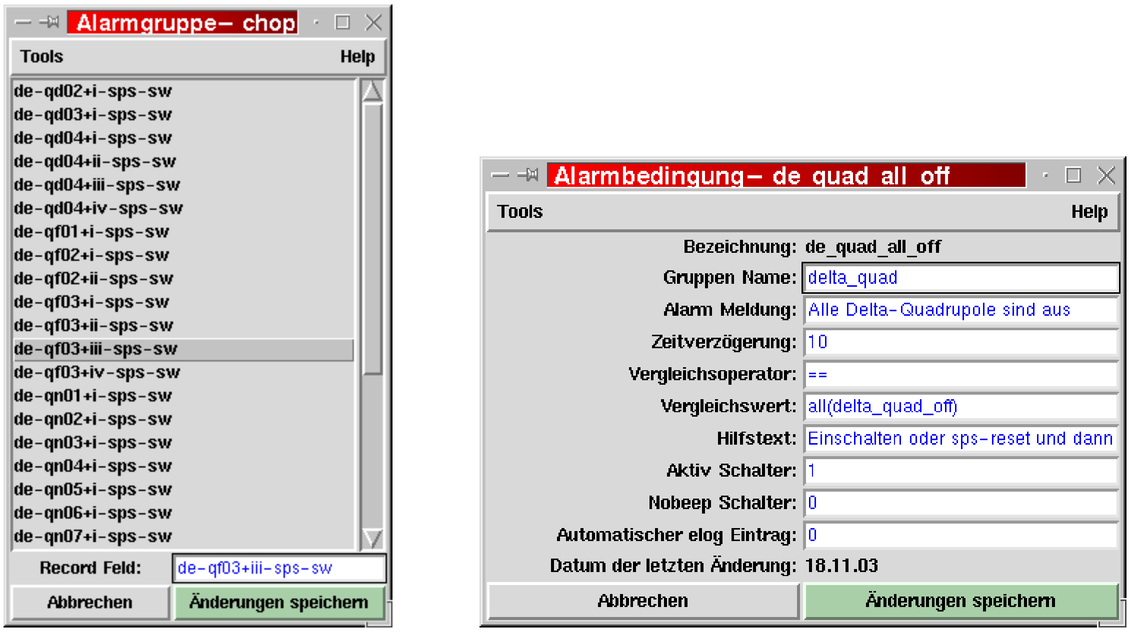


Abbildung 9.4: *Die linke Abbildung zeigt den Editor für Alarmgruppen, die bei der gleichen Bedingung einen Alarm anzeigen sollen. Eine Gruppe mit nur einem Element ist genauso erlaubt wie die Nennung von Untergruppen. Das rechte Fenster zeigt die Festlegung einer Alarmbedingung, die für die angegebene Alarmgruppe (*`Gruppen Name`*) angelegt werden soll.*

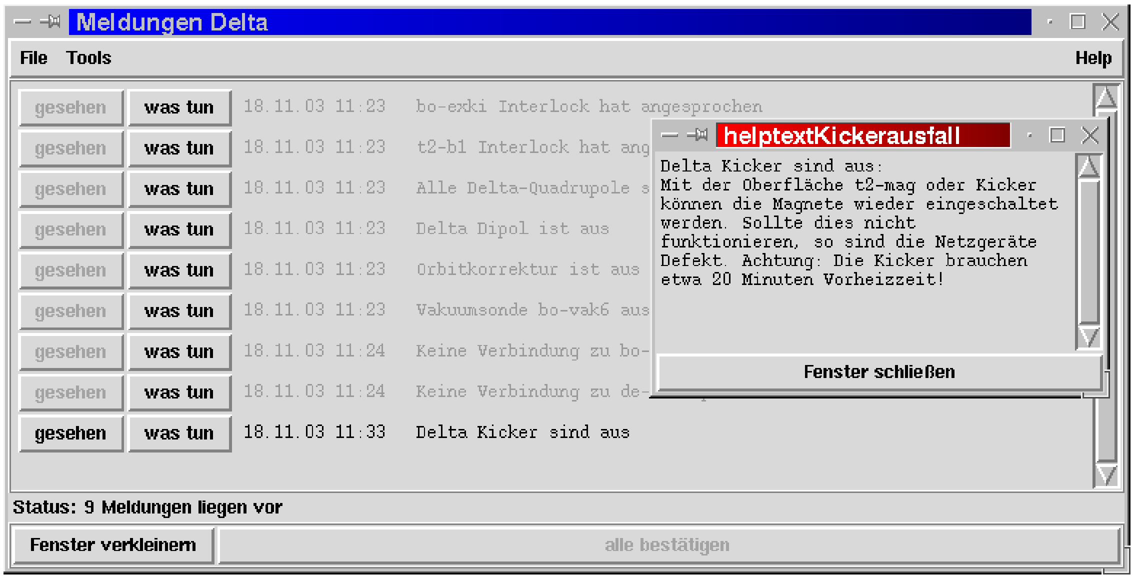


Abbildung 9.5: *Der Meldungsagent stellt die Alarmmeldungen des Alarmagenten dar. Als Agent bietet der Meldungsagent den Dienst an, Meldungen aus beliebiger Quelle darzustellen. Die Schaltfläche “*`Was Tun`*“ öffnet ein separates Fenster (hier vor dem Hauptfenster dargestellt), das einen Hilfstext enthält.*

Alarmagenten. Außerdem meldet der Editor, wenn die eingegebene Bedingung bereits existiert. Dies soll die Pflege der Konfigurationen durch verschiedene Personen vereinfachen. Im Prinzip könnte jeder Operateur die Alarmbedingungen für sein Spezialgebiet selbst festlegen und pflegen.

Der Alarmagent liest jede Nacht die Konfiguration für die Alarmbedingungen neu aus der Datenbank. Änderungen werden also nicht sofort wirksam, es sei denn der Alarmagent wird angehalten und neu gestartet oder über einen Agentendienst zum Lesen seiner Konfiguration veranlasst.

9.3 Der Meldungsagent

Der Meldungsagent dient als Darstellungsoberfläche für den Alarmagenten und andere Client-Agenten, die Meldungen anzeigen lassen wollen. Es können problemlos mehrere Instanzen des Meldungsagenten laufen, allerdings müssen Agentenprogramme, die eine Nachricht veröffentlichen wollen, ihre Nachricht explizit an jeden laufenden Meldungsagenten schicken. Der Alarmagent schickt nach dem Programmstart zunächst eine Liste mit allen derzeit anliegenden Alarmmeldungen an alle laufenden Instanzen des Meldungsagenten. Weitere Änderungen werden dann jeweils einzeln geschickt. Wird ein Meldungsagent nach dem Alarmagenten gestartet, so fragt er eine Liste aller Meldungen ab.

Eine Meldung erscheint als eine Zeile im Bildschirmfenster das Meldungsagenten. Den Anfang der Zeile machen zwei Schaltflächen mit den Aufschriften “`gesehen`“ und „`was tun`“, die zur Quittierung und die Anzeige des Hilfstextes dienen. Anschließend werden Datum und Uhrzeit angezeigt, zu denen die Meldung ausgegeben wurde. Den Rest der Zeile bildet die eigentliche Meldung. Abbildung 9.5 zeigt das Bildschirmfenster des Meldungsagenten und ein Hilfstext-Fenster davor.

Für den Meldungsagenten besteht eine Meldung aus maximal fünf Parametern, von denen jedoch nur die Kennung der Meldung zwingend erforderlich ist:

1. **Kennung**: Eine beliebige Zeichenkette, welche die Meldung identifiziert. Nachrichten mit der gleichen Kennung werden überschrieben. Die Kennung ist auch zum Löschen einer Meldung über einen Agentendienst notwendig.

2. **Meldung**: Die eigentliche Meldung. Alle Zeichen nach dem sechzigsten werden abgeschnitten, längere Meldungen erzeugen jedoch keinen Fehler. Wenn dieser Parameter nicht angegeben wird, so wird die Standardnachricht ausgegeben („`Identifikation $Kennung von Kanal $Client erhalten`“ wobei $Kennung und $Client ersetzt werden).

3. **Hilfstext**: Der Hilfstext wird angezeigt, wenn der Operateur auf die zu einer Meldung gehörende Schaltfläche mit der Aufschrift „was tun“ klickt. Wenn dieser Parameter nicht angegeben wird, so erscheint die Meldung „`Kein Hilfstext vorhanden. Bei schweren Problemen den PvD anrufen.`“

4. **Stiller Alarm**: Wenn hier eine Eins angegeben wird, so ertönt kein akustisches Signal beim Anzeigen der Meldung. Wird eine Null angegeben, so ertönt der Alarmton. Wird der Parameter nicht gesetzt, so wird er automatisch als Eins gewertet.

5. **Löschmarker**: Dieser Marker gibt an, ob die Meldung bei einer Bestätigung durch den Operateur sofort gelöscht wird, oder ob die Meldung explizit vom Client-Agenten glöscht werden soll. Eine Eins bedeutet eine Quittierung durch den Operateur, eine Null steht für eine Quittierung durch den Agenten. Wird der Parameter nicht angegeben, so wird er automatisch als Eins gewertet.

Alle Meldungen müssen vom Operateur quittiert werden. Erscheinen mehrere Meldungen gleichzeitig, so können sie gesammelt quittiert werden. Gegebenenfalls verstummt mit der Quittierung auch der akustische Alarm. Je nach Parameterkonstellation wird mit der Quittierung auch die Meldung gelöscht.

Sowohl das Erscheinen von Meldungen als auch die Quittierung durch den Operateur oder Client-Agenten wird in einer Protokolldatei mitgeschrieben, so dass sich später rekonstruieren lässt, ob und wann ein Operateur Kenntnis von einer Meldung genommen hat.

Meldungen, die vom Alarmagenten geschickt werden, werden nicht anders behandelt, als Meldungen aus anderen Quellen. Der Löschmarker ist grundsätzlich bei diesen Meldungen nicht gesetzt, so dass die Quittierung durch den Operateur nur der Kenntnisnahme und dem Abstellen des akustischen Alarms dient. Die Meldungen werden durch den Alarmagenten quittiert und sind solange sichtbar, wie die Ursache für den Alarm anliegt. Dies soll gewährleisten, dass auch spätere Schichtbesatzungen über einen Alarm informiert werden, selbst wenn der Schichtoperateur diesen bereits quittiert hat.

In der Praxis hat sich gezeigt, dass der Meldungsagent von vielen Operteuren als Störung empfunden wird. So werden auch Meldungen angezeigt, die dem Operateur bereits aus anderen Quellen bekannt sind oder die er als nicht relevant einstuft. Darunter fallen zum Beispiel Alarmmeldungen von Temperatursensoren, die eine Schwellenüberschreitung anzeigen. Ist die Schwelle wieder unterschritten, so verschwindet der Alarm. Wenn die Temperatur nun um die Schwellentemperatur herum schwankt, so wird das häufige Auftreten des bereits bekannten Alarms als störend empfunden. Generell geht die Forderung dahin, dass der Meldungsagent nur *interessante* Meldungen anzeigen soll, wobei eine Definition von „interessant“ nicht allgemeingültig formuliert werden kann.

Es hat sich als nützlich erwiesen, dass der Alarmagent die detektierten Alarme in einer Datei protokolliert. Dadurch sind die aufgetauchten Probleme zumindest im Nachhinein zu analysieren, selbst wenn der Operateur den Meldungsagenten beendet hat.

Am Beispiel des Meldungsagenten ist ein wesentliches Problem neuer Software deutlich geworden: Der Nutzer muss sich an die Handhabung gewöhnen und reagiert in der Regel mit Ablehnung, wenn er das Gefühl hat, dass das neue Programm ihm lediglich zusätzliche Arbeit bereitet. Trotzdem ist der Nutzen des Alarmagenten durch diese Ablehnung nicht betroffen, da er anderen Agenten, im Speziellen dem T2-Experten, die Alarme auch direkt zur Verfügung stellt.

9.4 Der Statusagent

Der Statusagent hat die Aufgabe, den Zustand der Beschleunigeranlage zu beschreiben und zu bewerten. Zu diesem Zweck sind Regeln notwendig, die genau spezifizieren, welche Merkmale einen Zustand beschreiben. Diese Regeln sind für den Statusagenten in der Oracle-Datenbank gespeichert und können über ein Editorprogramm ohne Kenntnisse der Datenbank angepasst werden.

Wie beim Alarmagenten ist es wichtig, dass der Statusagent unabhängig von einer Oberfläche arbeitet, die versehentlich geschlossen werden könnte. Um die erkannten Zustände und Zustandsänderungen trotzdem nachvollziehen zu können, bietet der Statusagent Agentendienste an und schreibt seine Ergebnisse in einer Protokolldatei mit.

