

Extremwertregelung zur automatischen Strahlführung an Teilchenbeschleunigern

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur (Dr.-Ing.)

von Dipl.-Ing. Frank Herbrand

geb. am 23.09.1969 in Dresden

genehmigt durch die Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Gutachter: Herr Prof. i.R. Dr. Chr. Döschner

Herr Prof. Dr. B. Michaelis

Herr Prof. Dr. D. Husmann

Promotionskolloquium am 8. 11. 2001

Zusammenfassung

An Linearbeschleunigeranlagen ist im Normalbetrieb wiederholt eine Optimierung an den strahlbeeinflussenden Elementen notwendig. Diese Elemente dienen der Weiterleitung und Anpassung des Teilchenstrahls an nachfolgende Systeme. Sie müssen in einem Optimierungsprozeß so eingestellt werden, daß am Beobachtungsort der Teilchenstrahl bestimmte Eigenschaften erreicht. Um Drifterscheinungen insbesondere an der Teilchenquelle sofort ausgleichen zu können, soll die Optimierung auch bei gleichzeitiger Strahlnutzung stattfinden können. Dies stellt eine besondere Herausforderung dar. Es sind hierbei nur sehr kleine Schrittweiten zulässig, damit die Strahleigenschaften bei den Suchbewegungen nur unwesentlich verschlechtert werden. Es wird dazu ein Verfahren verwendet und in für diese Optimierungsaufgabe ganz wesentlichen Merkmalen weiterentwickelt, welches seinen Ursprung in der Literatur der Extremwertregelungsverfahren hat. In der vorliegenden Arbeit werden diese Erweiterungen ausführlich vorgestellt und getestet. Die Anwendung dieses Verfahrens an Teilchenbeschleunigern ist ein Beispiel für spezielle Optimierungsprozesse mit notwendigerweise sehr kleinen Abtastschrittweiten.

Das weiterentwickelte Verfahren beruht auf dem Nachweis einer Korrelation zwischen einem Testsignal und dem Gütesignal des Prozesses, solange der Arbeitspunkt bei diesem Prozeß nicht im Optimum liegt. Dieses Verfahren ist nicht nur dazu geeignet, den Optimalpunkt zu finden, sondern es hält diesen Punkt auch bei Drifterscheinungen. Durch die Nutzung der Korrelation ist es möglich, die Abtastschrittweite so klein zu halten, daß die zu detektierende Reaktion des Strahlführungssystems in der Größenordnung des Störpegels auf der Gütegröße liegt, was damit erst den online-Betrieb eines solchen Verfahrens ermöglicht.

Mit dem hier beschriebenen Extremwertregelungsverfahren wurden Simulationen und praktische Experimente an verschiedenen Teilchenbeschleunigern durchgeführt. Das Verfahren hat sich bei allen Versuchen insbesondere für den Zweck einer Optimierung bei gleichzeitiger Nutzung des Teilchenstrahls als sehr praktikabel erwiesen. Im direkten Vergleich mit einem bekannten numerischen Optimierungsverfahren an einer Teilchenbeschleunigeranlage wurden mit dem in dieser Arbeit entwickelten Verfahren bessere Optimierungseigenschaften bezüglich der Optimierungszeit und der Störung des Gütewertes während des Optimierungsvorgangs erzielt.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit in der Zentralabteilung Forschungs- und Informationstechnik des Forschungszentrums Rossendorf e. V.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Döschner vom Institut für Automatisierungstechnik der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg und Herrn Dr.-Ing. Wieland Bürger vom Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung des Forschungszentrums Rossendorf e. V. Beide haben mit Interesse, wertvollen Hinweisen und freundlicher Unterstützung die Entstehung dieser Arbeit begleitet. In gleichem Maße danke ich Herrn Dr. Peter Steier vom Institut für Isotopenforschung und Kernphysik der Universität Wien, der mir die Experimente an der Beschleunigeranlage VERA ermöglicht hat.

Den Mitarbeitern, insbesondere den Operatoren der Beschleunigeranlagen des Institutes für Ionenstrahlphysik und Materialforschung danke ich für die Bereitstellung ihrer Ressourcen zur Durchführung meiner praktischen Versuche an den von Ihnen betriebenen Anlagen. Allen Mitarbeitern der Zentralabteilung Forschungs- und Informationstechnik sei für die Unterstützung und das angenehme Arbeitsklima gedankt. Meinem Betreuer Herrn Dr.-Ing. habil. Krug danke ich für die gewährte Unterstützung. Er hat mir außerdem in entscheidenden Phasen der Anfertigung dieser Arbeit den Rücken von anderen Aufgaben frei gehalten. An dieser Stelle sei unbedingt auch mein Kollege Herr Dr.-Ing. Andreas Wolf genannt, der mir für zahlreiche anregende Diskussionen zur Verfügung stand.

Besonderen Dank gilt auch meiner Frau Katrin, die mir durch ihre Hilfe, Geduld und ihr Verständnis bei der Anfertigung dieser Arbeit zur Seite gestanden hat.

Dresden, den 12.3.2001

Frank Herbrand

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung.....	11
2 Optimierungsvorgänge an Strahlführungssystemen von Teilchenbeschleunigern.....	15
2.1 Begriffe.....	15
2.2 Beschleunigeranlagen.....	16
2.3 Strahlführungssysteme, Strahlführungselemente und Strahldiagnose.....	18
2.3.1 Stellglieder.....	18
2.3.2 Meßglieder.....	20
2.4 Betriebszustände an Beschleunigeranlagen.....	21
2.5 Anforderungen an eine automatische Optimierung der Stellwerte von Strahlführungssystemen.....	22
3 Optimierungsverfahren für Strahlführungsanlagen.....	25
3.1 Klassifikation von Optimierungsproblemen und Methoden.....	25
3.2 Untersuchungen zur Optimierung an Strahlführungsanlagen.....	26
3.3 Extremwertregelungsverfahren.....	28
3.4 Extremwertregelung mit Korrelationsverfahren.....	32
3.4.1 Testsignalgenerator G.....	35
3.4.2 Die Testsignalamplitude m und deren Regelung.....	36
3.4.3 Korrelationsoperator, Block P.....	39
3.4.4 Integration des Stellwertes im Block I.....	39
3.4.5 Adaption der Integrationszeitkonstante, Arbeitsschrittweite, Block A.....	39
3.4.6 Programmablauf des Extremwertregelungsvorgangs.....	41
3.5 Simulative Erprobung des Extremwertregelungsverfahrens.....	45
3.5.1 Strahlführungsabschnitt für die Simulation.....	47
3.5.2 Simulation des Verhaltens der Extremwertregelung bei gleichzeitiger Verstellung aller Stellwerte.....	57
3.5.3 Simulation des Verhaltens der Extremwertregelung bei Drifterscheinungen.....	60
4 Experimentelle Untersuchungen an Strahlführungsanlagen.....	63
4.1 Experimente an der 5-MV-Tandembeschleunigeranlage.....	63
4.1.1 Implementierung des Extremwertregelungsverfahrens.....	66
4.1.2 Versuchsauswertung.....	68

4.2 Experimente an der Strahlkopplungsanlage des 3-MV-Tandetron-Beschleunigers und des 500-kV-Implanters.....	71
4.2.1 Implementierung des Extremwertregelungsverfahrens.....	74
4.2.2 Versuchsauswertung.....	75
4.3 Experimente an der Beschleunigeranlage VERA.....	81
4.3.1 Implementierung des Extremwertregelungsverfahrens.....	82
4.3.2 Versuchsauswertung.....	83
5 Schlußfolgerungen und Ausblick.....	85
6 Zusammenfassung.....	89
7 Anhang.....	91
Anlage 1: Primitive Polynome und zugehörige Maskierungswerte.....	93
Anlage 2: Korrespondierende Variablen zwischen MATLAB und S7-Programm.....	94
Anlage 3: Algorithmus des Testsignalgenerators.....	96
Anlage 4: Erzeugung der Teilchenmatrix; MATLAB-Funktion "quelle".....	97
Anlage 5: Simulation eines Korrektorelementes; MATLAB-Funktion "wkorrr".....	98
Anlage 6: Simulation eines Quadrupolmagneten; MATLAB-Funktion "quadrupol".....	99
Anlage 7: Simulation einer Blende, MATLAB-Funktion "aperture".....	100
Anlage 8: Simulation eines Faradaybechers; MATLAB-Funktion "cup".....	101
Anlage 9: Verlauf der Stellwerte bei der Simulation in Kapitel 3.5.2.....	102
Anlage 10: Ergebnis von zwei weiteren Simulationsläufen aus Kapitel 3.5.2.....	107
Anlage 11: Verlauf der Stellwerte bei der Simulation in Kapitel 3.5.3.....	108
Anlage 12: Ergebnis von zwei weiteren Simulationsläufen aus Kapitel 3.5.3.....	112
Anlage 13: Dokumentation des Funktionsbausteins FB101 in der SIMATIC-Steuerung des Tandembeschleunigers.....	113
Anlage 14: Zwei Optimierungsläufe an der Tandem-Beschleunigeranlage entsprechend Kapitel 4.1.2.....	118
Anlage 15: Der Optimierungsalgorithmus als MATLAB-Funktion für die Simulation – Funktion "optimize6.m".....	119
Anlage 16: Funktionsbaustein und Funktion zur Extremwertregelung mit der SIMATIC S7-400 (FB100, FC107).....	127
Anlage 17: Versuchsergebnisse aus dem zuerst beschriebenen Versuch in Kapitel 4.2.2.....	150
Anlage 18: Versuchsergebnisse aus dem zweiten beschriebenen Versuch in Kapitel 4.2.2.....	157

8 Verzeichnis der Abkürzungen und Formelzeichen.....	163
9 Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen.....	165
10 Literaturverzeichnis.....	169

1 Einleitung

Die Entwicklung und Nutzung von Teilchenbeschleunigeranlagen besitzt eine lange Tradition. Viele Entdeckungen der modernen Physik sind nur durch diese Technik möglich geworden. Die Anwendungen in der experimentellen Wissenschaft erstrecken sich dabei nicht nur auf die Teilchenphysik. In zunehmenden Maße wurde die Anwendung dieser Technik auch auf andere Wissenschaftsbereiche erweitert. Auch die Nutzung in der Industrie und Medizin stellt heute keine Besonderheit mehr dar. Stellvertretend sei hierfür die Ionenimplantation und die Tumorbekämpfung mit Hilfe von Ionenbeschleunigeranlagen genannt.

So vielfältig, wie die Anwendungsgebiete sind, so verschieden ist auch die technische Ausrüstung von Beschleunigeranlagen. Genutzt werden entweder die beschleunigten Teilchen selber oder die mit ihrer Hilfe erzeugte sekundäre Strahlung. Um Teilchen beschleunigen zu können, müssen sie eine elektrische Ladung besitzen. Es kommen also Elektronen, Positronen sowie leichte und schwere Ionen zur Anwendung, die in sogenannten Teilchenquellen erzeugt werden. Beschleunigeranlagen werden in Bezug auf die zu beschleunigenden Teilchen in die beiden wesentlichen Gruppen der Elektronen- bzw. Positronenbeschleuniger und der Ionenbeschleuniger für schwere oder leichte Ionen eingeteilt. Diese Einteilung ergibt sich insbesondere aus der sehr unterschiedlichen Masse von Elektronen und Positronen gegenüber Ionen und der daraus resultierenden Technologie zur Beschleunigung.

Eine weitere Einteilung läßt sich bezüglich der Laufbahn der Teilchen während des Beschleunigungsprozesses treffen. Bei den sogenannten Linearbeschleunigern wird der Teilchenstrahl einmal durch die Beschleunigeranordnung geschickt und besitzt danach seine Endenergie. Bei den Kreisbeschleunigern wird der Strahl hingegen auf eine umlaufende Bahn gebracht und somit die Beschleunigungsstrecke mehrfach ausgenutzt. Informationen über die verschiedenen Arten von Beschleunigern, die historische Entwicklung und die Anwendungen kann unter anderem /2/, /63/, /64/ und /65/ entnommen werden. /63/ enthält außerdem eine umfangreiche Bibliographie über dieses Thema.

Die Bewegung des Teilchenstrahls in solchen Beschleunigeranlagen wird durch sogenannte Strahlführungselemente gesteuert. Die Wirkung auf die Teilchen eines Strahls wird hierbei über elektrische oder magnetische Felder erzielt. Es werden Elemente eingesetzt, die (in der Näherung des Strahltransports 1. Ordnung betrachtet) ablenkende und fokussierende Eigenschaften besitzen. Bei der ersten Form werden alle Teilchen des Strahls um einen gleichen Winkelbetrag abgelenkt. Im Gegensatz dazu wirken bei den fokussierenden Elementen die ablenkenden Kräfte abhängig von der Position der Teilchen in der Querschnittsebene. Die Strahlführungselemente dienen zum möglichst verlustfreien Transport der Teilchen von einem Punkt zu einem anderen und zur Anpassung der Strahleigenschaften an nachfolgende Systeme.

Bei der Projektierung einer Beschleuniger- bzw. Strahlführungsanlage wird genau festgelegt, welches Strahlführungselement an welcher Position eingesetzt wird und welchen Einfluß es quantitativ auf den Strahl haben soll. Dies erfolgt durch Berechnungen und Simulationen, die mehr oder weniger genau das System aus Teilchenquelle, Strahltransport und Strahlbeschleunigung beschreiben. Die Genauigkeit dieser Berechnungen resultiert aus der Genauigkeit der Modellierung der Teilchenquelle, aller auf die Teilchen eines Strahls wirkenden Kräfte und auf die Kräfte, die die Teilchen untereinander ausüben. Die Berechnungen werden mit einem solchen Aufwand ausgeführt, daß damit eine Projektierung der Gesamtanlage auch zum gewünschten Erfolg führt. Die Genauigkeit läßt sich aber insbesondere bei der Modellierung des Extraktionsprozesses der Teilchenquelle selten bis in eine solche Größenordnung führen,

daß nach der Inbetriebnahme der Anlage mit den errechneten Einstellwerten der Strahl am betrachteten Ort die gewünschten Eigenschaften erfüllt. Aus diesem Grund wird ein Strahlführungssystem immer so konzipiert, daß die Strahlführungselemente nach dem Zuschalten der Teilchenquelle entlang des Strahlweges schrittweise so eingestellt werden können, daß der Strahl mit möglichst wenig Verlust die Strahlführung passiert und am betrachteten Ort die gewünschten Parameter erreicht. Dieser Vorgang wird als "Strahlfädeln" bezeichnet. Er ist ein typischer Optimierungsvorgang. Da die Strahlführung in der Regel nicht aus einem einzigen Strahlführungselement besteht, handelt es sich hierbei um ein mehrdimensionales Optimierungsproblem.

Werden die beiden Betriebszustände einer Beschleunigeranlage mit den Begriffen offline und online eingeteilt, wobei online bedeutet, daß der Teilchenstrahl auf einem Target für einen bestimmten Zweck genutzt wird, und im offline-Betrieb der Teilchenstrahl vor dem Target abgefangen wird, dann wird der Strahlfädelungsvorgang dem offline-Betrieb zugeordnet. Ist dieser Schritt erfolgt, dann behält der Strahl seine Parameter in bestimmten Grenzen über einen unbestimmten Zeitraum bei. Die Dauer dieses Zeitabschnitts hängt von Drifterscheinungen und vor allem vom statistischen Charakter der Teilchenextraktion in der Quelle ab. Entscheidend für die Stabilität der Strahlparameter ist deshalb das Funktionsprinzip der Teilchenquelle. Die bekannten unterschiedlichen Funktionsprinzipien resultieren wiederum aus den Teilchenarten, die in den Anlagen erzeugt werden sollen und den zu erreichenden Strahlparametern.

Wird im Verlauf der Zeit beobachtet, daß die Strahlparameter die vorgegebenen Grenzen verlassen, wird mit den Stellgrößen der Strahlführungselemente eine neue Optimierung durchgeführt. Dies erfolgt in der Regel im offline-Betrieb. Das heißt, der Teilchenstrahl wird nicht bis zum Target durchgelassen. Zur Optimierung muß der Strahl in seinen Parametern gemessen werden. In der offline-Betriebsphase könne dabei Meßmethoden angewendet werden, die den Strahl unterbrechen. Bei einer Optimierung im online-Betrieb hingegen dürfen die Meßelemente den Strahl nicht oder nur unwesentlich beeinflussen.

Die eben beschriebenen Optimierungen werden an einer großen Zahl von Beschleunigeranlagen per Hand durch einen Operator ausgeführt. Das zeigt, daß beim vorliegenden mehrdimensionalen Optimierungsproblem die Verkopplung der einzelnen Stellgrößen bezüglich der Wirkung auf das Gütemaß nicht zu komplex sind. Eine Automatisierung dieses per Hand durchgeführten Vorgangs mit Verfahren der numerischen Optimierung dürfte deshalb keine Probleme bereiten.

Neben der eigentlichen Fähigkeit eines Automatisierungssystems, die Optimierung im offline-Betrieb durchzuführen, besteht der Wunsch der Betreiber solcher Anlagen, daß, einmal in den online-Betrieb übergegangen, dieser möglichst lange aufrecht erhalten werden kann. Entscheidend hierbei ist der Extraktionsprozeß der Teilchen aus der Teilchenquelle. Bei diesen Extraktionsprozessen werden Drifterscheinungen beobachtet, die teilweise durch eine Nachoptimierung der Strahlführungselemente ausgeglichen werden können. Um den Zeitpunkt, an dem eine neue Optimierung im offline-Betrieb durch diese Drifterscheinungen erforderlich wird, möglichst lange hinauszuschieben, wäre es wünschenswert, wenn der Optimierungsvorgang auch im online-Betrieb aktiv bleibt und die Drifterscheinungen sofort ausgeglichen werden können.

Numerische Optimierungsverfahren wurden entwickelt, um möglichst effektiv, d. h. mit möglichst geringer Schrittzahl, aus unterschiedlicher Entfernung den Optimalpunkt zu ermitteln. Wird bei diesen Verfahren die Schrittweite gesteuert, erfolgt dies mit der Absicht, große Schritte zur groben Suche und danach kleinere Schritte zur genauen Auffindung des Optimums durchzuführen. Die dabei teilweise stark wechselnde Amplitude des Gütesignals als

Zielgröße der Optimierung bleibt unberücksichtigt. Mit diesen Verfahren ist es deshalb nicht unmittelbar möglich, online an einer Strahlführungsanlage zu optimieren. Für diesen Anwendungszweck ist es notwendig, die Suchverluste während der Optimierung zu begrenzen. Es ist außerdem erforderlich, solch ein Optimierungsverfahren ausreichend robust gegenüber Störungen im Gütesignal auszulegen. Dies resultiert daraus, daß das Gütesignal aus Meßsignalen gewonnen wird, die nicht frei von Störungen sein können.

Im nachfolgenden Kapitel werden die Einsatzbedingungen genauer abgegrenzt, unter denen der Optimierungsvorgang ablaufen muß. Unter Berücksichtigung dieser Bedingungen wird danach ein bestimmter Typ von Optimierungsalgorithmus ausgewählt, der in der Literatur unter dem Oberbegriff Extremwertregelungsverfahren bekannt ist. Dieses speziell ausgesuchte Verfahren beruht auf einer Korrelation zwischen einem Testsignal für jede Stellgröße und einem gemeinsamen Gütesignal. Durch einige Anpassungen und Erweiterungen wurde dieses Verfahren auf die Aufgabenstellung einer Optimierung an Strahlführungselementen zugeschnitten. Dabei wird mittels einer Testsignalamplitudenregelung eine automatische Anpassung der Amplitude des Testsignals an die "Breite" des Optimalgebietes erreicht. Durch die Nutzung der Korrelation zur Ermittlung der Suchrichtung und die Regelung der Testsignalamplitude wird eine online-Optimierung möglich, da die Stellwerte nur sehr kleinen Abtast- und Arbeitsschritten unterworfen sind. Durch die Einführung eines Testsignalgenerators für zufällige 1-Bit-Signale kann das Extremwertregelungsverfahren gleichzeitig für mehrere Stellgrößen verwendet werden, ohne daß einige Stellgrößen durch eine höhere Testsignalfrequenz bei der Optimierung bevorzugt würden.

Dieses Extremwertregelungsverfahren wird im weiteren simulativ erprobt. Bei dieser Simulation kann insbesondere auch die Reaktion auf Drifterscheinungen überprüft werden, was bei einer Erprobung an einer real existierenden Anlage nicht ohne weiteres möglich ist. Schließlich erfolgt die praktische Umsetzung des Optimierungsprinzips in experimenteller Form an zwei Strahlführungsanlagen am Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung des Forschungszentrums Rossendorf e.V. und an einer Beschleunigeranlage der Universität Wien.

2 Optimierungsvorgänge an Strahlführungssystemen von Teilchenbeschleunigern

Mit der Beschreibung der Strahlführungssysteme und der durchzuführenden Optimierungsvorgänge in diesem Kapitel werden Voraussetzungen und Abgrenzungen bezüglich der zu entwickelnden automatischen Optimierungslösung, deren Simulation, der Meßtechnik und der Verallgemeinerungsfähigkeit getroffen. Da auf diese im weiteren Text wieder verwiesen wird, werden sie als sogenannte Prämissen "P" hervorgehoben und mit einer fortlaufenden Nummer versehen. Am Ende dieses Kapitels werden diese Prämissen nochmals tabellarisch zusammengefaßt.

2.1 Begriffe

Zur Beschreibung des Bewegungsvorganges der Teilchen eines Strahls ist es üblich, ein rechtwinkliges Koordinatensystem $\{x, y, z\}$ einzuführen, das entlang der idealen Strahlachse mit dem Teilchen mitgeführt wird /2/, /3/. Dieses Koordinatensystem soll auch hier verwendet werden. Der Koordinatenursprung befindet sich immer auf der Linie der idealen Strahlachse. Die Koordinate z zeigt in Richtung der Bewegung auf der idealen Strahlachse. In gekrümmten Bahnen ist z also die Tangente an die ideale Strahlachse (Abbildung 2.1). Die Koordinaten x und y spannen damit die Fläche auf, die rechtwinklig die ideale Strahlachse im Koordinatenursprung schneidet. Die Zuordnung der Richtung der Koordinaten x und y im Raum (horizontal und vertikal) wird dabei für jede Anlage speziell definiert. Die Bezeichnung der Koordinaten wird in der Literatur nicht einheitlich gehandhabt. Eine andere häufig benutzte Bezeichnung ist $\{z, x, s\}$, z. B. in /1/ und /2/.

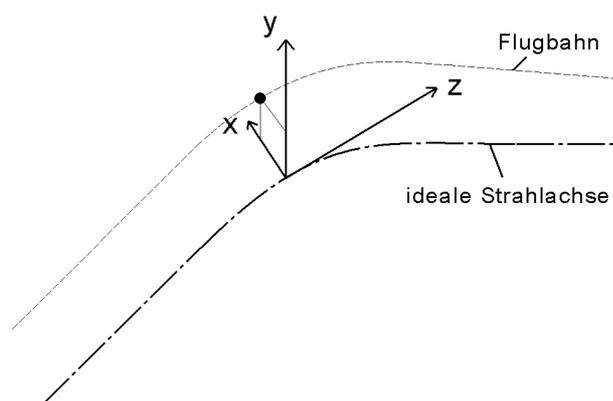


Abbildung 2.1: Koordinatensystem für den Bewegungsvorgang der Strahlteilchen

Zur Darstellung der Bewegungsvorgänge des Strahls wird der Begriff des Phasenraumes benutzt /41/. Es wird dabei zwischen longitudinalem und transversalem Phasenraum unterschieden. Der transversale Phasenraum $\{x, x', y, y'\}$ umfaßt Orte und Bewegungsrichtungen innerhalb der Querschnittsfläche $\{x, y\}$ an einer bestimmten Stelle z entlang der idealen Strahlachse. Er steht in unmittelbarem Zusammenhang mit den Elementen der Strahlenoptik. Der longitudinale Phasenraum beschreibt hingegen die Zusammenhänge von Orten und

Bewegungen von Teilchen innerhalb eines Teilchenpaketes entlang der Strahlrichtung. Er ist nur für gepulste Teilchenstrahlen und Beschleunigungen in Wechselfeldern interessant. Diese Arbeit beschäftigt sich ausschließlich mit Optimierungsproblemen an Strahlführungselementen der Teilchenoptik. Deshalb ist nur der transversale Phasenraum Bestandteil der Betrachtungen.

Ein Maß zur Charakterisierung der Eigenschaften eines Strahls ist die physikalische Größe "Emittanz". Sie entspricht dem Volumen im Phasenraum, das der Strahl einnimmt und wird als transversale Emittanz für die separierten Phasenräume $\{x, x'\}$ und $\{y, y'\}$ angegeben. In diesem Fall handelt es sich um zweidimensionale Emittanzen /4/. Die Basiseinheit der Emittanz ist [m·rad]. Die reale Verteilung der Teilchen innerhalb dieses Phasenraumes wird dabei nicht berücksichtigt. Vereinfachend wird häufig davon ausgegangen, daß sich die Teilchen im Phasenraum näherungsweise GAUSS-förmig verteilen. Bei gepulstem Strahl wird zusätzlich die Emittanz im longitudinalen Phasenraum angegeben. Wie bereits bei der Beschreibung des Phasenraums erwähnt, werden in dieser Arbeit nur die transversalen Größen berücksichtigt.

Für die Strahltransportrechnung werden hierbei zwei Vereinfachungen getroffen, die die Emittanz sehr stark idealisieren /1/:

- Die diffuse Abnahme der Teilchendichte zu den Rändern des Phasenvolumens hin wird nicht berücksichtigt. Dadurch entsteht eine scharfe Begrenzung des betrachteten Phasenraumes, welcher vom Strahl eingenommen wird.
- Die Phasenraumbegrenzung in den separierten Phasenräumen $\{x, x'\}$ und $\{y, y'\}$ wird durch eine Ellipse beschrieben.

In Analogie zur Emittanz bezeichnet man als Akzeptanz den Phasenraum am Eingang eines Strahlführungs- oder Strahlbeschleunigungsabschnittes, den ein Teilchenstrahl maximal ausfüllen kann, ohne durch Begrenzungen innerhalb dieses Abschnittes beschnitten zu werden.

2.2 Beschleunigeranlagen

Eine Beschleunigeranlage besteht im wesentlichen aus den folgenden Abschnitten:

- Injektor
- Beschleuniger
- Strahlführungssystem zum Target
- Target

Der Injektor umfaßt immer die Teilchenquelle und ein mehr oder weniger umfangreiches Strahlführungssystem. Um die Teilchen in den Beschleuniger zu führen, müssen sie aus der Quelle extrahiert werden. Dieser Prozeß stellt für sich bereits einen Beschleunigungsvorgang dar. Bei Ionenquellen können bei der Extraktion verschiedene Ionen gleichzeitig frei werden. Eine Aufgabe des Injektors ist es dann, diese verschiedenen Ionen zu separieren und nur die Ionen bis zum Beschleuniger durchzuleiten, die am Target gewünscht werden (P1).

Die wesentlichen Anforderungen an den Teilchenstrahl am Beschleunigereingang ergeben sich aus der Akzeptanz des Beschleunigers. Aufgabe des Injektors ist es deshalb, die Emittanz des Teilchenstrahls an die Akzeptanz des Beschleunigers anzupassen. Bei gepulsten Teilchenstrahlen übernimmt der Injektor außerdem noch Aufgaben zur Formung der Teilchenpakete.

Bei Linearbeschleunigern wird der Teilchenstrahl unmittelbar vom Injektor in den Beschleuniger geführt und dort in einer oder mehreren Beschleunigerstufen beschleunigt. Zwischen den Beschleunigerstufen können sich kurze Strahlführungsabschnitte zur Korrektur der Strahlage, zur Fokussierung und zur Diagnose befinden. Am Ende der Beschleunigerstrecke tritt der Teilchenstrahl in ein weiteres Strahlführungssystem ein, durch das er bis zum Target geleitet und gegebenenfalls an dessen Bedingungen angepaßt wird.

Im Fall der Kreisbeschleuniger muß der Teilchenstrahl, aus dem Injektor kommend, zuerst in das System des umlaufenden Strahls eingekoppelt werden. Einmal in dieses System eingeschleust, durchlaufen die Teilchen den Beschleuniger mehrfach. Um die Teilchen nach ausreichender Beschleunigung wieder aus der umlaufenden Bahn herauszuführen, werden spezielle Einrichtungen zur Ejektion benutzt. Danach wird wie bei den Linearbeschleunigern der Teilchenstrahl durch ein weiteres Strahlführungssystem bis zum Target geführt.

Es gibt spezielle Ausführungen von Beschleunigern, bei denen sich der Injektor bzw. die Teilchenquelle innerhalb der Beschleunigerstruktur befinden kann (Van-de-Graaff-Beschleuniger, Zyklotron). Bei großen Kreisbeschleunigeranlagen kann ein Linearbeschleuniger Bestandteil des Injektors sein.

Zu der Besonderheit von Kreisbeschleunigern gegenüber den Linearbeschleunigern, daß der Teilchenstrahl eingekoppelt und ausgekoppelt werden muß, kommt noch die Eigenschaft, daß durch den vielfachen Umlauf der Teilchen jedes Strahlführungsgerät mehrfach passiert wird und damit die Wirkung dieses Elementes komplexer mit dem Gesamtsystem verbunden ist als dies bei Linearbeschleunigeranlagen der Fall ist. Da zur praktischen Untersuchung im Rahmen dieser Arbeit im Forschungszentrum Rossendorf e. V. (FZR) Linearbeschleuniger für Ionen zur Verfügung stehen, wurde diese Beschleunigerart für die weiteren Betrachtungen ausgewählt (P2). Diese Beschleuniger des FZR arbeiten ausschließlich mit ungeladenen Strahlen. Deshalb werden die Betrachtungen in dieser Arbeit auf diese Betriebsart beschränkt. Dies hat unmittelbare Auswirkungen auf die Möglichkeiten der Strahldiagnose (P3).

Als Anwendungsziele von Experimenten an solchen Beschleunigeranlagen kommen die unterschiedlichsten Möglichkeiten in Frage. Dies kann z.B. die Beobachtung von Wechselwirkungen mit anderer beschleunigter oder unbeschleunigter Materie zum Zwecke der physikalischen Grundlagenforschung oder der Materialanalyse sein. Ebenso ist eine Materialbearbeitung möglich. Hierunter fällt z.B. die Implantation mit Ionen. Auch eine sekundäre Nutzung des Teilchenstrahls nach Wechselwirkung mit magnetischen Feldern in Form von elektromagnetischen Wellen (Strahlung) wird vielfach angewendet.

Das Ziel des Experiments oder des technologischen Prozesses bestimmt letztlich, welche Teilchenart, welche Energie und welche Strahleigenschaften von der Beschleunigeranlage gefordert werden. In Forschungseinrichtungen werden die Beschleunigeranlagen in der Regel so ausgelegt, daß sie einen möglichst großen Bereich dieser Parameter abdecken können, um über eine möglichst lange Nutzungszeit eine Vielzahl von Anwendungsfällen ermöglichen zu können. Sie stellen deshalb in der Regel nicht immer für alle Betriebszustände auch automatisch die ideale Konfiguration dar. Es ist meist nicht bzw. nur eingeschränkt möglich, eine Anlage so zu konzipieren, daß sie im Betrieb keinerlei Optimierungsaufwand zur Erfüllung der Strahlparameter erfordert. Von vielen Anlagen wird außerdem verlangt, daß Strahlführungsab-

schnitte mehrfach in ihrer Ausführung verändert werden können. Dazu gehört insbesondere die Strahlführung in den letzten Abschnitten vor dem Target. Das Gesamtsystem sollte deshalb insbesondere in der Steuerung und Bedienung so ausgelegt sein, daß solche Eingriffe mit geringem Aufwand möglich sind. Jeder Automatismus in der Ansteuerung und damit auch die in dieser Arbeit betrachteten Mittel zur automatischen Optimierung müssen diesem Anspruch gerecht werden (P4).

2.3 Strahlführungssysteme, Strahlführungselemente und Strahldiagnose

Als Strahlführungssystem soll hier ein Abschnitt bezeichnet werden, bei dem die Energie der Teilchen beim Ein- und Austritt aus diesem System gleich ist. Das heißt, dieses System enthält keine Beschleunigungsstrecken. Der in dieses System hineingehende Strahl stellt einen Komplex von Eingangsgrößen dar. Diese Größen sind die Bewegungszustände, die Masse, der Ladungszustand und die Energie der Teilchen. Da die Eigenschaften dieses Strahls am Eingang des Strahlführungssystems meist nicht genau bekannt sind, können diese Eingangsgrößen in Form einer Differenz zu einem angenommen idealen Strahl auch als Störgrößen betrachtet werden. Jeder feldfreie Raum in diesem System stellt eine Driftstrecke für die Teilchen des Strahls dar, in der sie sich geradlinig bewegen. Um die Teilchen in ihrer Bewegung zu beeinflussen, enthält ein solches System Strahlführungselemente. Diese Elemente sind somit die Stellglieder des Systems. Zur Diagnose des Teilchenstrahls an bestimmten Stellen im Strahlengang gibt es unterschiedlichste Methoden und Geräte. Diese Hilfsmittel sind demzufolge die Meßglieder des Systems. Weitere Beeinflussungsmöglichkeiten der Teilchen in einem solchen System bestehen in der Wirkung von Fremdfeldern. Dies können Gleich- und Wechselfelder sein. Sie stellen immer Störgrößen für den Strahltransport dar. Zusätzliche Einflußgrößen in diesem System sind die Aperturen der Strahlrohre, Strahlführungs- und Diagnoseelemente und die Abbildungsfehler an den Strahlführungselementen insbesondere außerhalb der idealen Strahlachse. Alle Einflüsse sind entscheidend für das nichtlineare Verhalten des Systems verantwortlich. Aperturen werden dabei auch zusätzlich eingebaut, um Strahlführungssysteme untereinander besser zu entkoppeln oder um die Emittanz im transversalen Phasenraum des Strahls zu verringern. Dabei werden fest eingestellte oder veränderliche Aperturen benutzt. In diesem Zusammenhang stellen veränderliche Aperturen weitere Stellglieder dar.

2.3.1 Stellglieder

Zur Beeinflussung der Teilchen eines Strahls können elektrische und magnetische Felder verwendet werden. Strahlführungselemente auf Basis elektrischer Felder werden vorwiegend bei Ionenbeschleunigeranlagen im niederenergetischen Teil der Anlage verwendet. Die magnetischen Felder werden hingegen bei allen Beschleunigerarten benutzt. Die Wahl für das eine oder andere Prinzip hängt von der gewünschten Stärke der Wirkung unter Berücksichtigung von Masse und Energie der Teilchen ab.

Strahlführungselemente werden bezüglich ihrer strahlenoptischen Wirkung eingeteilt. Der einfachste Wirkmechanismus ist die Ablenkung aller Teilchen um den gleichen Winkel (hier unter Vernachlässigung der dabei auftretenden schwachen Fokussierung). Dies wird durch ein möglichst homogenes Feld innerhalb des Strahlführungselementes erreicht. Zu dieser Gruppe gehören die Dipole, Korrektorspulen bzw. Steerer. Die Ablenkwirkung wird bei diesen Elementen in Form des Ablenkradius angegeben. Strahlablekende Elemente besitzen immer

auch die Eigenschaft einer sogenannten schwachen Fokussierung /4/. Bei kleinen Ablenkwinkeln, wie sie bei Korrektoren vorkommen, kann dieser Einfluß meist vernachlässigt werden.

Bei der zweiten Gruppe der Strahlführungselemente verlaufen die Feldlinien des elektrischen oder magnetischen Feldes innerhalb des Elementes so, daß die aus der Wechselwirkung des Feldes mit dem geladenen Teilchen resultierende Ablenkung beim vollständigen Durchlaufen des Elementes auf der idealen Strahlachse Null ist und mit zunehmendem Abstand von dieser Achse linear ansteigt. In der x - z -Ebene des in Kapitel 2.1 eingeführten Koordinatensystems folgt also die Änderung der Bewegungsrichtung beim Durchlaufen des Elementes der Gleichung

$$x'' = k x \quad (2.1)$$

Bei der speziellen Bauform des sogenannten Quadrupols wird k als Quadrupolstärke bezeichnet. Quadrupollinsen werden in der Regel als Quadrupol-Doublets oder -Triplets ausgeführt, um in beiden Ebenen fokussieren zu können. Andere Bauformen mit fokussierenden Eigenschaften sind z.B. Solenoide und elektrostatische Linsen.

Diese beiden Gruppen der Strahlführungselemente gehören zu den Elementen der sogenannten linearen Strahlenoptik. Idealisiert besitzen diese Elemente nur konstante und linear mit der transversalen Richtung sich ändernde Ablenkkräfte. Kraftwirkungen höherer Ordnung treten bei diesen Elementen als Fehler in den Abbildungseigenschaften auf. Bei solchen Feldanteilen höherer Ordnung kommt es zusätzlich noch zu einer Verkopplung der Bewegung der Teilchen zwischen der x - z - und y - z -Ebene /2/.

Reale Strahlführungselemente sind in der Regel so ausgeführt, daß die Wirkung höherer Ordnung gegenüber dem Wirkungsanteil der linearen Strahlenoptik sehr gering ist. Dies gilt aber nur für einen begrenzten Bereich um die ideale Strahlachse.