Der globale Status der gesamten Beschleunigeranlage ist aus verschiedenen Stati zusammengesetzt, wie zum Beispiel aus den Stati des Linac, des Beschleunigerrings Bodo, des T2 und des Speicherrings Delta. Es spielen aber auch noch andere Stati eine Rolle, die mehrere (oder alle) Teilsysteme betreffen, wie der Status des Vakuumsystems oder des Kontrollsystems. Für jedes Subsystem ist zu entscheiden, ob es für einen übergeordneten Zustand zwingend notwendig ist oder ob der übergeordnete Zustand mit Hilfe einer Zusatzbedingung grundsätzlich festgelegt werden kann.

Als Beispiel soll der Transferkanal T2 betrachtet weden:

> Damit der T2 als eingeschaltet gelten kann, sollten die Netzgeräte der Magnete eingeschaltet sein, das Timing-System sollte Triggerimpulse liefern und die Ventile sollten geöffnet sein (was momentan nur über Kommunikation mit dem Nutzer feststellbar ist, da es sich um manuell einstellbare Ventile handelt). Diese Bedingungen sind alle zwingend erforderlich.
>
> Außerdem ist davon auszugehen, dass bei positiver Transfereffizienz der Transferkanal T2 eingeschaltet ist, selbst wenn andere Vorbedingungen angeblich nicht erfüllt sind. Es gibt dann offensichtlich an irgendeiner Stelle Fehler in der Auslese oder in der Konfiguration. Der Zustand sollte in so einem Fall durch die positive Transfereffizienz dominiert werden.
>
> Zusätzlich kann man überlegen, ob die Einstellungen der Schirmmonitore im Status berücksichtigt werden sollten, da es trotz eingeschalteten Komponenten nicht zu einer Stromakkumulation im Speicherring kommt, wenn sich die Monitore im Weg des Elektronenstrahls befinden.

Eine Status-Regel muss also Gewichtungen vorsehen, mit denen die Relevanz eines Subzustandes für den übergeordneten Zustand beschrieben werden kann. Für den Statusagenten wird die Relevanz eines Subzustandes als Prozentzahl angegeben.

Außerdem muss beachtet werden, dass ein Zustand *teilweise* erfüllt sein kann. Einerseits gibt es Systeme, bei denen ein Zwischenzustand nicht existiert: ein Gerät ist entweder an oder aus. Andererseits ist es möglich, dass es mehrere Zwischenstufen gibt, vor allem bei Systemen, die größere Gebiete zusammenfassen (also aus mehreren einzelnen Stati zusammen gesetzt sind). Um beide Fälle darstellen zu können, wird ein Zustand durch den Statusagenten mit einem Prozentwert bewertet. Alle Bewertungen größer null und kleiner hundert Prozent bedeuten dabei eine teilweise Erfüllung der Bedingungen. Der Prozentwert stellt also die Wahrscheinlichkeit dar, mit der ein Zustand anliegt.

Für einen übergeordneten Status bedeutet dies, dass er aus den Wahrscheinlichkeiten seiner Subzustände abgeleitet wird, die jeweils mit der Relevanz dieses Subzustandes für den übergeordneten Zustand gewichtet werden. Es muss natürlich darauf geachtet werden, dass eine vollständige Erfüllung aller Vorbedingungen eine Wahrscheinlichkeit von 100% ergibt.

Um dies zu verdeutlichen, wird nochmals das oben diskutierte Beispiel des Transferkanals T2 aufgegriffen:

> Die folgenden vier Bedingungen sollen jeweils eine Relevanz von 25% für den Einschaltzustand des Transferkanals haben:
>
> Subzustand 1: Magnetnetzgeräte sind eingeschaltet
> Subzustand 2: Triggerimpulse liegen an
> Subzustand 3: Ventile sind geöffnet
> Subzustand 4: Schirmmonitore sind herausgefahren
>
> Wenn diese Subzustände alle erfüllt sind, also eine Wahrscheinlichkeit von 100% aufweisen, dann ist damit auch der übergeordnete Zustand erfüllt. Ist einer der Zustände nicht oder nur teilweise erfüllt, so ist auch der Gesamtzustand nur teilweise erfüllt. Die Subzustände müssen auch nicht alle die gleiche Relevanz haben. So könnte man zum Beispiel den Subzuständen 1 bis 3 eine Relevanz von 30% und dem Subzustand 4 eine Relevanz von 10% zuordnen. Dies würde bedeuten, dass der Gesamtzustand „Transferkanal T2 eingeschaltet“ immer noch eine Wahrscheinlichkeit von 90% hätte, auch wenn die Schirmmonitore nicht herausgefahren wären.
>
> Dem Subzustand 5 „Transfereffizienz positiv“ sollte eine Relevanz von 100% zugeordnet werden, damit er die Wahrscheinlichkeit des Gesamtzustandes dominiert. Natürlich muss bei der Berechnung der Wahrscheinlichkeit eine Bewertung von mehr als 100% ausgeschlossen werden.
>
> Zusätzlich kann jedem Subzustand ein Wahrheitswert zugeordnet werden, der diesen Subzustand als notwendige Voraussetzung für den Gesamtzustand kennzeichnet. Hat dann dieser notwendige Zustand eine Wahrscheinlichkeit von 0%, so sollte auch der Gesamtzustand mit 0% bewertet werden, unabhängig von den anderen Subzuständen. Im vorliegenden Beispiel wäre der Schaltzustand der Magnetnetzgeräte als notwendig zu bewerten.

Die vom Statusagenten aufgebaute Struktur ist von vornherein flexibel und erweiterbar ausgelegt. Dazu wurden zwei Gruppen von Zuständen vorgesehen:

- die *Basiszustände*, die den Zustand einzelner EPICS-Records überwachen
- die *zusammengesetzten Zustände*, die auf einer Liste von Zuständen beruhen, die jeweils als notwendig gekennzeichnet werden können und zu denen die Relevanz des Unterzustandes angegeben wird.

Die zusammengesetzen Zustände können sowohl aus Basiszuständen als auch aus anderen zusammengesetzen Zuständen bestehen, wobei eine Mischung ebenfalls zulässig ist. Alle Zustände haben nach dem Anlegen mit dem Editor (siehe Abbildung 9.6) eine eindeutige

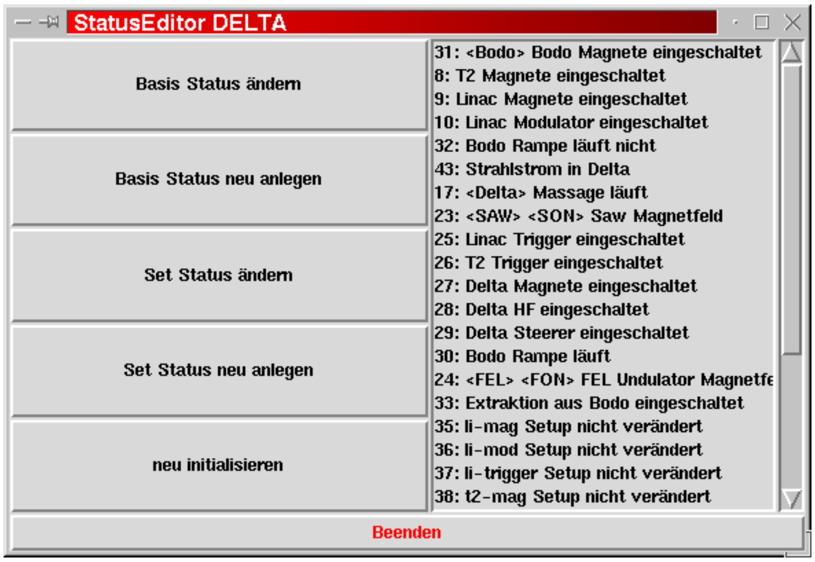


Abbildung 9.6: *Hauptfenster des Editors für Systemzustände des Statusagenten. Die Liste auf der rechten Seite zeigt einige der Basiszustände mit ihrer Kennung und ihrem Titel.*

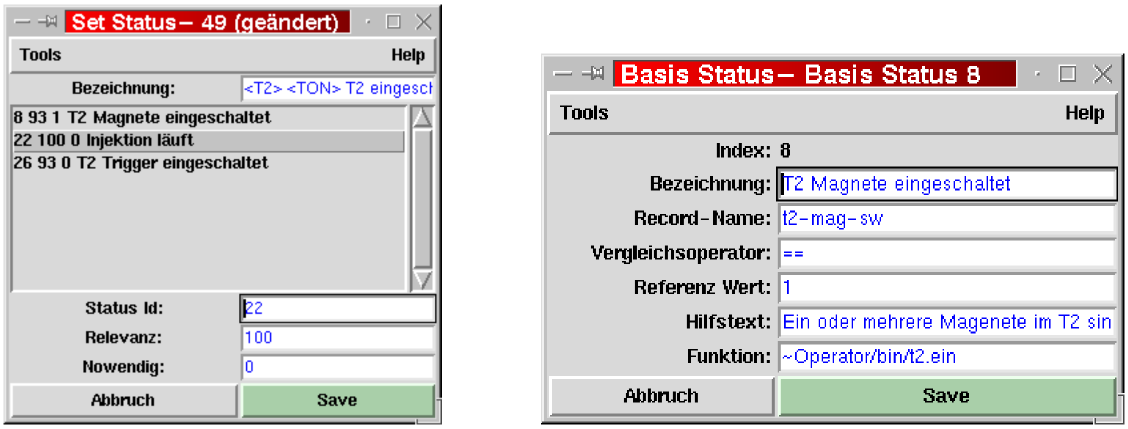


Abbildung 9.7: *Das rechte Bild zeigt die Konfiguration eines Basiszustandes, der durch ein EPICS-Record definiert ist. Im linken Bild ist ein zusammengesetzter Zustand mit seinen Einzelkomponenten dargestellt. Die dargestellten Programmfenster gehören zum Editor des Statusagenten und werden von dort bei Bedarf aufgerufen.*

Kennnummer, über die der Zustand referenziert werden kann. Außerdem hat jeder Zustand einen Titel, der den Zustand für den Operateur beschreibt.

Bei zusammengesetzten Zuständen wird die Gesamtwahrscheinlichkeit, dass dieser Zustand anliegt, aus den Wahrscheinlichkeiten der Teilzustände berechnet, gewichtet mit der Relevanz des Teilzustandes. Dabei bleibt die zeitliche Abfolge unberücksichtigt, in der die Teilzustände sich verändern. Abbildung 9.7 zeigt links einen zusammengesetzten Zustand mit seinen Teilzuständen. Die Zahlen vor der Klartextbezeichnung sind die Kennnummern des Zustandes, die Relevanz in Prozent und die Notwendigkeit. Ist die Relevanz eines Zustandes mit hundert Prozent angegeben, so dominiert dieser Zustand die Gesamtwahrscheinlichkeit. Wenn die dritte Zahl gleich eins ist, handelt es sich um einen notwendigen Subzustand. Diese Zahlen lassen sich editieren, während der Klartext aus der Definition des Teilzustandes bekannt ist.

Ein Beispiel für einen Basiszustand ist der Schaltzustand der Magnete im Transferkanal T2. Die nötigen Parameter sind im rechten Bild von Abbildung 9.7 dargestellt, wobei die Angabe des Record-Namens der entscheidende Teil ist. Um Systemzustände durch einzelne Records überwachen zu können, wurden im Rahmen dieser Arbeit die Zustände von Magnetnetzgeräten mit Hilfe von EPICS-Records zusammengefasst. Dadurch ist es nun möglich, die Schaltzustände, Setup-Namen[3] und Abweichungen von der Setup-Einstellung zu detektieren.

Neben der Möglichkeit, über die Agentenkommunikation Informationen zu einzelnen Stati oder dem gesamten Statusgeflecht abzufragen, stellt der Statusagent einen Dienst bereit, um sich regelmäßig die wichtigsten Strahlparameter des Speicherrings senden zu lassen. Eine solche Nachricht enthält den derzeitigen Strahlstrom, die Lebensdauer des Elektronenstrahls, das Produkt aus Strahlstrom und Lebensdauer, die Transfereffizienz und die aktuelle Zeit.

9.5 Der Darstellungsagent

Die Intention zur Entwicklung des Darstellungsagenten (siehe Abbildungen 9.8 und 9.9) war die übersichtliche Darstellung der Beschleunigeranlage. Es sollten möglichst viele Informationen in gebündelter Form zur Verfügung gestellt werden. Um zusätzlich eine einfache Erweiterbarkeit zu erreichen, wurde die grafische Oberfläche ähnlich einem Karteikasten gestaltet. Man kann zwischen verschiedenen Funktionen oder „Karteikarten“ wählen, deren Titel jeweils im oberen Teil des Bildschirmfensters angezeigt werden. Derzeit sind drei Funktionen implementiert: der so genannte *Pfadfinder*, eine *Setupoberfläche* und eine Darstellung des *Maschinenstatus*.