Die einzelnen Strahlführungselemente werden aus Spannungs- bzw. Stromversorgungsgeräten gespeist, die meist speziell für diese Anwendung entwickelt wurden. Moderne Versorgungsgeräte besitzen zur Ansteuerung eine genormte Schnittstelle für die serielle Übertragung von Daten. Auch genormte analoge Eingangssignale sind bei Geräten üblich, die keine extreme Auflösung des Einstellbereiches erfordern. Stromversorgungsgeräte für Magnete mit Eisenjoch besitzen zudem häufig eine Feldregelung, um die Reproduzierbarkeit der Einstellwerte bezüglich der Wirkung auf den Teilchenstrahl sicherzustellen. Dies ist insbesondere bei Dipolmagneten erforderlich, da sie auch bei großem Ablenkwinkel diesen Winkel sehr genau einhalten müssen. Spannungs-, Strom- oder Feldregelung sind meist so ausgelegt, daß für den Verlauf der Feldgröße über der Zeit beim Übergangsvorgang auf einen neuen Sollwert ein zu einem Verzögerungsglied 1. Ordnung vergleichbarer Verlauf angenommen werden kann. Durch Begrenzungen kann allerdings nicht von einem linearen Verhalten bei unterschiedlich großen Sollwertsprüngen ausgegangen werden (P5).

Die Reaktions- bzw. Ausregelzeiten der Strahlführungsgeräte hängen sehr stark von der jeweiligen Ausführung der Geräte ab. Bei großen Stellwertänderungen und Magneten mit hohen Stromstärken kann diese Zeit über 1s liegen. Bei Strahlführungsgeräten mit kleinen Magnetfeldern oder elektrostatischen Feldern und kleinen Stellwertänderungen können diese Zeiten wesentlich kürzer sein.

Da diese Geräte im Normalfall über ihre Schnittstelle aus der Ferne bedient werden und diese Bedienung über eine Bedienoberfläche und mindestens eine zwischenliegende Automatisierungsebene erfolgt, gibt es Totzeiten zwischen der Vorgabe des Stellwertes und dem

Beginn der Reaktion des Stellgliedes. Diese Totzeiten setzen sich aus Zeiten zur Datenübertragung und aus Programmablaufzeiten zusammen. In der Regel ist diese Totzeit nicht konstant, sondern hängt vom momentanen Bearbeitungszustand der Software und von Wartezeiten an Datenbussen ab. Meist kann nur eine Obergrenze für die Totzeit angegeben werden (P6).

Die genannten Zeiten plus der Zeiten an den Meßstellen zur Meßwertaufnahme, -verarbeitung und -übertragung sind viele Größenordnungen höher als die Flugzeiten der Teilchen von der einwirkenden Stelle bis zu einer darauffolgenden Meßstelle. Aus diesem Grund kann das System zwischen Strahlführungselement und Meßwertaufnehmer als statisches System betrachtet werden (P7).

2.3.2 Meßglieder

Ein Teilchenstrahl wird am umfassendsten durch seine Emittanz beschrieben. Die Bestimmung der Bewegungsvorgänge der im Strahl befindlichen Teilchen ist beim derzeitigen Stand der Technik jedoch nicht ohne eine nahezu vollständige Unterbrechung des Strahls an der Meßstelle möglich. Für eine online-Optimierung ist die Bestimmung der Emittanz deshalb nicht möglich. Sie ist aber auch nicht immer nötig. Grundsatz der Optimierung der Strahlführungselemente ist, daß letztlich am Target bestimmte Eigenschaften des Strahls eingehalten bzw. optimiert werden sollen. Wenn z.B. ein Teilchenstrahl auf die Oberfläche eines Targets auftrifft, spielt die Bewegungsrichtung der einzelnen Teilchen häufig keine Rolle mehr. Entscheidend ist die Dichteverteilung des Teilchenstromes. Für diesen Zweck ist also eine Bestimmung des Stromdichteprofiles völlig ausreichend. Aus solch einem Profil ist die Lage des Strahls in der x - y -Ebene ebenso ablesbar, wie die Ausdehnung in dieser Ebene und die Symmetrieeigenschaften. Wie später gezeigt wird, ist es aber für das Erreichen des Optimierungszieles nicht einmal unbedingt nötig, das gesamte Stromdichteprofil eines Strahls zu erfassen. Auch bereits eine punktuelle oder sektorweise Erfassung kann zum Erfolg eines Optimierungsvorganges führen.

Im folgenden werden Meßverfahren kurz umrissen, die für eine online-Optimierung geeignet erscheinen. Online bedeutet hierbei, daß der Strahl an der Meßstelle nicht unterbrochen werden soll. Diese Bedingung kann allerdings abgeschwächt werden. Möglich sind auch Meßverfahren, die den Strahl nur geringfügig (z.B. am Rand) unterbrechen oder bei denen Strahlanteile aufgefangen werden, die das Target nicht erreichen (z.B. unmittelbar neben dem Target). Im folgenden werden nur Meßverfahren berücksichtigt, die unter den Prämissen P2 und P3 verwendet werden können.

Strommessung an Quelle und Target

Der Teilchenstrahl stellt durch seine gerichtete Bewegung einen Stromfluß dar. Da ein Stromkreis immer geschlossen ist, kann dieser Strahlstrom auch außerhalb des Strahlweges gemessen werden. Solch ein Strom tritt an Blenden und am Target zwischen diesen und dem Erdpotential sowie an der Quelle zwischen Erde und Hochspannungspotential auf.

Faraday-Becher

Insbesondere beim Fädeln des Strahls werden Faraday-Becher in den Strahlengang eingefahren. An diesen Stellen wird der Strahl allerdings vollständig unterbrochen. Bei Teilchenstrahlen, die über ein Target gescannt werden, können diese Meßeinrichtungen jedoch neben dem Target angeordnet werden. Während des Scannvorgangs überstreicht der Strahl zyklisch

diese Faradaybecher und Aussagen über Stromstärke und Symmetrie des Scannvorgangs lassen sich daraus ermitteln.

Sektorblenden

Während Faraday-Becher einen in der Regel kreisrunden zentrierten Ausschnitt des Strahls erfassen, arbeiten Sektorblenden dazu invers. Ein Ausschnitt der kreisförmig, viereckig oder vieleckig sein kann, läßt den Strahl passieren. Nur der Randbereich des Strahls wird durch die Blenden angeschnitten. Damit läßt sich zwar keine Aussage über die Gesamtstromstärke, dafür aber über Symmetrieeigenschaften und die Zentrierung im Strahlengang treffen.

Drahtscanner

Beim Drahtscanner wird ein Draht zyklisch durch den Strahlengang geführt. Im einfachsten Fall kann mit einem Oszilloskop das Linienstromdichteprofil in jeweils einer Richtung abgelesen werden. In der jeweils anderen dazu orthogonalen Richtung wird der Strahlstrom über die Drahtlänge integral erfaßt. Mechanisch wird der Draht so geführt, daß nacheinander in beiden zueinander orthogonalen Richtungen das Linienstromdichteprofil erfaßt wird. Je nach Dicke des Drahtes im Verhältnis zu den Strahlabmessungen wird dabei der Strahl mehr oder weniger stark abgeblendet. Da mit diesem Meßverfahren gegenüber den anderen genannten Verfahren die meisten Informationen über das Strahlstromdichteprofil und damit über die Symmetrieeigenschaften erfaßt werden können, eignet es sich besonders gut für eine online-Optimierung. Voraussetzung dabei ist, daß die Auflösung des Drahtscanners gegenüber den Strahlabmessungen ausreichend ist. Im anderen Fall lassen sich nur Informationen über die Strahlage bezüglich der idealen Strahlachse und bedingt Informationen über die Fokussierung gewinnen.

Eine Übersicht über bekannte Meßverfahren teilweise auch mit Blick auf gepulste Teilchenstrahlen als Verallgemeinerung zur Prämisse P3 ist z.B. in /2/, /7/ und /54/ zu finden.

2.4 Betriebszustände an Beschleunigeranlagen

Der Strahlbetrieb an Linearbeschleunigeranlagen läßt sich in 3 Zustände einteilen.

- Strahlfädeln. Nach jeder Inbetriebnahme der Anlage wird ausgehend von der Teilchenquelle der Teilchenstrahl schrittweise durch die Strahlführungssysteme und den Beschleuniger gefädelt. Dazu werden nacheinander strahlunterbrechende Meßelemente (Faraday-Becher oder Schirme zur optischen Abbildung) in den Strahlengang eingefahren. Dabei werden Startwerte für sämtliche Strahlführungselemente gewählt, die sich aus archivierten Werten früheren Strahlbetriebs, aus berechneten Werten für Teilchenmasse, Ladungszustand und durchlaufener Beschleunigungsspannung oder aus daraus interpolierten Werten ergeben.
- Strahlnutzung. Ist der Strahlfädelungsprozeß abgeschlossen, wird der Strahl bis aufs Target freigegeben und kann dort genutzt werden.
- Nachoptimierung. Werden nach einer mehr oder weniger langen Strahlnutzung durch Drifterscheinungen nicht mehr die für das jeweilige Experiment ausreichenden Strahleigenschaften erreicht, muß der Strahl wieder optimiert werden. Je nach dem Grad der Veränderungen der Eigenschaften kann der Strahl unter

eingeschränkten Bedingungen online unter Beobachtung von nicht den Strahl unterbrechenden Meßgliedern optimiert werden. In den meisten Fällen wird jedoch für die Nachoptimierung der Strahl durch einzufahrende Meßeinrichtungen stellenweise unterbrochen. Im Extremfall wird ein neuer Prozeß des Strahlfädels erforderlich.

Der dritte Punkt führt damit oft zu einer Unterbrechung des laufenden Experimentierbetriebs. Ansatzpunkt für diese Arbeit soll deshalb sein, durch eine automatische, ständig im Hintergrund laufende Optimierung, die Häufigkeit und Zeitdauer solcher Unterbrechungen zu minimieren. Diese Optimierung soll also die Drifterscheinungen während des Strahlbetriebs ausgleichen, so daß die Strahlparameter nicht erst so schlecht werden, daß eine Unterbrechung erforderlich wird. Ziel ist also in erster Linie das Halten eines Optimums und erst in zweiter Linie das Auffinden des Optimums (P8).

2.5 Anforderungen an eine automatische Optimierung der Stellwerte von Strahlführungssystemen

Damit der Optimierungsvorgang während der Strahlnutzung im Hintergrund laufen kann, dürfen die Abtastungen des Gebietes um das Optimum nur mit sehr kleinen Schritten ausgeführt werden (P9). Durch diese Schritte, die um das Optimum herum geführt werden, wird nur in seltenen Fällen genau das Optimum selbst getroffen. Die Differenz des Gütewertes von diesem Optimalpunkt zu den während der Abtastung eingenommenen Abtastpunkten wird als Suchverlust bezeichnet.

Die Strahlparameter können bei den verschiedensten Experimenten an einer Beschleunigeranlage sehr unterschiedliche Eigenschaften annehmen. Zum Beispiel kann der Strahlquerschnitt sehr stark variieren. Daraus können sehr unterschiedliche Verläufe der Gütekennlinie über einen bestimmten Optimierungszeitraum auftreten. Das Optimierungsverfahren muß deshalb in seiner Robustheit tolerant bezüglich der "Breite" des Optimalgebietes, also dem Verlauf des Anstiegs der Gütekennlinie im Gebiet um das Optimum sein (P10).

In Tabelle 2.1 werden die in den vorherigen Abschnitten ausgearbeiteten Prämissen nochmals zusammengefaßt.

Prämissen und Schlußfolgerungen für die automatisierte Optimierung	Kurzbezeichnung
In Teilchenquellen können verschiedene Ionen gleichzeitig frei werden. Durch die verschiedenen Bahnen bei Ablenkung des Strahls können im Meßbereich bestimmter Strahlbeobachtungsgeräte mehrere Strommaxima auftreten. Die Auswahl eines Teilstrahls als den zu optimierenden Strahl muß möglich sein.	P1
Die hier betrachteten Beschleunigeranlagen seien auf Linearbeschleuniger für Ionen eingegrenzt.	P2
Der Teilchenstrahl sei ungepulst.	P3
Veränderungen am Aufbau von Strahlführungsabschnitten sollten bezüglich des Optimierungsalgorithmus mit geringem Aufwand durchführbar sein.	P4
Das Verhalten von Strahlführungselementen beim Übergang von einem Sollwert auf einen anderen kann näherungsweise mit einem Verzögerungsglied 1. Ordnung beschrieben werden. Durch Begrenzungen innerhalb der Versorgungsgeräte bei großen Sollwertsprüngen kann allerdings nicht von einem linearen dynamischen Verhalten zwischen unterschiedlich großen Sollwertsprüngen ausgegangen werden.	P5
Bei der Ansteuerung der Strahlführungselemente kommt es durch den Programmablauf der Software und der Datenübertragungen zwischen Automatisierungsgeräten und Strahlführungselementen zu Totzeiten. Diese Totzeiten sind mehr oder weniger zufällig. In der Regel kann aber ein Grenzwert angegeben werden, den die Totzeit eines einzelnen Gerätes nur sehr selten überschreitet.	P6
Die Flugzeiten der Teilchen im Strahl können vernachlässigt werden. Zwischen Strahlführungselement und Meßwertaufnahme kann also von einem statischen System ausgegangen werden.	P7
Hauptzweck des Optimierungsvorgangs soll das Halten des Optimalpunktes sein. Die Anwendbarkeit des Algorithmus zum Auffinden des Optimums soll dieser Prämisse untergeordnet sein.	P8
Der online im Hintergrund laufende Optimierungsvorgang darf keine zu großen Suchverluste hervorrufen. Die Schrittweite der notwendigen Abtastschritte ist deshalb sehr klein zu halten.	P9
Das Optimierungsverfahren muß tolerant gegenüber Veränderungen der Gütekennlinie bezüglich ihrer "Breite" um den Optimalpunkt, also tolerant gegenüber Änderungen des Anstiegs der Gütekennlinie im Gebiet um das Optimum sein.	P10

Tabelle 2.1: Prämissen für die Auswahl und Anpassung eines geeigneten Optimierungsalgorithmus

3 Optimierungsverfahren für Strahlführungsanlagen

3.1 Klassifikation von Optimierungsproblemen und Methoden

Die verschiedenen Optimierungsprobleme und die Methoden zur Lösung der Optimierungsaufgaben werden in der Literatur auf unterschiedliche Weise klassifiziert. Folgende wesentliche vier Unterscheidungsmerkmale werden z. B. in [27] angegeben:

1. statische oder dynamische Optimierungsprobleme
2. beschränktes oder unbeschränktes Gütekriterium
3. lineare oder nichtlineare Optimierungsprobleme
4. eindimensionale oder mehrdimensionale Optimierungsprobleme

Ein dynamisches Optimierungsproblem liegt vor, wenn entweder der Gütewert nicht nur vom aktuellen Stellvektor sondern auch von den vorangegangenen Zuständen des Systems abhängt oder wenn mehrere Optimierungsvorgänge kaskadenartig hintereinander auf das betrachtete System wirken. Da bei der Optimierung an Strahlführungssystemen nur eine Verzögerung (P5) und eine Totzeit (P6) vorliegen, kann von einem quasistatischen Verhalten ausgegangen werden, wenn zwischen Ausgabe des Stellvektors und Einlesen des zugehörigen Gütewertes ausreichend lange gewartet wird. Wenn für die Optimierung des Gesamtsystems ein einheitlicher Gütewert gebildet wird, tritt keine kaskadenartige Struktur auf.

Der Stellbereich der Strahlführungselemente wird bei der Projektierung einer Strahlführungsanlage in der Regel so festgelegt, daß unter normalen Bedingungen während der Optimierung keine der Stellgrößen einer Begrenzung ausgesetzt ist. Der Extremwert des Gütekriteriums liegt deshalb immer innerhalb des Einstellbereiches der Strahlführungselemente. Es gibt aus der Sicht der Stellgrößen deshalb keine weiteren Einschränkungen bei der Bestimmung des Gütewertes. Nur die Meßverfahren, aus deren Werten der Gütewert ermittelt wird, bestimmen, inwieweit der Gütewert Beschränkungen unterliegt.

Der Einfluß der Stellgrößen eines Strahlführungsgerätes auf den Gütewert ist nichtlinear. Sobald mehr als eine Stellgröße durch die Optimierung bedient wird, liegt ein mehrdimensionales Optimierungsproblem vor.

Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal von Anwendungen auf dem Gebiet der Optimierung ist der Verlauf der Gütekennlinie bezüglich der Anzahl der Extremwerte. Bei einem Strahlführungssystem ist wegen P1 das Auftreten von mehreren Extremwerten möglich. In dieser Arbeit soll aber vom Spezialfall ausgegangen werden, daß die verschiedenen Ionen bereits ausreichend separiert wurden und nur noch eine Ionenart im relevanten Einstellbereich der Stellgrößen auftritt. Dieser Spezialfall tritt aus der Erfahrung der Operatoren bei der überwiegenden Zahl von Optimierungen an Strahlführungssystemen auf bzw. kann durch Beschränkungen des Stellbereichs der Stellglieder erzwungen werden. In diesem Fall würden dann die Begrenzungen innerhalb des Einstellbereiches wirksam werden.

Es gibt in der Literatur weitere Klassifikationen der Optimierungsmethoden. Hier sei in diesem Zusammenhang /56/ genannt. Dort werden in 8 Hauptgruppen und zahlreichen Untergruppen insgesamt über 60 numerische Optimierungsverfahren eingeordnet. Dort, wie allgemein in der Literatur der Optimierungsverfahren, werden allerdings die weiter unten besprochenen Methoden der Extremwertregelung in der Klassifikation nicht berücksichtigt. Sie dürften eine eigenständige Gruppe unter den Optimierungsverfahren bilden.

3.2 Untersuchungen zur Optimierung an Strahlführungsanlagen

Forschungen zu Verfahren und Algorithmen zur Optimierung an Strahlführungen wurden schon in verschiedenen Laboratorien unternommen. Dabei sind unterschiedliche Verfahren zur Anwendung gekommen, wie Verfahren der numerischen Mathematik /12/, /22/ sowie Expertensysteme, Neuronale Netze, Fuzzy-Technologien und genetische Algorithmen sowie Hybridarchitekturen /13/, /14/, /15/, /16/, /44/, /45/, /46/, /49/.

Unter den Verfahren der numerischen Mathematik gibt es recht leistungsfähige Algorithmen in einer fast unüberschaubaren Vielfalt. Die Leistungsfähigkeit beruht zum einen auf der sinnvollen Auswahl von Suchrichtungen und zum anderen sehr wesentlich auf der Steuerung der Schrittweiten. Bei diesen Verfahren wird davon ausgegangen, daß die Zielfunktion eine berechenbare Funktion und frei von zufälligen Störungen ist. Bei der Nutzung dieser Algorithmen an realen Systemen müssen diese Störungen in den Meßgrößen gesondert, z.B. durch Filterung, behandelt werden. Desweiteren kommt es bei vielen numerischen Optimierungsverfahren darauf an, die Ermittlung der Abtastwerte auf der Zielfunktion mit genau den durch den Algorithmus vorgegebenen Stellwerten auszuführen, d.h. die Stellglieder müssen auf den jeweils vorgegebenen Wert vollkommen eingeschwungen sein. Die Schrittweitensteuerungen dieser Verfahren sind auf eine Suche zugeschnitten, die in der Regel weit entfernt vom Optimalpunkt mit großen Schritten beginnt. In der Nähe des Optimalpunktes angelangt, wird die Schrittweite verringert, um den Optimalpunkt möglichst genau zu finden.

In den letzten Jahren sind zahlreiche Veröffentlichungen über den Einsatz von genetischen Algorithmen erschienen. Zur Einführung siehe hierzu z.B. /8/, /9/ und /10/. Diese Verfahren lassen sich sehr sinnvoll verwenden, wenn Optimierungsprobleme mit vielen lokalen Extremwerten vorliegen. Da sie aber prinzipbedingt über einen relativ großen Einstellbereich der Stellgrößen suchen, eignen sie sich nicht ohne weiteres für eine online-Optimierung an Strahlführungsanlagen (P9).

In /12/ wird über die Nutzung eines numerischen Verfahrens nach POWELL berichtet. Dieses Verfahren ist in /17/ als eine der "POWELL's direction set methods" beschrieben. In /12/ wird ein Ergebnis mit einer solchen Optimierungsmethode vorgestellt. Hier wurde mit 8 Stellgrößen optimiert. Der Fortschritt der Optimierung wird über fast 8000 Optimierungsschritte dargestellt, wobei danach das Maximum offenbar noch nicht voll erreicht wurde. Nach /18/ ist dieses Optimierungsverfahren inzwischen verbessert und die Abtastrate für einige Stellgrößen heraufgesetzt, so daß Optimierungen mit 8 Stellgrößen nun ca. 15 Minuten dauern.

Eine weitere Anwendung mit einem Verfahren der numerischen Mathematik, dem Simplexverfahren der nichtlinearen Optimierung /11/, /23/, wurde in /22/ beschrieben. Die Funktionsfähigkeit dieses Verfahrens konnte am Injektor des Tandembeschleunigers im damaligen Zentralinstitut für Kernforschung Rossendorf, dem heutigen Forschungszentrum Rossendorf e.V., mit drei Stellgrößen nachgewiesen werden /24/. Mit der Umstrukturierung dieser

Forschungseinrichtung wurde jedoch eine weitere Untersuchung mit diesem Verfahren aufgegeben.

Im Vorfeld der vorliegenden Arbeit wurden am Tandem-Beschleuniger im Forschungszentrum Rossendorf e.V. zwei weitere numerische Optimierungsverfahren praktisch getestet. Verwendet wurden die sogenannte "Sukzessive Variation der Variablen" /11/ und eine Erweiterung dieser Methode um eine Suche in eine Richtung, die ähnlich wie bei der POWELLschen Methode ermittelt wird. Beide Verfahren wurden auf eine eindimensionale Optimierung unter Nutzung der Interpolation mit einer quadratischen Ersatzfunktion /20/ zurückgeführt, die auf der LAGRANGESchen Interpolation beruht /19/. Durch eine Begrenzung der Schrittweitenänderung konnte erreicht werden, daß die Optimierung nicht zu heftig auf Störungen auf dem Meßsignal reagierte. Abbildung 3.1 zeigt einen typischen Optimierungsverlauf mit

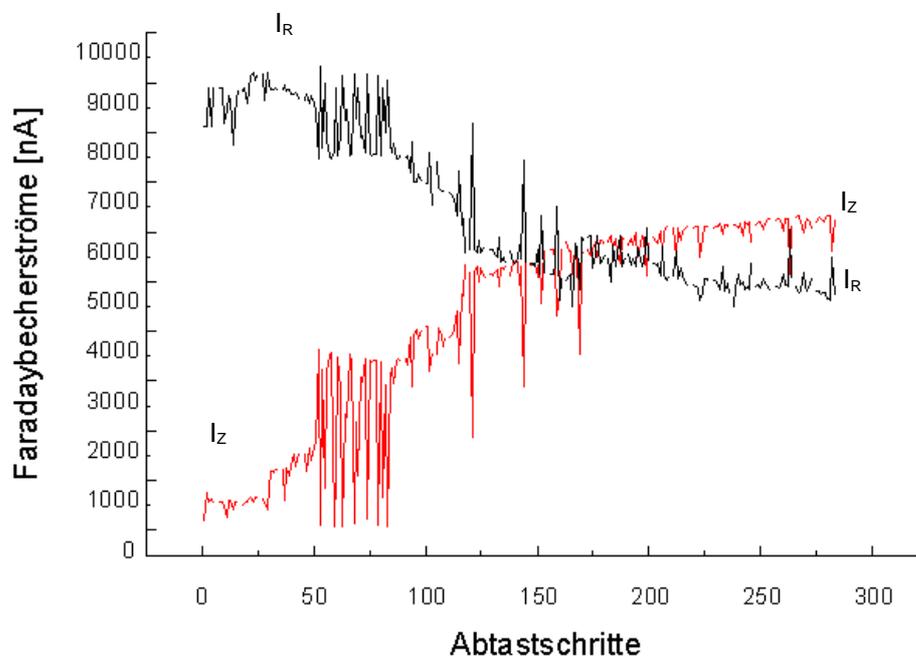


Abbildung 3.1: Verlauf der Meßgrößen bei der Optimierung am Tandem-Beschleuniger /21/

dem genannten erweiterten Optimierungsverfahren. Im Gegensatz zur POWELLschen Methode, wie in /17/ beschrieben, werden die koordinatenparallelen Anfangsrichtungen hier nicht ersetzt. Damit wird erreicht, daß im Verlauf der Optimierung bestimmte Suchrichtungen nicht auf Dauer eliminiert werden. Die Abbildung 3.1 zeigt zwei Meßkurven solch eines Optimierungslaufes. Das Vorhandensein von zwei Kurven resultiert aus dem verwendeten Faradaybecher als Sensor. Dieses Meßglied ist in zwei Segmente geteilt. Das vordere kreisrunde Segment besitzt in der Mitte ein Loch. Der Strahlenteil, der durch dieses Loch geht, wird auf dem zweiten Segment hinter dem ersten aufgefangen. Der Strahlstrom des ersten, äußeren Segmentes sei als Randstrom I_R bezeichnet und der Strahlstrom des hinteren Segmentes als Zentrumstrom I_Z . Bei der Optimierung wurde der Strahl in diesen Faradaybecher geführt und fokussiert. Mit fortschreitender Fokussierung geht ein immer größerer Teil des Strahls durch das Loch des ersten Segmentes hindurch. Damit besteht die Optimierung also darin, einen schlecht fokussierten Strahl, der außerdem nicht zentriert auf der Strahlachse am Ort des Faradaybechers verläuft, in den Faradaybecher zu führen und dann den Randstrom zu minimieren und den Zentrumstrom zu maximieren. In dem in

Abbildung 3.1 gezeigten Experiment wurde deshalb der Gütewert x , der als Qualitätswert dem Optimierungsalgorithmus zur Verfügung gestellt wurde, nach Gleichung 3.1 gebildet:

$$x = I_R + 2I_Z \quad (3.1)$$

Die Abbildung 3.1 zeigt, wie der Strahl aus dem Randbereich in das Zentrum des Faradaybechers geführt wird. Deutlich erkennbar sind Abschnitte, in denen die Schrittweite plötzlich sehr groß wird. Es ist nicht auszuschließen, daß die aus der großen Schrittweite resultierenden Schwankungen der Meßgröße so groß werden können, daß der Strahl an dieser Meßstelle verloren gehen kann. Damit ist gemeint, daß das Signal des Strahlstroms im Faradaybecher nicht mehr vom Rauschen der Meßgröße getrennt werden kann. Aber auch ohne diesen Extremfall ist ersichtlich, daß mit diesem Verfahren wegen der großen Schwankungen keine online-Optimierung möglich ist.

Die Steuerung der Schrittweite stellt bei den getesteten Optimierungsverfahren immer ein Problem dar, wenn online, also während der Strahlnutzung, optimiert werden soll. Es ist zwar immer möglich, die Schrittweite stark zu beschränken, allerdings verlieren damit viele Optimierungsverfahren ihren Sinn, da sie gerade auf eine geschickte Anpassung der Schrittweite beruhen. Es gibt aber noch eine andere Gruppe von Optimierungsverfahren, die der regelungstechnische Sichtweise besser gerecht werden. Diese Verfahren werden unter dem Oberbegriff der Extremwertregelung zusammengefaßt.

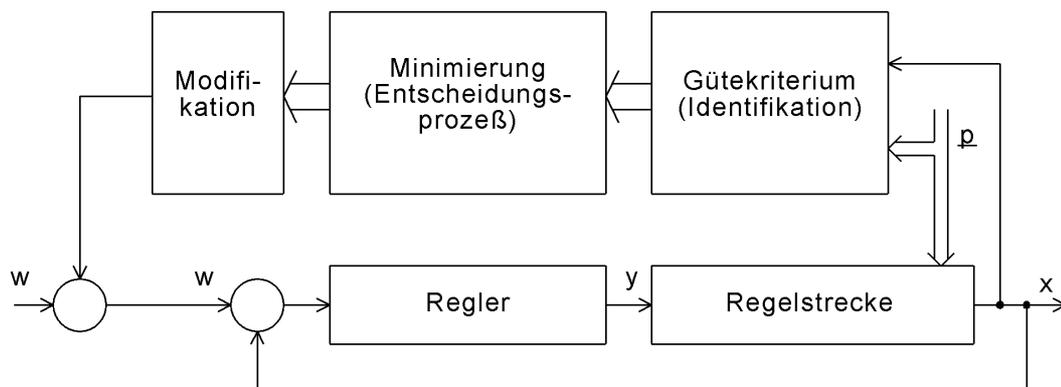
3.3 Extremwertregelungsverfahren

Im Sprachgebrauch der Regelungstechnik werden Optimierungsprobleme häufig als Probleme der Extremwertregelung bezeichnet. Im Gegensatz zur numerischen Optimierung steht hier neben dem Finden des Extremwertes vor allem auch das Halten dieses Wertes unter dem Einfluß von Störungen und Drifterscheinungen im Vordergrund /27/ (P8). Der Begriff der Extremwertregelung ergibt sich zum einen aus der Eigenschaft, daß jeder Optimierungsvorgang ein Prozeß mit Informationsrückführung ist. Zum anderen kann das Halten des Optimalpunktes als Regelvorgang aufgefaßt werden. Das Ziel ist demnach, die Differenz des gegenwärtigen Arbeitspunktes vom wirklichen Optimalpunkt minimal zu halten. Im Gegensatz zur typischen Regelung ist hierbei allerdings der Optimalpunkt, im regelungstechnischen Sinne die Führungsgröße, unbekannt. Wird allerdings als Regelungssystem im engeren Sinne ein rückgekoppeltes System verstanden, das ausschließlich dazu dient, die Abweichung einer Meßgröße (oder eines Meßgrößenvektors) von einer bestimmten Führungsgröße (oder eines Führungsgrößenvektors) minimal zu halten, und der Begriff eines Steuerungssystems mit Informationsrückführung für alle anderen Systeme benutzt, die zwar eine Informationsrückführung aber nicht den beschriebenen Regelungscharakter besitzen, dann sind die Extremwertregelungs- bzw. die Optimierungsverfahren dieser zweiten Gruppe zuzuordnen.

Die VDI/VDE-Richtlinie 3685 beschreibt den Begriff des Extremwertreglers enger /55/. Dort wird dem Optimierungsprozeß noch ein unterlagerter Regler zugefügt (Abbildung 3.2). In den im weiteren noch genannten Literaturstellen ist jedoch dieser unterlagerte Regler nicht immer zu finden.

Die Extremwertregelungsverfahren lassen sich u.a. nach selbstschwingenden und nicht selbstschwingenden Systemen unterscheiden. Bei den selbstschwingenden Verfahren, wie z.B. dem Relais-Extremwertregler, wird die Suchbewegung durch die Rückkopplung des Gütewertes erreicht. Im Gegensatz dazu müssen bei den nicht selbstschwingenden Systemen die Suchbewegungen durch einen Signalgenerator erzeugt werden.

Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal ist auch bei diesen Systemen die Dimension des Stellvektors. Es wird auch hier zwischen eindimensionalen und mehrdimensionalen Verfahren unterschieden. Wie oben schon beschrieben, interessieren bei der Optimierung an Strahlführungsanlagen die mehrdimensionalen Verfahren. Weitere Informationen zu Klassifizierung und Aufgaben von Extremwertreglern können /25/ und /26/ entnommen werden. In /28/ bis /35/ und in /57/ sind verschiedene Ausführungen und Anwendungen von Extremwertreglern beschrieben. Eine ausführliche Darstellung des Verfahrens der Relais-Extremwertregler ist in /36/ zu finden. Eindimensionale Extremwertregelungen an dynamischen Systemen werden u.a. in /62/ behandelt. Nach /58/ gibt es offenbar keine neuere umfassende Literatur speziell zu den Extremwertreglern. Es gibt jedoch immer noch Weiterentwicklungen bei den Extremwertreglern, wie /59/, /60/ und /61/ zeigen.



y - Stellgröße
 w - Führungsgröße
 x - Regelgröße
 p - Vektor, dessen Elemente das Prozeßverhalten kennzeichnen oder beeinflussen

Abbildung 3.2: Extremwertregelungsprinzip nach VDI/VDE /55/

In /28/, /30/ und /31/ sind untereinander mehr oder weniger gleichwertige Verfahren beschrieben, die mit Testsignalen arbeiten. Sie sind offenbar die einzigen aus der Literatur bekannten Verfahren, die eine gleichzeitige Extremwertregelung mit mehreren Stellgrößen zulassen. Das für das Verfahren notwendige Testsignal n ist in den genannten Quellen ein periodisches Signal der Amplitude m , welches auf den Stellwertarbeitspunkt y_0 addiert wird und den Stellwert y ergibt (Abbildung 3.3).

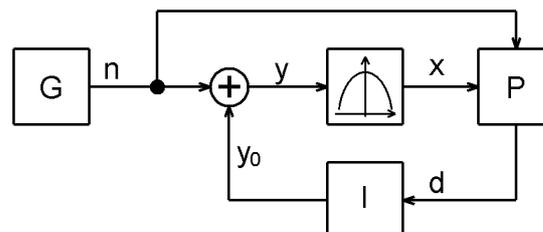


Abbildung 3.3: Extremwertregelung mit Synchrondetektor /53/

Mit einem Sinussignal als Testsignal ist

$$n = m \sin(\omega t) \quad (3.2)$$

mit der Testsignalamplitude m .

Für y ergibt sich:

$$y = y_0 + m \sin(\omega t) \quad (3.3)$$

Der Prozeß wird als nichtlineares Glied mit einer quadratischen Kennlinie beschrieben und besitzt im Arbeitspunkt für das Kleinsignalverhalten den Anstieg:

$$\left. \frac{dx}{dy} \right|_{y_0}$$

In linearer Näherung ergibt sich somit für das Signal x :

$$x = x_0 + n \left. \frac{dx}{dy} \right|_{y_0} = x_0 + m \left. \frac{dx}{dy} \right|_{y_0} \sin(\omega t) \quad (3.4)$$

Die Abbildung 3.4 zeigt den Verlauf des Meßwertes x unter dem Einfluß des periodischen Testsignals n .

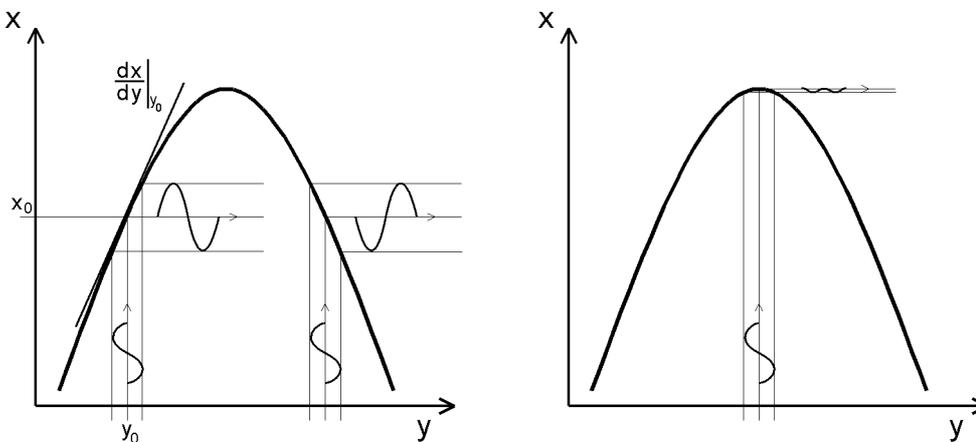


Abbildung 3.4: Funktionsweise der Synchrondetektierung

Im Block P werden das Meßsignal und das Testsignal miteinander verknüpft. In der Literatur wird für diesen Block ein Phasendiskriminator, ein phasenempfindlicher Gleichrichter /28/ (auch als Synchrondetektor bezeichnet /31/) oder ein Multiplikator /30/ angegeben.

Bei Einsatz eines Multiplikators ergibt sich für d :

$$d = nx_0 + n^2 \left. \frac{dx}{dy} \right|_{y_0} = mx_0 \sin(\omega t) + m^2 \left. \frac{dx}{dy} \right|_{y_0} \sin^2(\omega t) \quad (3.5)$$

Der neue Stellwert y_0 wird über eine Integration aus dem Ausgangssignal d des Blockes P bestimmt (Block I in Abbildung 3.3).

Bei einer Integration über die Periode $T=2p$ des Testsignals n ergibt sich:

$$\int_0^T d \, dt = p \, m^2 \left. \frac{dx}{dy} \right|_{y_0} \quad (3.6)$$

Die Optimierungsgeschwindigkeit ist also von der Testsignalamplitude m und dem Anstieg im Arbeitspunkt abhängig. Das Vorzeichen des Integrals ist hierbei allein abhängig vom Vorzeichen der Ableitung dx/dy im Arbeitspunkt y_0 . Es ist immer so gerichtet, daß eine Integration des Signals d im Integrator I zu einer Bewegung des Stellwertarbeitspunktes y_0 in Richtung des Optimums führt. Im Optimum selber ist die Ableitung Null, so daß das Signal y_0 an dieser Stelle verharrt.

Dieses Verfahren zur Extremwertregelung läßt sich auf ein System mit mehreren Stellgrößen erweitern, indem mehrere Synchrondetektoren und Testsignale jeweils ungleicher Frequenz eingesetzt werden [31]. Damit ist im Gegensatz zu anderen aus der Literatur bekannten Extremwertregelungsverfahren eine mehrdimensionale Optimierung möglich. Dieser Weg wird auch im folgenden Kapitel durch die Einführung mehrerer unkorrelierter Testsignale zur Erweiterung der eindimensionalen Extremwertregelung auf ein System mit mehreren Stellgrößen zur mehrdimensionalen Strahlführungsoptimierung begangen.

Der Wert x in Abbildung 3.3 ist ein Wert, der die Qualität der Zielgröße ausdrückt. Als Zielgröße kann eine einzelne Meßgröße oder auch eine Gruppe von Meßgrößen – durch sinnvolles Verknüpfen (z.B. gewichtete Addition) auf eine Zielgröße gebracht – benutzt werden. Der Wert x soll im weiteren als Gütewert und die Abhängigkeit $x = f(y)$ als Gütekennlinie bezeichnet werden. Bei mehr als einer Stellgröße ist die Gütekennlinie eine mehrdimensionale Funktion, hingegen der Gütewert immer eine skalare Größe. Es ist zwar auch möglich, mit mehreren Stellgrößen auf mehrere Gütewerte gleichzeitig zu optimieren, der Optimierungsvorgang und -erfolg ist unter diesen Bedingungen aber schlecht zu beurteilen. Unter bestimmten Bedingungen kann solch ein Optimierungsvorgang dann zu einem dynamischen Optimierungsproblem werden.

Dem eben beschriebenen Grundprinzip einer speziellen Form der Extremwertregelung wird in dieser Arbeit für die Optimierung an Strahlführungsanlagen der Vorzug gegeben. Es besitzt neben dem eigentlichen Optimierungsverhalten folgenden entscheidenden Vorteil gegenüber andere Verfahren:

Durch den Korrelationsoperator mit dem nachgeschalteten Integrator erfolgt von vorn herein eine statistische Auswertung der Wirkung des Testsignals auf den Prozeß. Damit sind Störungen auf dem Gütesignal erlaubt, die durchaus die Größenordnung des eigentlichen Nutzsignals annehmen dürfen. Umgekehrt bedeutet dies, daß die Testsignalamplitude soweit verkleinert werden kann, daß die Wirkung in Form des Nutzsignals in der Größenordnung des Störpegels auf dem Gütesignal liegen darf. Damit ist gewährleistet, daß die Suchverluste verhältnismäßig gering sind (P9).

Das bisher beschriebene Extremwertregelungsverfahren hat jedoch noch folgende Nachteile bei einer Anwendung an Strahlführungssystemen von Teilchenbeschleunigern:

- Das Testsignal ist in seiner Amplitude konstant. Damit ist der Suchverlust abhängig von der Steilheit der Gütefunktion in der Umgebung des Optimums. Da bei Strahlführungen die Steilheit sehr stark variieren kann, läßt sich der Suchverlust nicht durch die Festlegung der Testsignalamplitude auf einem bestimmten Wert konstant halten (Abbildung 3.5).

- Da zur Korrelation das Testsignal und nicht das Stellsignal herangezogen wird, stellt die Größe y_0 mit ihrer Arbeitsbewegung beim Integrieren von d eine Störgröße bei der Korrelationsoperation dar.
- Die Optimierungsgeschwindigkeit hängt vom Absolutwert des Testsignals und der Ableitung im Arbeitspunkt ab. Damit ist die Optimierung abhängig von der Einstellung der Testsignalamplitude und insbesondere von der Steilheit um das Optimalgebiet. Wenn das Optimalgebiet sehr steil ist, ist die Optimierungsgeschwindigkeit hoch. Ist das Gebiet jedoch sehr flach, ist die Optimierungsgeschwindigkeit auch noch sehr weit weg vom Optimalpunkt gering.

Diese Nachteile sollen im folgenden Kapitel durch Veränderungen und Erweiterungen der Struktur des Extremwertreglers vermieden werden.

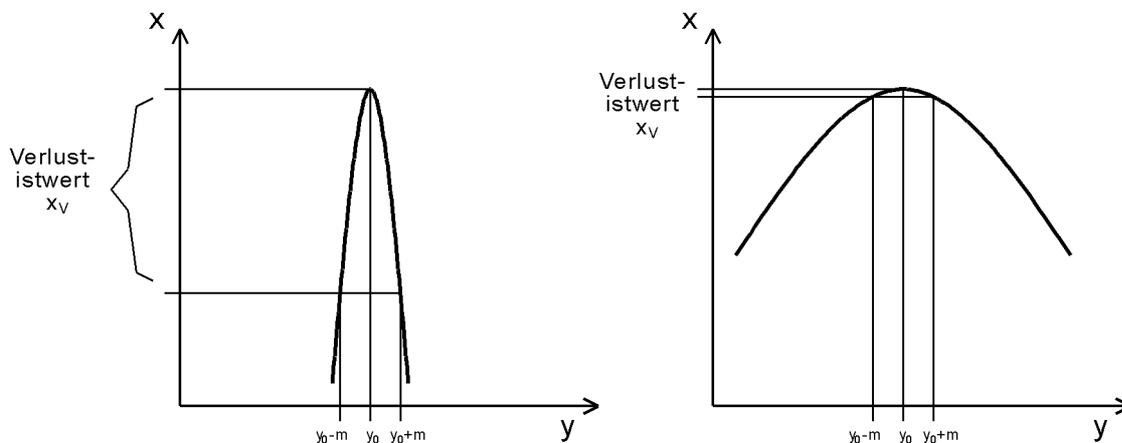


Abbildung 3.5: Suchverluste bei stark variierenden Gütekennlinien

3.4 Extremwertregelung mit Korrelationsverfahren

Bei der Optimierung mit einem Extremwertregelungssystem nach Abbildung 3.3 und den beschriebenen im Block P enthaltenen Operatoren, ist die Optimierungsgeschwindigkeit abhängig von der Ableitung der Kennlinie im Arbeitspunkt. Dies kann sinnvoll sein, wenn die Form der Gütekennlinie konstant bleibt und sich nur die Lage auf der Abszisse ändert. Damit ist die Geschwindigkeit der Annäherung an den Optimalpunkt um so größer, je größer der Betrag der ersten Ableitung im jeweiligen Arbeitspunkt ist, bzw. je weiter der Arbeitspunkt vom Optimalpunkt entfernt ist. Bei der Optimierung an Strahlführungen kann jedoch nicht von einer gleichbleibenden Form der Gütekennlinie ausgegangen werden. Vielmehr ist die Form dieser Funktion von verschiedensten Einflüssen abhängig und kann sehr stark variieren (P10). Es ist deshalb nicht wünschenswert, daß die Amplitude des Signals d am Ausgang des Korrelationsoperators P von Absolutwerten des Gütewertes x und des Testsignals n abhängt. Diese Abhängigkeit kann durch den Einsatz eines Polaritätskorrelationsoperators für den Block P und durch Differenzenbildung (Blöcke Δ) an den Eingängen des Korrelationsoperators ausgeschlossen werden (Abbildung 3.6). Durch diesen Polaritätskorrelator werden nur die Vorzeichen der Meß- und Stellwertdifferenzen ausgewertet (Abbildung 3.7). Als Signal d treten dabei drei verschiedene Werte auf: +1 für gleiche Vorzeichen, -1 für ungleiche Vorzeichen und 0 für den Fall, daß mindestens eine der beiden Eingangsgrößen von Block P Null ist. Die Blöcke Δ bilden immer die Differenzen ihrer Eingangsgröße vom Abtastpunkt i zum vorangegangenen Abtastpunkt $i-1$.

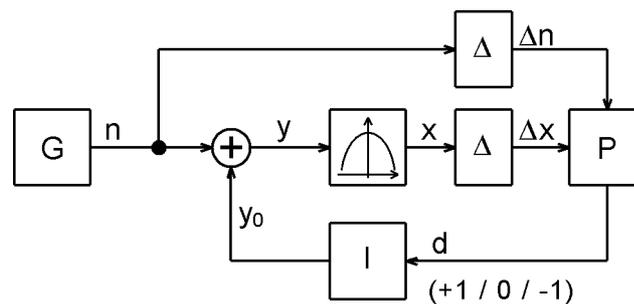


Abbildung 3.6: Extremwertregelung mit Polaritätskorrelator für P und Differenzenbildung an den Eingängen von P

Wenn nur noch die Vorzeichen der Änderungen berücksichtigt werden, kann als Testsignal auch ohne Einschränkung ein bipolares Rechtecksignal benutzt werden. Nur das Vorzeichen soll wechseln. Die Amplitude soll durch den Block M regelbar sein (Abbildung 3.8). Damit wird mit dem Abstand m links und rechts vom Arbeitspunkt y_0 abgetastet. Der Abstand m vom Arbeitspunkt soll nun so geregelt werden, daß die Änderung des Gütwertes x durch den Abtastvorgang (sog. Suchverlust) detektierbar ist. Einerseits soll dieser Suchverlust möglichst klein gehalten werden, andererseits muß er sich an der Größenordnung des Rauschens der Meßgrößen orientieren (P9).

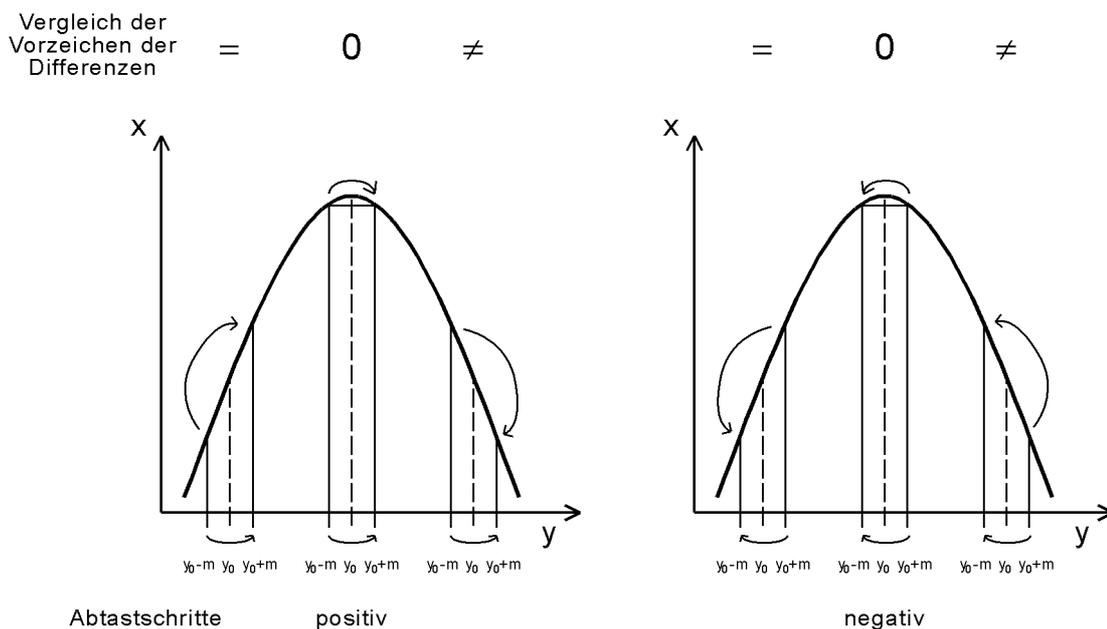


Abbildung 3.7: Abtastschritte mit Vergleich der Differenzen von Testsignal und Meß- bzw. Gütesignal

Bisher wurde immer das Testsignal (bzw. dessen Änderung) mit dem Meßsignal (bzw. dessen Änderung) verglichen. Die Arbeitsbewegung des Wertes y_0 nach der Integration im Block I stellte dabei eine Störgröße dar. Da die Arbeitsbewegung eine bekannte Größe ist, liegt es nahe, die Information über die Arbeitsschritte bei der Auswertung mit dem Polaritätskorrelationsoperator nicht zu verschenken. Aus diesem Grund besteht die nächste eingeführte Änderung darin, daß bei der Korrelationsoperation in P als Referenzsignal nicht das

Testsignal, sondern die aus Testsignal und Arbeitsschritt gebildete Summe, die Größe y , benutzt wird (Abbildung 3.8).

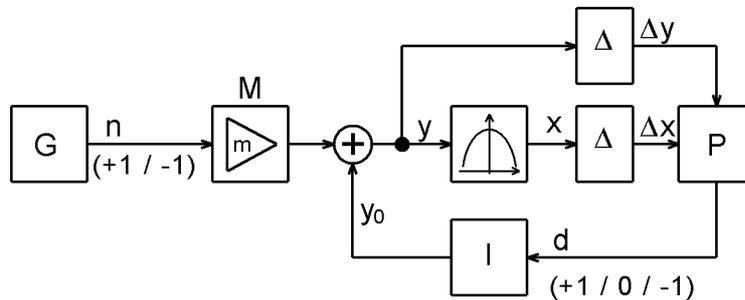


Abbildung 3.8: Extremwertregelung mit binärem Testsignal

In der Ausführung des Extremwertreglers nach Abbildung 3.8 ist die Geschwindigkeit der Arbeitsbewegung durch die diskreten Werte der Größe d fest vorgegeben. Da beim Halten des Optimalpunktes die Arbeitsbewegungen klein sein müssen, um im Optimum ein stabiles Verhalten des Strahls zu erhalten, muß die Zeitkonstante des Integrators I ausreichend groß gewählt werden. Daraus ergibt sich jedoch, daß bei der Annäherung aus großer Entfernung zum Optimum die Optimierungszeit sehr groß sein wird. Aus diesem Grund wird eine Adaption A der Integrationszeitkonstante T_I des Integrators I eingeführt (Abbildung 3.9). Diese Zeitkonstante kann dabei in bestimmten Grenzen variieren. Die Adaption soll durch eine Auswertung der Tendenz des Signals d geschehen. Im Optimum, so kann angenommen werden, wird die Größe ständig zwischen -1 und $+1$ pendeln. Die Integrationszeitkonstante sollte dann groß sein. Außerhalb des Optimums wird einer der beiden Werte -1 oder $+1$ überwiegen. In diesem Fall soll die Integrationszeitkonstante bis zu einem Minimalwert verkleinert werden. Wie dieses Ziel zu erreichen ist, wird in Kapitel 3.4.5 ausführlicher beschrieben.

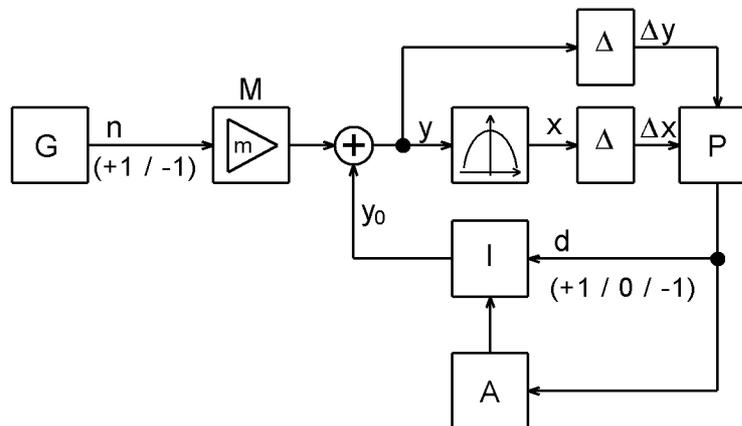


Abbildung 3.9: Mit einer Adaption der Integrationszeitkonstante vervollständigter Extremwertregler auf Basis einer Polaritätskorrelation /53/

Das hier gezeigte Verfahren kann bei einer größeren Anzahl von Stellgrößen eines Prozesses für die einzelnen Stellgrößen wiederholt nacheinander ausgeführt werden. Als mehrdimensionale Optimierung entspricht diese Variante der Methode "Sukzessive Variation der Variablen". Der Einsatz dieses Verfahrens ist auch bei allen anderen mehrdimensionalen Verfahren möglich, die eine Optimierung auf eindimensionale Suchschritte zurückführen (z.B. "POWELL's direction set methods"). Jedoch dürfte hierbei in vielen Fällen die Regelung der

Testsignalamplitude nach den Suchverlusten schwieriger sein. Wie schon im Kapitel 3.3 für die Synchrondetektoren beschrieben, ist es möglich, mehrere Korrelatoren an einem Prozeß mit mehreren Testsignalen gleichzeitig zu betreiben. Voraussetzung dafür ist, daß die Testsignale nicht miteinander korrelieren. Diese Struktur (Abbildung 3.10) soll im weiteren Gegenstand der Betrachtungen sein.

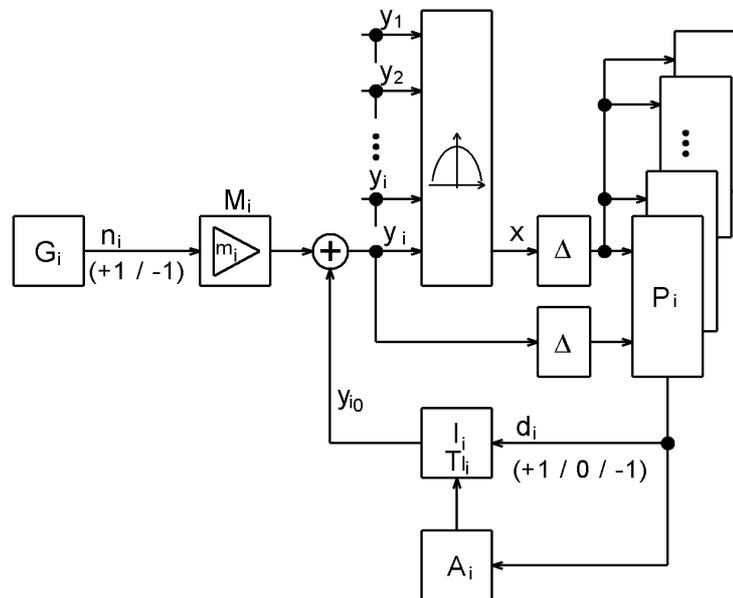


Abbildung 3.10: Mehrdimensionale Extremwertregelung auf Basis der Polaritätskorrelation

In den folgenden Abschnitten soll der hier schematisch dargestellte Algorithmus noch detaillierter beschrieben werden. Dabei wird vorausgesetzt, daß der Übergang von einem Schritt zum nächsten zwischen der Ausgabe der Stellwerte und dem Einlesen der Meßwerte erfolgt. Die Zeit, die dazwischen liegt, soll so groß sein, daß die Stellglieder in etwa auf den neuen Stellwert eingeschwungen sind und die daraus resultierenden Meßergebnisse vorliegen. In diesem Fall und unter Beachtung der Prämisse P7 kann von einem quasistatischen Prozessverhalten ausgegangen werden und der Einfluß der Prämisse P5 und P6 wird eliminiert.

Zur Beschreibung der Algorithmen der einzelnen Bestandteile der Extremwertregelung wird im Anhang neben mathematischen Ausdrücken auch die verhältnismäßig allgemein verständliche Notation mit MATLAB-Code benutzt. Die Beschreibung der verwendeten Funktionen ist in Buchform in /37/ und online über das Internet in /38/ zu finden.

3.4.1 Testsignalgenerator G

Für jede Stellgröße liefert je ein Testsignalgenerator G ein binäres Signal mit den Zuständen +1 und -1. Diese Signale für die einzelnen Stellgrößen dürfen untereinander nicht korrelieren. Für diesen Zweck wird hier ein Pseudozufallsgenerator in Form eines sogenannten linear rückgekoppelten Schieberegisters benutzt /17/, /39/. Für jede Stellgröße gibt es hierbei einen Parametersatz und ein Schieberegister. Details dazu sind in Anlage 3 zu finden.

Statt der Zufallssignale könnten auch Signale fester aber untereinander unterschiedlicher Frequenz verwendet werden. Bedingung ist hierbei nur, daß diese Signale nicht miteinander korrelieren. Der Vorteil von zufälligen Signalen gegenüber Testsignalen fester Frequenz besteht jedoch darin, über einen längeren Zeitabschnitt eine Gleichverteilung der erbrachten Abtastschritte pro Stellgröße zu erreichen. Bei Testsignalen unterschiedlicher aber fester

Frequenz würden die Stellgrößen mit der größeren Frequenz eine höhere Optimierungsgeschwindigkeit aufweisen.

3.4.2 Die Testsignalamplitude m und deren Regelung

Das Ziel soll sein, die Amplitude des Testsignals m im Block M so zu regeln, daß der auftretende Suchverlust einen vorgebbaren Sollwert einhält. Diese Regelung verlangt keine große Genauigkeit, da unter anderem der wahre Suchverlust durch die neben den Suchschritten ausgeführten Arbeitsschritte immer größer als der vorgegebene Sollwert ist.

Zur Bestimmung des Suchverlustes werden die Punkte y_0-m , y_0 und y_0+m angefahren (Abbildung 3.11). Im Gegensatz zur Optimierung wird hier auch der mittlere Abtastpunkt y_0 benutzt. Der Suchverlust sei die größte dabei auftretende Differenz der Meßwerte bezogen auf den größten der drei Meßwerte:

$$x_V = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{x_{\max}} = 1 - \frac{x_{\min}}{x_{\max}} \quad \text{mit} \quad \begin{aligned} x_{\max} &= \max(x_{-m}, x_0, x_{+m}) \\ x_{\min} &= \min(x_{-m}, x_0, x_{+m}) \end{aligned} \quad (3.7)$$

Als Regler wird ein einfacher I-Regler verwendet. Die Großsignalkennlinie des Prozesses ist jedoch stark nichtlinear. Für die Kennlinie der Gütefunktion $x=f(y)$ kann im Optimalgebiet näherungsweise eine quadratische Funktion angenommen werden. Wenn y_0 im Optimum liegt, ergibt die Funktion $f(m)$ also einen quadratischen Verlauf des Verlustwertes (Abbildung 3.12). Der Anstieg im Arbeitspunkt wird näherungsweise als konstante Strecken-

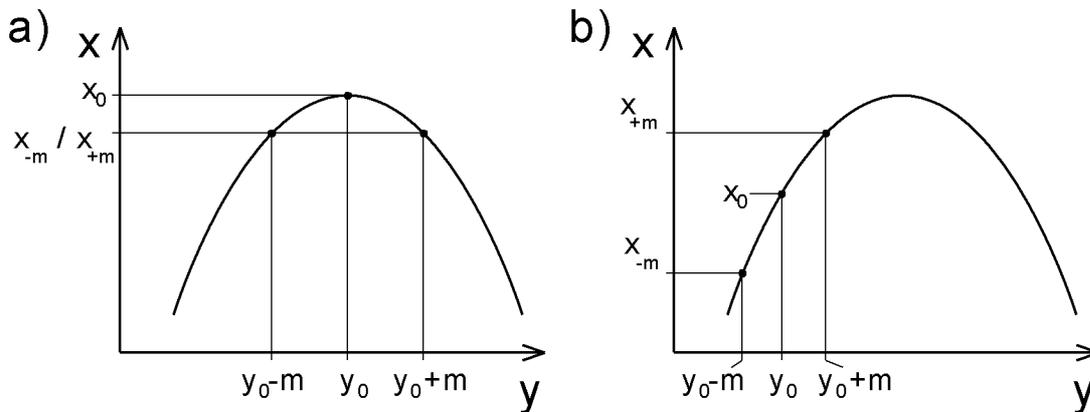


Abbildung 3.11: Suchverluste an der Gütefunktion $x=f(y)$

verstärkung des Kleinsignalverhaltens betrachtet. Je nachdem, wo der Arbeitspunkt liegt und wie steil das Optimalgebiet ist, differiert diese Streckenverstärkung sehr stark. Damit der Einfluß der Reglerzeitkonstante unabhängig von der Streckenverstärkung bleibt, soll im Regler ein Verstärkungsglied die variable Streckenverstärkung ausgleichen. Als Verstärkungswert wird dazu genau der Reziprokwert der nachfolgend näherungsweise zu bestimmenden Streckenverstärkung benutzt. Es wird dabei angenommen, daß sich die Regelung schon annähernd im ausgeregelten Zustand im Arbeitspunkt befindet. Damit ist in diesem Punkt die Testsignalamplitude m_{AP} und der zugehörige Verlustsollwert w_V bekannt.

Die Gleichung der quadratischen Funktion mit dem Minimum im Koordinatenursprung ist

$$x_V = a m^2 \quad (3.8)$$

a kann somit über die bekannten Werte am Arbeitspunkt berechnet werden:

$$a = \frac{w_V}{m_{AP}^2} \quad (3.9)$$

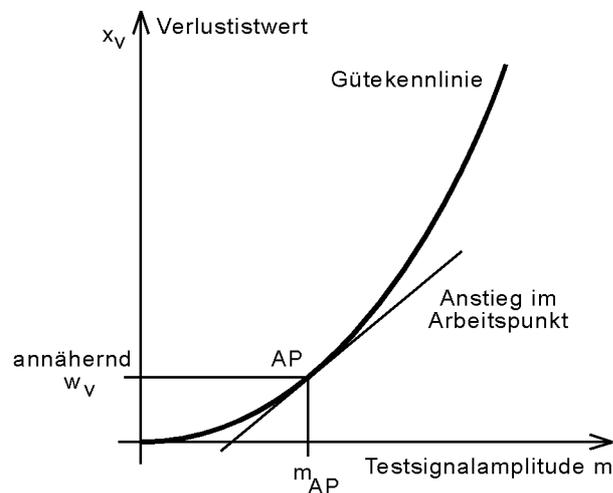


Abbildung 3.12: Gütekennlinie als Funktion der Testsignalamplitude im Optimum

Die erste Ableitung im Arbeitspunkt ist der Anstieg der Kleinsignalkennlinie. Die Gleichung dafür ist:

$$v = x'_V = 2am \quad (3.10)$$

Wird nun a eingesetzt, ergibt sich als Schätzwert für die Kleinsignalverstärkung im Arbeitspunkt

$$v^*_{AP} = 2 \frac{w_V}{m_{AP}} \quad (3.11)$$

Dieser Verstärkungswert v^*_{AP} ist zwar eine recht grobe Schätzung, reicht aber aus, um die unkritische Reglerzeitkonstante unabhängig vom Zustand der Strecke einstellen zu können. Abbildung 3.13 zeigt die Struktur des Testsignalamplitudenreglers. Für die Reglerzeitkonstante wurde in der Simulation $10 \cdot T_{AR}$ gewählt. T_{AR} sei die Periodendauer zwischen zwei Regelungsschritten. Mit diesen Zeitkonstanten wird ein zügiges Einstellen der Testsignalamplitude bei Veränderungen der Gütekennlinie erreicht. Damit der Regler trotzdem unempfindlich gegen einzelne Störungen oder einer stark überschätzten Streckenverstärkung ist, wurde er nichtlinear ausgelegt. Diese Nichtlinearität ist eine Begrenzung (s. Abbildung 3.13), damit sich der Stellwert, also die Testsignalamplitude, nur um maximal 10% pro Regelungsschritt ändern kann.

Weiterhin wird die Testsignalamplitude m auf einen Minimalwert hin begrenzt. Diese Begrenzung ist so einzustellen, daß die Testsignalamplitude nicht kleiner als die Auflösung des Stellwertes im Stellglied ist (Digital-Analog-Wandlung).

Die Testsignalamplitudenregelung kann zeitgleich oder abwechselnd mit der Optimierung durchgeführt werden. Es hat sich allerdings in der Simulation gezeigt, daß eine zeitliche Abwechslung von Testsignalamplitudenregelung und Optimierung wesentlich günstiger ist. Dies resultiert daraus, daß für die Testsignalamplitudenregelung neben den Abtastpunkten

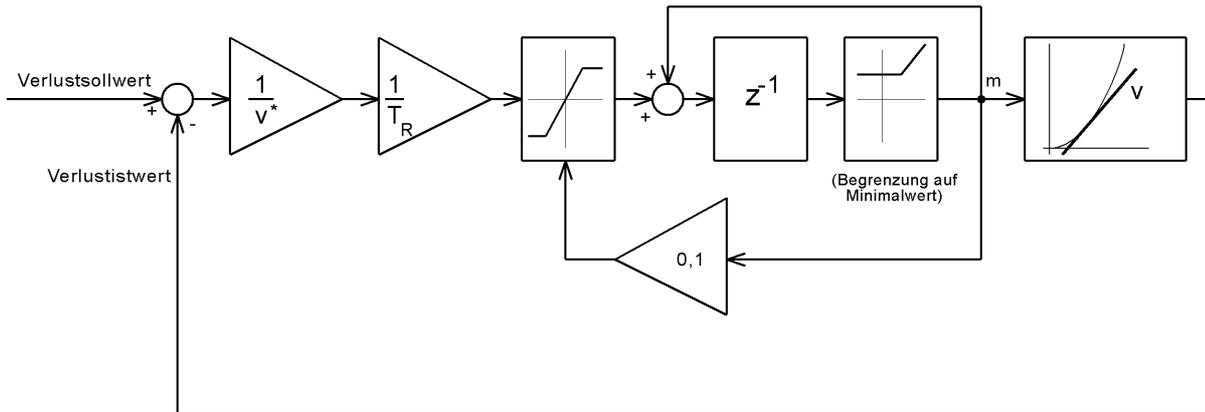


Abbildung 3.13: Testsignalamplitudenregler

y_{0-m} und y_{0+m} , die ebenso für die Optimierung benötigt werden, auch y_0 angefahren werden muß. Es ist jedoch eine positive Eigenschaft des Optimierungsalgorithmus, daß nur y_{0-m} und y_{0+m} angefahren werden, da bei gefundenem Optimum einer Stellgröße die Abtastung zum Halten dieses Optimalpunktes fast keine Störungen auf dem Gütesignal bezüglich der Optimierung aller anderen Stellgrößen hervorruft. Dies sei an Abbildung 3.14 demonstriert. Im Diagramm a) liegt der bisher gefundene Optimalwert y_0 geringfügig neben dem tatsächlichen Optimalpunkt. Wird ein symmetrischer Verlauf der Gütekennlinie angenommen, schwankt der Gütewert sehr gering zwischen den Werten x_{-m} und x_{+m} . Liegt y_0 genau im Optimum, wird der Gütewert von dieser Stellgröße nicht mehr beeinflusst. Im Diagramm b) wird nun zwischendurch der Stellwert y_0 angefahren, um den Suchverlust für die Testsignalamplitudenregelung zu bestimmen. Auf dem Gütesignal wird nun zusätzlich der Wert x_0 erreicht. Damit wechselt der Gütewert x auch in dem Fall, daß das Optimum genau gefunden wurde, mit der Amplitude des momentanen Suchverlustwertes zwischen x_{+m} bzw. x_{-m} und x_0 . Aus diesem Grund wird im weiteren die Variante mit zeitlich abwechselnder Testsignalamplitudenregelung und Optimierung verwendet.

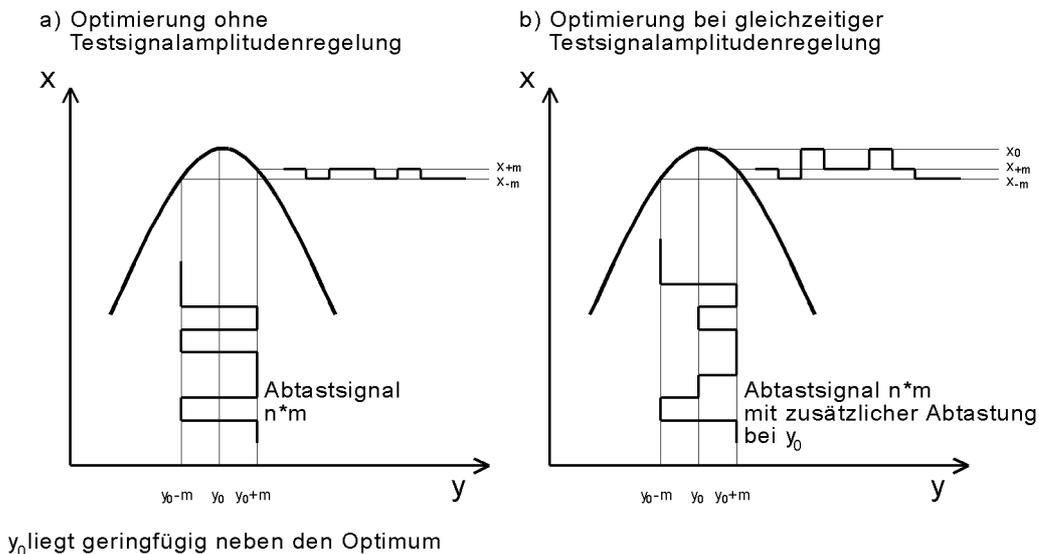


Abbildung 3.14: Optimierung mit und ohne gleichzeitiger Testsignalamplitudenregelung

3.4.3 Korrelationsoperator, Block P

Wie eingangs erwähnt, werden nicht die Absolutwerte von Güte- und Testsignal verknüpft, sondern die Änderung dieser Signale bezüglich dem vorangegangenen Suchschritt. Damit reicht ein Polaritätskorrelator aus, um die Richtung zu ermitteln, in der der Optimalpunkt zu finden ist. Vorausgesetzt wird hier, wie bei vielen anderen Optimierungsproblemen auch, daß im Suchbereich nur ein Optimum liegt und die Gütefunktion linksseitig vom Optimum echt monoton wachsend und rechtsseitig echt monoton fallend ist.

Das Signal d als Ergebnis der Korrelation ist:

$$d = f(\Delta x, \Delta y) = \begin{cases} \text{sign}(\Delta x) \text{sign}(\Delta y), & \text{falls } \Delta x \neq 0 \text{ und } \Delta y \neq 0 \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (3.12)$$

d kann somit nach Tabelle 3.1 in Form boolescher Vergleiche realisiert werden:

$d = f(\Delta x, \Delta y)$		Δy		
		>0	$=0$	<0
Δx	>0	+1	0	-1
	$=0$	0	0	0
	<0	-1	0	+1

Tabelle 3.1: Polaritätskorrelation

3.4.4 Integration des Stellwertes im Block I

Zur Integration im Block I wird das Signal d am Ausgang des Korrelationsoperators P mit $1/\text{Integrationszeitkonstante}$ multipliziert und danach aufsummiert. Der Reziprokwert der Integrationszeitkonstante stellt somit die Schrittweite eines Arbeitsschrittes dar. Da der Integratorausgang unmittelbar den Stellwert für eine Stellgröße darstellt, ist es nützlich, den Inhalt des Integrators auf sinnvoll festzulegende Grenzen zu beschränken.

3.4.5 Adaption der Integrationszeitkonstante, Arbeitsschrittweite, Block A

Die Zeitkonstante des Integrators I ist im Falle des Haltens des Optimums so groß zu wählen, daß die Schwankungen des Gütewertes durch die Arbeitsschritte nicht zu groß werden. Das Maß dafür wird in den meisten Fällen das subjektive Beurteilungsvermögen des Operators oder Experimentators sein. Hat der Algorithmus das Optimum noch nicht erreicht, werden jedoch auch außerhalb des Optimums sehr kleine Arbeitsschritte ausgeführt, die zu einer geringen Optimierungsgeschwindigkeit führen. Die Idee der Adaption besteht nun darin, zu erkennen, ob sich der Algorithmus im Optimalgebiet oder auf der Suche nach dem Optimalgebiet befindet. Diese Erkennung kann sicherlich auf vielfältige Weise erfolgen. Hier soll eine Adaption beschrieben werden, die zusammen mit anderen, ähnlichen Methoden als die erfolgreichste aus der Simulation hervorgegangen ist.

In der Simulation und bei der experimentellen Realisierung wird dabei mit dem Reziprokwert der Integrationszeitkonstante gearbeitet. Dieser Reziprokwert stellt die Schrittweite der Arbeitsbewegung in diesem zeitdiskreten System dar. Diese Schrittweite ist die Änderung der Größe y_0 von einem Optimierungsschritt zum nächsten.

Die Grundidee der Adaption besteht zunächst darin, den Korrelationsoperatorausgang d zu überwachen. Wie unter Kapitel 3.4 genannt, wird der Ausgang im Optimum ständig zwischen $+1$ und -1 wechseln. Außerhalb des Optimalgebietes wird hingegen einer der beiden Zustände überwiegen, das Signal d besitzt in diesem Fall einen Gleichanteil. Um diesen zu detektieren, wird dieses Signal zur Glättung zuerst mit einem T1-Glied gefiltert. Das geglättete Signal soll mit \bar{d} bezeichnet werden. Diese Filterung soll als Ersatz für eine gleitende Mittelwertbildung angesehen werden. Danach wird geprüft, ob die geglättete Größe \bar{d} den Schwellwert $0,1$ bzw. $-0,1$ (10% vom Endwert) übersteigt. Nur wenn diese Grenze überschritten ist, wird das Überwiegen einer der beiden Werte -1 oder $+1$ als signifikant gewertet. In der Simulation wie auch bei der experimentellen Realisierung wurde die Zeitkonstante für das T1-Glied auf einen Wert im Bereich von $40 \cdot T_A$ bis $100 \cdot T_A$ gesetzt. Eine größere Zeitkonstante macht zwar die Erkennung sicherer, führt aber zu einer unnötig großen Verzögerung der Erkennung, weswegen die genannte Größenordnung für diese Zeitkonstante und den zugehörigen Schwellwert eingehalten werden sollte.

Damit die Adaption der Arbeitsschrittweite unabhängig von der wahren Breite des Optimalgebietes ist, wird sie aus der Größe der Testsignalamplitude gebildet, die ja auf eine bestimmte Breite geregelt wird. Es sollen hierfür folgende zwei Grenzfälle zur Bestimmung der Arbeitsschrittweite herangezogen werden:

- Wenn der Wert für d gleich häufig $+1$ und -1 ist, bedeutet dies, daß der Arbeitspunkt im Optimum liegt. Die Arbeitsschrittweite soll dann einen gewählten Mindestwert nicht unterschreiten.
- Wenn der Wert für d immer $+1$ oder -1 ist, bedeutet dies, daß sich der Arbeitspunkt mit ziemlicher Sicherheit außerhalb des Optimums befindet. Die Arbeitsschrittweite soll in diesem Fall einen bestimmten Maximalwert annehmen.

Die konkreten Werte für diese Ober- und Untergrenze wurden im simulativen Experiment auf die vierfache Testsignalamplitude bzw. auf die halbe Testsignalamplitude gesetzt. Diese Werte stellten bei der Simulation mit 8 Stellgrößen sinnvolle Werte dar. Beim experimentellen Versuch mit 14 Stellgrößen wurden die beiden Grenzen auf das 1,5-fache und 0,2-fache der Testsignalamplitude eingestellt, um ein ausreichend stabiles Arbeiten im Optimum zu erreichen. Es zeigte sich, daß diese Parameter unmittelbar durch praktische Versuche sinnvoll zu ermitteln sind. Sie haben einen großen Einfluß auf die Optimierungsgeschwindigkeit einerseits und die Stabilität im Optimum andererseits.