Die Pfadfinderoberfläche

Die *Pfadfinderoberfläche* zeigt eine Zeichnung der Anlage und rechts daneben eine Liste von Gerätebezeichnungen (siehe Abbildung 9.8). Mit Hilfe dieses Programmteils ist es möglich, aufgrund von Einbaunamen oder Kontrollsystemnamen, den Standort eines Gerätes herauszufinden. Dabei werden alle Geräte, die zu einem Kontrollsystemnamen gehören

[3] Ein *Setup* fasst die Setzwerte einer Gerätegruppe zusammen. Setups werden von einem Darstellungsrechner aus auf Anweisung des Operateurs in Dateien abgespeichert oder aufgrund einer Datei in EPICS-Records geladen.

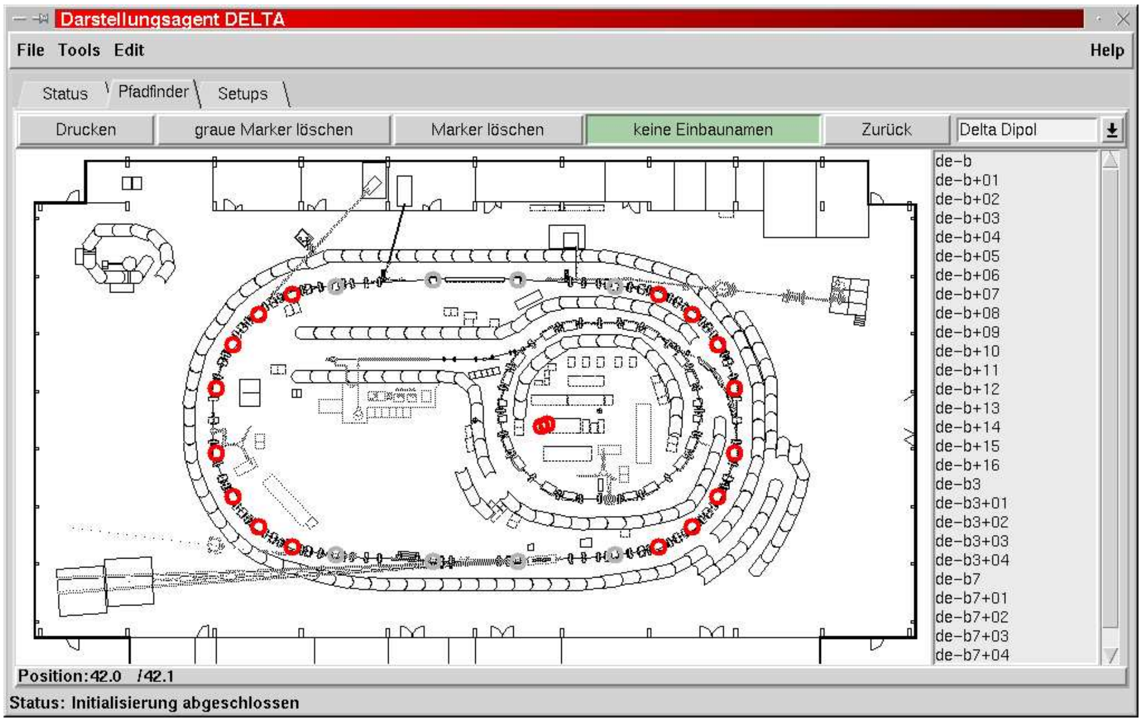


Abbildung 9.8: *Die Lokalisierung von Komponenten innerhalb des Beschleunigers kann problematisch werden, wenn jeweils nur der Kontrollsystemname oder der Einbauname der Komponente bekannt sind. Diese Teiloberfläche des Darstellungsagenten ermöglicht die Suche und Darstellung der Positionen aufgrund von Einträgen in der Oracle-Datenbank.*

angezeigt, also zum Beispiel alle Dipolmagnete und das zugehörige Netzgerät. Wenn von einem Element kein genauer Name bekannt ist, aber die Funktionsgruppe (z.B. Vakuum oder Diagnose) oder der ungefähre Standort, so kann nach dem Element gesucht werden.

Die Konfiguration des Pfadfinders ist in der Oracle-Datenbank gespeichert und kann einfach um neue Geräte erweitert werden. Zusätzlich ist auch die Skalierung der Zeichnung gespeichert, so dass neue Entwicklungen, wie der Aufbau einer Beamline, auch grafisch eingebunden werden können. Die Skalierung der Zeichnung und die Aufnahme von neuen Geräten in die Datenbankkonfiguration sind über einen Menü-Punkt im Darstellungsagenten einfach zu erreichen.

Die Setupoberfläche

Bisher wurden die Sollwertvorgaben für eine Gerätegruppe (so genannte *Setups*) aus einem zu dieser Gerätegruppe gehörenden Steuerprogramm geladen und gespeichert. Dies ermöglicht zwar eine sofortige Kontrolle der geladenen Werte, beim Abspeichern eines gesamten Maschinenzustandes werden jedoch häufig einzelne Gruppen übersehen und sind dann später nicht mehr konsistent zu rekonstruieren. Um dieses Problem zu lösen, wurde die *Setupoberfläche* in den Darstellungsagenten integriert. Sie zeigt die Namen der zuletzt geladenen Setups und gibt gleichzeitig an, ob diese Setups noch in ihrem ursprünglichen Zustand in der Maschine anliegen.

Dieser Vergleich zwischen Setup und Ist-Zustand wurde im Rahmen dieser Arbeit durch eine Konstruktion von EPICS Records realisiert, die je nach Gerätegruppe konfiguriert

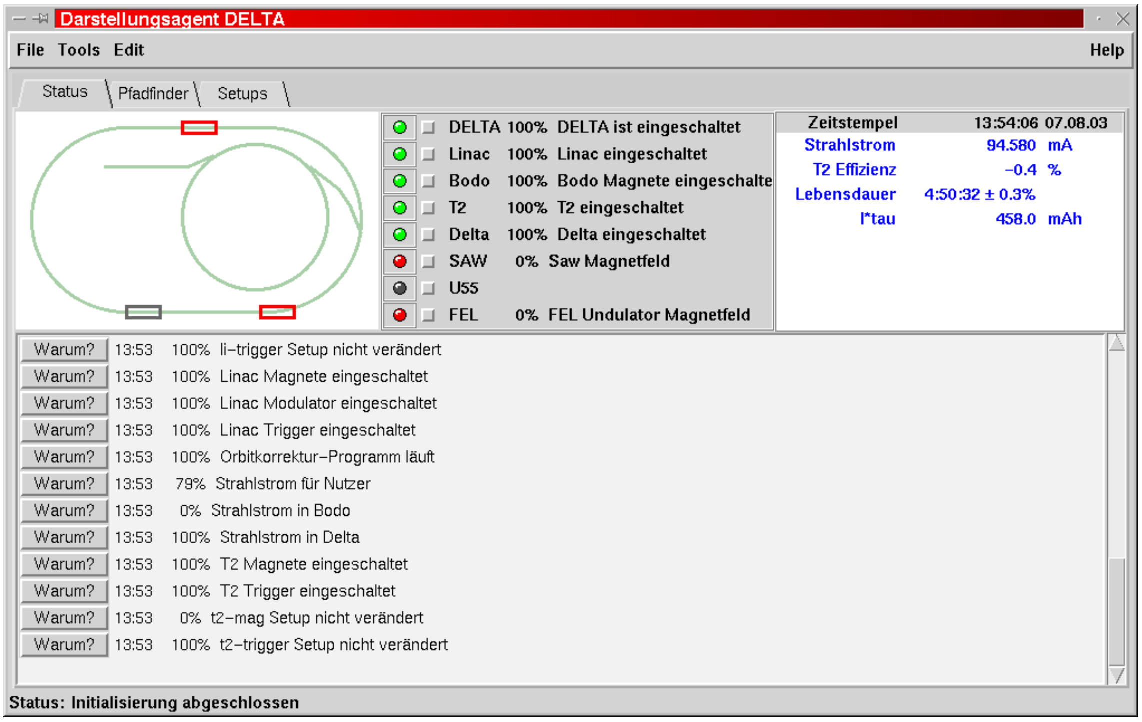


Abbildung 9.9: *Eine Teiloberfläche des Darstellungsagenten liefert den Status des Beschleunigers, so wie er vom Statusagenten detektiert wird. Jede Einzelmeldung kann auf ihre Voraussetzungen überprüft werden („Warum?"), so dass die Schlussfolgerungen des Statusagenten nachvollzogen werden können.*

werden kann. Die Rampensteuerung des Beschleunigers Bodo beruht nicht auf Setups (siehe [22]), wird aber der Vollständigkeit halber mit dargestellt und läßt sich auch bearbeiten.

Vom Darstellungsagenten aus können für die in Kapitel 8.1 genannten Gerätegruppen Setups geladen und gespeichert werden. Außerdem ist es möglich, gleichzeitig Setups für alle Gruppen zu speichern. Zusätzliche Funktionen sind das Laden und Vorgeben von Standardsetups, der Vergleich eines Setups mit den derzeit eingestellten Werten und das Editieren von Setups.

Die Statusoberfläche

Die *Statusoberfläche* stellt die Informationen des Statusagenten für den Operateur dar. Sie ist in vier Abschnitte aufgeteilt, um einen schnellen Überblick zu liefern (siehe Abbildung 9.9).

Oben links findet sich eine schematische Darstellung der Beschleunigeranlage, in welcher der Zustand einzelner Maschinenteile durch Farbgebung dargestellt ist. Dabei bedeutet rot „ausgeschaltet", gelb „teilweise eingeschaltet", grün „eingeschaltet" und dunkelgrau „keine Informationen". Unmittelbar daneben (oben Mitte) sind die gleichen Informationen im Klartext dargestellt. Die Informationen stammen vom Statusagenten, werden vom Darstellungsagenten aber nicht anders behandelt als andere Zustandsinformationen. Ob ein Zustand in diesem Teil des Darstellungsagenten angezeigt wird, ist vielmehr in der Klartextbeschreibung des Zustandes angegeben. So genannte *Tags* (engl. für Etikett) zeigen dem Darstellungsagenten an, ob ein Zustand für einen Teilbereich der Maschine bedeutend ist. Die Anzahl der gekennzeichneten Zustände für einen Maschinenteil ist nicht begrenzt, es wird jedoch immer nur der Zustand mit der größten Wahrscheinlichkeit dargestellt.

Rechts oben auf der Statusoberfläche werden ausgewählte Informationen in Zahlenform angezeigt. Die Liste wird vom Statusagenten vorgegeben und umfasst derzeit:

- den Strahlstrom im Speicherring Delta
- die Lebensdauer des Elektronenstrahls im Speicherring
- das Produkt aus Strahlstrom und Lebensdauer
- die Transfereffizienz
- den Zeitpunkt, zu dem die Werte gemessen wurden

Die Werte werden jeweils mit Bezeichnung und Einheit dargestellt, so dass der Operateur kein Vorwissen benötigt.

Im unteren Teil der Statusoberfläche sind alle Zustände, die dem Statusagenten bekannt sind, aufgelistet. Eine Zeile enthält jeweils die aktuelle Wahrscheinlichkeit des Zustandes, die Klartextbeschreibung und eine Schaltfläche. Durch die Schaltfläche (beschriftet mit „Warum?“) kann der Operateur ein Fenster aufrufen, in dem weitere Informationen zu dem Zustand angezeigt werden. Handelt es sich um einen Basiszustand, so ist neben dem zugehörigen EPICS Record auch der Vergleichswert aufgeführt. Für einen zusammengesetzten Zustand sind die Wahrscheinlichkeiten aller zugehörigen Zustände aufgelistet. Die Schaltflächen geben dem Operateur damit die Möglichkeit nachzuvollziehen, warum der Statusagent einen Zustand mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit bewertet.

Zusammen mit dem Meldungsagenten stellt der Darstellungsagent den aktuellen Zustand aller Maschinenkomponenten dar und ermöglicht dem Operateur so einen schnellen und umfassenden Überblick, der aufgrund der Klartext-Darstellung und der Bewertungen durch den Statusagenten auch ohne Erfahrung einen Eindruck von der Situation vermittelt.

9.6 Der T2-Experte

Der T2-Experte ist ein intelligenter Agent, der die Injektion in den Speicherring Delta aufgrund eines heuristischen Algorithmus selbständig optimieren kann. Damit ersetzt er in Standardsituationen einen erfahrenen Operateur und macht eine erfolgreiche Injektionsphase durch einen unerfahrenen Operateur möglich.

Zwei wichtige Voraussetzungen, nämlich die Bewertung des Maschinenzustandes und die Überwachung auf Fehlerzustände, werden vom Statusagenten und vom Alarmagenten des Agentensystems übernommen, so dass der T2-Experte auf deren Resultate zurückgreifen kann. Damit ist sichergestellt, dass ein Optimierungsversuch nur dann unternommen wird, wenn die generellen Randbedingungen erfüllt sind. Es wird zum Beispiel überprüft, ob überhaupt Injektionsbetrieb vorliegt und ob der Speicherring eingeschaltet ist.

Bewertung der Transfereffizienz

Die Optimierung der Injektion erfolgt aufgrund der Transfereffizienz, die großen Schwankungen unterworfen ist (siehe Kapitel 5.6). Eine Bewertung der gemessenen Werte ist daher eine Grundfähigkeit des T2-Experten.