Zwischen den beiden Grenzwerten wird linear interpoliert. Es ergibt sich damit eine Kennlinie zur Adaption der Arbeitsschrittweite und damit der Integrationszeitkonstante nach Abbildung 3.15.

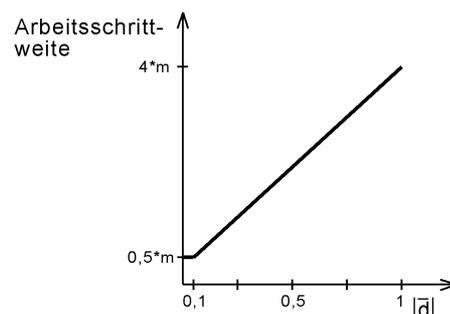


Abbildung 3.15: Kennlinie der Arbeitsschrittweite (Reziprokwert der Integrationszeitkonstante) bei der Simulation

3.4.6 Programmablauf des Extremwertregelungsvorgangs

Mit den in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Details wird nun die in Abbildung 3.10 gezeigte Struktur des Extremwertreglers als Programmablaufplan realisiert. Der Ablauf des beschriebenen Extremwertregelungsverfahrens gliedert sich in zwei Zustände (Abbildung 3.16). Entweder werden die Optimierungsschritte für alle Stellgrößen quasi gleichzeitig ausgeführt oder es laufen die Testsignalamplitudenregelungsschritte für alle Stellgrößen nacheinander ab. Im ersten Fall wird das Schema nach Abbildung 3.10 abgearbeitet, im zweiten Fall wird die Testsignalamplitude m des Blocks M in Abbildung 3.10 geregelt. Wie zwischen diesen beiden Zuständen umgeschaltet wird, läßt sich verschiedenartig lösen. In der Simulation wurde für den Ablauf der Optimierung eine bestimmte Anzahl Schritte vorgegeben. Sind diese Schritte abgelaufen, wird mit der Testsignalamplitudenregelung an der ersten Stellgröße begonnen. Dazu werden alle drei Abtastpunkte y_0-m , y_0 und y_0+m jeweils einmal angefahren und danach ein Regelschritt ausgeführt. Beim praktischen Experiment wurde statt dessen für den Optimierungsvorgang eine Zeit vorgegeben. Ist sie abgelaufen, werden die Schritte der Testsignalamplitudenregelung ausgeführt. In Abweichung zur Simulation werden jedoch die drei Abtastpunkte y_0-m , y_0 und y_0+m mehrfach angefahren, um mit Hilfe einer Mittelwertbildung der Meßwerte Störungen zu unterdrücken.

Mit der Regelung der Testsignalamplitude soll auf Veränderungen der Gütekennlinie reagiert werden, die auf Drifterscheinungen basieren. Das Verhältnis aus Optimierungszeit und Testsignalamplitudenregelungszeit sollte deshalb so eingestellt werden, daß die Drifterscheinungen ausgeglichen werden können. Auf der anderen Seite sollte das Verhältnis möglichst zu Gunsten der Optimierung ausgelegt werden, um die Optimierungszeit gering zu halten.

Um eine Unterdrückung des Testsignals durch wirksam werdende Begrenzungen des Stellwertes zu verhindern, sollte die Begrenzung nur auf das Signal y_0 wirksam werden und nach der Addition mit dem Testsignal n zum Signal y keinerlei Begrenzungen mehr erfolgen. Dies dürfte zu keiner Beschränkung des Einsatzes dieses Verfahrens führen, da das Testsignal immer sehr klein gegenüber dem Absolutwert des Stellwertes ist.

Die Abbildungen 3.17 und 3.18 zeigen den Programmablaufplan für einen Optimierungs- bzw. Testsignalamplitudenregelungsschritt. Für die Simulation wurde die MATLAB-Funktion "optimize6" entwickelt (Anlage 15). Sie entspricht der Optimierung einer einzelnen Stellgröße nach Abbildung 3.9 und wird zur mehrdimensionalen Optimierung für jede Stellgröße getrennt aufgerufen.

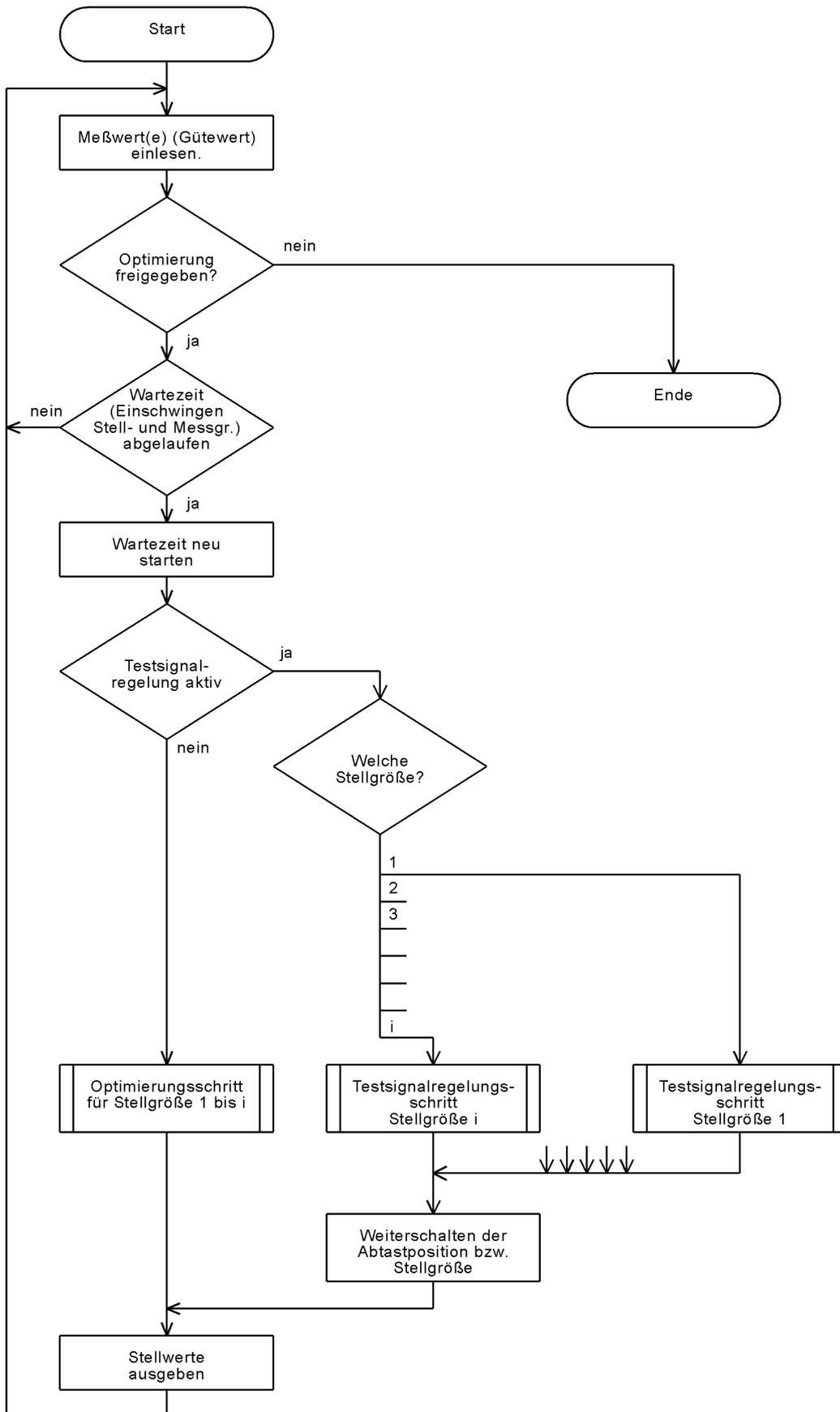


Abbildung 3.16: Programmablaufplan (PAP) der obersten Ebene zur Steuerung der Optimierungs- und Testsignalregelungsschritte

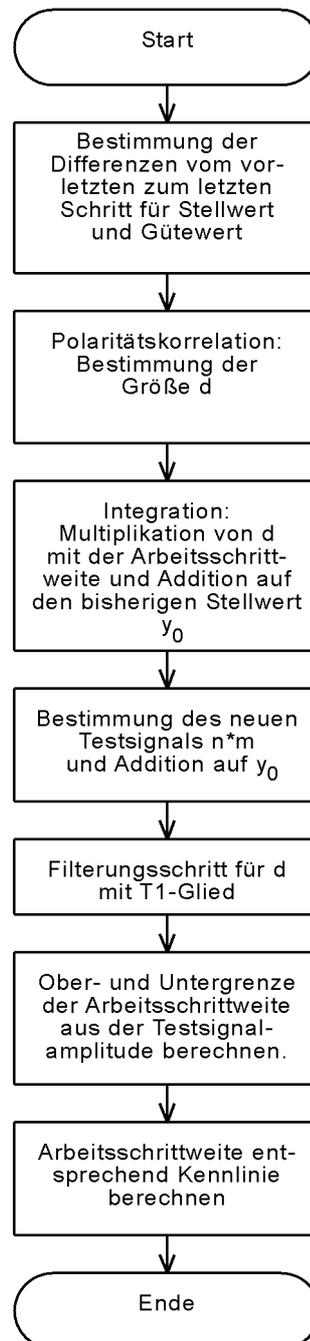


Abbildung 3.17: PAP Optimierungsschritt

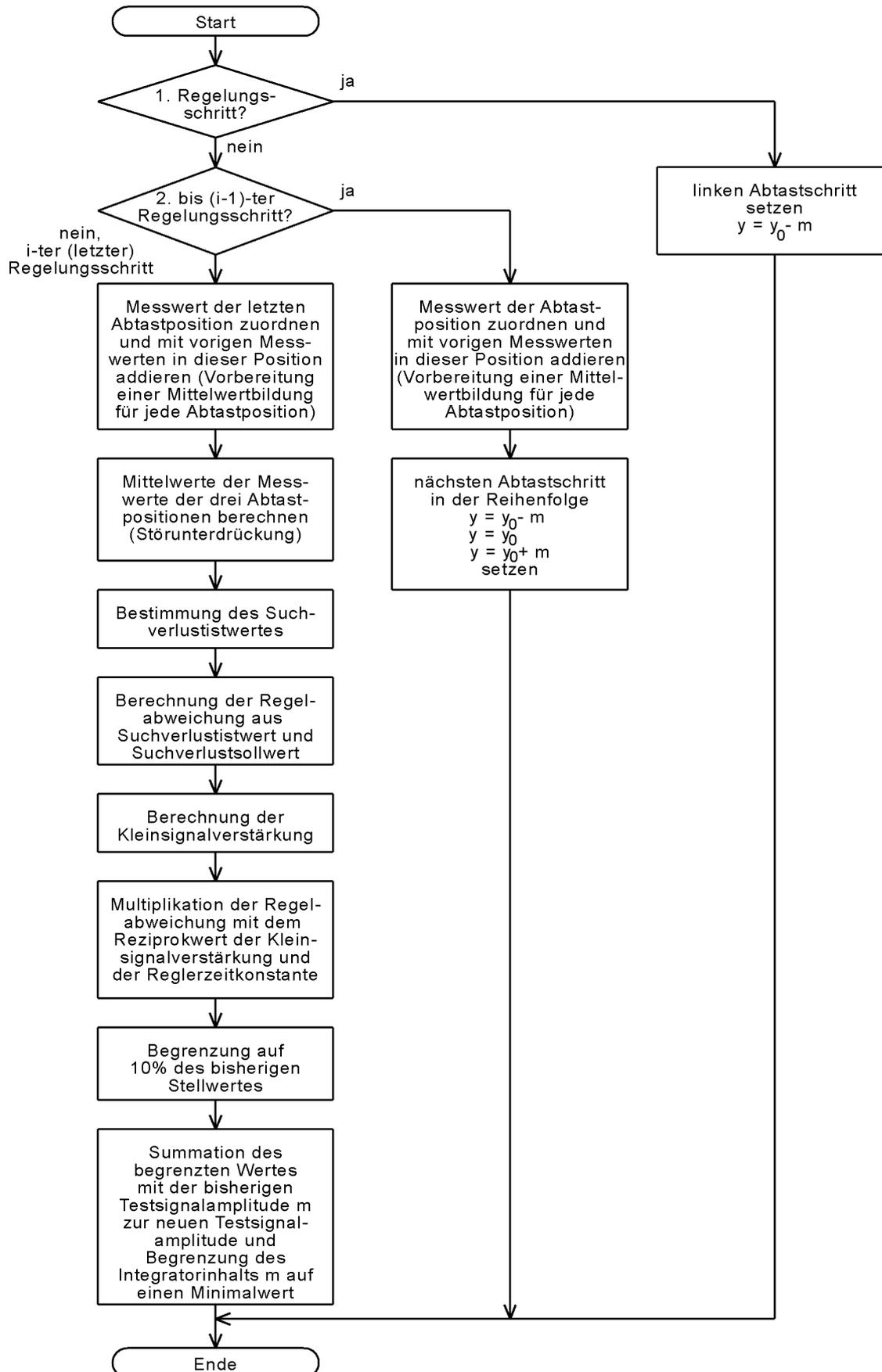


Abbildung 3.18: PAP Testsignalregelung

3.5 Simulative Erprobung des Extremwertregelungsverfahrens

Das im Kapitel 3.4 beschriebene Extremwertregelungsverfahren wurde umfangreich mit Hilfe von Simulationen erprobt. Bei der Beschreibung der Strecke wurde auf den häufig zur Simulation von Strahlführungssystemen benutzten Matrix-Formalismus der linearen Strahlenoptik zurückgegriffen /2/. Hierbei wird mit einer sogenannten Transfermatrix die Wirkung eines strahlenoptischen Elements auf ein Teilchen ausgedrückt. Diese Transfermatrix ergibt sich jeweils aus der Lösung der Bewegungsgleichung für Teilchen innerhalb eines solchen strahlenoptischen Elements. Ein Teilchen $\mathbf{T}_{0,xy}$ in der x - y -Ebene wird dabei an der Stelle des strahlenoptischen Elementes mit der Transfermatrix \mathbf{M} in das Teilchen $\mathbf{T}_{1,xy}$ überführt:

$$\mathbf{T}_{1,xy} = \mathbf{M} \mathbf{T}_{0,xy} \quad (3.13)$$

Nach /5/ ist der Teilchenvektor:

$$\mathbf{T}_{xy} = \begin{bmatrix} 1 \\ x' \\ x \\ y' \\ y \\ \mathbf{h} \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Die Elemente x und y sind die Ortskoordinaten auf der x - y -Ebene. Die Ableitungen von x und y nach dem Ort z

$$x' = \frac{\partial x}{\partial z} \quad (3.15)$$

und

$$y' = \frac{\partial y}{\partial z} \quad (3.16)$$

beschreiben die Neigungen der Bewegungsrichtung zur idealen Strahlachse. Das Element \mathbf{h} ist die Energieabweichung des Teilchens gegenüber der mittleren Energie aller Teilchen. Das Element "1" dient dazu, bei der Multiplikation mit der Transfermatrix Sprünge des Ortes und des Winkels einzubringen, die unabhängig von Ort, Winkel und Energieabweichung des Teilchens sind (z.B. beim Strahlführungselement "Korrektor").

Als Transfermatrix wird allgemein angegeben:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} & a_{36} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} & a_{46} \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} & a_{56} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{66} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

Im weiteren sollen Energieabweichungen der Teilchen vernachlässigt und deshalb nicht weiter berücksichtigt werden. Außerdem gibt es bei der linearen Strahlenoptik keine Verkopplung der

Bewegungsgleichungen zwischen der x - z - und der y - z -Ebene. Damit kann die Teilchenbewegung zwischen diesen beiden Ebenen getrennt berechnet werden. Weiterhin ist es nicht unbedingt erforderlich, Sprünge in Ort und Winkel mit der Transfermatrix zu behandeln. Aus diesem Grund sollen im weiteren zur Beschreibung eines Teilchens die Vektoren

$$\mathbf{T}_x = \begin{bmatrix} x \\ x' \end{bmatrix} \quad \text{und} \quad \mathbf{T}_y = \begin{bmatrix} y \\ y' \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

verwendet werden.

Aus der Matrix \mathbf{M} nach Gleichung 3.16 ergeben sich damit zwei Transfermatrizen \mathbf{M}_x und \mathbf{M}_y der Form:

$$\mathbf{M}_x = \begin{bmatrix} a_{x11} & a_{x12} \\ a_{x21} & a_{x22} \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

$$\mathbf{M}_y = \begin{bmatrix} a_{y11} & a_{y12} \\ a_{y21} & a_{y22} \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Da auch die Driftstrecken in dieser Form dargestellt werden können, ergibt sich beim Durchlaufen eines längeren zusammenhängenden Stückes Strahlführung die Gleichung zum Transferieren des Teilchens vom Eingang dieses Systems zum Ausgang:

$$\mathbf{T}_{xi} = \mathbf{M}_{xi} (\mathbf{M}_{xi-1} (\dots (\mathbf{M}_{x2} (\mathbf{M}_{x1} \mathbf{T}_{x0}))) \dots) = \left(\prod_{j=1}^i \mathbf{M}_{xj} \right) \mathbf{T}_{x0} \quad (3.21)$$

In der y - z -Ebene ergibt sich ein analoger Ausdruck. Die einzelnen Transfermatrizen können also vor der Simulation zu einer Systemmatrix zusammengefaßt werden, so daß in der Simulation nur noch eine einzige Multiplikation mit dem Teilchenvektor \mathbf{T} ausgeführt werden muß. Dies gilt jedoch nur, wenn sich in diesem Strahlführungsabschnitt keine Blenden befinden.

Mit den oben dargestellten Mitteln zur Beschreibung und Simulation eines Strahlführungsystems ist es erforderlich, den Teilchenstrahl durch eine große Menge einzelner Teilchen zu beschreiben. Es gibt jedoch eine weitere Möglichkeit der Strahltransportrechnung, bei der der Strahl als Ganzes in Form einer Phasenellipse in den zwei separierten Phasenräumen $\{x, x'\}$ und $\{y, y'\}$ beschrieben wird. Die transversale Emittanz des Strahls ist dabei proportional zur Ellipsenfläche. Hier kann – ähnlich wie im Fall eines Einzelteilchens – mit einem Matrixformalismus unter Nutzung der Betafunktion die Bewegung der Phasenellipsen durch die Strahlführungselemente hindurch berechnet werden. Will man jedoch auch die Wirkung von Blenden in die Simulation einbeziehen, würde die Emittanzfläche an der Blende beschnitten und ihren Ellipsencharakter verlieren (vgl. dazu das Simulationsergebnis in den Abbildungen 3.25 und 3.26). Beim Durchlauf der nachfolgenden Strahlführungsstrecke wäre damit die weitere Annahme einer ellipsenförmigen Ausdehnung im Phasenraum eine zu große Vereinfachung. Aus diesem Grund wird im Rahmen dieser Arbeit zur Simulation der Strahlführung das Prinzip der Einzelteilchenverfolgung angewandt und nicht das Rechenverfahren auf Grundlage der Phasenellipse benutzt.

Die Transportmatrizen der gebräuchlichen Strahlführungselemente werden an verschiedenen Stellen in der Literatur genannt: /2/, /3/, /40/, /41/, /42/, /43/ und /50/. Im weiteren werden Transfermatrizen der Driftstrecke und des Quadrupols für die hier durchgeführte Simulation nach Tabelle 3.2 verwendet.

Strahlenoptisches Element	Transfermatrix
Feldfreie Driftstrecke	$\mathbf{M}_x = \mathbf{M}_y = \begin{bmatrix} 1 & l \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.22)$ <p>$l = \text{Länge der Driftstrecke}$</p>
Quadrupol mit Fokussierung in der x-z-Ebene und Defokussierung in der y-z-Ebene ($k < 0$)	$\mathbf{M}_x = \begin{bmatrix} \cos \Omega & \frac{1}{\sqrt{ k }} \sin \Omega \\ -\sqrt{ k } \sin \Omega & \cos \Omega \end{bmatrix} \quad (3.23)$ $\mathbf{M}_y = \begin{bmatrix} \cosh \Omega & \frac{1}{\sqrt{ k }} \sinh \Omega \\ \sqrt{ k } \sinh \Omega & \cosh \Omega \end{bmatrix} \quad (3.24)$ $\Omega = \sqrt{ k } l \quad (3.25)$ <p>$k = \text{Quadrupolstärke}$ $l = \text{Wirklänge auf den Strahl}$</p>
Quadrupol mit Defokussierung in der x-z-Ebene und Fokussierung in der y-z-Ebene ($k > 0$)	$\mathbf{M}_x = \begin{bmatrix} \cosh \Omega & \frac{1}{\sqrt{k}} \sinh \Omega \\ \sqrt{k} \sinh \Omega & \cosh \Omega \end{bmatrix} \quad (3.26)$ $\mathbf{M}_y = \begin{bmatrix} \cos \Omega & \frac{1}{\sqrt{k}} \sin \Omega \\ -\sqrt{k} \sin \Omega & \cos \Omega \end{bmatrix} \quad (3.27)$ $\Omega = \sqrt{k} l \quad (3.28)$ <p>$k = \text{Quadrupolstärke}$ $l = \text{Wirklänge auf den Strahl}$</p>

Tabelle 3.2: Transfermatrizen für die Simulation

3.5.1 Strahlführungsabschnitt für die Simulation

Für die Simulation wird im Rahmen dieser Arbeit ein Strahlführungsabschnitt benutzt, der so gestaltet ist, daß er eine allgemeine Gültigkeit für verschiedene Anwendungszwecke besitzt. Das Ziel der Optimierung an diesem Strahlführungsabschnitt soll darin bestehen, einen Teilchenstrahl über eine bestimmte Distanz zu führen und ihn am Ende dieses Abschnittes in

einen simulierten Faradaybecher zu fokussieren. Dabei soll der Strahl möglichst symmetrisch durch den Strahlführungsabschnitt verlaufen und somit senkrecht in den Faradaybecher einfallen.

Zu diesem Zweck wurde folgende Anordnung gewählt (Abbildung 3.19):

- ein Startpunkt, an dem die Teilchen erzeugt werden,
- zwei Korrektorelemente (auch Steerer genannt) je Ebene zur Verschiebung der Strahlage und zur Winkeländerung des Gesamtstrahls,
- ein Quadrupol-Dublett zur Abbildung des Startpunktes des Strahls in die Blende 1,
- Blende 1 als Abbildungsebene für den Strahl und zur Messung der Symmetrieeigenschaften des Strahls,
- Blende 2 zur Messung der Symmetrieeigenschaften,
- ein weiteres Quadrupol-Dublett zur Fokussierung des Strahls in den Faradaybecher,
- ein Faradaybecher zur Bestimmung des Strahlstromes in einer vorgegebenen Querschnittsfläche.

Im Startpunkt des Strahls werden i Teilchen erzeugt, deren Koordinaten auf der x - y -Ebene und deren Richtungen zur idealen Strahlachse x' , y' in der Teilchenmatrix

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \mathbf{T}_{1x} & \mathbf{T}_{2x} & \cdots & \mathbf{T}_{ix} \\ \mathbf{T}_{1y} & \mathbf{T}_{2y} & \cdots & \mathbf{T}_{iy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \cdots & x_i \\ x'_1 & x'_2 & \cdots & x'_i \\ y_1 & y_2 & \cdots & y_i \\ y'_1 & y'_2 & \cdots & y'_i \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

gespeichert sind. Jede Spalte dieser Matrix stellt den Vektor eines Einzelteilchens dar.

Da der Strahl aus einer begrenzten Anzahl von Teilchen zusammengesetzt ist, besteht jede Messung eines Strahlstroms im Zählen der Teilchen über einen bestimmten Querschnitt. Der Strahlstrom ist hier also im Unterschied zu einem realen Strahlstrom eine diskrete Größe. Um die Diskretisierungsintervalle ausreichend klein zu halten, wurde der Strahl mit insgesamt 4000 Teilchen im Startpunkt simuliert. Es wird hierbei vorausgesetzt, daß die Teilchen um den mittleren Startpunkt und den mittleren Winkel der Bewegungsrichtung zur idealen Strahlachse GAUSS-förmig verteilt sind. Das Histogramm in Abbildung 3.22 zeigt die Stromdichteverteilung eines solchen simulierten Strahls im Startpunkt.

In den im folgenden noch beschriebenen Simulationen wurde die Teilchenmatrix nur ein einziges Mal erstellt und in jedem Simulationsschritt wiederverwendet, da andernfalls die Simulationszeit zu groß geworden wäre. Vergleichende Simulationen mit einer aller 10 Simulationsschritte neu gebildeten Teilchenmatrix haben gezeigt, daß das Simulationsverhalten in beiden Fällen nahezu gleich war. Die MATLAB-Funktion zur Erzeugung der Teilchenmatrix ist in Anlage 4 dargestellt.

Mit einem Korrektorelement ist es möglich, den gesamten Strahl um einen bestimmten kleinen Winkel abzulenken. Diese Ablenkung dient der Korrektur von Strahlage und -winkel in einem geradlinigen Stück Strahlführung. Das Koordinatensystem mit der z -Koordinate auf der idealen Strahlachse wird deshalb im Gegensatz zur üblichen Anwendung von Dipolmagneten

nicht mitgedreht. Werden zwei Korrektorelemente mit einem bestimmten Abstand nacheinander eingesetzt und mit dem gleichen Stellwert aber entgegengesetztem Vorzeichen beaufschlagt, wird der Teilchenstrahl in der x-y-Ebene verschoben (Abbildung 3.21). Mit den beiden Korrektoren K1a und K1b (jeweils für beide Ebenen) wird die Lagekorrektur und die Korrektur

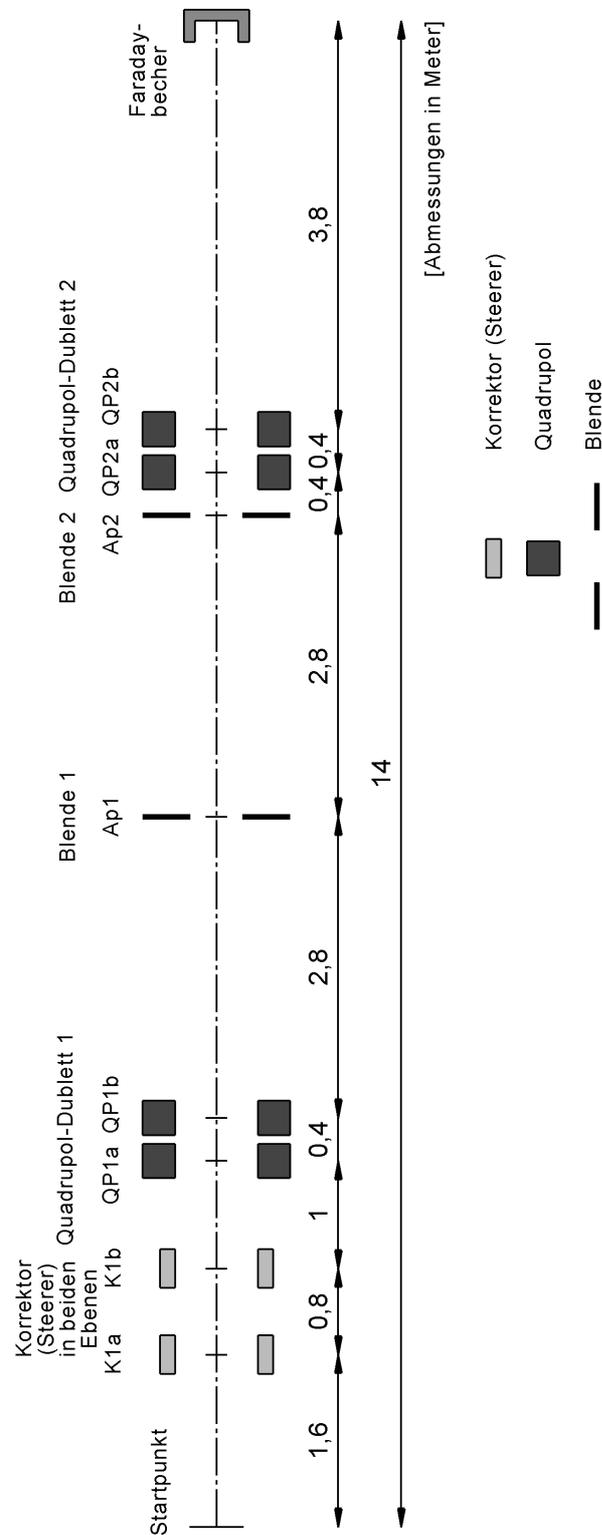


Abbildung 3.19: Strahlführungsabschnitt der Simulation

des Strahlwinkels gleichzeitig ausgeführt. Dazu wird das erste Korrektorelement mit dem Stellwert K1a (Lagekorrektor) beaufschlagt. Vom zweiten Korrektorelement wird zuerst der Wert der Stellgröße K1a (Lagekorrektor) subtrahiert, bevor der Stellwert K1b (Winkelkorrektor) auf dieses Korrektorelement addiert wird. Im weiteren wird nicht mehr zwischen den beiden Korrektorelementen unterschieden, sondern es werden nur die Funktionen und Stellwerte des Lagekorrektors (als K1a) und Winkelkorrektors (als K1b) verwendet¹. Die MATLAB-Funktion des Korrektorelements enthält Anlage 5.

Ein Quadrupol hat auf Grund seiner Feldkonfiguration immer in einer Ebene eine fokussierende Wirkung und gleichzeitig in der anderen Ebene eine defokussierende Wirkung. Daher resultieren die beiden unterschiedlichen Transfermatrizen für Quadrupole in Tabelle 3.2. Werden nun zwei Quadrupole hintereinander angeordnet (Quadrupol-Dublett), wird eine Fokussierung in beide Ebenen gleichzeitig möglich. Die MATLAB-Funktion zur Simulation eines Quadrupols zeigt Anlage 6.

Um die Symmetrieeigenschaften des Teilchenstrahls abzuschätzen, wird der Strahl durch die beiden Blenden beschnitten. Eine Blende besteht hierbei aus zwei hintereinander liegenden Schlitzen. Die Teilchen, die in der Simulation auf diese Blendensegmente auftreffen, werden gezählt. Diese Anordnung entspricht den sogenannten Kreuzschlitzen an real existierenden Strahlführungen (Abbildung 3.20). Die Realisierung der Blenden in der Simulation ist Anlage 7 zu entnehmen.

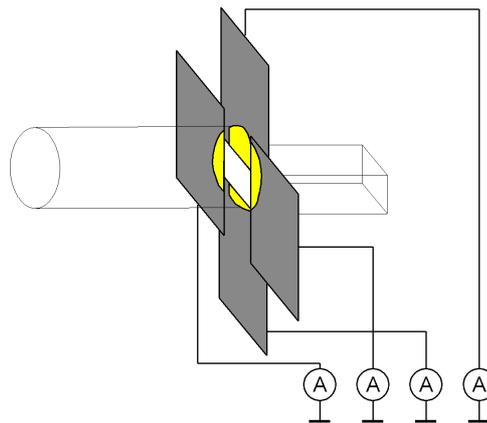


Abbildung 3.20: Funktionsprinzip einer Kreuzschlitzanordnung

Ein Faradaybecher ist so aufgebaut, daß er alle Teilchen eines Strahls über eine bestimmte Fläche auffängt und dabei für eine exakte Messung das Austreten von Sekundärelektronen weitgehend verhindert. Die Konstruktion ist abhängig von Teilchenart und -energie. Die im Faradaybecher auftreffenden Ladungen führen zu einem Stromfluß gegen Masse, der gemessen wird. In der Simulation wird der Faradaybecher durch eine zentrische, auf der z-Achse liegende kreisrunde Fläche mit einem Durchmesser von 0,5 mm beschrieben, innerhalb der alle auftreffenden Teilchen gezählt werden. Die zugehörige MATLAB-Funktion ist Anlage 8 zu entnehmen.

Die folgenden Bilder der Simulation wurden im optimierten Zustand der Strahlführung aufgezeichnet. Die Abbildungen 3.25 und 3.26 zeigen den Verlauf der Emittanzflächen an

¹ Die beiden Stellgrößen Lage- und Winkelkorrektor sind in den beiden Ebenen x-z und y-z jeweils einmal vorhanden. Im weiteren wird der Bezug zu einer der beiden Ebenen durch ein angehängenes "x" oder "y" an die Kurzbezeichnung kenntlich gemacht (z. B. K1ax).

ausgewählten Punkten unmittelbar vor und nach bestimmten Strahlführungs- und Diagnoseelementen. Hinter den Blenden 1 und 2 (in den Diagrammen e und g) ist deutlich die Beschneidung in x - und y -Richtung zu erkennen. Dadurch erlangt die vorher ellipsenförmige Emittanzfläche eine trapezförmige Form, wie am Ort des Faradaybechers (in den Diagrammen i) sehr gut zu erkennen ist. In Abbildung 3.23 ist die Stromdichteverteilung im simulierten Faradaybecher unter diesen Bedingungen dargestellt. Die Abbildung zeigt, daß diese Fläche vom Teilchenstrahl sehr homogen ausgeleuchtet wird.

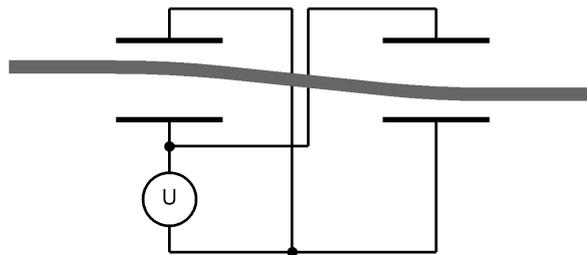


Abbildung 3.21: Funktionsprinzip eines elektrostativen Lagekorrektors bestehend aus zwei einzelnen Korrektorelementen

Die Symmetrie des Strahlverlaufs in der Strahlführung wird durch die Darstellung der Enveloppe in der x - z - und y - z -Ebene deutlich (Abbildung 3.24). Die Enveloppe ist die "einhüllende" Kurve des Strahls. Da der Querschnitt des Strahls meist nicht abrupt endet, sondern vergleichbar mit der GAUSS-Verteilung allmählich in den strahlfreien Raum übergeht, wird die Enveloppe für einen bestimmten Prozentsatz des Strahlstroms angegeben, der von ihr eingehüllt wird. Hier wird bei der Simulation grundsätzlich die Enveloppe für 95% Strahlstrom angegeben.