Ein erfahrener Operateur kann die Transfereffizienz aufgrund ihrer Vergangenheit, also der letzten paar Messwerte, und eines Erwartungswertes beurteilen. Der T2-Experte beurteilt aufgrund der gleichen Kriterien und vergibt eine Punktewertung. Je mehr Punkte vergeben werden, desto besser ist der Injektionsvorgang zu bewerten.

- Negative Transfereffizienzen bekommen generellen Punktabzug, treten sie mehr als einmal in Folge auf, wird dies nochmal schlechter beurteilt.
- Ist die aktuelle Transfereffizienz größer als die letzte, so ist dies positiv, ansonsten gibt es Punktabzug. Außerdem werden besonders große Abweichungen des aktuellen Wertes zu vorherigen bewertet.
- Es wird ein Mittelwert über die letzten vier Transfereffizienzen gebildet. Ist der Mittelwert einschließlich der aktuellen Transfereffizienz deutlich unterschiedlich zum vorherigen Mittelwert, so wird dies je nach Richtung der Veränderung gewertet.
- Durch den maximalen und den minimalen Wert der Transfereffizienz über die letzten vier Injektionen wird ein Bereich definiert. Liegt der aktuelle Messwert außerhalb dieses Bereichs, so wird dies je nach Richtung der Abweichung bewertet.

Der T2-Experte bewertet jeden Messwert der Transfereffizienz auf dieselbe Weise und ist damit wesentlich reproduzierbarer in seiner Bewertung als ein menschlicher Operateur. Die erhaltene Bewertung wird in eine Klartextmeldung übersetzt und auf der Oberfläche (siehe Abbildung 9.11) angezeigt. Dies ermöglicht es einem Operateur, die Bewertung des T2-Experten mit der eigenen zu vergleichen. Derzeit dient diese Anzeige vor allem zur Überwachung des Agenten; zukünftig können anhand dieser Angaben jedoch auch Operateure geschult werden.

Der Optimierungs-Algorithmus

Der Algorithmus, nach dem der T2-Experte die Injektion optimiert, ist dem Vorgehen eines erfahrenen Operateurs nachempfunden. Schematisch ist dies in Abbildung 9.10 dargestellt. Grundlage ist die Optimierung einzelner Magnete im Wechsel, wobei es zu iterativen Wiederholungen kommt.

Der T2-Experte stellt für jeden in der Oracle-Datenbank abgespeicherten Parameter des Transferkanals T2 eine Priorität fest. Aus der resultierenden Prioritätenliste wird der Parameter mit der höchsten Priorität für den ersten Optimierungsversuch ausgewählt.

Die ursprüngliche Priorität ergibt sich aus einem Wert, der in der Oracle-Datenbank gespeichert ist. Zusätzlich werden die aktuelle Sollwertvorgaben für die Magnete des Transferkanals T2 mit einem in der Datenbank gespeicherten Referenzsetup verglichen. Parameter, deren Sollwert stark von der Referenz abweicht[4], werden als potenzielle Kandidaten für eine

[4]Die Differenz zwischen aktuellem Setzwert und Referenzwert wird mit der Schrittweite verglichen, die dem T2-Experten für den Parameter vorgegeben ist. Die Schrittweite ist in der Datenbank abgespeichert, kann aber auf der grafischen Oberfläche des T2-Experten vom Operateur verändert werden.

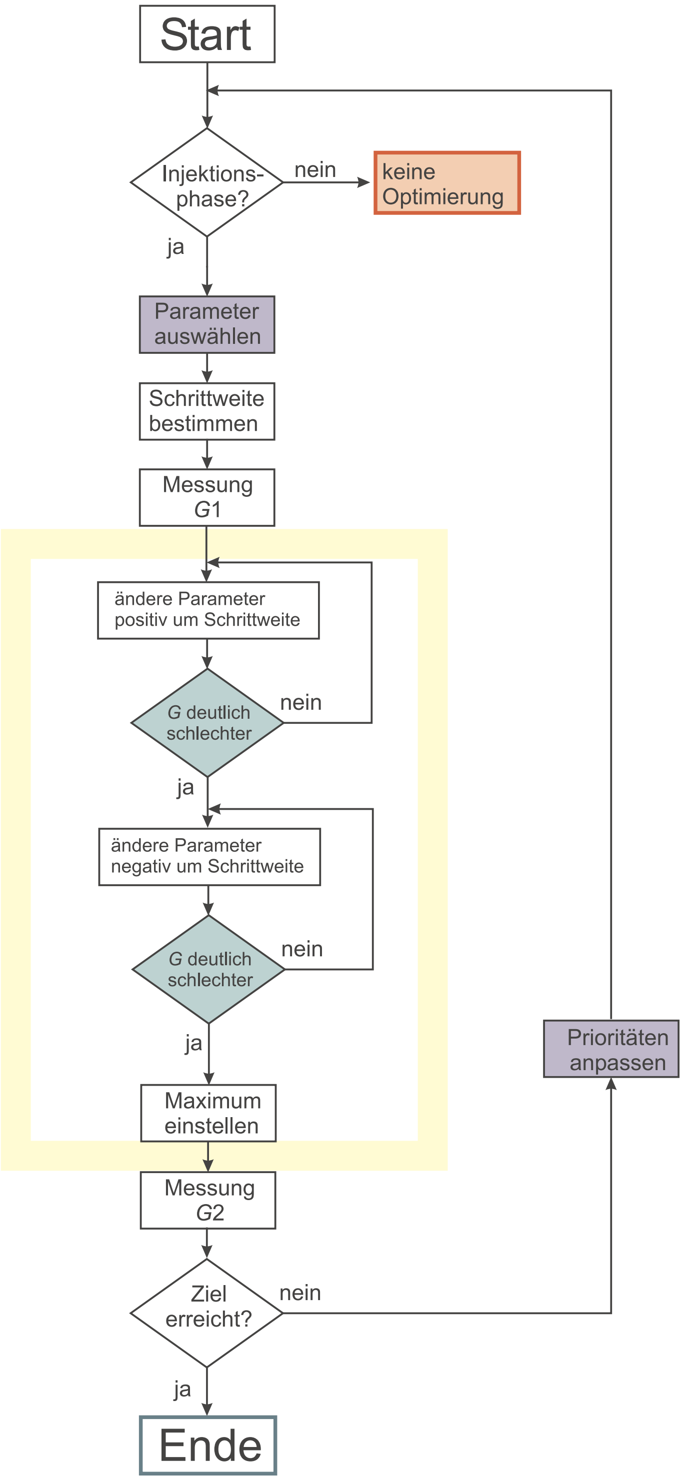


Abbildung 9.10: *Schematische Darstellung des Algorithmus, nach dem der T2-Experte die Transfereffizienz G optimiert. Der gelb umrandete Bereich enthält die eigentliche Optimierung. In violett sind die Punkte markiert, an denen der T2-Experte seine Erfahrungen einsetzt (Verwendung von Wissen). Die grün hinterlegten Verzweigungen setzen eine Bewertung der Transfereffizienz voraus, die trotz der beobachteten Schwankungen (siehe Kapitel 5.6) eine Entscheidung möglich macht.*

Optimierung betrachtet. Dementsprechend wird ihre Priorität erhöht. Dieser Vergleich der Sollwerte mit der gespeicherten Referenz findet nur beim Starten der Optimierung statt.

Dieses Vorgehen ist angelehnt an einen erfahrenen Operateur, der zunächst die Parameter optimiert, die nach seiner Erfahrung den größten Einfluss haben („die üblichen Verdächtigen"). Zusätzlich werden die Setzwerte vom Operateur mit einem Setup verglichen. Dies kann sowohl explizit oder aufgrund von erinnerten Werten („War der Wert nicht letzte Woche bei ...?") geschehen.

Das Element mit der höchsten aktuellen Priorität wird vom T2-Experten ausgewählt und optimiert. Dabei kann ein Element durchaus häufiger ausgewählt werden, jedoch nie zweimal direkt nacheinander.

Der Sollwert des ausgewählten Elementes wird nun zunächst in positive Richtung jeweils um die vorgegebene Schrittweite verändert, bis die Transfereffizienz deutlich schlechter wird. Anschließend wird vom ursprünglichen Wert aus in negative Richtung variiert, bis ebenfalls die Transfereffizienz schlechter wird. Die Schrittweite der Variation ist empirisch ermittelt und in der Datenbank gespeichert. Mit den Variationen wird der Bereich eingegrenzt, in dem das Optimum der Transfereffizienz für den betrachteten Parameter liegen sollte. Eingestellt wird nun der Sollwert, bei dem die größte Transfereffizienz erreicht wurde.

Diese Optimierung (in Abbildung 9.10 gelb umrahmt) beruht darauf, dass es für jeden einstellbaren Parameter des Transferkanals T2 eine Plateau-Kurve der Transfereffizienz gibt (als Beispiel sei auf die Abbildung 5.10 verwiesen). Die Lage und Form des Maximums ist dabei in erster Näherung von den Einstellungen aller anderen Parameter abhängig[5]. Ein erfahrener Operateur versucht die aktuelle Lage des Plateaus durch Variation des Parameters zu messen. Die optimale Einstellung für den Parameter liegt in der Mitte des Plateaus. Der T2-Experte versucht mit seiner Parametervariation, die Grenzen des Plateaus zu bestimmen.

Die Mitte zwischen den beiden Grenzen ist nur dann mit dem Optimum identisch, wenn die Parametereinstellung zu Beginn der Optimierung bereits auf dem Plateau lag. Beginnt die Optimierung außerhalb des Plateaus, so liegt das Optimum näher an einer der erkannten Grenzen. Aufgrund der Schwankungen der Transfereffizienz kann es passieren, dass nicht sofort das Optimum erreicht wird, oder dass im ungünstigen Fall das Optimum sogar außerhalb des bestimmten Bereiches liegt. Da ein Element jedoch mehrfach optimiert wird, können sich diese Schwankungen nicht dauerhaft negativ auswirken.

Durch einen Vergleich der Transfereffizienzen vor („Messung $G1$") und nach („Messung $G2$") der Optimierung bewertet der T2-Experte den Erfolg des Optimierungsschritts. Diese Bewertung ist zum Einen die Grundlage für die Entscheidung, ob die Optimierung erfolgreich beendet wird. Zum Anderen werden die Prioritäten der Parameter aufgrund der Bewertung angepasst. Wenn die Transfereffizienz nach dem Optimierungsschritt deutlich höher lag als vorher, so wird die Priorität für den Parameter erhöht. Ansonsten wird die Priorität gesenkt, da der T2-Experte annehmen muss, dass sich dieser Parameter bereits nahe an seiner optimalen Einstellung befindet.

Der T2-Experte lernt aus seinen gemachten Erfahrungen, indem er die Prioritätenliste in der Oracle-Datenbank nach einer erfolgreich abgeschlossenen Optimierung anpasst. Damit Ausnahme-Situationen nicht die gesamte bisher gemachte Erfahrung überlagern, werden

[5] Wenn die x- und z-Ebene jeweils vollständig von der anderen Ebene unabhängig wären, dann könnten nur die Parameter einen Einfluss haben, die in der gleichen Ebene wirken. Dies ist aber aufgrund der fehlenden Ablenkfreiheit der Quadrupolmagnete nicht gegeben.

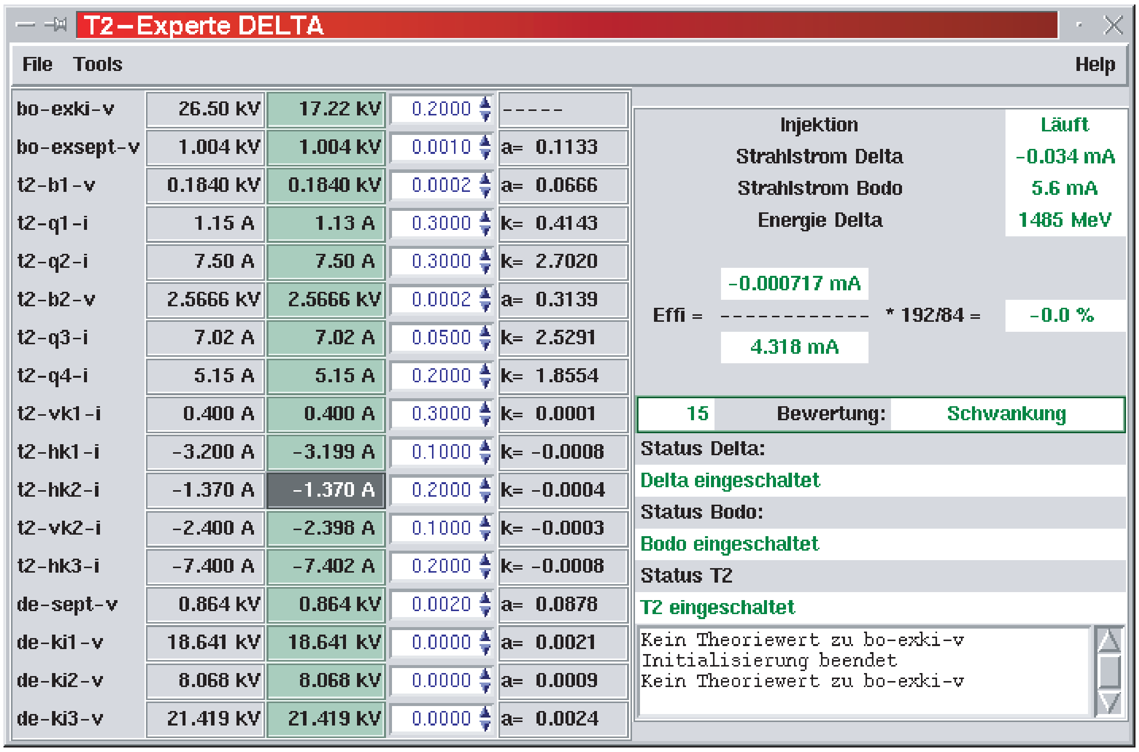


Abbildung 9.11: *Die grafische Oberfläche des T2-Experten. Auf der linken Seite werden die Optimierungsparameter des Transferkanals dargestellt. Die erste Spalte stellt den Kontrollsystemnamen dar, die zweite Spalte den Setzwert des Netzgerätes. Grün hinterlegt findet sich der Rücklesewert des Netzgerätes, wobei die Farbe den Status angibt [15]. Die Spalte mit weißem Hintergrund zeigt die einstellbare Schrittweite der Optimierungsschritte. In der letzten Spalte wird der Theoriewert dargestellt, wie er sich nach Tabelle 4.2 aus dem Setzwert errechnet.*

die neuen Prioritäten langsam gelernt. Das heißt, die aktuellen Prioritäten werden nicht einfach in die Datenbank übernommen, sondern mit den bereits gespeicherten Prioritäten verrechnet:

$$\text{Neue-Priorität} = 0{,}8 \cdot \text{Gespeicherte-Priorität} + 0{,}2 \cdot \text{Aktuelle-Priorität}$$

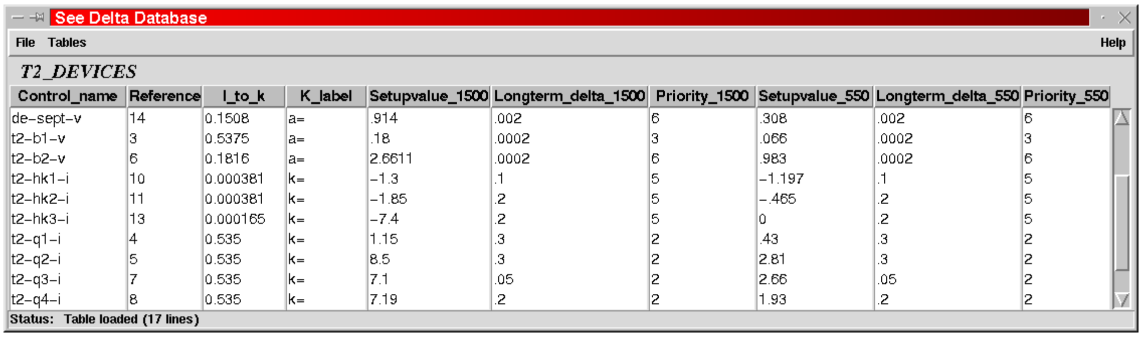
Dieser Vorgang führt dazu, dass der T2-Experte langfristig aus seinen Erfolgen lernt, ohne dass kurzfristige Schwankungen den Prozess dominieren.

Die grafische Oberfläche

Die Struktur des Programms ist modular, d.h. die Implementierung des Optimierungsalgorithmus kann ersetzt werden, ohne dass die Oberfläche oder die Bewertung der Transfereffizienz verändert werden muss. Die für die Optimierung zur Verfügung stehenden Elemente sind in der Datenbank gespeichert (siehe Abbildung 9.12) und können beliebig erweitert werden. Die grafische Darstellung wird solchen Veränderungen automatisch angepasst.

Wie Abbildung 9.11 darstellt, ist die grafische Oberfläche in zwei Teile unterteilt.

Auf der linken Seite werden die Optimierungsparameter des Transferkanals in einer, in der Datenbank festgelegten, Reihenfolge tabellarisch dargestellt. Die erste Spalte stellt den


See Delta Database

File Tables Help

T2_DEVICES

Control_name	Reference	I_to_k	K_label	Setupvalue_1500	Longterm_delta_1500	Priority_1500	Setupvalue_550	Longterm_delta_550	Priority_550
de-sept-v	14	0.1508	a=	.914	.002	6	.308	.002	6
t2-b1-v	3	0.5375	a=	.18	.0002	3	.066	.0002	3
t2-b2-v	6	0.1816	a=	2.6611	.0002	6	.983	.0002	6
t2-hk1-i	10	0.000381	k=	-1.3	.1	5	-1.197	.1	5
t2-hk2-i	11	0.000381	k=	-1.85	.2	5	-.465	.2	5
t2-hk3-i	13	0.000165	k=	-7.4	.2	5	0	.2	5
t2-q1-i	4	0.535	k=	1.15	.3	2	.43	.3	2
t2-q2-i	5	0.535	k=	8.5	.3	2	2.81	.3	2
t2-q3-i	7	0.535	k=	7.1	.05	2	2.66	.05	2
t2-q4-i	8	0.535	k=	7.19	.2	2	1.93	.2	2

Status: Table loaded (17 lines)

Abbildung 9.12: *Die Tabelle T2-Devices aus der Oracle-Datenbank, in der für jeden Optimierungsparameter die erforderlichen Werte gespeichert werden: Der Kontrollsystemname, die Zeilennummer für die Darstellung, der Faktor für die Umrechnung zwischen Setzwert und Theoriewert, sowie die Bezeichnung des Theoriewertes sind fest vorgegeben. Der Referenzwert, die Schrittweite und die Priorität können je nach Energie in verschiedenen Spalten abgespeichert werden. Eine Erweiterung der Tabelle um weitere energiespezifische Spalten ist vorgesehen.*

Kontrollsystemnamen dar, die zweite Spalte den aktuellen Setzwert des Netzgerätes. Grün hinterlegt findet sich der Rücklesewert des Netzgerätes, wobei die Farbe den Status des EPICS-Records angibt (dunkelgrau bedeutet, dass derzeit kein Zugriff möglich ist [15]). Die Spalte mit weißem Hintergrund zeigt die einstellbare Schrittweite der Optimierungsschritte. In der letzten Spalte wird der Theoriewert dargestellt, wie er sich nach Tabelle 4.2 aus dem Setzwert errechnet.

Wird der Optimierungsalgorithmus gestartet (über den Menü-Punkt „File"), so wird die Zeile des Optimierungsparameters jeweils blau hinterlegt. Für den Operateur ist damit sofort ersichtlich, welcher Setzwert vom Programm verändert wird.

Auf der rechten Seite des Bildschirmfensters sind Daten der Beschleunigeranlage dargestellt. Die Informationen über den Status der einzelnen Maschinenteile sowie über den Status der Injektion wird vom Statusagenten geliefert. Liegt keine Injektionsphase vor oder sind Teile der Beschleunigeranlage nicht eingeschaltet, so läßt sich der Optimierungsalgorithmus nicht starten. Der Grund dieser Entscheidung wird rechts unten in der Darstellung angezeigt. Dort werden auch Kommentare zum Verlauf der Optimierung oder aufgetretene Probleme ausgegeben.

Wird vom Alarmagenten ein für die Optimierung angegebener Parameter als fehlerhaft gemeldet, so nimmt der T2-Experte diesen Parameter aus seiner Prioritätenliste heraus und versucht trotzdem, die Transfereffizienz zu optimieren. Erst wenn ein Fehler zu einem Statuswechsel führt (der dann vom Statusagenten gemeldet wird), so wird die Optimierung abgebrochen.

Zusätzlich zu der grafischen Darstellung legt der T2-Experte eine Protokolldatei an, in der Informationen zum Programmablauf, zur Bewertung der Transfereffizienz und zur Prioritätenliste gespeichert werden. Dadurch ist es möglich, die Optimierungsschritte jederzeit nachzuvollziehen.

Der T2-Experte ist in das Agentensystem von Delta eingebettet und nutzt die zur Verfügung gestellten Dienste anderer Agenten. Andererseits kann die Optimierung über einen Agentendienst gestartet und abgebrochen werden, womit der T2-Experte seinerseits Dienste für das Agentensystem zur Verfügung stellt.

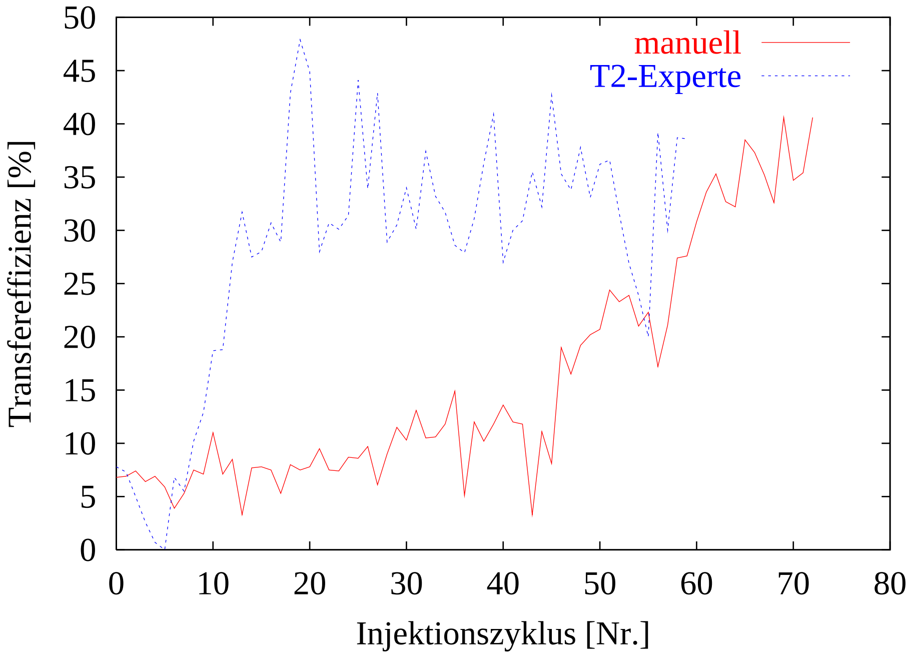


Abbildung 9.13: *Vergleich zwischen dem T2-Experten und einer manuellen Optimierung. Die Verbindungslinien zwischen den einzelnen Messwerten dienen der Anschaulichkeit und haben keine physikalische Bedeutung.*

9.7 Resultate des T2-Experten

Der T2-Experte wurde unter verschiedenen Bedingungen getestet und im Betrieb der Beschleunigeranlage erfolgreich eingesetzt. Die Ergebnisse werden im Folgenden jeweils an einer exemplarischen Messung diskutiert.