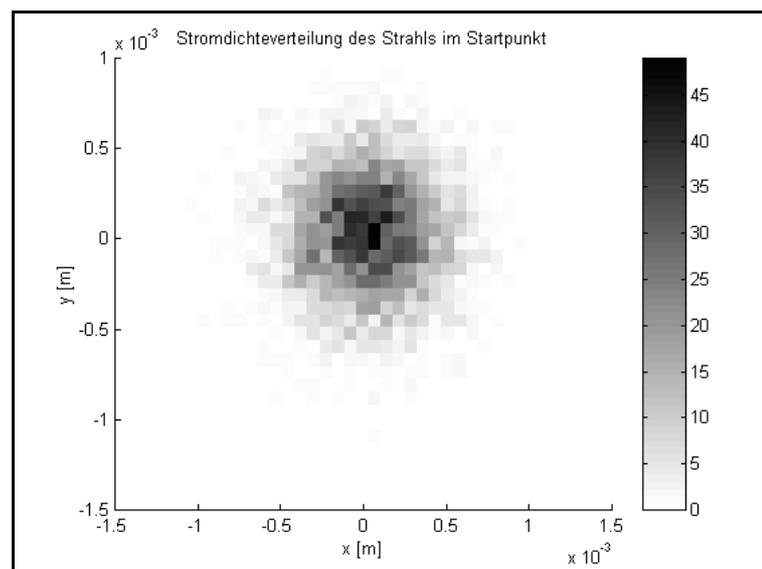


Abbildung 3.22: Stromdichteverteilung (Anzahl Teilchen pro Flächensegment) in der x - y -Ebene im Startpunkt

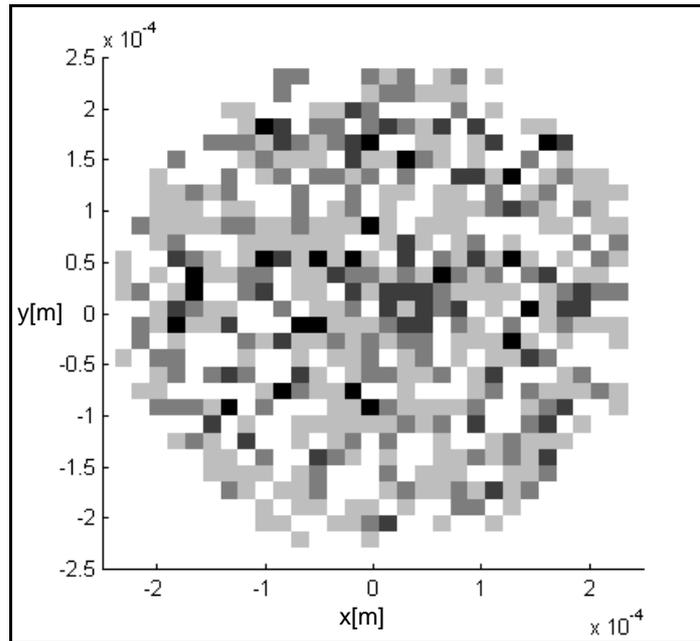


Abbildung 3.23: Stromdichteverteilung im Faradaybecher im optimierten Zustand

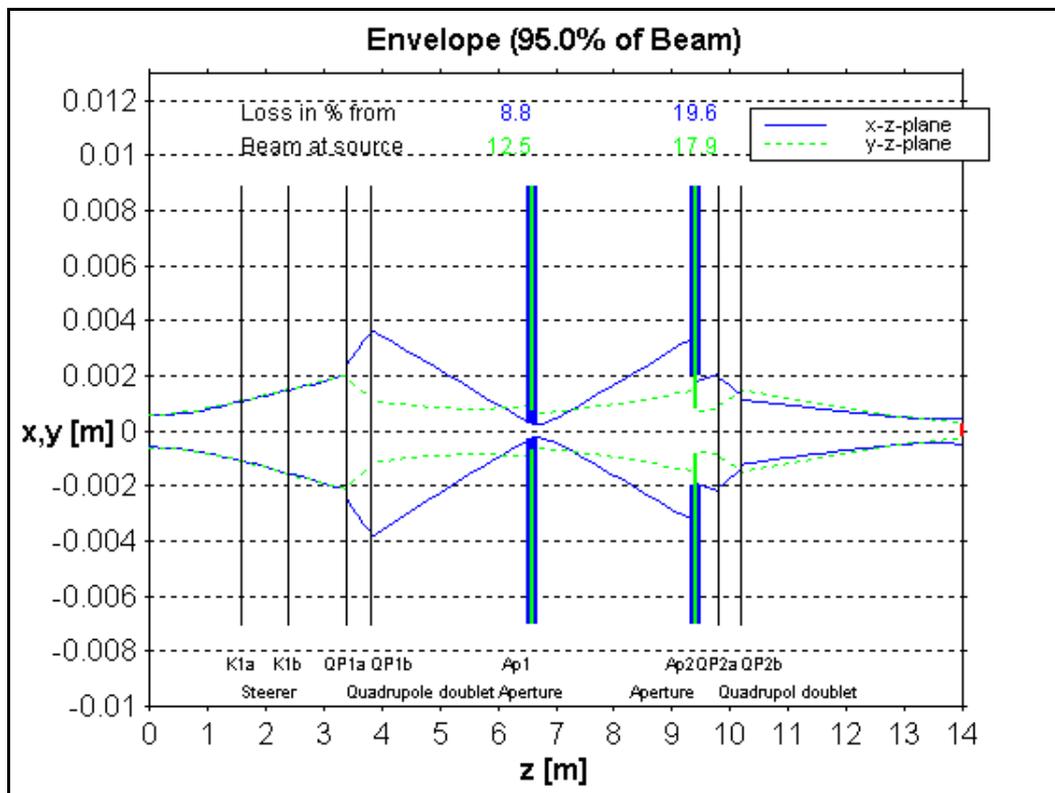


Abbildung 3.24: Enveloppe zu Beginn der Simulation im optimierten Zustand

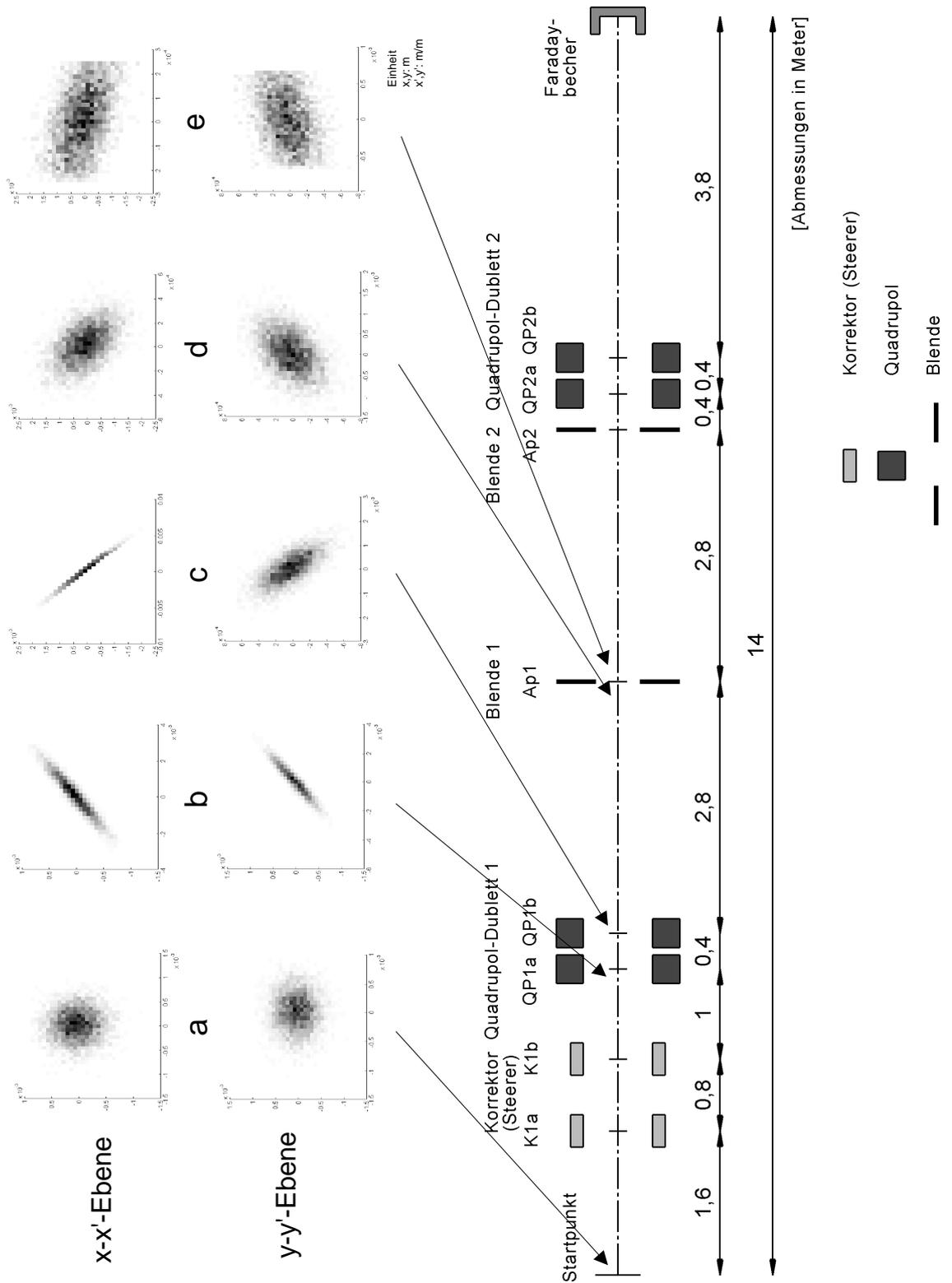


Abbildung 3.25: Emittanzflächen im transversalen Phasenraum bis zur Blende 1

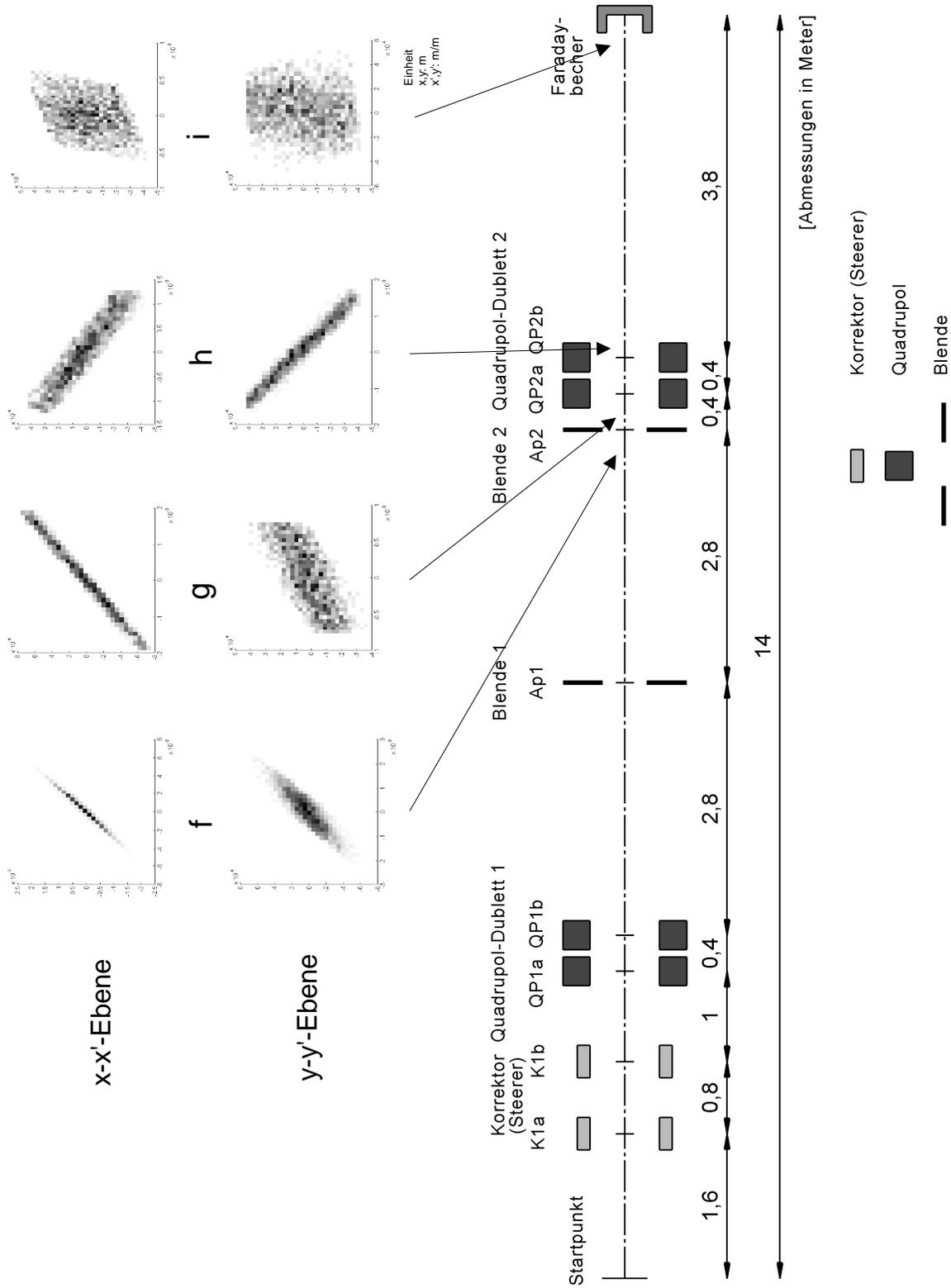


Abbildung 3.26: Emittanzflächen im transversalen Phasenraum vor Blende 2 bis zum Faradaybecher

In der Simulation der Optimierung wird der Gütewert x aus den Strömen der auf die oben genannten Blenden auftreffenden Teilchen und dem Faradaybecherstrom berechnet. Der Faradaybecherstrom I_F wird bestimmt aus der Anzahl der auf die Faradaybecherfläche auftreffenden Teilchen Z_F und der Gesamtzahl der im Startpunkt erzeugten Teilchen Z_Q nach der Gleichung:

$$I_F = \frac{Z_F}{Z_Q} \quad (3.30)$$

Der maximal mögliche Strom hat den Wert 1. Dieser Wert ist die Strahlstromstärke im Startpunkt.

Zur Berechnung der Symmetrieeigenschaften des Strahls an den Blenden werden alle die Teilchen, die auf die einzelnen Blendensegmente auftreffen, gezählt. Die Zuordnung der im folgenden verwendeten Zählvariablen für die einzelnen Blendensegmente kann Abbildung 3.27 entnommen werden. Die Gleichungen zur Berechnung der Symmetriewerte an den Blenden in den einzelnen Ebenen sind:

$$I_{B1x} = 1 - \frac{|Z_{B1x1} - Z_{B1x2}|}{Z_{B1x1} + Z_{B1x2}} \quad (3.31)$$

$$I_{B1y} = 1 - \frac{|Z_{B1y1} - Z_{B1y2}|}{Z_{B1y1} + Z_{B1y2}} \quad (3.32)$$

$$I_{B2x} = 1 - \frac{|Z_{B2x1} - Z_{B2x2}|}{Z_{B2x1} + Z_{B2x2}} \quad (3.33)$$

$$I_{B2y} = 1 - \frac{|Z_{B2y1} - Z_{B2y2}|}{Z_{B2y1} + Z_{B2y2}} \quad (3.34)$$

Damit sind die Symmetriewerte I_B gleich eins, wenn die Anzahl der Teilchen auf den sich gegenüberstehenden Blendensegmenten gleich ist. Im Extremfall, bei dem Teilchen nur auf eine der beiden gegenüberstehenden Blendensegmente auftreffen, ist der Symmetriewert gleich Null.

Der Strom im Faradaybecher und die Symmetriewerte an den Blenden können z.B. mit Wichtungsfaktoren a_i zu dem Gütewert x zusammengefaßt werden:

$$x = a_1 I_F + a_2 (I_{B1x} + I_{B1y} + I_{B2x} + I_{B2y}) \quad (3.35)$$

Es hat sich allerdings in der Simulation gezeigt, daß bei einer anderen Zusammenführung dieser Größen ein besseres Optimierungsverhalten auftrat. Hierbei wurde neben dem Faradaybecherstrom nur der schlechteste und damit kleinste aller vier Symmetriewerte benutzt:

$$x = a_1 I_F + a_2 \min(I_{B1x}, I_{B1y}, I_{B2x}, I_{B2y}) \quad (3.36)$$

In vorangegangenen Simulationen konnte gezeigt werden, daß das Verhalten bei unterschiedlichen Startwerten immer ausreichend stabil ist. Um Simulationszeit zu sparen, wurden vergleichbare Startwerte als Anfangswerte festgesetzt, die für alle Simulationen gleich sind. Diese Anfangswerte haben sich aus einer Simulation über ein großen Zeitraum ergeben. Beim Simulationsstart kann deshalb von einem "eingeschwungenen" Zustand ausgegangen werden. Dies betrifft neben der Optimierung insbesondere auch die Testsignalamplituden, deren Regelungen eine relativ große Zeitkonstante besitzen.

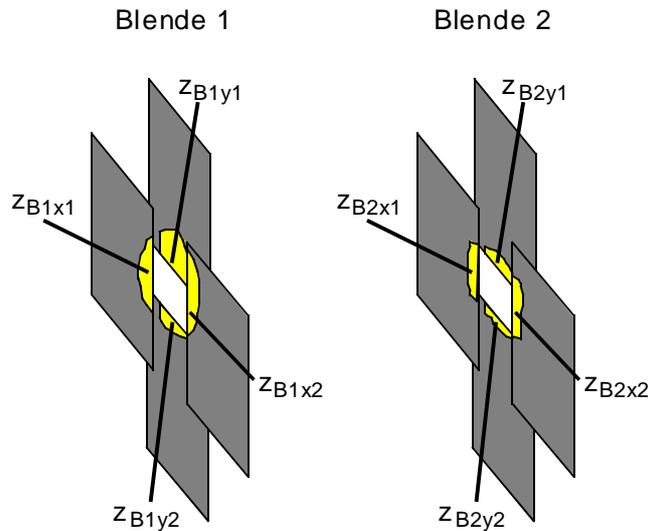


Abbildung 3.27: Zuordnung der Zählvariablen für die Teilchenzahlen auf den unterschiedlichen Blendensegmenten

Im weiteren sollen zwei typische Optimierungsabläufe durch Simulationen getestet werden. Zuerst werden ausgehend vom Optimalpunkt alle Stellgrößen gleichzeitig und plötzlich geringfügig verändert. Dies soll das Optimierungsverhalten bei noch nicht optimal eingestellten Stellgrößen demonstrieren. Praktisch liegt dieser Fall vor, wenn nach der Inbetriebnahme der Anlage und einer groben Einstellung der Stellgrößen während des Strahlfädels auf den Betrieb mit der hier vorgestellten Extremwertregelung umgeschaltet wird. Der zweite Simulationsablauf soll das Verhalten bei Drifterscheinungen der Strahlparameter zeigen. Hierbei läuft das Zentrum des Quellpunktes in einer Ebene langsam aus der Symmetrielinie heraus und die Extremwertregelung muß darauf entsprechend reagieren.

Für den Extremwertregler wurden folgende Parameter für alle hier aufgeführten Simulationen benutzt:

- Länge der Schieberegister zur Erzeugung des Pseudozufallsgenerators: 12 bis 19 Bit
- Sollwert des Suchverlustes für jede Stellgröße: 0,3 %
- Reglerzeitkonstante der Testsignalamplitudenregelung: $10 \cdot T_{AR}$
- Zeitkonstante des T1-Gliedes zur Glättung des Korrelationsoperationsergebnisses d : $40 \cdot T_A$
- Untergrenze der Testsignalamplitude: $1 \cdot 10^{-10}$ für Korrektoren und $1 \cdot 10^{-6}$ für alle Quadrupole

Wie oben erläutert, wechseln sich die Testsignalamplitudenregelung und die eigentliche Optimierung gegenseitig ab. In der Simulation wurden für jede Stellgröße jeweils die drei erforderlichen Abtastpositionen y_0-m , y_0 und y_0+m einmalig abgetastet. Für die 8 Stellgrößen ergeben sich demzufolge 24 Testsignalregelungsschritte. Die Zahl der danach folgenden Optimierungsschritte wurde auf 150 festgesetzt.

3.5.2 Simulation des Verhaltens der Extremwertregelung bei gleichzeitiger Verstellung aller Stellwerte

Wie oben angedeutet, soll hier die Reaktion des Extremwertregelungsverfahrens auf eine nicht optimale Einstellung der Stellwerte betrachtet werden. Damit ein Vergleich mit der optimalen Einstellung durchgeführt werden kann, beginnt diese Simulation mit den Stellwerten des bei einem längeren Versuch ermittelten Optimalpunktes. Mit dem Simulationsschritt 250 werden dann alle Stellwerte um einen kleinen Betrag variiert. Die Quadrupolstärken wurden alle auf 95% ihres bisherigen Wertes vermindert. Bei den Korrektoren hingegen ist eine Verstellung um einen bestimmten Prozentsatz ihres bisherigen Stellwertes nicht sinnvoll, da der Teilchenstrahl bezüglich Ort und Winkel annähernd symmetrisch aus dem Startpunkt austritt und somit die Korrektoren Stellwerte um Null besitzen. Bei den Korrektoren wurde der Stellwert deshalb auf folgende absolute Werte gesetzt:

Korrektorstellgrößen	Stellwerte im Schritt 250
K1ax	$+1 \cdot 10^{-4}$
K1ay	$-1 \cdot 10^{-4}$
K1bx	$+1 \cdot 10^{-4}$
K1by	$-1 \cdot 10^{-4}$

Tabelle 3.3: Stellwerte der Korrektoren im Schritt 250

Im Vergleich zur Abbildung 3.23 zeigt Abbildung 3.28 die Verteilung der Teilchen im Faradaybecher im Schritt 250. Der Strahl verläuft in diesem Zustand nicht mehr symmetrisch bezüglich der idealen Strahlachse (Abbildung 3.29).

Nach ca. 2250 Schritten (Abbildung 3.30) ist die Symmetrie der Enveloppe zur idealen Strahlachse wieder hergestellt. Die Abbildung 3.31 zeigt zum Vergleich zur Abbildung 3.28 die Verteilung der Teilchen im Faradaybecher zu diesem Zeitpunkt. Abbildung 3.32 zeigt den Verlauf von Gütewert x und der Anzahl Teilchen im Faradaybecher während der 3000 Simulationsschritte. Die dünne Linie beschreibt den Vergleichswert für den Fall, daß die Stellgrößen fest auf dem Startwert der Simulation gehalten werden.

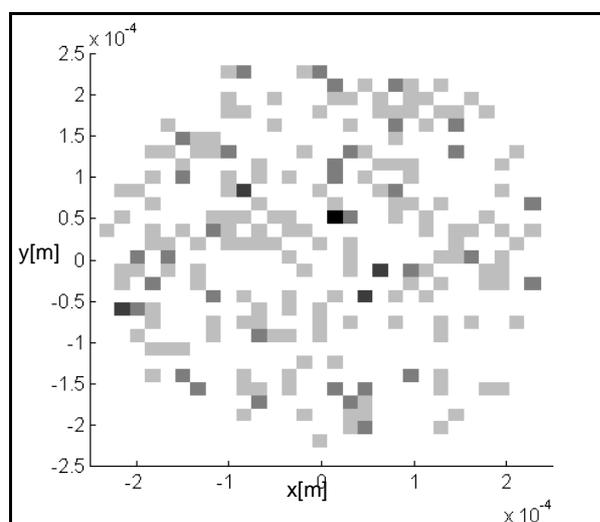


Abbildung 3.28: Verteilung der Teilchen im Faradaybecher im Simulationsschritt 250

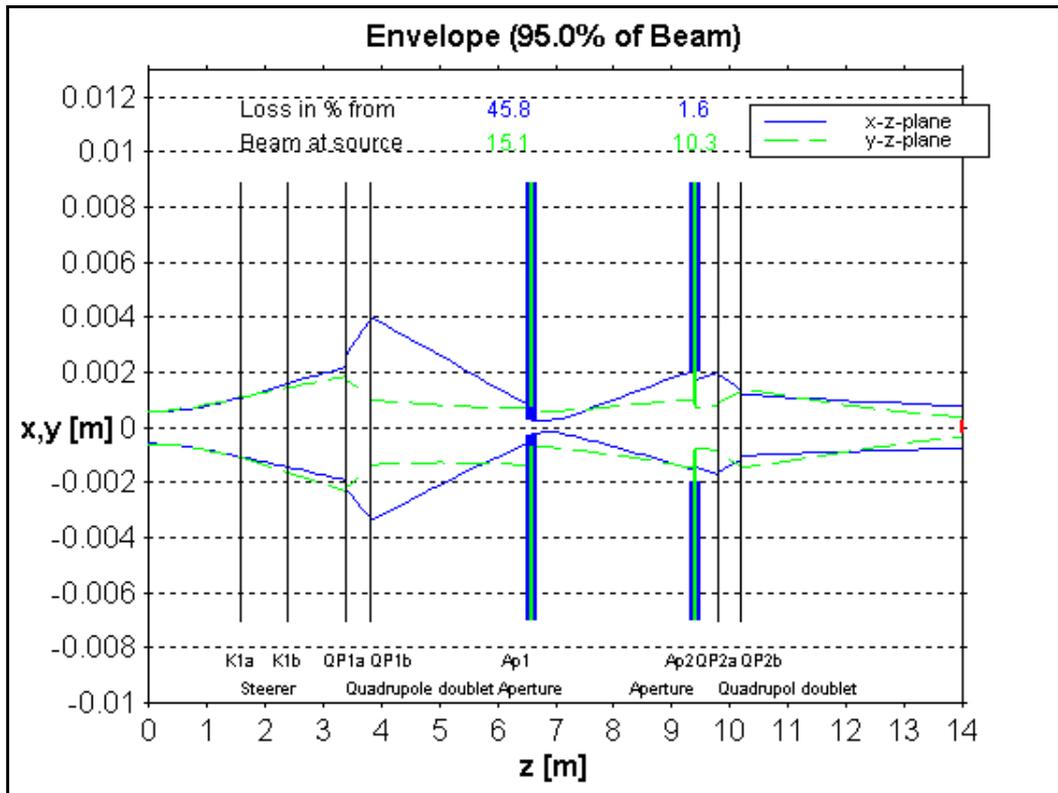


Abbildung 3.29: Enveloppe im Simulationsschritt 250

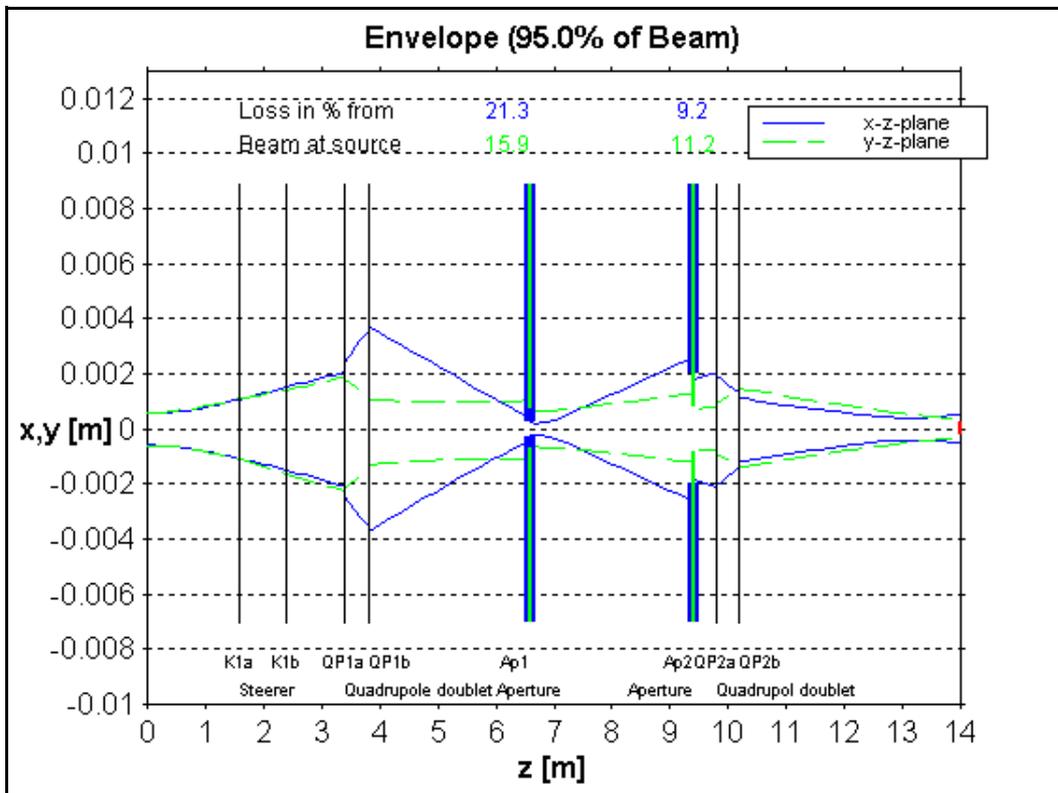


Abbildung 3.30: Enveloppe im Simulationsschritt 2250

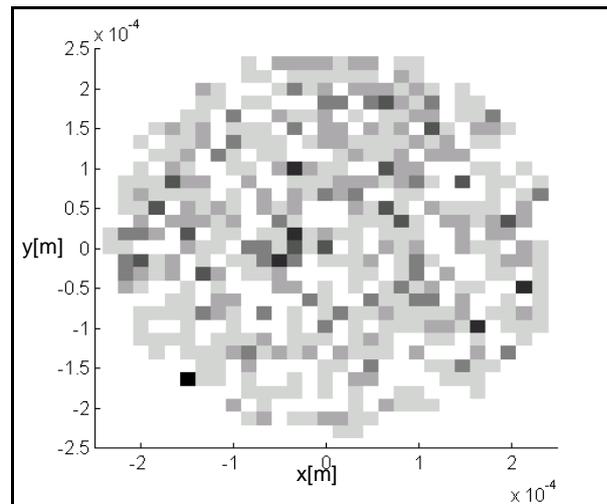


Abbildung 3.31: Verteilung der Teilchen im Faradaybecher nach Simulationsschritt 2250

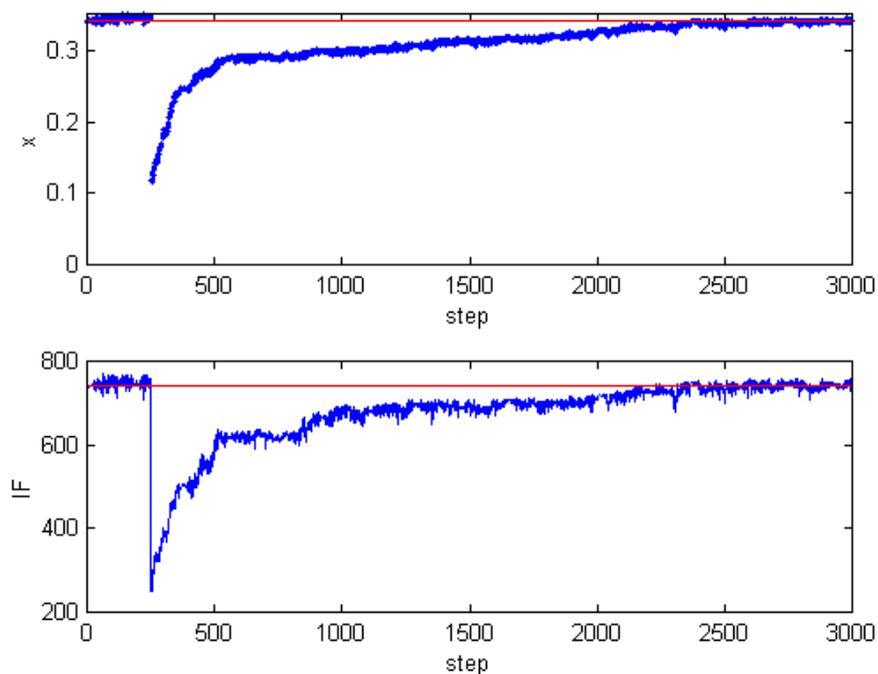


Abbildung 3.32: Verlauf des Gütevalues x und des Faradaybecherstromes I_F über 3000 Simulationsschritte

In der Anlage 9 sind die Verläufe der 8 Stellgrößen über die 3000 Schritte hinaus, bis 10000 Schritte, dargestellt. Diese Verläufe zeigen, daß alle Stellgrößen wieder ihren Ausgangswert vom Beginn der Simulation erreichen. Obwohl das Optimierungsziel bezüglich des Gütevalues schon nach ungefähr 2250 Schritten erreicht ist, benötigen einige Stellgrößen, insbesondere Quadrupol QP1a, eine größere Zeit, um ihren Startwert wieder zu erreichen.

Die Verläufe des Gütevalues x und der Teilchen im Faradaybecher sind für zwei weitere solche Simulationen in Anlage 10 dargestellt.

3.5.3 Simulation des Verhaltens der Extremwertregelung bei Drifterscheinungen

In diesem Kapitel werden die Stellwerte nicht einmalig manuell verändert. Statt dessen wird in bestimmten Zeitabschnitten der Austrittsort der Teilchen in der x - z -Ebene kontinuierlich verschoben. Dies soll eine Drifterscheinung an der Teilchenquelle simulieren /52/. Der Vorteil dieser hier gewählten Drift ist, daß bekannt ist, mit welcher Stellgröße der Extremwertregler auf diese Drift reagieren muß. Da es sich hier um eine Lageverschiebung des Strahls in der x - z -Ebene handelt, ist eine Korrektur mit dem Lagekorrektor (Stellgröße $K1ax$) die sinnvolle Reaktion.

Gleichzeitig soll mit dieser Simulation die Stabilität der Optimierung über eine längere Zeit demonstriert werden. Deshalb werden insgesamt 10000 Schritte ausgeführt. Der mittlere Austrittsort kann für die 10000 Simulationsschritte der Abbildung 3.33 entnommen werden.

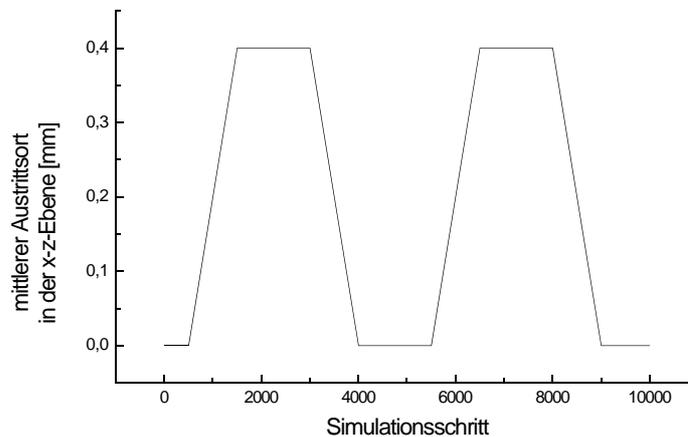


Abbildung 3.33: mittlerer Austrittsort der Teilchen in Abhängigkeit vom Simulationsschritt

In Abbildung 3.34 ist der Verlauf der Enveloppe im Simulationsschritt 1500 dargestellt. In diesem Schritt ist der mittlere Austrittsort in der x - z -Ebene auf +0,4 mm verschoben. Zugleich ist in dieser Abbildung zu erkennen, daß der Lagekorrektor dieser Ebene (Stellgröße $K1ax$) diese Verschiebung des Strahls vollständig rückgängig macht. Hinter dem Korrektorelement $K1b$ verläuft dadurch der Strahl wieder symmetrisch zur idealen Strahlachse. Der Verlauf der Stellgröße $K1ax$ über die gesamte Simulationszeit ist in Abbildung 3.35 dargestellt. Eine Übersicht über die Verläufe aller Stellgrößen dieses Simulationslaufes ist Anlage 11 zu entnehmen. In Abbildung 3.36 ist im oberen Diagramm der Verlauf des Gütewertes x und im unteren Diagramm die Zahl der Teilchen im Faradaybecher dargestellt. Die dünne Linie kennzeichnet den Wert dieser beiden Größen für den Fall, daß die Stellwerte der Stellgrößen über den gesamten Simulationslauf konstant auf den Startwerten gehalten würden, die Optimierung also deaktiviert ist.

Die Anlage 12 enthält zwei weitere Ergebnisse von Simulationsläufen mit gleichen Startwerten und identischem Driftverlauf. Die auftretenden Änderungen resultieren aus für diese Simulationen individuell erstellten Teilchenverteilungen im Startpunkt.

Die Simulationen haben gezeigt, daß das hier vorgestellte Extremwertregelungsverfahren an Strahlführungsanlagen verwendet werden kann. Es zeigt eine ausreichende Stabilität, paßt sich automatisch der "Breite" des Optimums an und verursacht nur einen geringen Suchverlust. Neben der Aufgabe, den Stellvektor des Optimums aus einer nicht idealen Einstellung der Stellwerte heraus zu finden, konnten bei der Simulation von Drifterscheinungen des Austrittsortes der Teilchen hervorragende Optimierungsergebnisse erzielt werden.