Bei der in Abbildung 9.13 dargestellten Optimierung war der Beschleuniger zuvor bereits in Betrieb und mehrere Stunden mit den schlechten Bedingungen zu Anfang der Optimierung betrieben worden. Die manuelle Optimierung wurde danach aufgrund einer Einstellung gemacht, die vor dem Start des T2-Experten abgespeichert wurde. Der Operateur wollte schon bei einer Transfereffizienz von 11% mit der Optimierung aufhören und nur der Hinweis auf ein besseres Ergebnis des T2-Experten veranlasste ihn, weiter zu optimieren. Dies weist auf einen der Vorteile des Programms hin: Es verliert nicht die Geduld, sondern optimiert weiter. Im Endergebnis unterscheiden sich die erzielten Transfereffizienzen und die Parameter der T2-Magnete kaum. Die Einzelheiten sind aus der folgenden Aufstellung ersichtlich:

vor T2-Experte (gemittelt über 17 Zyklen)	6,7 % Transfereffizienz
nach T2-Experte (gemittelt über 20 Zyklen)	36,2 % Transfereffizienz
vor manuell (gemittelt über 20 Zyklen)	6,4 % Transfereffizienz
nach manuell (gemittelt über 20 Zyklen)	32,6 % Transfereffizienz

Unterschiede in den erzielten Parametersätzen (Setups) nach der Optimierung:

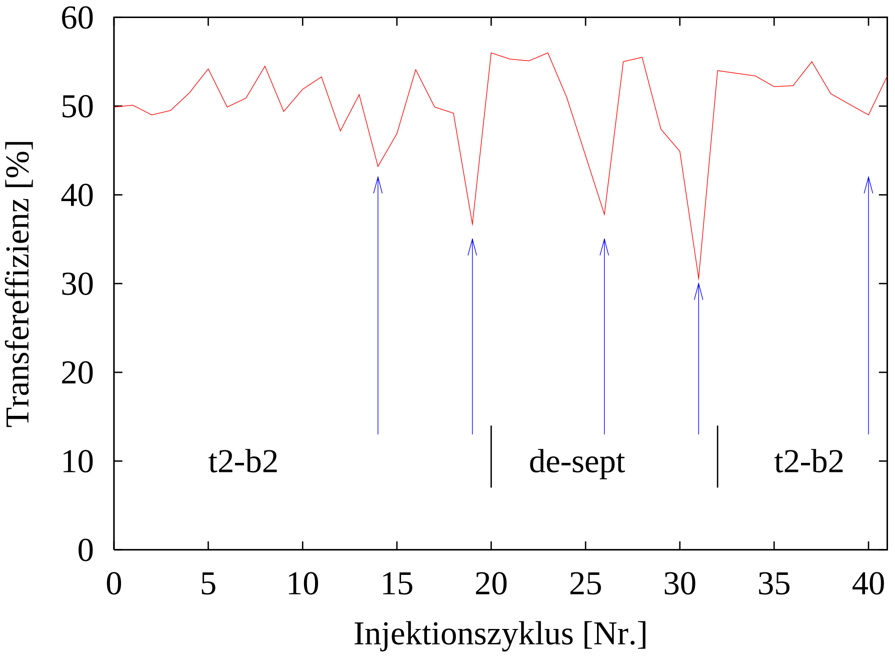


Abbildung 9.14: *Auch bei einer bereits guten Transfereffizienz kann der T2-Experte mitlaufen. Er versucht nach seiner Prioritätenliste die Parameter zu optimieren, verschlechtert die Transfereffizienz dabei jedoch nur sehr kurzzeitig. Die Pfeile bezeichnen die Punkte, an denen der Experte jeweils die Richtung der Optimierung bzw. den Parameter gewechselt hat. Die Verbindungslinien zwischen den einzelnen Messwerten dienen der Anschaulichkeit und haben keine physikalische Bedeutung.*

Parameter	*Startwert*	*T2-Experte*	*manuell*
t2-b1	0,1850 kV	unverändert	0,1846 kV
t2-b2	2,6728 kV	2,6738 kV	2,7630 kV
de-sept	0,877 kV	0,853 kV	0,860 kV
de-ki2	7,995 kV	unverändert	8,018 kV

Dies zeigt, dass der T2-Experte die gleiche Transfereffizienz mit der Optimierung von weniger Parametern erzielt hat. Außerdem versuchte der Operateur, einen einzelnen Kickermagneten (`de-ki2`) zu optimieren, was aufgrund der Abhängigkeit der drei Kickermagneten voneinander nur dann sinnvoll ist, wenn die damit erzeugte Orbitbeule nicht lokal begrenzt ist. Dies wurde vom Operateur nicht überprüft, so dass die Optimierung vermutlich eine Störung der Strahllage im gesamten Speicherring verursacht hat.

Eine der wichtigsten Fragen, die durch die Tests geklärt werden sollte, war: Kann der T2-Agent auch dann eingesetzt werden, wenn bereits gute Bedingungen vorliegen? Aus der Antwort auf diese Frage ergibt sich, ob der Agent nur für spezielle Fälle eingeschaltet werden soll, oder ob es möglich ist, ihn ständig mitlaufen zu lassen.

Wenn bereits eine gute Transfereffizienz vorliegt, versucht der T2-Experte trotzdem, nach seiner Prioritätenliste die Parameter zu optimieren. Wie in Abbildung 9.14 erkennbar ist, kann es zu kurzfristigen Verschlechterungen der Transfereffizienz kommen. Der T2-Experte erkennt jedoch schnell, wenn ein Parameter nicht weiter optimierbar ist. Das Programm kann also permanent mitlaufen, ohne dass eine dauerhafte Verschlechterung der Injektion

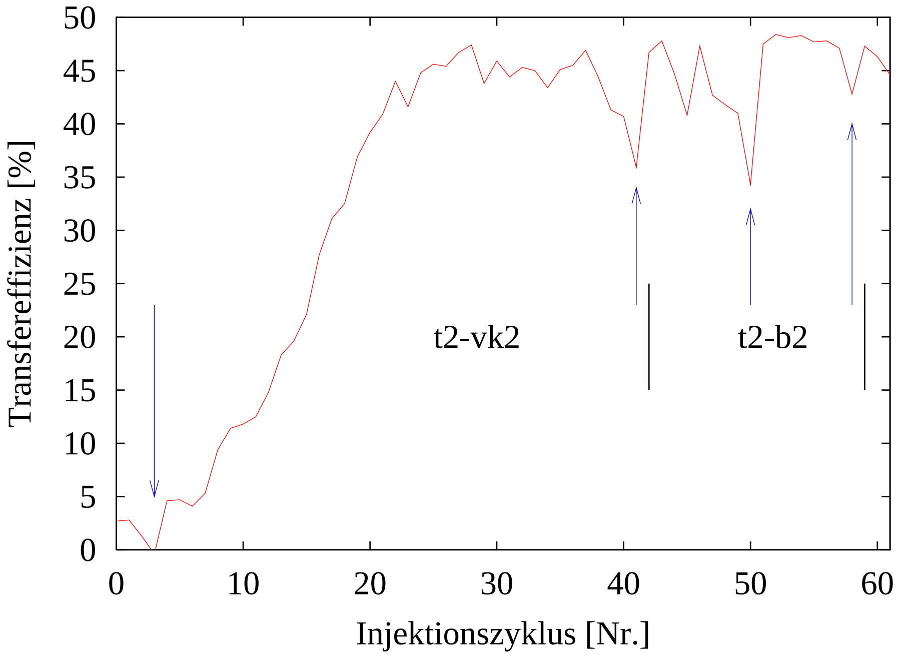


Abbildung 9.15: *Vor der Korrektur wurde ein Parameter (t2-vk2) verstellt. Der T2-Experte findet durch Vergleiche mit der Datenbank sofort den richtigen Parameter. Die Pfeile bezeichnen die Punkte, an denen der T2-Experte jeweils die Richtung der Optimierung bzw. den Parameter gewechselt hat. Die Verbindungslinien zwischen den einzelnen Messwerten dienen der Anschaulichkeit und haben keine physikalische Bedeutung.*

zu befürchten ist.

Schon durch einen einzelnen Parameter, der versehentlich verstellt wurde, kann die Transfereffizienz stark einbrechen. Diese Situation tritt vor allem auf, wenn ein Gerät zwischen den Injektionsphasen ausgeschaltet wurde oder ausgefallen war. Um diese Situation zu simulieren wurde der Setzwert einer Korrekturspule (`t2-vk2`) absichtlich so stark verändert, dass die Transfereffizienz auf 3% zurückging.

Der T2-Experte vergleicht die aktuellen Setzwerte mit den Referenzwerten, die in der Oracle-Datenbank gespeichert sind. Wie Abbildung 9.15 zeigt, findet der T2-Experte sofort den richtigen Parameter und bewertet ihn mit einer so hohen Priorität, dass dieser Parameter als erstes optimiert wird. Nach wenigen Schritten in die falsche Richtung (ein Parameter wird immer zuerst in positive Richtung variiert), wird eine weitere Verschlechterung der Transfereffizienz bemerkt (siehe Pfeile in der Abbildung) und vom Ausgangswert aus in die andere Richtung optimiert. Erst nachdem die Abweichung vom Referenzsetup korrigiert wurde, versucht der T2-Experte, nach seiner Prioritätenliste auch andere Parameter zu optimieren.

Wenn mehrere Parameter gleichzeitig nicht dem Referenzsetup entsprechen, stellt sich die Frage, ob der T2-Experte auf die Referenz korrigiert, oder ob die Referenz nur als Richtwert betrachtet wird. Die gleichzeitige Abweichung von mehreren Parametern ist zum Beispiel dann wahrscheinlich, wenn ein Setup geladen wird, das nicht mit dem Referenzsetup übereinstimmt. Da das Referenzsetup nicht die beste Einstellung enthalten muss, benutzt der T2-Experte die gespeicherten Werte nur als Grundlage für eine Anpassung der Prioritä-

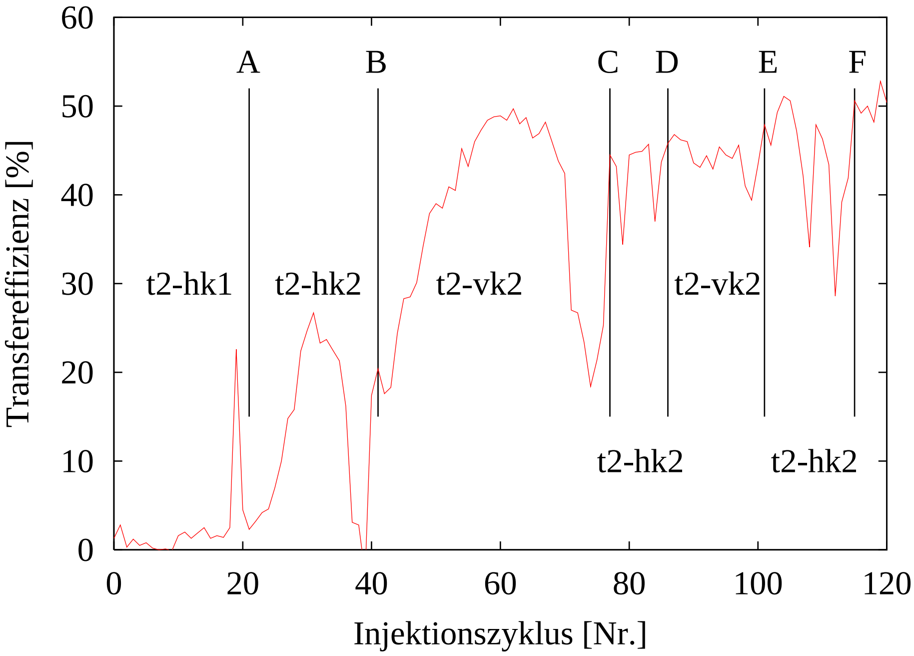


Abbildung 9.16: *Vor der Korrektur wurden fünf Parameter (Korrekturspulen) verstellt. Der T2-Experte findet durch Vergleiche mit der Datenbank die richtigen Parameter, verstellt jedoch nur drei, um wieder die alte Transfereffizienz zu erreichen. Die Transfereffizienz beträgt nach der Optimierung 50 % (gemittelt über vier Werte). Die Buchstaben bezeichnen jeweils das Ende eines Optimierungsschrittes.*

ten. Die eigentliche Optimierung erfolgt ausschließlich aufgrund der aktuell gemessenen Transfereffizienz.

Wie man an Abbildung 9.16 sehen kann, korrigiert der T2-Experte nicht alle veränderten Parameter. Für die dargestellte Messung wurden die Sollwerte der fünf Korrekturspulen um 1 A verstellt, so dass die Transfereffizienz auf etwa 1,4% (gemittelt über vier Messwerte) fiel. Der T2-Experte optimiert jedoch nur drei dieser Parameter und erreicht damit wieder die ursprüngliche Transfereffizienz von etwa 50%.

Damit ist gezeigt, dass die gespeicherten Sollwerte nur als Vergleichswerte betrachtet werden und nicht als zwingende Vorgaben, die so und nicht anders eingestellt werden müssen. Der T2-Experte kann daher auch bessere Lösungen als die abgespeicherte Referenz finden.

Die Entwicklung der Prioritäten für die einzelnen Korrekturspulen lässt sich am oben beschriebenen Beispiel (Abb. 9.16) ebenfalls gut erkennen. Wenn der T2-Experte einen Schritt als erfolgreich bewertet, steigt die Priorität des optimierten Parameters, ansonsten wird sie verringert. In der folgenden Aufstellung sind jeweils die Prioritäten am Ende eines Optimierungsschrittes aufgeführt, so wie sie der T2-Experte in seiner Protokolldatei abspeichert:

Korrekturspule	Anfang		A		B		C		D		E		F
t2-vk1	4												4
t2-vk2	7				7	→	9		9	→	7		7
t2-hk1	7	→	6										6
t2-hk2	7		7	→	9		9	→	8		8	→	6
t2-hk3	4												4

Man kann erkennen, dass nach der Bewertung des T2-Experten nur die Schritte von A nach B und von B nach C gewinnbringend waren. Dort nimmt die Priorität des optimierten Parameters jeweils zu, während die Prioritäten in den anderen Schritten abnehmen. Dabei ist zu unterscheiden, dass die Schritte von D nach E und von E nach F schlechter bewertet wurden als der Schritt vom Anfang nach A und von C nach D.

Da die dargestellte Messung insgesamt 121 Injektionen mit zum Teil sehr guten Transfereffizienzen umfasste, waren gegen Ende der Messung über 100 mA in Delta gespeichert. Dies kann zu teilweise schlechten Transfereffizienzen aufgrund von Instabilitäten führen (siehe auch Kapitel 5.6). Trotzdem steigerte der T2-Experte die Transfereffizienz von 1,4% auf 50%.

Der T2-Experte hat in verschiedenen Situationen die Injektion in den Speicherring optimiert. Im Vergleich mit einem erfahrenen Operateur hat der T2-Experte seine Tauglichkeit unter Beweis gestellt.

Nach der Definition aus Kapitel 7.1.2 ist der T2-Experte ein intelligentes Programm:

1. Auf Änderungen seiner Umgebung reagiert der T2-Experte flexibel: Die Liste der Optimierungsparameter ist frei konfigurierbar und der Zustand der Beschleunigeranlage wird berücksichtigt.

2. Das Programm lernt aus seinen Erfahrungen und passt sowohl sein aktuelles Verhalten als auch seine Wissensbasis für spätere Optimierungen diesen Erfahrungen an.

3. Es wurde gezeigt, dass der T2-Experte die Transfereffizienz wie ein erfahrener Operateur optimieren kann.

4. Dem T2-Experten stehen die Möglichkeiten der Agentenkommunikation zur Verfügung. Das Programm nutzt daneben die Möglichkeiten eines direkten Zugriffs auf EPICS (zum Einstellen neuer Parameterwerte) und auf die Datenbank (zum Lesen und Abspeichern der Konfiguration).

5. Aufgrund der Protokolldatei ist es möglich, jeden Optimierungsschritt und jede Bewertung der Transfereffizienz nachzuvollziehen.

6. Die Optimierung muss explizit gestartet werden (über die grafische Oberfläche oder einen Agentendienst), arbeitet dann aber völlig unabhängig vom Operateur.

Der T2-Experte greift nicht auf ein theoretisches Modell des Transferkanals T2 zurück. Die Grundlage des Programms ist ein heuristischer Algorithmus, der das lokale Maximum der Transfereffizienz in der Umgebung der vorher eingestellten Parameter findet. Damit kann dieses Expertensystem einen erfahrenen Operateur bei der Optimierung der Injektion in den Speicherring Delta ersetzen.

Kapitel 10

Ausblick und Weiterentwicklung

10.1 Integration weiterer Agenten

Das Agentensystem von DELTA wurde mit Blick auf einfache Erweiterbarkeit geplant und implementiert. Die nötigen Funktionen stehen als Paket in der Programmiersprache Tcl/Tk zur Verfügung und sind dokumentiert. Bei der Dokumentation wurde viel Wert auf Beispiele gelegt, so dass sich einfache Agenten innerhalb kürzester Zeit aus diesen Beispielen zusammensetzen lassen.

Während der Erstellung dieser Arbeit wurden von Marc Grewe bereits zwei weitere Agenten in das System integriert. Dabei handelt es sich um ein neues Programm zur Ansteuerung einer Relaiskaskade und um eine Weiterentwicklung des Orbitkorrekturprogramms von Dirk Zimoch [6]. Bei beiden Anwendungen war die Möglichkeit einer Kommunikation von Programmen untereinander der Hauptgrund für die Implementierung als Agent.

Durch die einfache Nutzung von Funktionen anderer Programme über die Agentenkommunikation ist es zum einen unnötig, Funktionen mehrfach zu implementieren. Zum anderen können aktuelle Informationen problemlos ausgetauscht werden. Da die Agentenkommunikation die Details des Verbindungsaufbaus und der Datenbankverwaltung übernimmt, sind keine Kenntnisse in diesem Bereich notwendig, um einen Agenten zu implementieren.

Die Anzahl der möglichen Agenten im Kontrollsystem ist nur durch die vom Betriebsystem gesteckte Grenze der so genannten *TCP-Sockets* begrenzt (siehe Kapitel 9.1.2). Daher können ohne Probleme hunderte Agenten implementiert werden, bevor eine Umstellung der Kommunikation nötig wäre. Diese Beschränkung betrifft jedoch ausschließlich Serveragenten, die Dienste zur Verfügung stellen.

Weitere Agenten wären zum Beispiel in den Bereichen Datenarchivierung, Programmverwaltung und Modellbildung denkbar. Auch im Zusammenhang mit der Oracle-Datenbank könnten Agenten die Suche nach Informationen vereinfachen.

10.2 Einsatzgebiete von Expertensystemen bei DELTA

Expertensysteme sind vor allem im Zusammenspiel mit anderen Programmen sinnvoll, sollten also Teil des Agentensystems werden. Nur dann kann ein isoliertes Problem in den Gesamtzusammenhang der Beschleunigeranlage gestellt werden. Dadurch werden viele

Teilaspekte auf andere Programme verlagert und das Expertensystem kann sich auf die Verknüpfung der Daten konzentrieren.

Ein Expertensystem ist überall dort sinnvoll, wo entweder nur empirisches Wissen zur Verfügung steht, oder wo die theoretischen Zusammenhänge so komplex sind, dass ein Operateur über spezielles Vorwissen verfügen muss. In diesen Fällen ist es möglich, mit Hilfe eines Programms die Situation so weit zu vereinfachen, dass auch unerfahrene Operateure damit umgehen können. Allerdings beschränkt sich der Einsatz damit auf Standardsituationen, da bisher der flexible und kreative Einsatz von Fertigkeiten auf neue Problemstellungen in Programmen nicht umgesetzt werden kann.

Bei DELTA wären Expertensysteme vor allem bei der Optimierung von Maschinenparametern einsetzbar. So könnte die Korrektur des Arbeitspunktes oder auch die Optimierung des Linearbeschleunigers durch ein intelligentes Programm übernommen werden, welches auf Änderungen oder ungenaue Messungen angemessen reagieren kann.

10.3 Einsatz von Methoden der künstlichen Intelligenz

Das Problem im Einsatz von Methoden der künstlichen Intelligenz im Bereich von Beschleunigern oder großen Forschungsanlagen im Allgemeinen besteht in der Kommunikation zwischen den Disziplinen. Die Physiker an einer Anlage sehen zwar die Probleme in der Steuerung, sind aber nur selten über die Möglichkeiten der Informatik informiert. Auf der anderen Seite haben Informatiker zwar die Werkzeuge, um die Probleme zu lösen, können diese aber vielfach nicht auf eine komplexe physikalische Fragestellung umsetzen.

Die Informatik ist derzeit ein schnell wachsendes Gebiet, das sich gleichzeitig in viele Richtungen weiter entwickelt. Einen Überblick über die jeweils aktuellen Möglichkeiten zu behalten ist daher aufwändig und muss gegen den möglichen Nutzen abgewägt werden. Der augenscheinliche Nutzen besteht vor allem darin, Routineaufgaben in Programme umsetzen zu können und so den Freiraum zu erhalten, um neue Ideen zu entwickeln und Theoriebildung betreiben zu können. Allerdings sind die Möglichkeiten der Informatik nicht mehr auf diese Routineaufgaben beschränkt. Die Methoden der künstlichen Intelligenz könnten neue Wege der Erkenntnisgewinnung sein, wenn sie bewusst eingesetzt werden.

Bisher sind diese Einsätze zumindest in der Beschleunigerphysik eher punktuell. Beispiele sind ein Expertensystem zur Optimierung einer Beamline [47], ein Expertensystem zur Magnetfeldvermessung [48], die Optimierung von Magnetstrukturen in Transferlines durch neuronale Algorithmen [49] und ein Designvorschlag für Agentensysteme zur Diagnose an Beschleunigern [50]. Diese Beispiele zeigen die Bandbreite der Einsatzmöglichkeiten, aber auch die Problematik die damit einhergeht, dass Physiker von den Möglichkeiten nicht nur wissen, sondern diese im Allgemeinen auch implementieren müssen.

Es ist nötig, ein Bewusstsein für diese Möglichkeiten zu entwickeln und der Informatik, ähnlich wie der Mathematik, eine Relevanz als Methodenreservoir für die Physik einzuräumen.

Kapitel 11

Zusammenfassung

Die Injektion in den Speicherring ist eine wichtige Phase im Betrieb einer Synchrotronstrahlungsquelle. Bei DELTA ist eine Automatisierung der Optimierung des Ladungstransfers notwendig, um die Zeit für diese Injektionsphase zu minimieren.

Eine exemplarische Untersuchung der vorhandenen Mess- und Korrekturmöglichkeiten im Transferkanal T2 im Rahmen dieser Arbeit zeigte Probleme bei der theoretischen Modellierung auf. Die Transfereffizienz lässt zwar eine Beurteilung der Güte eines einzelnen Transfervorgangs zu, hängt jedoch von vielen Parametern ab, die nur mit erheblichem Aufwand charakterisiert werden können. So wäre die Vermessung der Magnetpositionen und Justage der Magnete mit einem längeren Stillstand der gesamten Synchrotronstrahlungsquelle verbunden. Die Forderung nach einer hohen Verfügbarkeit der Beschleunigeranlage lässt einen derartigen Aufwand jedoch nicht zu.

Um eine Automatisierung der Injektionsoptimierung zu realisieren, wurde daher auf die Methodik der wissensbasierten Systeme aus dem Fachgebiet der künstlichen Intelligenz zurück gegriffen. Im Rahmen dieser Arbeit wurden verschiedene Ansätze verglichen und auf ihre Anwendbarkeit überprüft.

Das Ergebnis ist ein kooperierendes Agentensystem, in das ein Expertensystem zur Injektionsoptimierung eingebettet ist. Die Grundlage des Agentensystems von DELTA bildet ein Programmpaket, das im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurde. Es ermöglicht eine einfache Implementierung von Agenten und ihre Integration in das Kontrollsystem von DELTA. Das Agentensystem ist erweiterbar und kann so flexibel an die Anforderungen der Beschleunigeranlage angepasst werden.

Fünf verschiedene Agenten wurden im Rahmen dieser Arbeit implementiert und erprobt. Sie bieten dem Anwender einen einfachen Überblick über die Beschleunigeranlage und lassen sich durch zugehörige Konfigurationsprogramme unkompliziert an geänderte Voraussetzungen anpassen. Das Expertensystem zur Injektionsoptimierung basiert auf heuristischen Methoden, die der Vorgehensweise eines erfahrenen Operateurs nachgebildet wurden, welcher den Transferkanal T2 ohne theoretisches Modell optimiert. So konnte die Optimierung der Transfereffizienz automatisiert werden, ohne den Betrieb der Beschleunigeranlage zu beeinträchtigen.

Der erfolgreiche Einsatz des Agentensystems und speziell des T2-Experten zeigt, dass es möglich und sinnvoll ist, Methoden der künstlichen Intelligenz zur Automatisierung physikalischer Anwendungen einzusetzen.