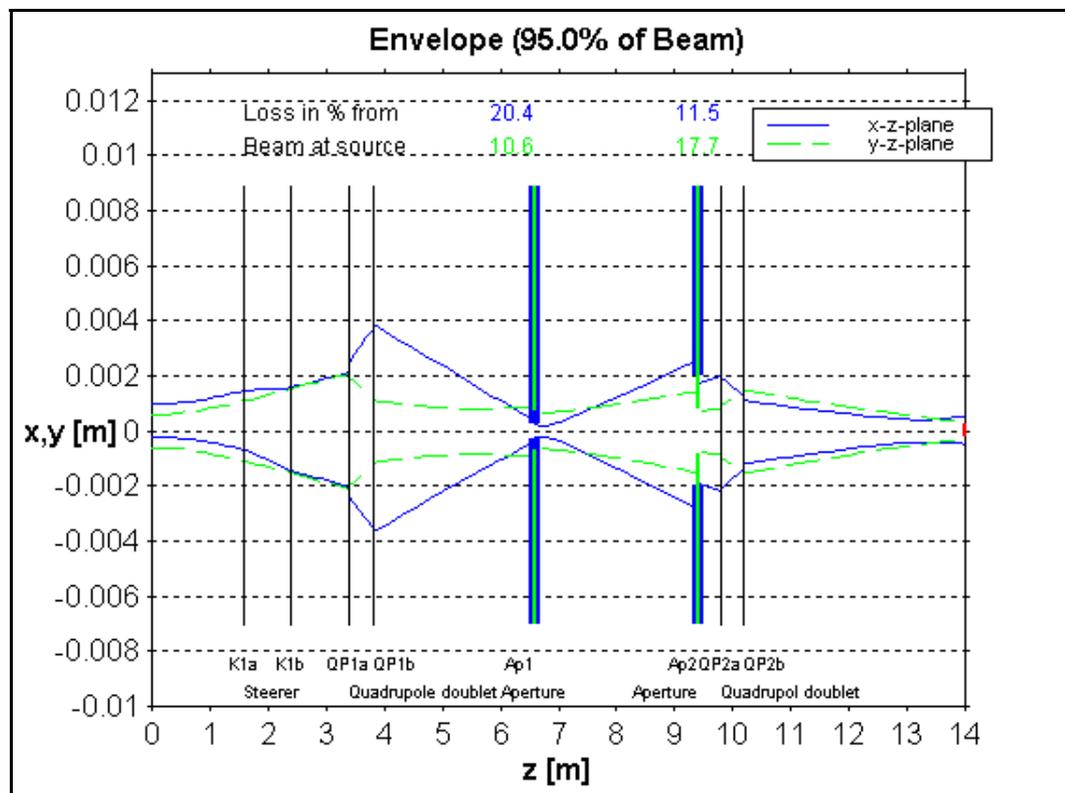


Abbildung 3.34: Enveloppe im Simulationsschritt 1500

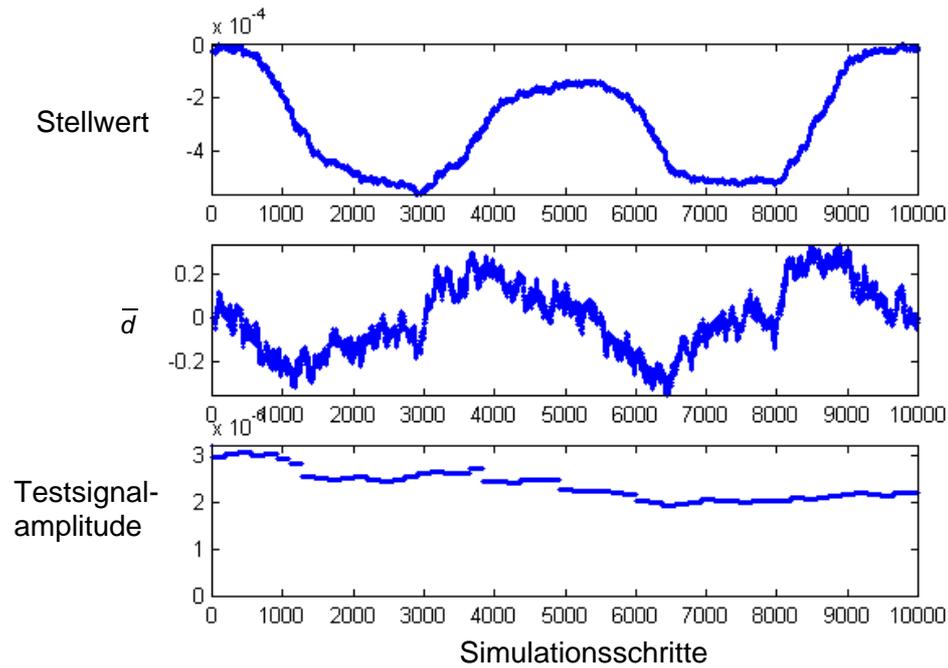


Abbildung 3.35: Verlauf der Stellgröße Lagekorrektor K1ax

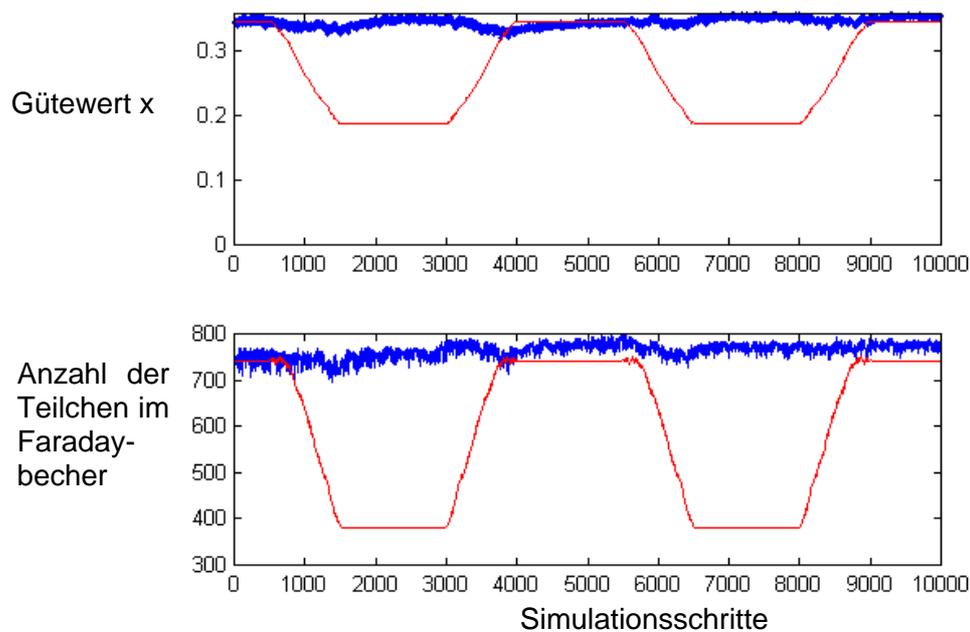


Abbildung 3.36: Verlauf des Gütwertes (oben) und der Zahl der Teilchen im Faradaybecher (unten) während der Optimierung (dick) und zum Vergleich bei deaktivierter Optimierung (dünn)

4 Experimentelle Untersuchungen an Strahlführungsanlagen

Für den Test des Extremwertregelungsverfahrens standen am Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung des Forschungszentrums Rossendorf e. V. zwei Beschleunigeranlagen und am Institut für Isotopenforschung und Kernphysik der Universität Wien eine weitere Beschleunigeranlage zur Verfügung. Im folgenden werden diese Anlagen kurz vorgestellt und die durchgeführten Experimente mit dem Extremwertregelungsverfahren beschrieben.

4.1 Experimente an der 5-MV-Tandembeschleunigeranlage

Die Tandembeschleunigeranlage ist die größte der Beschleunigeranlagen am Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung. Aus Gründen der Statik ist der Beschleunigerkessel stehend in einem turmartigen Gebäudeteil untergebracht. In diesem Turm befindet sich über dem Beschleuniger der Bereich des Injektors. Dazu gehören die Teilchenquellen und alle notwendigen Strahlführungselemente für den Einschuss der Teilchen in den Beschleuniger. Die Teilchen werden nach dem Durchlauf durch den Beschleuniger mit Hilfe eines Analysiermagneten in die horizontale Ebene umgelenkt. Gleichzeitig findet hier eine Separation nach dem Impuls der Teilchen statt. Die Umlenkung kann dabei wahlweise in zwei gegenüber liegende Richtungen erfolgen. Mit Hilfe je eines sogenannten Schaltmagneten kann der Strahl in eine der insgesamt maximal 10 Versuchsstände in zwei Experimentiersälen geleitet werden. Durch das Tandem-Prinzip des Beschleunigers ist es möglich, einfach geladene Teilchen mit einer maximalen Terminalspeisung von 4,5 MV auf 9 MeV zu beschleunigen /47/. Die Ladungen zur Erzeugung der Spannung auf dem Hochspannungsterminal werden mit Hilfe eines Van-de-Graaff-Bandgenerators auf das Hochspannungsterminal übertragen. Gesteuert wird der für die Versuche relevante Teil der Anlage mit einer Speicherprogrammierbaren Steuerung SIMATIC-S5. Als Bedienoberfläche dient das Visualisierungssystem WinCC. Beides sind Komponenten eines Automatisierungssystems der Siemens AG.

Für die Versuche mit dem Extremwertregelungsverfahren standen ursprünglich 6 Strahlführungselemente zur Verfügung (Abbildung 4.1). Diese sind

- die Beschleunigungsspannung in der Teilchenquelle (Sputterquelle),
- die elektrostatische Linse 1 unmittelbar hinter der Teilchenquelle,
- der Injektormagnet,
- die elektrostatische Linse 3 hinter dem Injektormagneten und
- die elektrostatischen Lagekorrektoren in der x-z- und y-z-Ebene vor dem Beschleunigereingang.

Entsprechend Gleichung 4.1, die den Ablenkradius in einem Dipolfeld beschreibt /50/, ist die ablenkende Wirkung auf den Teilchenstrahl im Injektormagneten gleichzeitig von der Beschleunigungsspannung in der Teilchenquelle und dem Magnetstrom und damit der magnetischen Flußdichte im Injektormagnet abhängig:

$$r = \sqrt{\frac{2mU}{ne}} B^{-1} \quad (4.1)$$

(In Gleichung 4.1 sind r der Ablenkradius, m die Teilchenmasse, n der Ladungszustand, e die Elementarladung, U die vorher vom Teilchen durchlaufene Beschleunigungsspannung und B die magnetische Flußdichte.) Es ist deshalb nicht sinnvoll, die Optimierung mit beiden Größen gleichzeitig durchzuführen. Da der Zugriff auf die Stellgröße des Injektormagneten eine verhältnismäßig große Zeit in Anspruch nimmt, wurde die Optimierung zuerst mit der Beschleunigungsspannung der Teilchenquelle durchgeführt. Es hat sich dabei jedoch herausgestellt, daß das Auflösungsvermögen dieser Größe für eine Feinjustierung zu grob ist. Aus diesem Grund wurden die Versuche auf die beiden Linsen und die Korrektoren beschränkt.

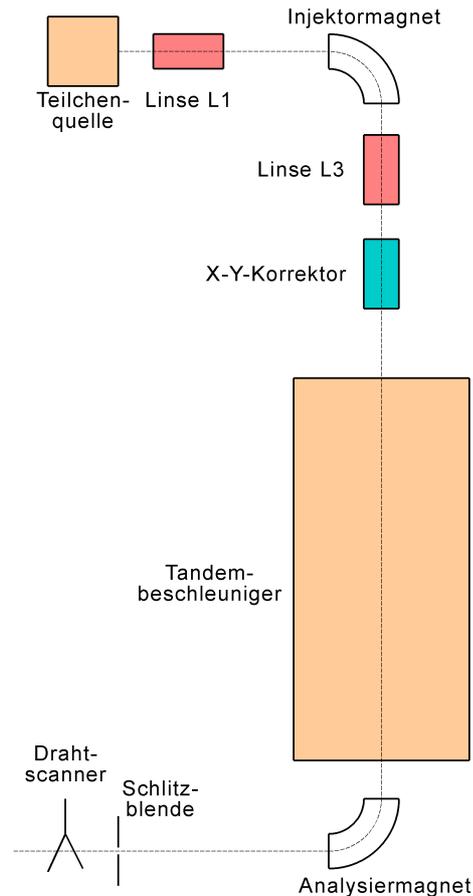


Abbildung 4.1: Die für die Experimente wichtigen Elemente des Tandembeschleunigers

Der Beschleuniger besitzt eine bestimmte Akzeptanz und kann deshalb nur den Anteil eines Strahls vollständig beschleunigen und durch den Beschleuniger führen, der am Eingang des Beschleunigers innerhalb einer bestimmten Fläche in den separierten transversalen Phasenräumen liegt. Die Aufgabe der Strahlführungsgeräte des Injektors ist es deshalb, den Strahl an diese Akzeptanz anzupassen. Der Erfolg dabei ist in Form des Strahlstromes hinter dem Beschleuniger meßbar. Obwohl auch Experimente mit einem vor dem Beschleunigereingang liegenden Faradaybecher durchgeführt wurden, sollen hier nur die Ergebnisse der Experimente vorgestellt werden, bei denen hinter dem Beschleuniger die Strahleigenschaften bestimmt wurden.

Für diese Messungen wurde eine Anordnung aus einem Schlitzsystem und einem Drahtscanner genutzt (Abbildung 4.2). Da der Drahtscanner nur für eine oszillografische

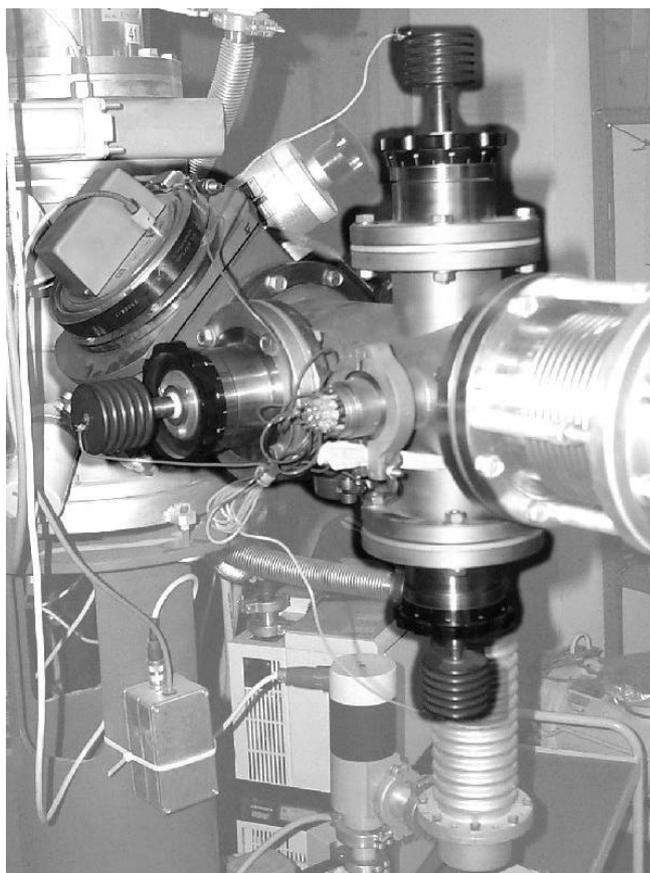


Abbildung 4.2: Kreuzschlitzsystem und Drahtscanner

Beobachtung des Strahlprofils durch den Benutzer vorgesehen ist, wurde im Zusammenhang mit dieser Arbeit eine Auswerteeinheit entwickelt, die das Ausgangssignal des Drahtscanners digitalisiert und vorverarbeitet (Abbildung 4.3). Das Gerät ist in der Lage, bis zu 4 Peaks pro Ebene gleichzeitig zu detektieren (P1). Alle Peaks werden im Maximum in eine linke und eine rechte Hälfte zerlegt. Jede dieser Hälften wird mit einer quadratische Funktion angenähert. Dadurch kommt es zu einer Datenreduktion, bei der für jeden Peak nur noch 6 Werte als

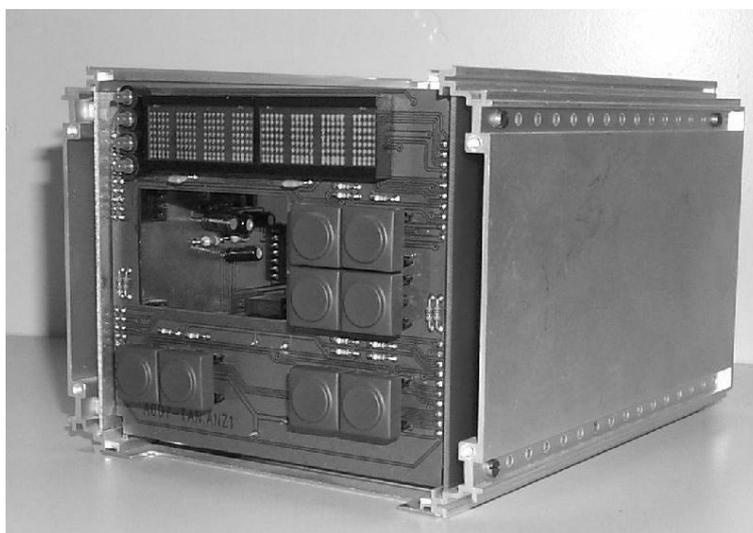


Abbildung 4.3: Auswerteeinheit für Drahtscanner

Koeffizienten der quadratischen Funktionen übertragen werden müssen. Diese wenigen Werte reichen aus, Aussagen zu Lage, Breite und Symmetrie des Teilchenstrahls zu treffen. Das Gerät verfügt über eine serielle Schnittstelle für die Übertragung der Koeffizienten. Für erste Tests mit diesem Gerät diente die Software "TestPoint" /51/ auf einem Personal Computer als Visualisierungssystem. Von diesem Rechner kann pro Ebene einer der Peaks ausgewählt werden, für den das Gerät den Gütewert für die Optimierung bestimmen soll. Dieser Gütewert wird ebenfalls über die serielle Schnittstelle übertragen und von einer zwischen diesem Gerät und dem Rechner liegenden Mikrocontrollereinheit in ein paralleles Signal umgewandelt und der SIMATIC S5 zugeführt. Das Ziel für die Anwendung dieser Auswerteeinheit für Drahtscanner soll darin bestehen, aus den ermittelten Koeffizienten einen Gütewert für einen selektierten Peak zu bestimmen, bei dem nicht nur der Maximalwert des mit dem Drahtscanner ermittelten Linienstromdichteprofiles, sondern ebenfalls die Lage und die Form im Vergleich zu einem "idealen" Strahl in die Bestimmung des Gütewertes einfließen.

Da die Entwicklung dieser Auswerteeinheit für Drahtscanner noch nicht abgeschlossen ist, wurde für die hier durchgeführten Experimente nur der maximale Strahlstrom im Profilquerschnitt als Gütekennggröße an die SIMATIC S5 weitergegeben. Im Zusammenhang mit einem eng eingestellten Schlitzsystem ist bei dieser Meßanordnung neben der maximalen Transmission durch den Beschleuniger auch eine Optimierung der Strahlage und -fokussierung am Ort des Kreuzschlitzes möglich. Da aber zum Zeitpunkt der Durchführung der Experimente noch kein Zugriff auf die Strahlführungsgeräte nach dem Beschleuniger bestand, konnte mit der Optimierung durch die Strahlführungsgeräte im Injektorbereich nur der Einschuß in den Beschleuniger beeinflusst werden.

4.1.1 Implementierung des Extremwertregelungsverfahrens

Das Extremwertregelungsverfahren wurde mit Hilfe von zwei Funktionsbausteinen (FB100 und FB101) in Form einer Anweisungsliste (AWL, vergleichbar mit Assemblercode) mit STEP 5 in die SIMATIC-Steuerung des Tandembeschleunigers (Abbildung 4.4) implementiert. Der Funktionsbaustein FB100 übernimmt das Einlesen des Gütewertes und den Aufruf der Extremwertregelung für jede einzelne Stellgröße. Diese Extremwertregelung wird dabei im Funktionsbaustein FB101 ausgeführt.



Abbildung 4.4: SIMATIC-S5-Einheit am Tandembeschleuniger

Für die Experimente an dieser Beschleunigeranlage wurde der Optimierungsalgorithmus vereinfacht, da in der CPU dieses Automatisierungssystems mathematische Funktionen nur eingeschränkt zur Verfügung stehen. Die wesentlichste Veränderung ist, daß die

Testsignalamplitudenregelung nicht implementiert ist. Statt dessen wurde die Testsignalamplitude m für jede Stellgröße an der Beschleunigeranlage per Hand eingestellt. Außerdem ist die Adaption der Arbeitsschrittweite anders ausgeführt. Die Arbeitsschrittweite wird außerdem nicht in Abhängigkeit der Testsignalamplitude bestimmt. Eine ausführliche Beschreibung des Funktionsbausteins FB101 ist in Anlage 13 zu finden. Der in dieser Steuerung realisierte Signalflußplan ist in Abbildung 4.5 dargestellt.

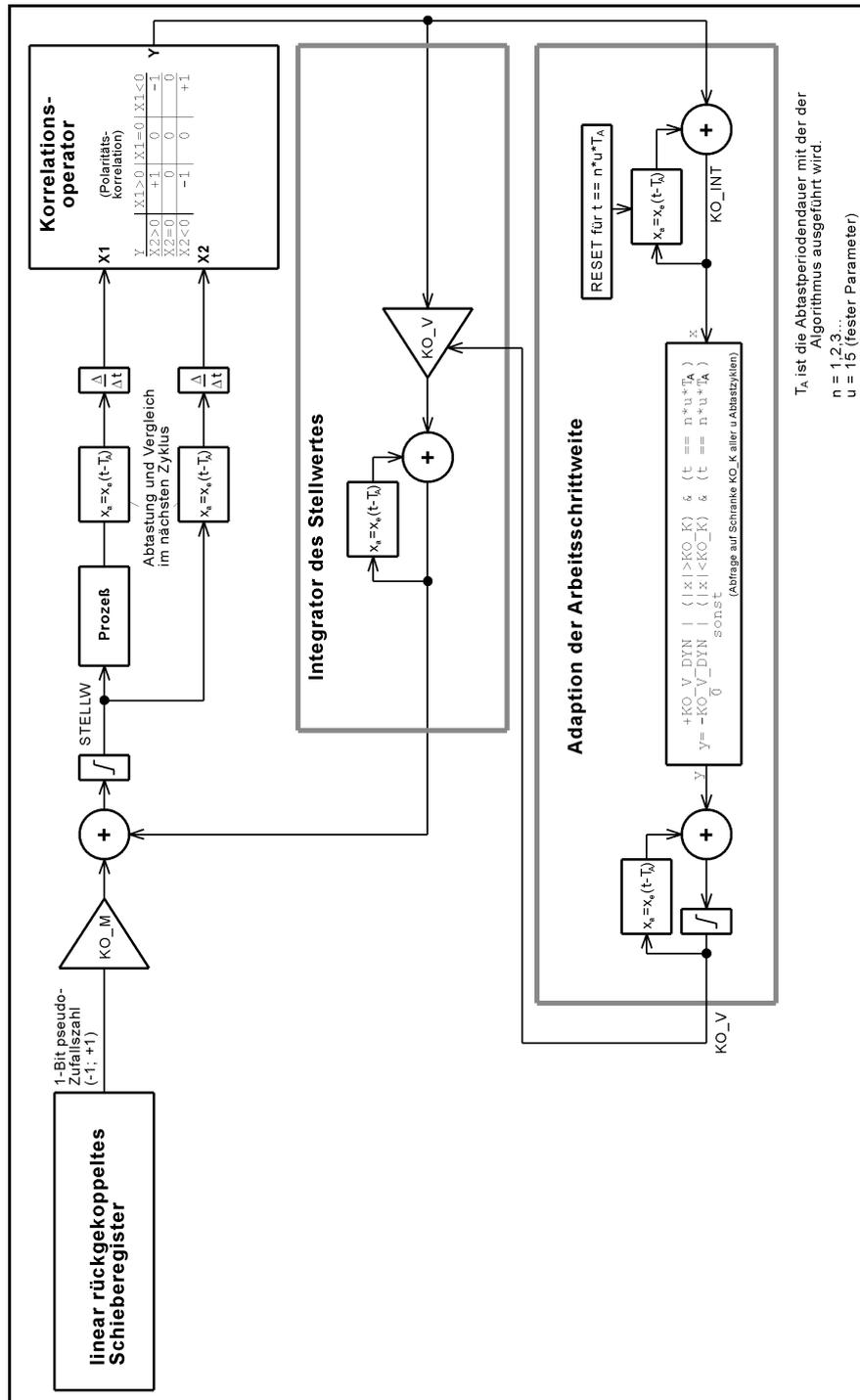


Abbildung 4.5: Signalfluß für Extremwertregelung in der SIMATIC S5

4.1.2 Versuchsauswertung

Im Gegensatz zur Simulation ist es bei den praktischen Versuchen nicht ohne weiteres möglich, das Optimierungsverhalten bei einer vorgegebenen Drift zu beobachten, da zum einen die Drift dem System nicht aufgezwungen werden kann und zum anderen natürliche Drifterscheinungen an der Teilchenquelle nicht direkt meßbar sind, um sie mit den Verläufen der Stellgrößen während der Versuchszeit zu vergleichen. Aus diesem Grund wurde hier das Optimierungsverhalten immer ausgehend von nicht optimalen Einstellungen der Stellgrößen untersucht.

Bei der ersten Versuchsreihe wurden die Stellgrößen zuerst von Hand so eingestellt, daß sich keine der vier Stellgrößen im Optimum befand. Danach wurde 300 Sekunden lang optimiert. Da die Testsignalamplitudenregelung hier nicht implementiert ist, handelt es sich in diesem Zeitraum ausschließlich um Optimierungsschritte. Die Zeit zwischen zwei Optimierungsschritten wurde für jede Stellgröße separat festgelegt (Tabelle 4.1) und ist abhängig von den Reaktionszeiten der Stellglieder.

Stellgröße	Periodendauer der Optimierungsschritte
Linse 1	650 ms
Linse 3	500 ms
X-Korrektor	400 ms
Y-Korrektor	400 ms

Tabelle 4.1: Periodendauer der Optimierungsschritte der einzelnen Stellgrößen

Die Einstellung der anderen Parameter zeigt Tabelle 4.2. KO_V_MAX und KO_V_MIN sind dabei die Begrenzungswerte der Größe KO_V und in Abbildung 4.5 nicht explizit dargestellt.

Stellgröße	KO_M	KO_K	KO_V_DYN	KO_V_MAX	KO_V_MIN
Linse 1	30	6	20	100	10
Linse 3	60	6	20	180	10
X-Korrektor	80	6	30	200	10
Y-Korrektor	80	6	30	200	10

Tabelle 4.2: Vorgegebene Parameter der Extremwertregelung

In Abbildung 4.6 ist der Verlauf des Gütewertes und der Stellwerte über den genannten Zeitraum der Optimierung dargestellt. Wie weiter oben beschrieben, ist der Gütewert der Maximalwert des Ausgangssignals eines Scannvorgangs des Drahtscanners. Da diese Größe auf keine physikalische Größe normiert ist, wird sie hier in Prozent auf den während der Optimierung erreichten Bestwert angegeben.

Die Abbildung 4.6 zeigt, daß der Extremwertregelungsvorgang mit den genannten 4 Stellgrößen etwa 125s dauert, bevor alle Stellgrößen im Optimalpunkt angelangt sind. Die Ergebnisse von zwei weiteren gleichwertigen Versuchen sind in Anlage 14 zu finden. Die Zeitdauer bis zum Erreichen des Optimums bei diesen Versuchen beträgt 100s und 80s.

Ein weiterer Versuch soll die Stabilität des Gütewertes beim Halten des Optimums über eine längere Zeit nachweisen. Dieser Versuch wurde mit Stellwerten gestartet, die nur gering neben dem Optimalpunkt lagen. Neben der kurzen Optimierungsphase zu Beginn des Versuchs wird der Gütewert sehr stabil über die gesamte Versuchszeit von 20 Minuten gehalten (Abbildung 4.7). Während dieser Zeit nahm der Gütewert geringfügig kontinuierlich ab. Zum Vergleich wurde deshalb diese Messung über weitere 20 Minuten mit abgeschalteter Extremwertregelung durchgeführt (Abbildung 4.8). Auch hier ist eine leichte Verringerung des Gütewertes erkennbar. Sie ist deshalb nicht auf den Optimierungsvorgang zurückzuführen. Dieses langsame Verringern des Gütewertes kann auf den Abbrand der Sputtersubstanz in der Quelle zurückgeführt werden und ist eine normale Erscheinung an solch einer Anlage. Die Nutzungsdauer solch einer in die Teilchenquelle eingesetzten Sputtersubstanz kann wenige Stunden bis wenige Tage sein.

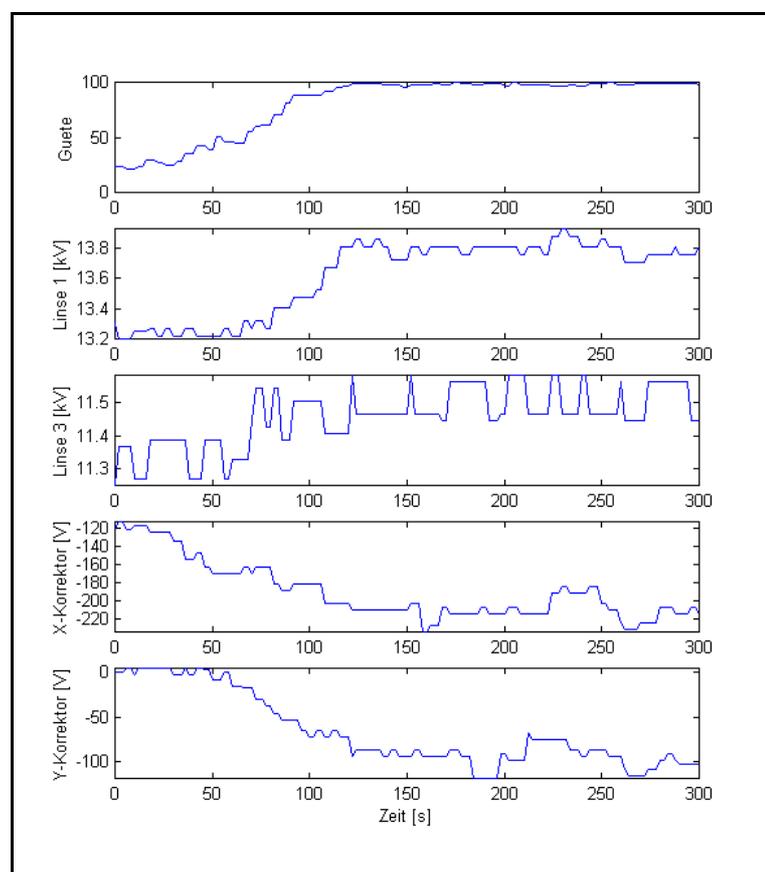


Abbildung 4.6: Extremwertregelung mit 4 Stellgrößen am Injektor des Tandembeschleunigers

Weiterhin gab es bei der Optimierung einen geringen Einbruch der Güte im Bereich von 1106 s bis 1110 s. Nach genauerer Untersuchung dieses Versuchs bezüglich der in dieser Zeitspanne gesetzten Stellwerte kann davon ausgegangen werden, daß dies nicht auf den Optimierungsvorgang zurückzuführen ist. Vermutlich lag hier eine Fluktuation in der Teilchenquelle vor.

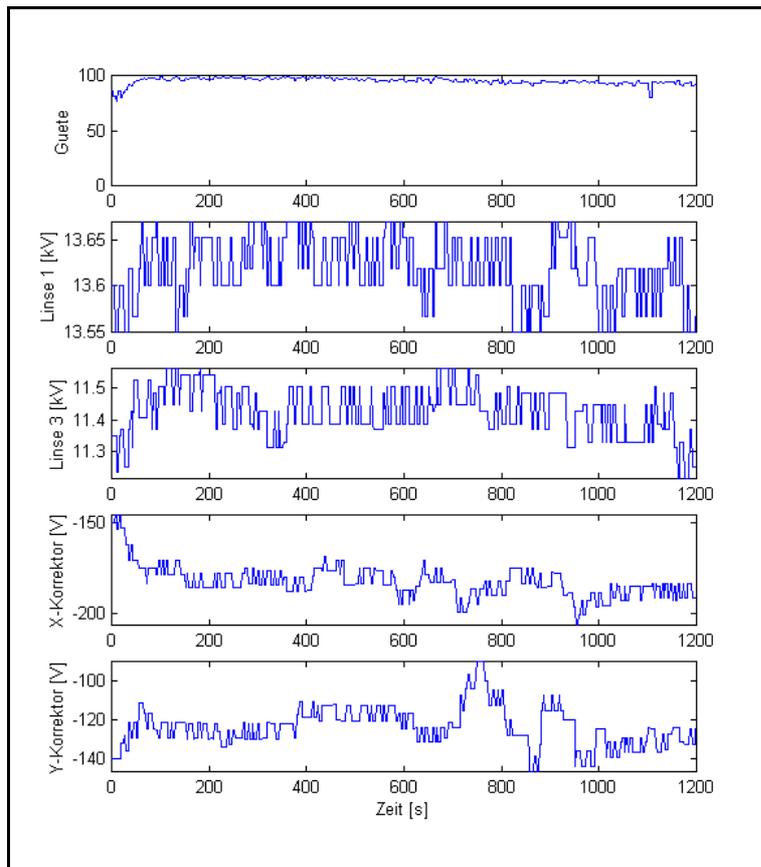


Abbildung 4.7: Versuch zum Stabilitätsverhalten des Extremwertregelungsvorgangs

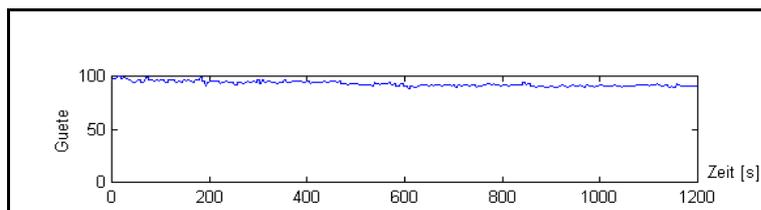


Abbildung 4.8: Gütewert bei abgeschalteter Extremwertregelung

4.2 Experimente an der Strahlkopplungsanlage des 3-MV-Tandetron-Beschleunigers und des 500-kV-Implanters

Neben der Tandembeschleunigeranlage wird auch ein 3 MV-Tandetron-Beschleuniger und ein 500 kV-Implanter vom Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung betrieben. Zur Doppelimplantation und zur in-situ-Messung bei der Implantation sind diese beiden Beschleuniger über eine sogenannte Strahlkopplungsanlage miteinander verbunden [48]. Mit dieser Strahlkopplung ist es möglich, den Ionenstrahl, der am Tandetron beschleunigt wird, in zwei Versuchsstände am Implanter zu leiten. Die Abbildung 4.9 zeigt die Komponenten dieses Anlagenteils. In dieser Abbildung sind alle die Anlagenabschnitte, die im weiteren nicht zur Optimierung benutzt werden, farblich geschwächt dargestellt.

Zur Bezeichnung der Strahlführungselemente werden die Abkürzungen nach Tabelle 4.3 benutzt. Die nachfolgende Zahlenkombination gibt in der ersten Stelle den Vakuumabschnitt an, in dem sich das jeweilige Strahlführungselement befindet. Die Zahl hinter dem Punkt gibt die fortlaufende Nummer dieses Strahlführungselementes in diesem Vakuumabschnitt an.

Strahlführungselement	Abkürzung für die Darstellung in Abbildung 4.9
Korrektor (in y -Richtung wirksam)	KY
Dipol	DP
Quadrupol	QP

Tabelle 4.3: Kurzbezeichnungen der Strahlführungselemente

Für die Experimente mit dem Extremwertregelungsalgorithmus stehen alle Strahlführungselemente beginnend mit dem Korrektor KY 1.1 und abschließend mit dem Quadrupol QP 4.2 zur Verfügung. Die Amplitude des Wobblers ist auf Null gestellt und die Neutralteilchenfalle lenkt den Strahl so ab, daß er in den Faradaybecher der nachfolgenden Strahlbeobachtung trifft. Beide Elemente haben also keine Wirkung auf den Optimierungsvorgang. In Tabelle 4.4 sind alle für die Optimierung verwendeten Strahlführungselemente aufgelistet. Insgesamt stehen 14 Stellgrößen zur Verfügung. Die Abbildung 4.10 zeigt drei ausgewählte Strahlführungselemente an dieser Anlage. Als Strahlbeobachtungsgerät wird ein Faradaybecher vor der Doppelimplantationskammer benutzt. Er liefert als Gütekennggröße für die hier durchgeführten Experimente den Stromwert des Strahls an dieser Stelle.

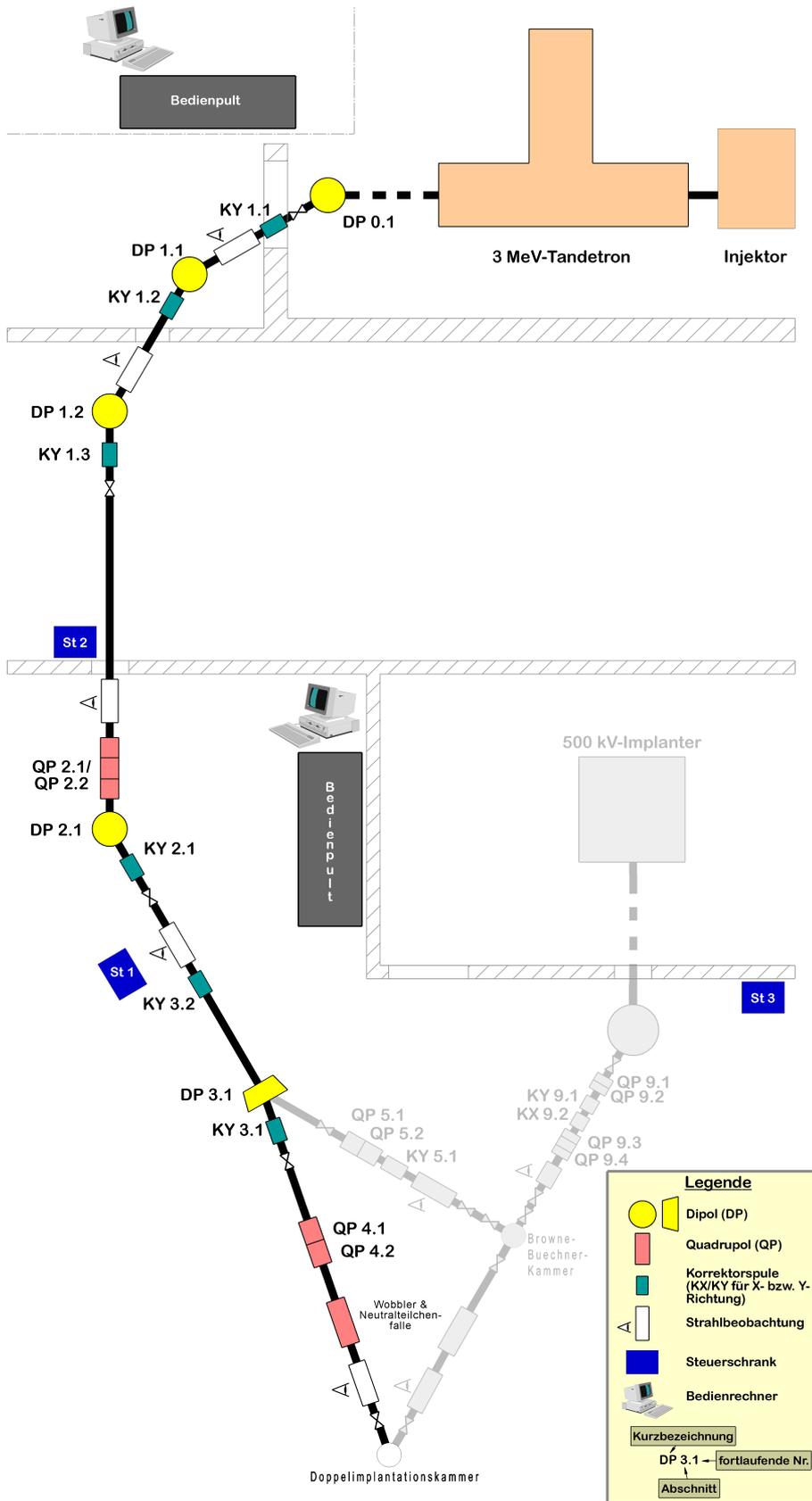


Abbildung 4.9: Strahlführungsanlage zur Strahlkopplung von 3MV-Tandetron und 500kV-Implanter

Art der Strahlführungselemente	Bezeichnung des Strahlführungselementes	Besonderheiten
Dipole	DP 1.1	
	DP 1.2	
	DP 2.1	
	DP 3.1	wird als Schaltmagnet für die beiden Experimentierplätze "Browne-Buechner-Kammer" und "Doppel-Implantations-Kammer" verwendet
Quadrupole	QP 2.1/2.2	als Quadrupol-Triplett; ein Stellwert wirkt auf die beiden äußeren Quadrupolmagnete, der andere Stellwert auf den dazwischenliegenden Quadrupolmagneten
	QP 4.1/4.2	als Quadrupol-Dublett
Korrektoren	KY 1.1	
	KY 1.2	
	KY 1.3	
	KY 2.1	
	KY 3.2	
	KY 3.1	

Tabelle 4.4: Strahlführungselemente, die zur Optimierung benutzt werden können

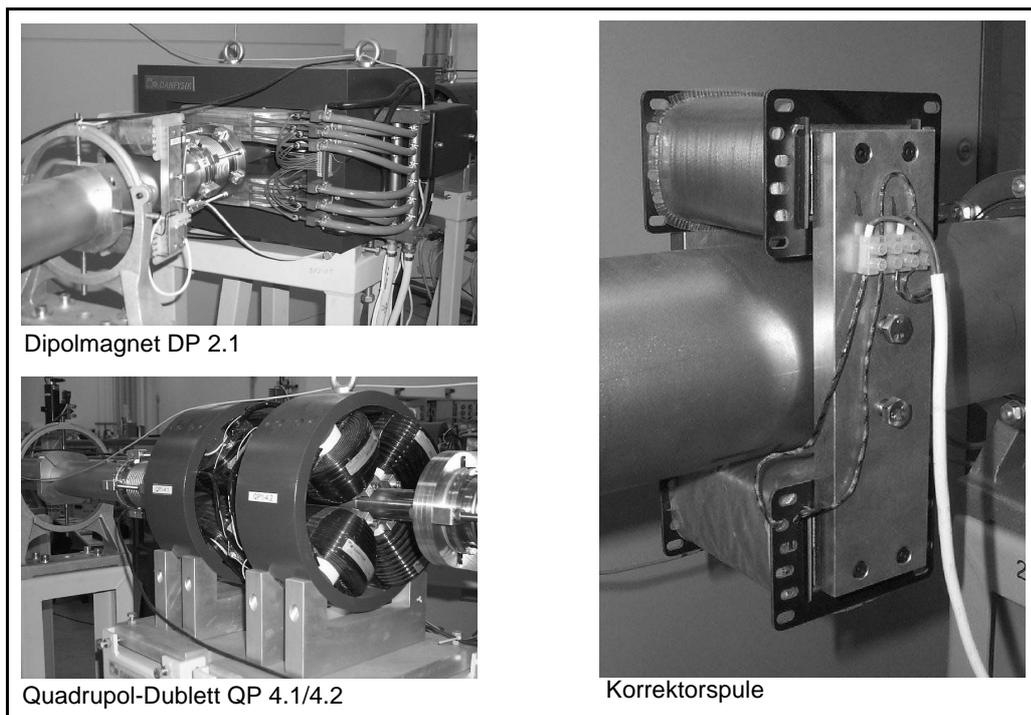


Abbildung 4.10: Strahlführungselemente an der Strahlkopplungsanlage

4.2.1 Implementierung des Extremwertregelungsverfahrens

Zur Steuerung der gesamten Strahlführung steht an dieser Anlage eine SIMATIC S7-400-Einheit zur Verfügung (Abbildung 4.11). Auch hier dient das Bedien- und Beobachtungssystem WinCC der Kommunikation mit dem Operator.

Die SIMATIC S7-400 besitzt gegenüber der am Tandembeschleuniger benutzten SIMATIC S5 eine wesentlich umfangreichere Ausstattung mit mathematischen Funktionen, insbesondere der Gleitkommaarithmetik. Aus diesem Grund war es möglich, den in Kapitel 3.4 vorgestellten Extremwertregelungsalgorithmus vollständig zu implementieren. Der einzige nennenswerte Unterschied besteht darin, daß für das Integrationsregister im Block I bei der Implementierung nicht das Register benutzt wird, das dem Operator als Stellwertregister dient. Damit ist es nicht möglich, während der Optimierung den Stellwert per Hand zu überschreiben. Für die praktischen Versuche an dieser Anlage hat dieser Sachverhalt allerdings keine weitere Bedeutung.

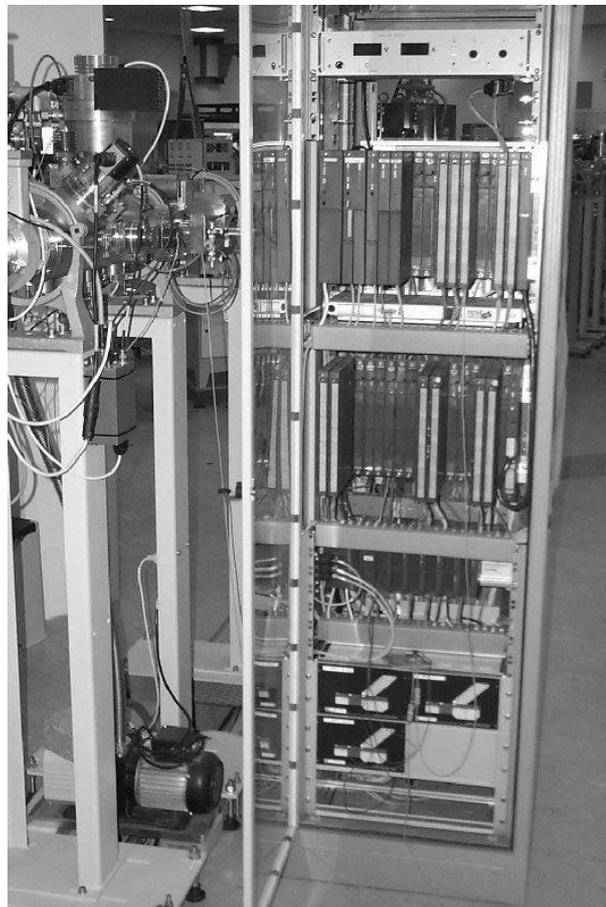


Abbildung 4.11: Steuerschrank mit SIMATIC S7-400

Der wesentlichste Funktionsbaustein für die Extremwertregelung in dieser SIMATIC-Einheit ist der FB 100. Er übernimmt die Steuerung der mehrdimensionalen Optimierung, der Testsignalamplitudenregelung und des Anfahrens von Vergleichswerten für die Experimente und ist nicht identisch mit dem Funktionsbaustein FB 100 in der SIMATIC-S5 des Tandembeschleunigers. Dieser Funktionsbaustein ruft wiederum die Funktion FC 107 auf. In dieser ist vergleichbar zur MATLAB-Funktion "optimize6" (Anlage 15) die eindimensionale

Extremwertregelung implementiert. Der Quellcode des Funktionsbausteins FB 100 und der Funktion FC 107 ist als Anlage 16 zu dieser Schrift enthalten. Zum unmittelbaren Vergleich von der MATLAB-Funktion "optimize6" und der Funktion FC 107 kann die Variablenreferenz-tabelle in Anlage 2 benutzt werden.

Mit dem Funktionsbaustein FB 100 ist folgender Ablauf der Extremwertregelung vorgegeben:

- Testsignalregelung: Es werden die Abtastpositionen y_{o-m} , y_o und y_{o+m} der einzelnen Stellgrößen jeweils 4 mal angefahren und die zugehörigen Gütewerte bestimmt. Nach einer Mittelwertbildung aus diesen jeweils 4 Gütewerten wird ein Testsignalamplitudenregelungsschritt ausgeführt. Nacheinander wird dies für alle 14 Stellgrößen in der gleichen Form abgearbeitet. Dazu sind insgesamt 182 Abtastperioden erforderlich.
- Handeinstellwerte ausgeben: Um Vergleichswerte zur Optimierung über den gesamten Zeitraum zu haben, werden nach der Testsignalamplitudenregelung zwei Abtastperioden lang sogenannte Handeinstellwerte angefahren. Diese Handeinstellwerte bilden einen Stellvektor, der vor Beginn der Optimierung festgelegt werden kann (z. B. beste Operatorenwerte). Da es hierbei zu größeren Sprüngen der Stellwerte kommen kann, wurde diese Phase auf zwei Abtastperioden ausgedehnt. Damit ist sichergestellt, daß auch solche Stellgrößen ihren eingestellten Endwert annehmen, deren Stellglieder bei größeren Stellwertänderungen dafür mehr Zeit als eine einzelne Abtastperiode benötigen.
- Optimierung: Ist die Testsignalregelung und die Einstellung der Handeinstellwerte abgeschlossen, wird mit der eigentlichen Extremwertregelung begonnen. Dazu wird zu Beginn ein Timer gestartet, der die Länge dieses Optimierungszyklus vorgibt. Ist die Zeit dieses Timers abgelaufen, wird wieder mit der Testsignalregelung begonnen.

In den nachfolgend beschriebenen Experimenten wurde die Dauer eines Optimierungszyklus auf 8 Minuten eingestellt. Die Abtastperiodendauer wurde auf 2 Sekunden gesetzt.

4.2.2 Versuchsauswertung

Aus den zahlreichen Versuchen an dieser Anlage werden im folgenden 3 Versuchsläufe wiedergegeben. Bei allen Versuchen ist entgegen der Einstellung bei der Simulation die Grenze der Arbeitsschrittweite auf $0,2*m$ und $1,5*m$ herabgesetzt (vgl. Abbildung 3.15, S. 40). Damit wurde ein stabileres Verhalten beim Halten des Optimums erreicht. Die Testsignalamplitude ist durch die den Experimenten vorangegangenen Versuche nahezu ausgeregelt.

Die Abtastperiode der Aufzeichnung von Meß- und Stellwerten verläuft nicht synchron mit der Abtastperiode der Extremwertregelung in der SIMATIC-Steuerung. Bei der Aufzeichnung wurde eine Abtastperiodendauer von einer Sekunde gewählt.

Der erste Versuch zeigt die Optimierung ausgehend vom durch den Operator gefundenen Bestwert. Im oberen Diagramm der Abbildung 4.12 ist der Verlauf des Gütewertes (hier also des Faradaybecherstroms vor der Doppelimplantationskammer) dargestellt. Mit einem Punkt ist die Vergleichsmessung mit den Startwerten, also die als Handeinstellwerte bezeichneten und vom Operator gewählten Werten, markiert. Deutlich zu unterscheiden sind in diesem Diagramm die Abschnitte der Testsignalregelung und der Optimierung. Da bei der Testsignalregelung immer nur eine Stellgröße mit ihrem Testsignal beaufschlagt wird, weist

die Güte in diesem Zeitabschnitt geringere Schwankungen auf. Diesbezüglich kann zum Vergleich das nächste Diagramm, das des Stellwertes von QP-2.1, herangezogen werden. Hier ist eindeutig der Abschnitt der Testsignalamplitudenregelung und der Optimierung zuordnenbar. Außerdem ist im Abschnitt innerhalb der Testsignalamplitudenregelung zu erkennen, wo die Abtastschritte für diese hier dargestellte Stellgröße ausgeführt werden. Am Ende der Abtastung für die Testsignalamplitudenregelung wird ein Regelungsschritt der Testsignalamplitude ausgeführt. Das Ergebnis ist ein Sprung der Testsignalamplitude im 4. Diagramm der Abbildung 4.12. Das dritte Diagramm zeigt den Integratorwert dieser Stellgröße. Dieser Wert ist gleich dem Stellwert abzüglich des Testsignals. An dieser Größe ist zu sehen, wie klein die Arbeitsschritte der Optimierung gegenüber der Testsignalamplitude (in der Darstellung des Stellwertes, zweites Diagramm) sind. Im untersten Diagramm ist die Arbeitsschrittweite dieser Stellgröße dargestellt. Sie ist nach Abbildung 3.15 eine Funktion des geglätteten Korrelationsergebnisses \bar{d} und der Testsignalamplitude m . Die drei Werte "Stellwertintegrator", "Testsignalamplitude" und "Arbeitsschrittweite" sind in der Abbildung 4.12 ohne Einheit, da durch eine Skalierung innerhalb der SIMATIC S7 der Definitionsbereich der Stellgrößen in einen internen Zahlenbereich abgebildet wird.

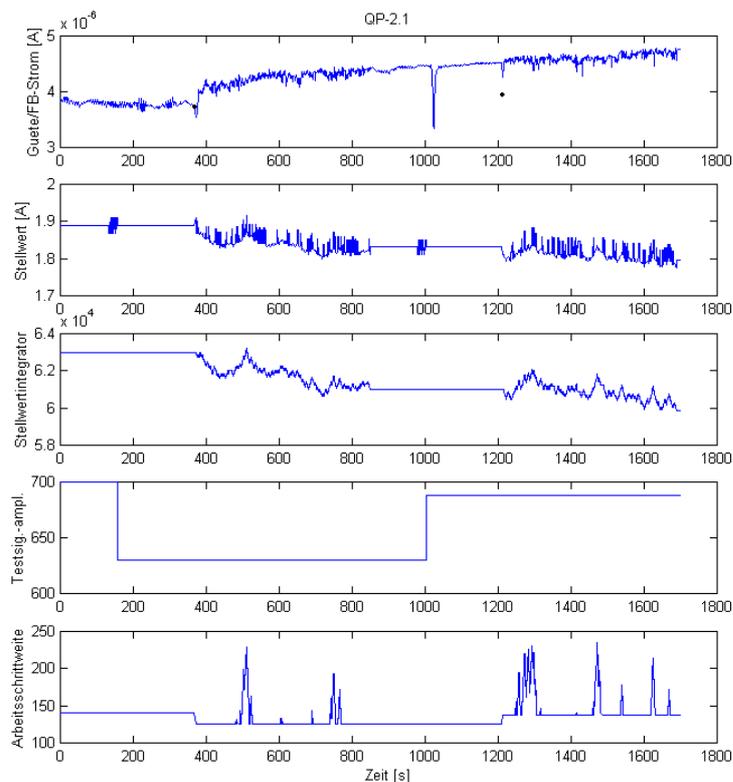


Abbildung 4.12: Gütewert und ausgewählte Werte der Stellgröße QP-2.1

Während der Versuchsdurchführung konnte ausgehend von den Operatoreinstellungen eine Verbesserung des Gütewertes auf etwa 125% gemessen werden. Allerdings ist während der Messung offenbar der Gesamtstrom schon vom Tandetronbeschleuniger aus geringfügig angestiegen, wie zum einen im Vergleichswert und zum anderen im Anstieg während der Testsignalamplitudenregelung zu sehen ist.

Der kurze Einbruch des Gütewertes nach etwas mehr als 1000 s Versuchszeit ist mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht auf die Optimierung zurückzuführen, da der Zeitabschnitt dieses

Ereignisses innerhalb der Testsignalamplitudenregelung liegt und somit nur eine einzige Stellgröße geringfügig verändert wurde.

In Anlage 17 sind zu dem hier beschriebenen Versuch die Verläufe aller 14 Stellgrößen dargestellt.

Ein zweites Experiment soll die Optimierung aus sehr schlecht gewählten Startwerten für die Stellgrößen zeigen. Dazu wurden alle Stellgrößen beginnend vom bisher gefundenen Bestwert solange um ein geringes Maß verstellt, bis der Faradaybecherstrom als Gütewert nur noch gering über dem Auflösungsvermögen des Analog-Digital-Wandlers lag. Der Fortschritt der nachfolgenden Optimierung ist in Abbildung 4.13 dargestellt. Als Vergleichswert (mit einzelnen Punkten markiert) dient nicht der Gütewert bei den vom Operator gefundenen Einstellwerten, sondern der in früheren Versuchen gefundene Stellvektor, der im Gütemaß über dem vom Operator gefundenen Optimalwert lag.

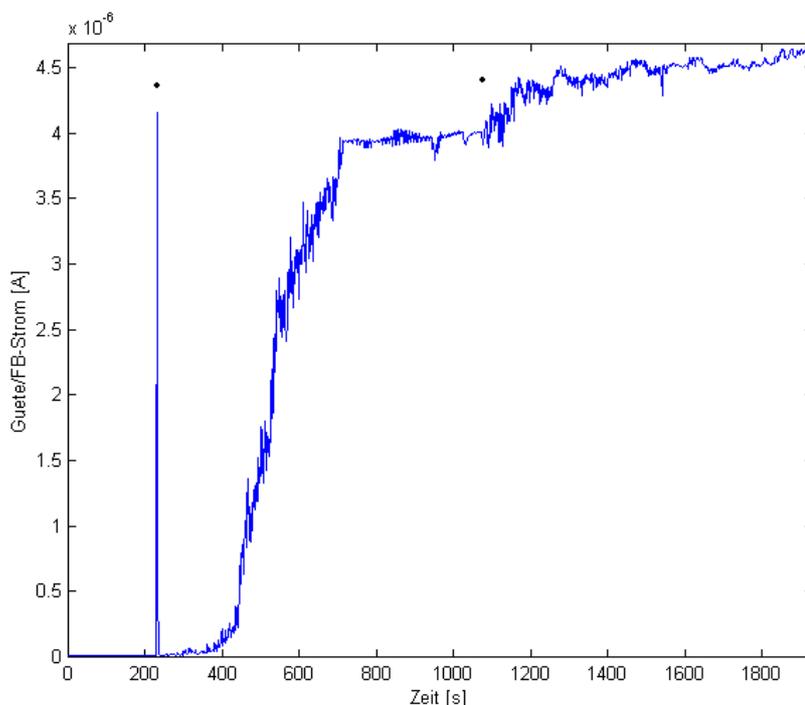


Abbildung 4.13: Gütewert (Faradaybecherstrom) bei der Optimierung von sehr ungünstigen Startwerten beginnend

Die Zeitdauer für den Optimierungsvorgang kann aus Abbildung 4.13 abgelesen werden. Sie beträgt etwa 25 Minuten. Davon entfallen 10 Minuten auf die Abschnitte der Testsignalamplitudenregelung und 15 Minuten auf die eigentliche Optimierung. Der Verlauf der Stellgrößen bei diesem Experiment ist in Anlage 18 dargestellt.

Bei den durchgeführten Versuchen konnte festgestellt werden, daß sich die Ströme des Quadrupol-Dubletts QP4.1/4.2 nicht immer auf die gleichen Werte einpegelten. Statt dessen konnten ähnlich gute Optimalwerte bei unterschiedlichen Einstellungen der beiden Quadrupolströme erreicht werden. Möglicherweise liegt der Grund in der Auflösung des Faradaybechers bezüglich der Fokussierung des Strahls durch diese beiden Linsen. Der Faradaybecher überstreicht eine wesentlich größere als die vom Strahl eingenommene Fläche. Im benutzten Einstellbereich der Stellgrößen geht damit in die Gütekennlinie nur der Randbereich des Strahls ein, der in seiner Stromdichteverteilung erheblich nichtlinear ist und möglicherweise zu

mehreren lokalen Optima führen kann. Dem kann durch den Einbau eines Faradaybechers mit kleinerer wirksamer Fläche oder eines vor dem Faradaybecher liegenden Schlitzsystems begegnet werden.

In einem dritten hier beschriebenen Experiment wird das Verhalten beim Aufrechterhalten des Optimums über einen großen Zeitraum demonstriert. Als Versuchsobjekt dient hier wiederum die Strahlführung der Strahlkopplung des Tandetronbeschleunigers mit dem Implanter des Institutes für Ionenstrahlphysik und Materialforschung im Forschungszentrum Rossendorf e.V. In Vorbereitung auf dieses Experiment wurde über einen großen Zeitabschnitt (mehr als 2,5 Stunden) optimiert. Da am Ende dieses Abschnittes über einen größeren Zeitraum keine Verbesserung der Güte beobachtet werden konnte, kann davon ausgegangen werden, daß der Optimalpunkt erreicht wurde. Im Anschluß daran wurde nun über einen weiteren großen Zeitraum die Optimierung fortgeführt. Abbildung 4.14 zeigt den dabei gemessenen Güteverlauf über der Experimentierzeit von 179 min und 25 s. Der Gütewert ist auch bei diesem Experiment der Strom im Faradaybecher am Ende des untersuchten Strahlführungsabschnittes.

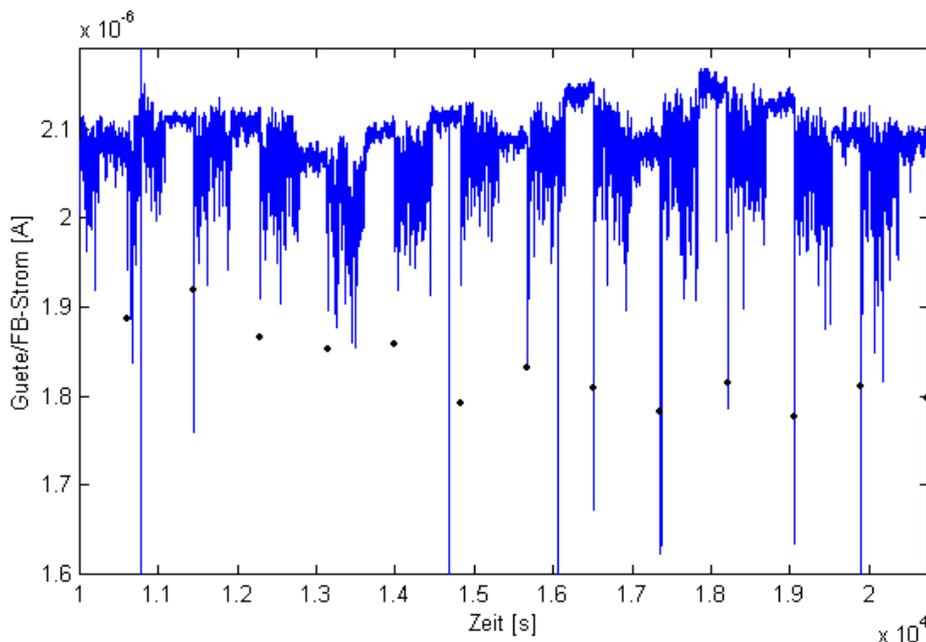


Abbildung 4.14: Güteverlauf beim Halten des Optimums im dritten Experiment

Die Vergleichswerte (punktiert dargestellt) sind die Werte, die die Güte bei einem Stellgrößenvektor hat, der dem Stellvektor beim Start der Optimierung entspricht. Diese Werte kennzeichnen also den Verlauf der Güte bei abgeschalteter Optimierung. Da in der in Abbildung 4.14 vorausgegangenem Optimierungszeit der Gütewert noch weiter verbessert werden konnte, liegt der Vergleichswert zu Beginn des Experimentes bei etwa $1,9 \mu\text{A}$ und der Gütewert der Optimierung bei etwa $2,1 \mu\text{A}$. Über den in Abbildung 4.14 dargestellten Zeitabschnitt wurde der Gütewert der Optimierung etwa auf diesem Wert gehalten. Durch Drifterscheinungen, denen wahrscheinlich der Abbrandvorgang der Sputtersubstanz in der Teilchenquelle zu Grunde liegt, sank jedoch der Vergleichswert in diesem Zeitabschnitt auf etwa $1,8 \mu\text{A}$. Diesem Absinken des Strahlstroms konnte also mit der laufenden Optimierung begegnet werden.

In Abbildung 4.14 sind mehrere nadelförmige Einbrüche der Güte zu sehen. Sie beruhen einerseits auf dem Umschaltvorgang zwischen den Stellwerten der Optimierung und den Stellwerten des regelmäßig abgetasteten Vergleichswertes. Die Änderung der Stellwerte bei

der Vergleichsmessung sind so groß, daß die Reaktion der Stellglieder darauf mehr als ein Abtastzyklus dauert. Aus diesem Grund werden vor der Auswertung des Vergleichswertes drei Abtastwerte verworfen. Nach der Ermittlung des Vergleichswertes werden jedoch alle Abtastschritte ausgewertet. Bei dem unmittelbar dem Vergleichswert folgenden Schritt kommt es deshalb zu einer stärkeren Verringerung des Gütesignals. Abbildung 4.15 zeigt dazu einen Ausschnitt aus Abbildung 4.14. Zwischen den Zeitpunkten 17361 s und 17365 s wird der Stellvektor des Vergleichswertes ausgegeben. Die Stellglieder schwingen ein und der Gütewert wird erst zum Zeitpunkt 17365 s ausgewertet. Die dazwischenliegenden Abtastzyklen wurden bei der Auswertung in Abbildung 4.14 (wie auch in den Abbildungen 4.12 und 4.13) entfernt. Nicht entfernt wurden allerdings die Abtastpunkte unmittelbar hinter der Messung des Vergleichswertes. In Abbildung 4.15 sind dies die Zeitpunkte 17366 s und 17367 s. Bei diesen Zeitpunkten schwingen die Stellglieder auf ihren neuen Wert, den der Optimierungsalgorithmus vorgibt, ein. Zu diesen Zeitpunkten kann der Gütewert kurzfristig noch schlechter als der der Vergleichsmessung sein, was die nadelförmigen Spitzen des Gütewertes in Abbildung 4.14 verursacht.

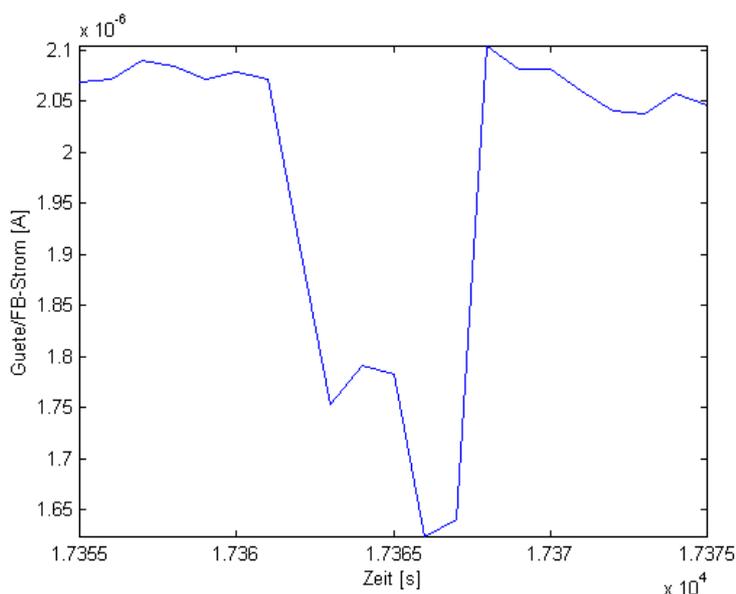


Abbildung 4.15: Abtastung des Vergleichswertes im Schritt 17365s

Eine weitere Ursache für kurzfristige Güteeinbrüche ist die Teilchenquelle. Der Sputtervorgang besitzt statistischen Charakter. Es ist deshalb immer mit plötzlichen Schwankungen des Strahlstroms und damit des Gütewertes zu rechnen. Ein Nachweis, daß diese Schwankungen nicht vom Optimierungsvorgang hervorgerufen werden, ist schwierig. Tritt solch ein Güteeinbruch allerdings im Zeitabschnitt der Testsignalamplitudenregelung auf, kann dies mit hoher Wahrscheinlichkeit auf solch einen kurzen Einbruch des Strahlstroms zurückgeführt werden, da in diesem Zeitabschnitt immer nur eine einzelne Stellgröße verändert wird und bei einer eingeschwungenen Testsignalamplitudenregelung diese Abtastschritte nur so groß sind, daß die Änderung des Gütewertes darauf in etwa dem vorgegebenen Sollwert des Suchverlustes entspricht. Abbildung 4.16 zeigt solch einen Güteeinbruch in einem Ausschnitt der Abbildung 4.14.

Vor und nach dem Einbruch des Strahlstromes zu den Zeitpunkten 14674 s und 14675 s sind die vergleichsweise geringen Schwankungen des Strahlstroms erkennbar, die auf die Testsignalamplitudenregelung zurückzuführen sind.

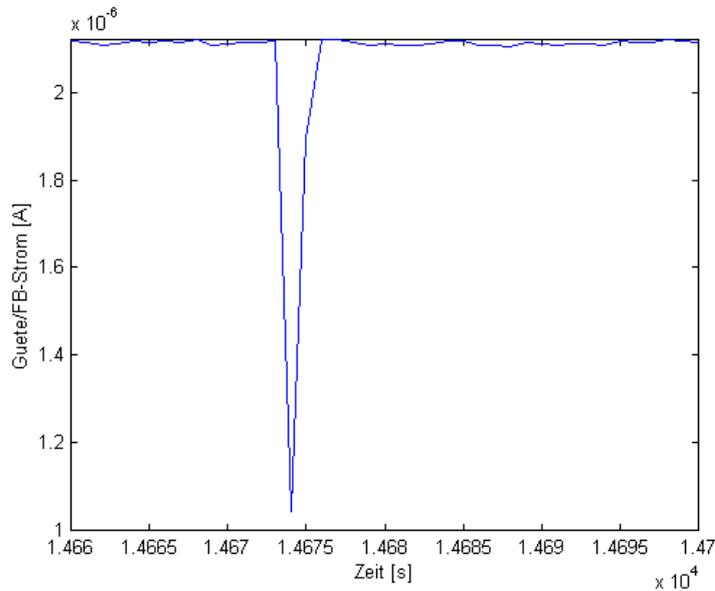


Abbildung 4.16: kurzzeitiger Einbruch des Strahlstroms während der Testsignalamplitudenregelung

Abbildung 4.17 zeigt den kurzzeitigen Einbruch des Strahlstroms während des Optimierungsvorgangs im Schritt 10767 s. Davor und dahinter sind die vergleichsweise geringen Schwankungen der Güte durch den Optimierungsvorgang zu sehen. Abbildung 4.15 hat gezeigt, daß eine Stellgrößenänderung, die für eine große Veränderung des Gütewertes verantwortlich ist, den Gütewert über mehr als ein einzelnen Schritt beeinflusst. Da in Abbildung 4.17 aber nur der Gütewert eines einzelnen Abtastpunktes sehr stark variiert, ist auch hier mit großer Wahrscheinlichkeit ein Strahlstromeinbruch in der Teilchenquelle als Ursache für das starke Abnehmen des Gütewertes anzunehmen.

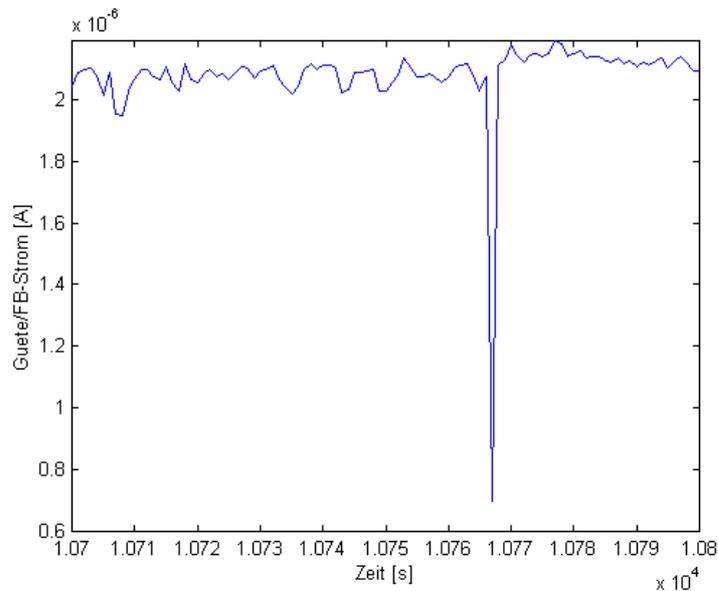


Abbildung 4.17: kurzzeitiger Einbruch des Strahlstroms während der Optimierung

4.3 Experimente an der Beschleunigeranlage VERA

Auch die Universität Wien betreibt eine Beschleunigeranlage für Ionen. Sie gehört zum Institut für Isotopenforschung und Kernphysik. Dieser Beschleuniger hat den Namen VERA (Vienna Environmental Research Accelerator). Der Anwendungsschwerpunkt liegt in der Massenspektrometrie für die Umweltforschung. Ein Überblick über diese Anlage bietet /66/. Der Beschleuniger selber ist ein 3 MV-Pelletron-Tandembeschleuniger. Für die Untersuchungen mit dem Extremwertregelungsverfahren stand der Injektor, der Beschleuniger und ein dahinter befindlicher Faradaybecher zur Verfügung (Abbildung 4.18).

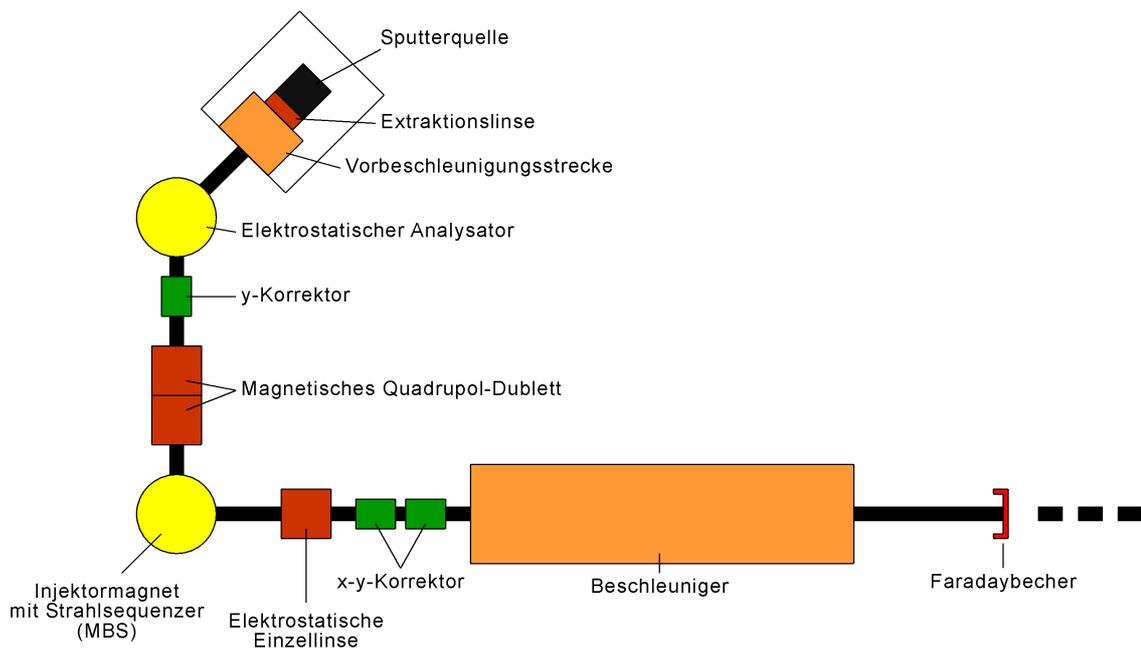


Abbildung 4.18: Anlagenteil des Beschleunigers VERA für die Optimierungsexperimente

Der verwendete Strahlführungs- und Beschleunigerabschnitt umfasst 9 verschiedene Strahlführungselemente und damit Stellgrößen für die Optimierung:

- eine Extraktionslinse in der Teilchenquelle
- einen elektrostatischen Analysator
- einen y- und einen x-y-Korrektor
- ein magnetisches Quadrupol-Dublett
- ein Strahlsequenzer (Multi Beam Sequencer, MBS) am Injektormagnet
- eine elektrostatische Einzellinse

Der Faradaybecher nach dem Beschleuniger liefert in Form des Stroms die Meßgröße, die als Gütegröße für die Optimierung verwendet wird.

4.3.1 Implementierung des Extremwertregelungsverfahrens

Die Steuerung der Ionenbeschleunigeranlage VERA erfolgt über einen Steuerrechner mit der Software AccelNET unter dem Betriebssystem LINUX. Von diesem Rechner werden teilweise direkt aber überwiegend über CAMAC-Geräte und Terminal Server die Stromversorgungsgeräte der Anlage angesteuert (Abbildung 4.19).

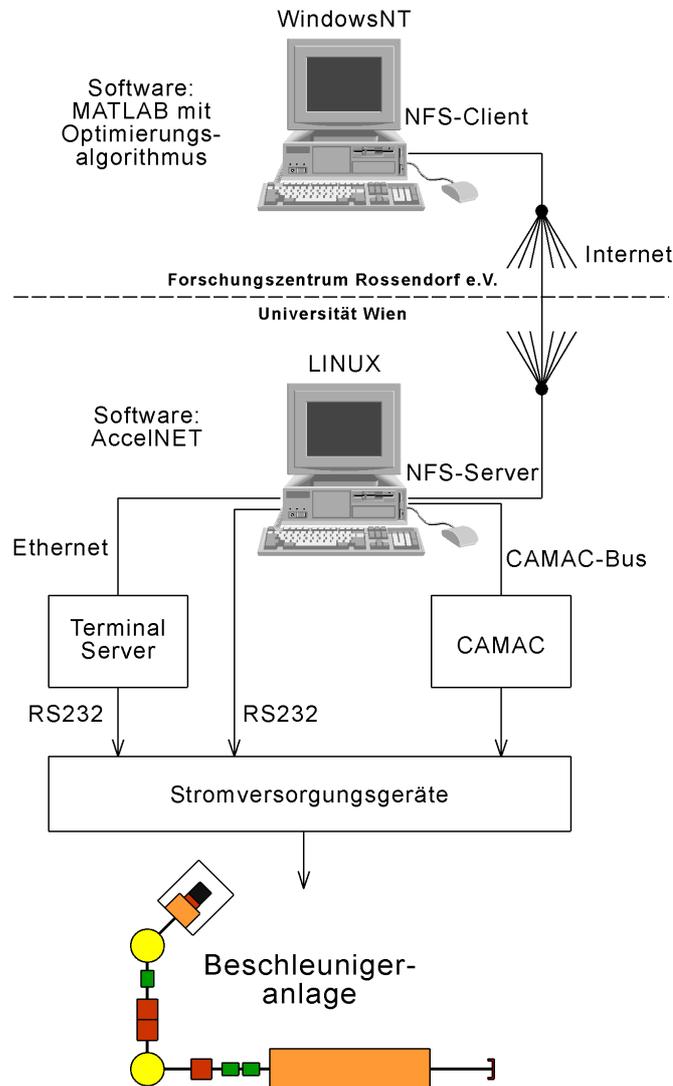


Abbildung 4.19: Steuerungssystem für die Experimente mit dem Extremwertregelungsverfahren an VERA

Bei AccelNET gibt es eine einfache Schnittstelle, bei der mittels einer C-Funktion die Stellwerte gesetzt werden können und der Faradaybecherstrom zurückgelesen werden kann. Dies erlaubt eine einfache Implementierung eines Algorithmus in dieses System. Bei den Versuchen an dieser Anlage wurde jedoch das Optimierungsverfahren nicht direkt implementiert. Statt dessen wurde die in der Simulation verwendete MATLAB-Funktion `optimize6` (Anlage 15) verwendet. MATLAB war dazu auf einem Rechner unter Windows NT im Forschungszentrum Rossendorf e.V. installiert. Die Verbindung mit dem Steuerrechner wurde über das Internet hergestellt. Der Datenaustausch während des Optimierungsvorgangs erfolgte über zwei Dateien, die auf der einen Seite von MATLAB geschrieben und ausgewertet wurden. Auf der Seite des Steuerrechners wurde zum Auslesen der Stellwerte und zum

Setzen des Gütewertes in den beiden Dateien ein kurzes Programm geschrieben, daß die oben genannte C-Funktion zur Verbindung mit dem Prozeß nutzt. Mit dieser Anordnung konnten die Experimente mit minimalem Aufwand aus der Ferne durchgeführt werden.