Anhang A

Die Magnetstruktur des Transferkanals T2

Die hier dargestellte Konfiguration für das Programm MAD [9] entspricht der Abbildung 5.1 auf Seite 38 und stellt die Umsetzung eines standardisierten Parametersatzes dar. Die Konvention der Vorzeichen für die Fokussierung ist im Programm MAD anders festgelegt ($k > 0$ horizontal fokussierend) als die in dieser Arbeit verwendete.

```
!==============================================================================
! Dieses Lattice entspricht dem Setup t2-mag.standard am 1.9.2003
!==============================================================================

INITIAL: BETA0, &
    BETX=4.38530, ALFX=-1.86385, &
    BETY=4.18425, ALFY=1.74939, &
    DX=0.812649, DPX=0.339

!------------------------------------------------------------------------------
! Dipolmagnete
!

! Extraktions-Septum Bodo
SEPEI :SBEND, L=0.28500, ANGLE=0.0541, E1=0.0541
SEPEO :SBEND, L=0.28500, ANGLE=0.0541, E2=0.0541
BO_EXSEPT : LINE=(SEPEI,SEPEO)

! Injektions-Septum Delta
SEPDI :SBEND, L=0.42000, ANGLE=-0.04345, E1=0.0869
SEPDO :SBEND, L=0.42000, ANGLE=-0.04345
DE_SEPT : LINE=(SEPDI,SEPDO)

! Kurzer Dipol
BD1I  :SBEND, L=0.17555, ANGLE=0.03295, E1=0.03295
BD1O  :SBEND, L=0.17555, ANGLE=0.03295, E2=0.03295
T2_B1 : LINE=(BD1I,BD1O)
```

```
! Langer Dipol
BD2I  :SBEND, L=0.385333, ANGLE=-0.1076, E1=0.0807
BD2M  :SBEND, L=0.385333, ANGLE=-0.1076
BD2O  :SBEND, L=0.385333, ANGLE=-0.1076, E2=0.0807
T2_B2 : LINE=(BD2I,BD2M,BD2O)

!---------------------------------------------------------------------------
! Quadrupolmagnete
! vertical fokussierend k1<0 ; horizontal fokussierend k1>0

T2_Q1 : QUADRUPOLE, L=0.22, K1=-0.4102
T2_Q2 : QUADRUPOLE, L=0.22, K1=2.675
T2_Q3 : QUADRUPOLE, L=0.22, K1=-2.5038
T2_Q4 : QUADRUPOLE, L=0.22, K1=1.8368

B2MQM064 : MULTIPOLE
D2MQM000 : MULTIPOLE

!---------------------------------------------------------------------------
! Driftstrecken
!

D1A:   DRIFT, L=0.28
D1B:   DRIFT, L=0.30
D2:    DRIFT, L=0.124
D3A:   DRIFT, L=0.343612
D3B:   DRIFT, L=0.17
D3C:   DRIFT, L=0.113
D4A1:  DRIFT, L=0.24
D4A2:  DRIFT, L=0.29
D4A3:  DRIFT, L=0.215
D4A4:  DRIFT, L=0.125
D4B:   DRIFT, L=0.11
D5:    DRIFT, L=0.14
D6:    DRIFT, L=0.14
D7A:   DRIFT, L=0.11
D7B:   DRIFT, L=0.430
D7C1:  DRIFT, L=0.23
D7C2:  DRIFT, L=0.092
D7D:   DRIFT, L=0.135
D8:    DRIFT, L=0.29
D9A:   DRIFT, L=0.4
D9B:   DRIFT, L=0.6

!---------------------------------------------------------------------------
! Korrektruspulen
!

T2_VK1 : VKICKER, L=0.08, KICK=0.0001
T2_HK1 : HKICKER, L=0.08, KICK=-0.0008
T2_HK2 : HKICKER, L=0.08, KICK=-0.0003
T2_VK2 : KICKER , L=0.10, HKICK=0.0, VKICK=-0.0003
```

```
!-----------------------------------------------------------------------------
! Beam Position Monitore
!

BPM1: MONITOR
BPM2: MONITOR
BPM3: MONITOR
ICT:  INSTRUMENT

!-----------------------------------------------------------------------------
! Marker

CHROMOX1 :   INSTRUMENT
CHROMOX2 :   INSTRUMENT

T2START : MARKER
END     : MARKER

!=============================================================================
!       LATTICE-Beschreibung
!

T2:LINE=(T2START,BO_EXSEPT,D1A,B2MQM064,D1B,T2_B1,D2,T2_Q1,D3A, &
    CHROMOX1,D3B,T2_VK1,D3C,T2_Q2,D4A1,BPM1,D4A2,ICT,D4A3,BPM2, &
    D4A4,T2_HK1,D4B,T2_B2,D5,T2_Q3,D6,T2_B2,D7A,T2_HK2,D7B, &
    CHROMOX2,D7C1,BPM3,D7C2,T2_VK2,D7D,T2_Q4,D8,T2_B2,D9A, &
    D2MQM000,D9B,DE_SEPT,END)

BEAM, particle=electron, energy=1.5, radiate=false

!=============================================================================
```

Literaturverzeichnis

[1] K. Wille, *Physik der Teilchenbeschleuniger und Synchrotronstrahlungsquellen*, Teubner Studienbücher, 1992

[2] C. Sternemann, M. Volmer, J.A. Soininen, H. Nagasawa, M. Paulus, H. Enkisch, G. Schmidt, M. Tolan, W. Schülke, *Momentum-transfer dependence of x-ray Raman scattering at the Be K-edge*, Physical Review B 68, 2003

[3] M. Tolan, T. Weis, C. Westphal, K. Wille *DELTA: Synchrotron Light in Nordrhein-Westfalen*, Synchrotron Radiaton News 16(2), 2003

[4] H. Enkisch, C. Sterneman, M. Paulus, M. Volmer, M. Tolan, W. Schülke, 3*d spectator hole satellites of the Cu* $K\beta_{1,2}$ *and* $K\beta_{2,5}$ *emission spectrum*, Physical Review A, zur Veröffentlichung eingereicht

[5] M. Paulus et.al., *An internet-based synchrotron experiment for students measuring the x-ray magnetic circular dichroism in PtFe*, Journal of Synchrotron Radiation, zur Veröffentlichung eingereicht

[6] D. Zimoch, *Implementierung eines Orbitkorrektursystems an der Synchrotronstrahlungsquelle DELTA*, Dissertation am Lehrstuhl für Beschleunigerphysik, Universität Dortmund, 2002

[7] H. Wiedemann, *Particle Accelerator Physics*, Springer-Verlag, 1993

[8] K. Wille, *OPTICS*, Windows Programm Version 3.18, Institut für Beschleunigerphysik und Synchrotronstrahlung,Universität Dortmund, 2002

[9] H. Grote, F.C. Iselin, *The MAD Program (Methodical Accelerator Design), Version 8.19*, CERN, Switzerland, 1996

[10] K. Potter, *Beam Profiles*, Cern Accelerator School - General Accelerator Physics (1), 1994

[11] U. Berges, *Lage- und Profilauswertung des Elektronenstrahls am Booster BoDo über Synchrotronstrahlung*, Diplomarbeit am Lehrstuhl für Beschleunigerphysik, Universität Dortmund, 1995

[12] P.J. Bryant, *Beam Transfer Lines*, Proceedings of CERN Accelerator School 94-01, p. 219ff, CERN, Geneva, Switzerland, 1994

[13] A. Streun, *SLS booster-to-ring transferline optics for optimum injection efficiency*, Internal Paper SLS-TME-TA-2002-0193, SLS, Paul Scherrer Institut, 2002

[14] A. Lüdeke, *Entwurf und Aufbau effizienter Zustandsdiagnostik für das Booster-Synchrotron Bodo*, Dissertation, Institut für Beschleunigerphysik und Synchrotronstrahlung, Universität Dortmund, 1999

[15] E. Kasel, *Styleguide for User Interfaces at DELTA Control System*, Internal Report IR2000-01, Institut für Beschleunigerphysik und Synchrotronstrahlung, Universität Dortmund, 2000, unveröffentlicht

[16] U. Weinrich, *Entwurf und Berechnung des Strahltransportweges zwischen BoDo und DELTA*, Diplomarbeit am Lehrstuhl für Beschleunigerphysik, Universität Dortmund, 1992

[17] Tesla Engineering Limited, *Konstruktionszeichnungen der Transferdipole*, England, 1993

[18] J. Albers, *Bau und Test eines Wirbelstromseptums für DELTA*, Diplomarbeit am Lehrstuhl für Beschleunigerphysik, Universität Dortmund, 1991

[19] P. Hartmann, E. Kasel, *Vermessung der T2 Korrekturspulen*, Internal Report IR2003-007, 2003, unveröffentlicht

[20] J. Friedl, M. Schürmann, *Mechanische und elektrische Dimensionierung der Septa bei DELTA (Neufassung)*, Technischer Bericht 94-1, Institut für Beschleunigerphysik und Synchrotronstrahlung, Universität Dortmund, 1994, unveröffentlicht

[21] K. Sabatkiewiez, *Emittanzmessung am Linearbeschleuniger von DELTA*, Diplomarbeit am Lehrstuhl für Beschleunigerphysik, Universität Dortmund, 1995

[22] B. Keil, *A Unified Distributed DSP-Based Beam Diagnostics and Global Feedback System for Ramped Electron Storage Rings: Development, Construction and Applications*, Dissertation, Lehrstuhl für Beschleunigerphysik, Universität Dortmund, 2003

[23] M. Grewe, *Dissertation*, noch nicht veröffentlicht

[24] S. Strecker, *Kurzzeit-Emittanzmessung an DELTA mittels Synchrotronstrahlung*, Diplomarbeit am Lehrstuhl für Beschleunigerphysik, Universität Dortmund, 2003

[25] B. Keil, *Charge Transfer Optimisation of Bodo and Transfer Line Optics*, DELTA Internal Report 2003-001, unveröffentlicht

[26] G. Schmidt, E. Kasel, K. Wille, M. Körfer, H. Henschel, J. Kuhnhenn, *Optical Fibre Beam Loss Monitors for Storage Rings at DELTA*, EPAC 2002, Paris

[27] K. Wille, DELTA Gruppe, *Datensammlung DELTA*, Lehrstuhl für Beschleunigerphysik, unveröffentlicht

[28] R. Heine, *Untersuchung der longitudinalen Strahldynamik am Speicherring Delta*, Diplomarbeit am Lehrstuhl für Beschleunigerphysik, Universität Dortmund, 2000

[29] A. Caglayan, C. Harrison, *Intelligente Software-Agenten*, Carl Hanser Verlag, 1998

[30] E. Shortliffe, *Computer-Based Medical Consultations: MYCIN*, American Elsenvier, New York, 1976

[31] F. Puppe, *Wissensbasierte Diagnose- und Informationssysteme: mit Anwendungen des Expertensystem-Shellbaukastens D3*, Springer Verlag Berlin, 1996

[32] F. Klügl, *Multiagentensimulation - Konzepte, Werkzeuge, Anwendungen*, Addison-Wesley Verlag, 2001

[33] R. Kühnel, *Agentenbasierte Softwareentwicklung - Methode und Anwendungen*, Addison-Wesley Verlag, 2001

[34] A. Cawsey, *Künstliche Intelligenz im Klartext*, Perason Education Deutschland, 2003

[35] A.S. Tanenbaum, *Computernetzwerke*, 4. überarbeitete Auflage, Pearson Studium, Prentice Hall Verlag, 2003

[36] D. Schirmer, E. Kasel, B. Keil, D. Zimoch, *Standardization of the DELTA Control System*, ICALEPCS, Triest, Italien, 1999

[37] Informationen über die Kontrollsysteme verschiedener Institute, die EPICS nutzen, erhält man am Aktuellsten über das Internet:

Advanced Photon Source (ANL)	www.aps.anl.gov
Berliner Elektronen Synchrotron (BESSY II)	www.bessy.de
Jefferson Laboratory (JLAB)	www.jlab.org
Stanford Linear Accelerator Center (SLAC)	www.slac.stanford.edu
Paul Scherrer Institut (PSI)	www.psi.ch
Los Alamos National Laboratory (LANL)	www.lanl.gov
KEK B-Faktory	www-kekb.kek.jp

Eine vollständige und aktuelle Liste kann über die Homepage von EPICS abgefragt werden: www.aps.anl.gov/epics/

[38] L.R. Dalesio, M.R. Kraimer, A.J. Kozubal, *EPICS Architecture*, Proceedings of ICALEPCS at KEK, Tsukuba, Japan, 1991

[39] M. Knott, D. Gurd, S. Lewis, M. Thuot, *EPICS: A Control System Software Co-Developement Success Story*, 1993

[40] D. Zimoch, *Paket Epics für Tcl/Tk*

[41] W. Misgeld, *SQL Einstieg und Anwendung*, 2. überarbeitete und aktualisierte Auflage, Carl Hanser Verlag, 1995

[42] C.A. Zehnder, *Informationssysteme und Datenbanken*, Teubner Verlag, 1998

[43] U. Hermann, D. Lenz, G. Unbescheid, *Oracle 8 für den DBA*, Addison-Wesley Verlag, 1998

[44] E. Kasel, *Einführung in die Delta-Datenbank*, Internal Report IR2000-04, Institut für Beschleunigerphysik und Synchrotronstrahlung, Universität Dortmund, 2000, unveröffentlicht

[45] B. Welch, *Praktisches Programmieren in Tcl und Tk*, Prentice Hall Verlag, 1996

[46] J.K. Ousterhout, *Tcl und Tk*, Addison-Wesley Verlag, 1995

[47] D.E. Schulz, P.A. Brown , *The Developement of an Expert System to Tune a Beam Line*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A293, 1990

[48] M. Zabinska, *Expert System for Harmonics Measurements*, DESY HERA 91-02, Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY, 1991

[49] D. Schirmer, M. v.Hartrott, S. Kahn, D. Krämer, E. Weihreter, *Beam Transport Lines at BESSY-II*, Conference Proceedings PAC '95, Dallas, USA, 1995

[50] I. Valova, J. Zaprianov, *Multi-Agents Systems for Control, Diagnostic and Monitoring*, Conference Proceedings ICALEPCS 99, Triest, Italien, 1999

Dank

Ich bedanke mich bei Professor Dr. Wille für die Möglichkeit, unter seiner Betreuung am Lehrstuhl für Beschleunigerphysik zu promovieren.

Meinen Eltern dankte ich dafür, dass sie mir das Studium der Physik ermöglicht und mich immer dabei unterstützt haben.

Professor Dr. Frank Puppe danke ich für die Version des Expertensystem-Shellbaukastens D3, die er mir für meine Arbeit zur Verfügung gestellt hat.

Allen Mitarbeitern und ehemaligen Mitarbeitern, die mich während meiner Zeit bei DELTA begleitet haben, möchte ich für ihre gute Zusammenarbeit danken. Besonders erwähnen möchte ich hier meine Kollegen in der Kontrollgruppe, Dr. Detlev Schirmer, Dr. Boris Keil und Dr. Dirk Zimoch.

Für wertvolle Kommentare und vielfältige Anregungen möchte ich mich vor allem bei Dr. Peter Hartmann, Dr. Detlev Schirmer und Marc Grewe bedanken.

Für das Korrekturlesen der Arbeit bedanke ich mich bei meinem Bruder Peter Kasel.

Meinem Mann Dirk Zimoch danke ich für die Unterstützung und die vielen Diskussionen.