Zur Berechnung des neuen Stellvektors mit MATLAB und der Übertragung der Dateien über das Internet ergab sich etwa ein Zeitraum von einer Sekunde. Zwischen dem Setzen der Stellwerte und der Bestimmung des Gütewertes wurden im Steuerrechner 1,8 Sekunden benötigt. Daraus ergab sich eine Periodendauer der Optimierungsschritte von knapp drei Sekunden.

4.3.2 Versuchsauswertung

Damit die Amplituden der Testsignale auf sinnvolle Startwerte gesetzt werden konnten, wurde zuerst die Optimierung abgeschaltet, bekannte optimale Stellwerte per Hand eingestellt und daraufhin nur die Testsignalamplitudenregelung ausgeführt. Die sich daraus ergebenden Testsignalamplituden wurden für die nachfolgenden Optimierungen als Startwerte verwendet.

Das Verhältnis der Abtastschrittzahlen für die Testsignalamplitudenregelung und die eigentliche Optimierung wurde bei den Versuchen auf 90 zu 310 Schritte gesetzt. Damit ergibt sich eine Periode aus Testsignalamplitudenregelung und anschließender Optimierung von genau 400 Schritten.

Der Strahlstrom aus der Teilchenquelle war über die Versuchszeit nicht konstant. Deshalb wird in der Auswertung der Güte nicht der Faradaybecherstrom benutzt, sondern eine relative Güte zu einer Referenzgröße berechnet. Dazu wurde aller 10 Abtastschritte ein in einer vorangegangenen Optimierung ermittelter Stellvektor auf das Strahlführungssystem gegeben, der Faradaybecherstrom bestimmt und bei den nachfolgenden 10 Abtastschritten der Optimierung der Faradaybecherstrom auf diesen Referenzwert bezogen und als sogenanntes relatives Gütemaß in der Auswertung verwendet. Für die Optimierung hingegen war die Zielgröße weiterhin der Faradaybecherstrom.

Als Startwerte für die Stellgrößen der Optimierung wurden ausgehend von der vorangegangenen Optimierung die Stellwerte soweit verstellt, daß sich ein Gütewert von rund 68% des vorher ermittelten optimalen Gütewertes einstellte. Die Optimierung startete mit den 90 Schritten der Testsignalamplitudenregelung (Abbildung 4.20). In den nachfolgenden 130 Optimierungsschritten wurde das Optimum an Güte mit einer Abweichung von einem Prozent zum Referenzwert erreicht.

An dieser Anlage war bereits ein Optimierungsverfahren implementiert, welches schon in Kapitel 3.2 erwähnt wurde. Dieses Verfahren basiert auf einem bekannten und verbreiteten Verfahren nach POWELL, bei dem zur mehrdimensionalen Suche ein unterlagertes eindimensionales Suchverfahren mit Interpolation einer quadratischen Ersatzfunktion verwendet wurde. Dieses Verfahren wurde von STEIER für die Problematik an Strahlführungssystemen zugeschnitten. Insbesondere werden Störungen auf den Meßgrößen unterdrückt und die Schrittweite dem Störpegel angepaßt /18/.

Mit diesem Verfahren wurde mit den gleichen Startwerten, wie im vorangegangenen Versuch, eine Optimierung durchgeführt. Der Verlauf der relativen Güte ist ebenfalls in Abbildung 4.20 dargestellt. Im Vergleich mit dem Extremwertregelungsverfahren benötigt dieses Verfahren wesentlich mehr Schritte, um das Optimum zu finden.

Neben der Zeit, die für die Optimierung benötigt wird, ist für eine online-Optimierung der Verlauf der Güte entscheidend. Im Vergleich mit dem STEIERschen Verfahren zeigt das Extremwertregelungsverfahren ein erheblich ruhigeres Verhalten des Gütewertes. Im Optimum angelangt, schwankt der Gütewert meist mit 1% um den Referenzwert. In wenigen Fällen werden 2% Abweichung erreicht. Beim STEIERschen Verfahren sind hingegen Abweichungen von 30% keine Seltenheit.

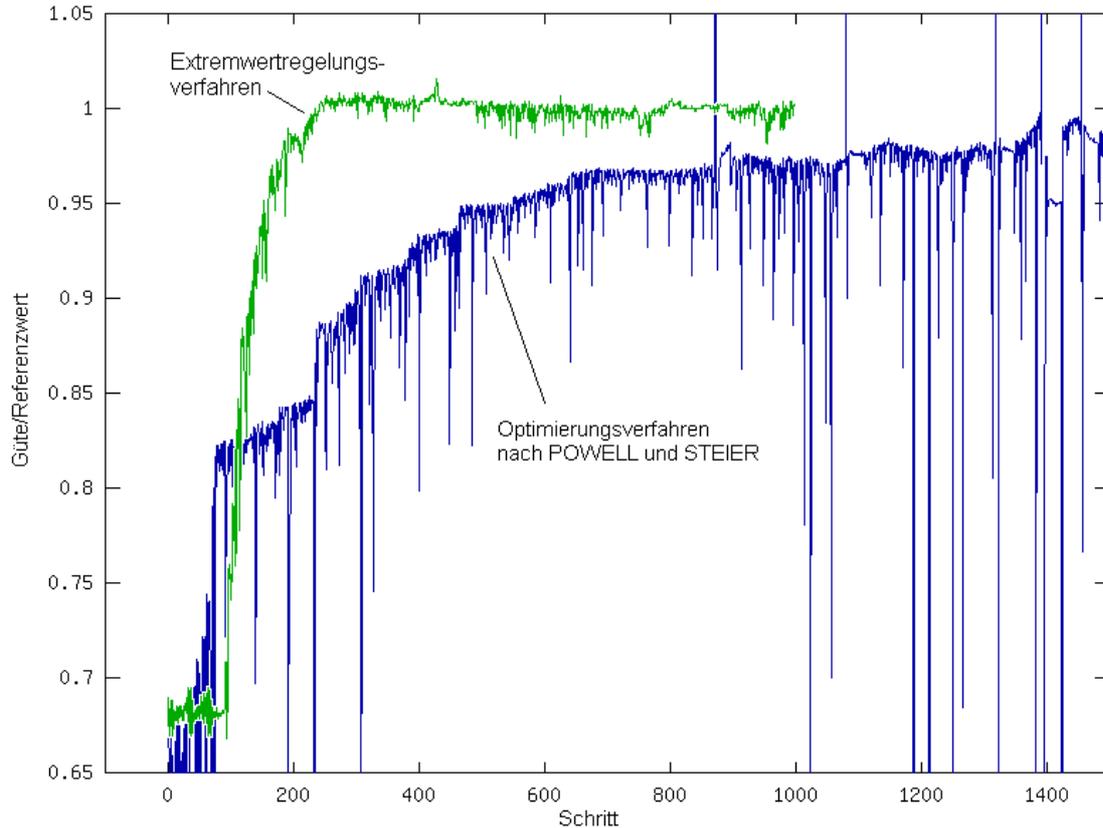


Abbildung 4.20: Verlauf des relativen Gütewertes bei der Optimierung mit dem Extremwertregelungsverfahren und zum Vergleich mit dem Verfahren nach POWELL in der von STEIER modifizierten Form

In Abbildung 4.20 treten beim Optimierungsverfahren nach POWELL und STEIER mehrere Spitzen des relativen Gütewertes auf, die deutlich über der bisher erreichten Güte liegen. Nach [18] sind dies kurzzeitige und zufällige Anhebungen des Strahlstroms aus der Teilchenquelle. Nach Säuberungen an der Teilchenquelle soll diese Erscheinung seltener auftreten.

Die an dieser Anlage und an den beiden Beschleunigeranlagen des Instituts für Ionenstrahlphysik und Materialforschung durchgeführten Experimente konnten zeigen, daß das Optimierungsverfahren bei sehr unterschiedlichen Konfigurationen von Strahlführungssystemen zuverlässig und äußerst zufriedenstellend arbeitet. Das Optimierungsverhalten läßt auch einen online-Betrieb an solchen Anlagen zu.

5 Schlußfolgerungen und Ausblick

In der simulativen Erprobung (Kapitel 3.5) wie auch in den Experimenten an den drei beschriebenen Ionenbeschleunigeranlagen (Kapitel 4) konnte die Funktionsfähigkeit des gewählten und weiterentwickelten Extremwertregelungsverfahrens für die gestellten Aufgaben nachgewiesen werden. Durch die geringen Stellwertänderungen bei der Suche nach dem Optimum ist dieses Verfahren für den online-Einsatz an solchen Strahlführungsanlagen prädestiniert.

Es wurde gezeigt, daß neben der Funktion des Haltens eines einmal gefundenen Optimalwertes auch die Funktion des Nachoptimierens von durch den Operator vorgewählten Startwerten erfüllt wird. Der bei laufender Optimierung erreichte Gütewert lag in den Experimenten im Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung über dem durch den Operator gefundenen Bestwert.

Dadurch, daß in die Implementierung und Parametrierung des Extremwertregelungsverfahrens keine Parameter der Strecke – also des Strahlführungssystems – eingehen, lassen sich Veränderungen am Aufbau des Strahlführungssystems einfach in den Ablauf der Optimierung übertragen (P4).

Das hier beschriebene mehrdimensional arbeitende Extremwertregelungsverfahren wird auf mehrere gleich arbeitende eindimensionale Extremwertregelungsverfahren zurückgeführt. Dieses Verfahren kann deshalb auch in vielen aus der Literatur bekannten mehrdimensionalen Suchverfahren eingesetzt werden, die ebenfalls auf eindimensionale Probleme zurückgeführt werden.

In den praktischen Versuchen wurden Abtastzeiten von mehreren hundert Millisekunden bis 2 Sekunden gewählt. Dies war durch die Zugriffszeiten auf die Stellgrößen begründet, die zwischen neuem Abtastschritt und Einlesen des dazugehörigen Meßwertes keine kürzeren Zeiten erlaubten. Durch die Eigenschaft des Extremwertregelungsverfahrens, bei den Abtastschritten keine genauen Absolutwerte anzufahren, sondern lediglich kleine Schritte mit einer ungefähren vorher festgelegten Amplitude (Testsignalamplitude m) auszuführen, ist es möglich, diese Zugriffszeit drastisch zu verkürzen, indem Komponenten in den Stromversorgungsgeräten der Stellgrößen umgangen werden und das Testsignal erst unmittelbar vor der Leistungsstufe eingekoppelt wird. Ein anderer Weg zur Verringerung der Abtastperiodendauer würde darin bestehen, bei mit magnetischen Feldern arbeitenden Strahlführungsgeräten das Testsignal durch zusätzliche Wicklungen in den Magneten über separate und mit hoher Dynamik arbeitende Stromversorgungsgeräte aufzuprägen. Hier dürften durchaus Abtastperioden von unter 100 Millisekunden erreichbar sein. Eine neue Begrenzung besteht dann unter Umständen in der Geschwindigkeit der Meßwerterfassung. Insbesondere Drahtcanner brauchen durch den mechanischen Bewegungsvorgang beim Abtasten eine bestimmte Zeit zur vollständigen Profilaufnahme eines Strahls. Durch solcherart Maßnahmen zur Verkürzung der Abtastperiodendauer müßte es möglich sein, die Optimierungszeit gegenüber den Versuchen um den Faktor 10 bis 20 zu verringern.

Da in der Regel das Interesse besteht, die gesamte Strahlführung eines Beschleunigers zu optimieren, müssen Meßgrößen gefunden werden, die die Strahleigenschaften am Ende dieses Strahlführungssystems erfassen. Die beste Möglichkeit wäre, unmittelbar am Target zu messen. Im einfachsten Fall kann z.B. eine Messung des Stromflusses vom Target nach Masse ausreichen. Mit der Maximierung dieser Größe wird damit ein Teilchenstrahl mit möglichst hoher Intensität als Optimierungsziel angestrebt.

Bei solchen Experimenten, wo der Strahl über eine bestimmte Fläche am Target gescaant wird, können die dort zur Messung üblichen 4 Faradaybecher in den Ecken der rechteckig bestrahlten Fläche zur Optimierung herangezogen werden. Mit dieser Anordnung ist neben der Maximierung der Stromstärke auch die Einhaltung der Symmetrie beim Bestrahlen der Fläche optimierbar. Solch eine Meßanordnung könnte z. B. bei der Doppelimplantationskammer an der Anlage zur Strahlkopplung am Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung des Forschungszentrums Rossendorf e.V. angewendet werden.

Aber auch mit dieser Meßmethode ist es nicht möglich, Strahlprofile zu bestimmen. Für diesen Zweck ist es sinnvoll, einen Strahlprofilmonitor, z. B. einen Drahtscanner, vor dem Target einzusetzen. Ein diesbezüglich verallgemeinerter Aufbau einer Strahlführungsanlage kann nach Abbildung 5.1 realisiert werden. Hier wird im Strahlführungssystem im letzten Fokus vor dem Target ein Strahlprofilmonitor angeordnet. Mit ihm wird das Stromdichteprofil an dieser Stelle gemessen und mit einem vorgegebenen Profil verglichen. Das Maß der Übereinstimmung kann nun als ein Gütekriterium zur Optimierung verwendet werden. Der Fokus wird nach dem Strahlprofilmonitor mit einer Linsenanordnung fester Brennweite im letzten Strahlführungsabschnitt auf das Target übertragen. In diesem Abschnitt können mit Hilfe von Strahlagemonitoren auch unmittelbar vor dem Target noch Korrekturen der Strahlage durchgeführt werden. Hierbei ist nicht unbedingt ein Optimierungsvorgang notwendig, da die Strahlagekorrektur mit entsprechenden Meßmitteln als Regelkreis aufgebaut werden kann.

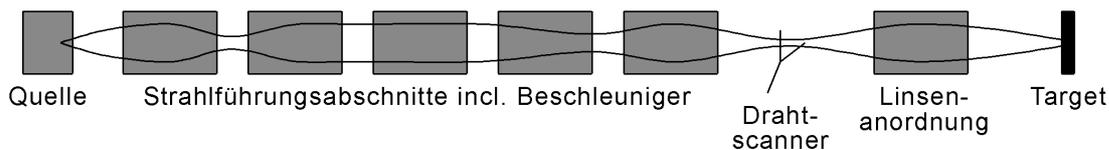


Abbildung 5.1: Anordnung eines Strahlprofilmonitors (Drahtscanner) in den letzten Fokus vor dem Target

Unter Umständen ist es nicht möglich, den Fokus für die beiden Ebenen x - z und y - z an die gleiche Stelle auf z zu legen. In diesem Fall kann die Strahlprofilmessung auch für beide Ebenen getrennt an unterschiedlichen Stellen im Strahlengang erfolgen.

Bei der Simulation wie auch bei den Versuchen an den beschriebenen Anlagen sind an bestimmten Stellen entlang der Strahlbahn Blenden angeordnet. Befindet sich der Strahl außerhalb der vorgegebenen idealen Strahlachse, führen die Abschattungen an den Blenden zu einer Verringerung der Transmission. Die Optimierung wird darauf mit der Korrektur der Strahlage reagieren. Der Grund für eine notwendige Fixierung des Strahls auf der idealen Strahlachse besteht nicht nur darin, die Wirkung der Aperturen der Strahlführungselemente und Strahlrohre auf den Strahl zu minimieren, um die Transmission zu erhöhen, sondern vor allem in der Minimierung von Abbildungsfehlern, die mit zunehmender Abweichung der Strahlage von der idealen Strahlachse in den Strahlführungselementen größer werden.

Es besteht nicht an allen Beschleunigeranlagen die Möglichkeit, für diesen Zweck Blenden in den Strahlengang anzuordnen. Dies ist insbesondere dann nicht möglich, wenn der Teilchenstrahl eine hohe Energie besitzt. Zum einen können in diesem Fall an solchen Blenden unerlaubt hohe Strahlendosen auftreten, zum anderen kann das Problem in der Abführung der Verlustleistung bestehen. In diesem Fall würde statt dessen der Einbau von Strahlage-monitoren und Strahlprofilmonitoren Abhilfe schaffen. Mit diesen Meßmitteln kann der Strahl in der Lage auf der x - y -Ebene beobachtet werden bzw. die Lage des Fokus entlang der Strahlachse z auf den Einbauort des Strahlprofilmonitors fixiert werden und damit die gleiche Wirkung wie beim Einsatz von Blenden erzielt werden.

Bei der Planung der notwendigen Diagnostik ist zu beachten, daß nicht nur in den Fokalkpunkten eine Messung der Strahlage notwendig ist, sondern auch außerhalb dieser Punkte zumindest an einigen wenigen Stellen die Bestimmung der Strahlage erforderlich ist. Es ist durchaus möglich, die Fokalkpunkte zwar auf die ideale Strahlachse zu legen, aber trotzdem eine Verschiebung in den Strahlführungselementen weg von der idealen Strahlachse zu erhalten. Abbildung 5.2 zeigt ein solches Verhalten am zur Simulation in Kapitel 3.5 verwendeten Strahlführungsabschnitt.

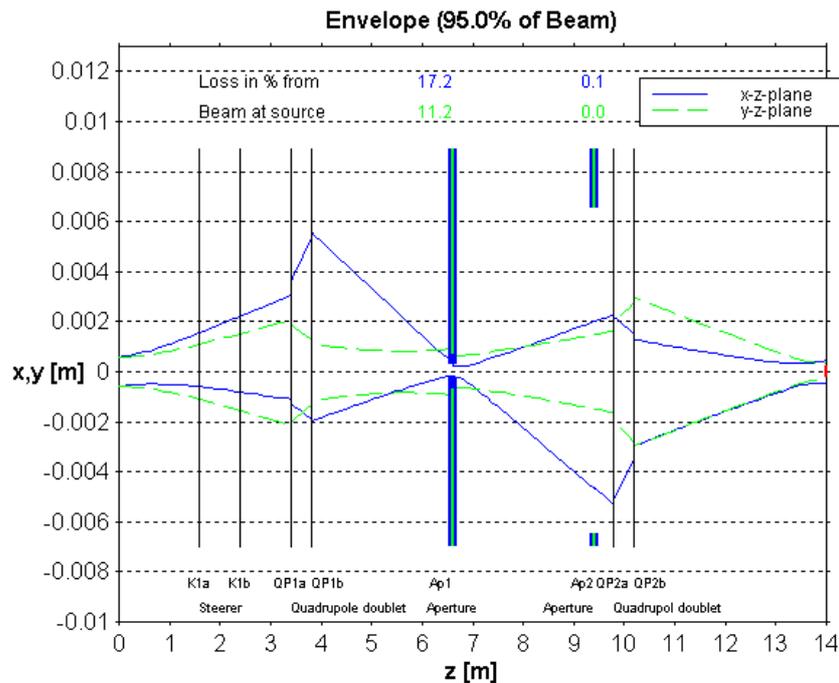


Abbildung 5.2: Simulation einer schiefen Strahlage in der X-Z-Ebene

Die Blende 2 ist bei dieser Simulation so weit offen, daß sie nahezu unwirksam ist. Ein in dieses System in die x - z -Ebene schief eingeschossener Strahl wird durch die Linsen so abgelenkt, daß er in den Fokalkpunkten wieder auf der Symmetrieachse liegt. Nur außerhalb der Fokalkpunkte ist die Schiefe des Strahls meßbar. Aus diesem Grund wurde in der Simulation die Blende 2 eingefügt. Mit dieser Blende wird zum einen die Diagnose der Schiefe möglich und zum anderen verringert sie die Transmission dieses Abschnitts in Abhängigkeit von der Schiefe, was im simulierten Faradaybecher am Ende des Strahlführungssystems meßbar ist.

Somit bleibt abschließend festzuhalten, daß mit der hier beschriebenen Extremwertregelung zur Optimierung an Strahlführungselementen zwar die Funktion des Operators bei der Fein- und Nachjustierung der Strahlführungselemente ersetzt werden kann, dafür jedoch eine Strahldiagnostik in ausreichendem Maße an der Anlage zur Verfügung stehen muß.

6 Zusammenfassung

An Anlagen zur Beschleunigung von Teilchen ist im allgemeinen ein Tuning der Strahlführungselemente nötig, um die gewünschten Strahlparameter zu erreichen. Dieses Tuning ist nicht nur in der Inbetriebnahmephase, sondern wiederholt zu erbringen. Um dies auch während der Nutzung der Anlage durch ein laufendes Experiment, also online, durchzuführen, bedarf es Optimierungsverfahren, die eine sehr geringe Einflußnahme auf die Stellgrößen des Strahlführungssystems haben.

In dieser Arbeit wird ein aus der Literatur der Regelungstechnik bekanntes Extremwertregelungsverfahren in weiterentwickelter Form für diesen Anwendungszweck vorgeschlagen. Dieses Verfahren beruht auf dem Nachweis einer Korrelation zwischen einem Testsignal und dem Gütesignal des Prozesses, solange der Arbeitspunkt bei diesem Prozeß nicht im Optimum liegt. Dieses Verfahren ist nicht nur dazu geeignet, den Optimalpunkt zu finden, sondern es hält diesen Punkt auch bei Drifterscheinungen. Durch die Nutzung der Korrelation ist es möglich, die Abtastschrittweite so klein zu halten, daß die zu detektierende Reaktion des Strahlführungssystems in der Größenordnung des Störpegels auf der Gütegröße liegt, was damit erst den online-Betrieb eines solchen Verfahrens ermöglicht.

Um die Eigenschaften des gewählten Extremwertregelungsverfahrens zu verbessern, wurden Veränderungen und Erweiterungen gegenüber dem aus der Literatur bekannten Verfahren eingebracht. Zur Korrelation werden nur die Differenzen des Gütesignals und des Testsignals benutzt. Mit dem Einsatz eines Polaritätskorrelationsoperators ergibt sich damit eine Unabhängigkeit des Korrelationsergebnisses von Absolutwerten des Test- und Gütesignals. Die sich aus dem Korrelationsergebnis durch Integration ergebende Optimierungsgeschwindigkeit wird damit unabhängig von Test- und Gütesignalamplitude.

Durch die Regelung der Testsignalamplitude nach dem Suchverlust ist es nicht nötig, sie an Hand der Gütekennlinie fest vorzugeben. Statt dessen paßt sich die Testsignalamplitude unterschiedlichen Gütekennlinien automatisch an. Weiterhin wird auch die Arbeitsschrittweite nach der geregelten Testsignalamplitude eingestellt, so daß auch sie sich der Breite des Optimalgebietes anpaßt.

Die Arbeitsschrittweite unterliegt gleichzeitig einer Adaption, durch die die Suchgeschwindigkeit bei größerer Entfernung zum Optimum steigt und im Optimum angelangt wieder sinkt. Damit kann eine hohe Stabilität im Optimalpunkt erreicht werden, ohne daß außerhalb des Optimalgebietes auf eine hohe Suchgeschwindigkeit verzichtet werden muß.

Dieses hier beschriebene Extremwertregelungsverfahren wurde mit Hilfe der Strahltransportrechnung simulativ erprobt. Durch die dabei mögliche Darstellung der Enveloppe konnte gezeigt werden, daß neben einer Maximierung des Strahlstroms in einem Meßelement am Ende einer Strahlführung auch eine Optimierung der Symmetrieeigenschaften des Strahls innerhalb der Strahlführung möglich ist. Insbesondere bei der simulierten Drift des Austrittsortes der Teilchen konnte ein sehr gutes Optimierungsverhalten festgestellt werden. Die Simulation erfolgte dabei mit 8 Stellgrößen.

Eine Erprobung des Extremwertregelungsverfahrens war an zwei Ionenbeschleunigeranlagen am Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung des Forschungszentrums Rossendorf e. V. möglich. An der Tandem-Beschleunigeranlage konnten 4 Stellgrößen des Injektors mit einer Speicherprogrammierbaren Steuerung auf diese Weise optimiert werden. Als

Meßmittel diente ein Drahtscanner hinter dem Beschleuniger. Es wurden hierbei Optimierungszeiten von unter 2 Minuten gemessen.

Bei der zweiten Anlage handelt es sich um eine Strahlkopplungsanlage für Ionen, die mit Hilfe zweier Beschleuniger erzeugt werden und gemeinsam auf ein Target treffen. An dieser Anlage stand ein längeres vollständiges Stück Strahlführung mit 14 Stellgrößen zur Verfügung. Auch an dieser Anlage konnte die Funktionsfähigkeit des Extremwertregelungsverfahrens mit Erfolg nachgewiesen werden. Die reine Optimierungszeit lag hier in der Größenordnung von 15 Minuten. Eine Nutzung dieses Verfahrens an dieser Anlage ist ohne Einschränkung auch im online-Betrieb möglich, vorausgesetzt die entsprechende Sensorik steht dann zur Verfügung.

Ein dritter Versuch wurde an der Ionenbeschleunigeranlage VERA des Institut für Isotopenforschung und Kernphysik der Universität Wien mit 9 Stellgrößen durchgeführt. Auch hier konnte die Funktionsfähigkeit für eine Nachoptimierung und eine online-Optimierung nachgewiesen werden. Insbesondere war hier ein unmittelbarer Vergleich mit einem numerischen Optimierungsverfahren möglich. Die Optimierungszeit des in dieser Arbeit beschriebenen Extremwertregelungsverfahrens war dabei erheblich geringer als die des numerischen Verfahrens.

Weiterhin wurde beschrieben, mit welchen Maßnahmen die Optimierungszeit weiter verringert werden kann. Der Vorteil des verwendeten Extremwertregelungsverfahrens besteht hierbei in der Möglichkeit, die Testsignale mit möglichst hoher Dynamik in das Strahlführungssystem einzukoppeln, ohne daß dafür hohe Genauigkeitsanforderung an den jeweiligen Absolutwert der Testsignale gestellt werden brauchen.

Für die Ausstattung eines vollständigen Beschleuniger- und Strahlführungssystems mit dem hier beschriebenen Extremwertregelungsverfahren wurde eine Lösung zur Anordnung der Sensorik in Form eines Strahlprofilmonitors im letzten Fokus der Strahlenoptik vor dem Target vorgeschlagen. Mit einer zwischen Strahlprofilmonitor und Target liegenden Linsenordnung wird dann das gemessene Strahlprofil auf das Target projiziert. Weiterhin wurde gezeigt, daß es nötig sein kann, neben dem Einsatz dieses Strahlprofilmonitors weitere Sensorik einzusetzen, um möglichst einen symmetrischen und zentrischen Verlauf des Strahls im Strahlführungssystem zu erreichen. Unter dieser Bedingung kann die Wirkung von Abbildungsfehlern strahlenoptischer Elemente erheblich verringert werden.

7 Anhang

Anlage 1: Primitive Polynome und zugehörige Maskierungswerte

Die Tabelle enthält Primitive Polynome für Schieberegister mit einer maximalen Länge von 32 Bit. Die Primitiven Polynome wurden /6/ entnommen.

Primitives Polynom	Maske des größten relevanten Bits im Schieberegister			Maske zur XOR-Verknüpfung		
	Binär	Hexadezimal	Dezimal	Binär	Hexadezimal	Dezimal
x^2+x+1	10b	2h	2			1
x^3+x+1	100b	4h	4	1b	1h	1
x^4+x+1	1000b	8h	8	1b	1h	1
x^5+x^2+1	1.0000b	10h	16	10b	2h	2
x^6+x+1	10.0000b	20h	32	1b	1h	1
x^7+x+1	100.0000b	40h	64	1b	1h	1
$x^8+x^4+x^3+x^2+1$	1000.0000b	80h	128	1110b	Eh	14
x^9+x^4+1	1.0000.0000b	100h	256	1000b	8h	8
$x^{10}+x^3+1$	10.0000.0000b	200h	512	100b	4h	4
$x^{11}+x^2+1$	100.0000.0000b	400h	1.024	10b	2h	2
$x^{12}+x^6+x^4+x+1$	1000.0000.0000b	800h	2.048	10.1001b	29h	41
$x^{13}+x^4+x^3+x+1$	1.0000.0000.0000b	1000h	4.096	1101b	Dh	13
$x^{14}+x^5+x^3+x+1$	10.0000.0000.0000b	2000h	8.192	1.0101b	15h	21
$x^{15}+x+1$	100.0000.0000.0000b	4000h	16.384	1b	1h	1
$x^{16}+x^5+x^3+x^2+1$	1000.0000.0000.0000b	8000h	32.768	1.0110b	16h	22
$x^{17}+x^3+1$	1.0000.0000.0000.0000b	1.0000h	65.536	100b	4h	4
$x^{18}+x^5+x^2+x+1$	10.0000.0000.0000.0000b	2.0000h	131.072	1.0011b	13h	19
$x^{19}+x^5+x^2+x+1$	100.0000.0000.0000.0000b	4.0000h	262.144	1.0011b	13h	19
$x^{20}+x^3+1$	1000.0000.0000.0000.0000b	8.0000h	524.288	100b	4h	4
$x^{21}+x^2+1$	1.0000.0000.0000.0000.0000b	10.0000h	1.048.576	10b	4h	2
$x^{22}+x+1$	10.0000.0000.0000.0000.0000b	20.0000h	2.097.152	1b	1h	1
$x^{23}+x^5+1$	100.0000.0000.0000.0000.0000b	40.0000h	4.194.304	1.0000b	10h	16
$x^{24}+x^4+x^3+x+1$	1000.0000.0000.0000.0000.0000b	80.0000h	8.388.608	1101b	Dh	13
$x^{25}+x^3+1$	1.0000.0000.0000.0000.0000.0000b	100.0000h	16.777.216	100b	4h	4
$x^{26}+x^6+x^2+x+1$	10.0000.0000.0000.0000.0000.0000b	200.0000h	33.554.432	10.0011b	23h	35
$x^{27}+x^5+x^2+x+1$	100.0000.0000.0000.0000.0000.0000b	400.0000h	67.108.864	1.0011b	13h	19
$x^{28}+x^3+1$	1000.0000.0000.0000.0000.0000.0000b	800.0000h	134.217.728	100b	4h	4
$x^{29}+x^2+1$	1.0000.0000.0000.0000.0000.0000.0000b	1000.0000h	268.435.456	10b	2h	2
$x^{30}+x^6+x^4+x+1$	10.0000.0000.0000.0000.0000.0000.0000b	2000.0000h	536.870.912	10.1001b	29h	41
$x^{31}+x^3+1$	100.0000.0000.0000.0000.0000.0000.0000b	4000.0000h	1.073.741.824	100b	4h	4
$x^{32}+x^7+x^5+x^3+x^2+x+1$	1000.0000.0000.0000.0000.0000.0000.0000b	8000.0000h	2.147.483.648	101.0111b	57h	87

Anlage 2: Korrespondierende Variablen zwischen MATLAB und S7-Programm

Das Programm zur Extremwertregelung in der S7-SIMATIC der Strahlkopplungsanlage (FC107) entspricht in wesentlichen Punkten dem Simulationsprogramm von MATLAB. Die Variablenbezeichnungen konnten dabei nicht beibehalten werden. In der folgenden Übersicht sind die Variablen gleicher Funktion gegenübergestellt. Zusätzlich sind die Variablentypen und der Speicherort im Datenbaustein angegeben. Einzelne Variablen im SIMATIC-Programm sind durch Funktionserweiterungen gegenüber dem Simulationsprogramm hinzugekommen. Für sie gibt es im MATLAB-File keine Referenz.

Variablen, die in den Datenbausteinen der Stellgrößen stehen:

<u>MATLAB-Variable</u>	<u>SIMATIC-Variable</u>	<u>Adresse im Datenbaustein</u>	<u>Datentyp</u>
[keine Refernz]	EIN_AUS	0.0	BOOL
[keine Refernz]	TESTSIG_REG_EIN	0.1	BOOL
[keine Refernz]	INT_ADT	0.2	BOOL
S.initF	INIT_F	0.3	BOOL
S.lfdNr	SCHRITT_NR	2.0	DWORD
S.y_1	MESSW_m1	6.0	REAL
S.x_1	STELLW_m1	10.0	REAL
S.y_m1	Y_m1	14.0	REAL
S.y_0	Y_0	18.0	REAL
S.y_p1	Y_p1	22.0	REAL
S.Testschritt	TESTSCHRITT	26.0	WORD
F	FILTER_ZK_MESSW	28.0	WORD
A	VERLUSTSOLLWERT (statt in Prozent als Teil von 1)	30.0	REAL
S.Kleinsignalverstaerkung	V_KLEINSIGNAL	34.0	REAL
S.m	TESTSIGN_AMPL	38.0	DWORD
S.mU	TESTSIGN_AMPL_UGR	42.0	DWORD
[keine Refernz]	TESTSIGN_AMPL_OGR	46.0	DWORD
S.RZ	TSRZ	50.0	REAL
S.v	INT_FAK	54.0	REAL
S.v0	INT_FAK_OGR	58.0	REAL
S.vU	INT_FAK_UGR	62.0	REAL
[keine Referenz]	STELLW_OGR	66.0	DINT
[keine Refernz]	STELLW_UGR	70.0	DINT
S.SR	SR	74.0	DWORD
S.maxmask	MAX_MASK	78.0	DWORD
S.xormask	XOR_MASK	82.0	DWORD
[keine Refernz]	ADT_ZK	86.0	REAL
S.kormm	ADT_MITTELWERT	90.0	REAL
[keine Refernz]	TS_ALT	94.0	INT

<u>MATLAB-Variable</u>	<u>SIMATIC-Variable</u>	<u>Adresse</u> <u>im</u> <u>Datenbaustein</u>	<u>Datentyp</u>	
[keine Referenz]	WAIT_TIME	98.0	S5TIME Byte)	(2
i	INTEGRATOR	100.0	REAL	
S.lg	LG	104.0	INT	
S.zReg_m1	ZM1	106.0	REAL	
S.zReg_0	Z0	110.0	REAL	
S.zReg_p1	ZP1	114.0	REAL	

Variablen, die als temporäre Variablen oder als Aktualoperanden im SIMATIC-Programm benutzt werden:

<u>MATLAB-Variable</u>	<u>SIMATIC-Variable</u>	<u>Datentyp</u>
y	MESSWERT	REAL
S.dy	D_MESS	REAL
S.dx	D_STELLW	REAL
S.Verlust	VERLUST	REAL
S.eVerlust	E_VERLUST	REAL
S.korr	KORR	INT
x	STELLWERT_t	DINT
OF	O_F	WORD
[keine Referenz]	Y_max	REAL
[keine Referenz]	Y_min	REAL
ra	RA	REAL
raGr	RA_GR	REAL
S.xt1	ADT_OUT	REAL
S.bit	ZFS	BOOL

Anlage 3: Algorithmus des Testsignalgenerators

Wenn dieser Algorithmus rechentechnisch ausgeführt wird, sind zwei Informationen notwendig. Die erste ist die Anzahl der benutzten Bits (als Maske "maxmask"), also die Länge des Schieberegisters "sr", und die zweite ist eine Maske die angibt, für welche Bitpositionen die XOR-Verknüpfung auszuführen ist ("xormask"). Bei der Initialisierung muß mindestens ein Bit im benutzten Registerbereich gesetzt werden. Das Ergebnis des Pseudozufallsgenerators ist +1 oder -1. Die Belegung der Masken maxmask und xormask kann für unterschiedliche Registerlängen der Anlage 1 entnommen werden. Damit die mit diesem Algorithmus gebildeten Zufallssignale unkorreliert sind, wird für jede Stellgröße eine andere Länge des Schieberegisters gewählt. (Im folgenden MATLAB-Code werden alle Kommentare mit dem Prozentzeichen eingeleitet.)

```
% Maske für alle relevanten Bits im Register bilden
srmask = bitor(maskmask, maxmask-1);

% Wenn in höchster Position das Bit gesetzt ist,
if (bitand(sr, maxmask)
    % dann XOR-Operation ausführen
    sr = bitxor(sr, maxmask);
    % Schieberegister 1* hochschieben
    sr = bitshift(sr, 1);
    % niederwertigstes Bit setzen und
    % alle übergelaufenen Bits löschen
    sr = bitand(bitset(sr, 1), srmask);
    % Ausgang setzen
    b = 1;

% Wenn in höchster Position das Bit nicht gesetzt ist
else
    % , dann Schieberegister nur 1* hochschieben
    sr = bitshift(sr, 1);
    % Ausgang rücksetzen
    b = -1;
end
```

Anlage 4: Erzeugung der Teilchenmatrix; MATLAB-Funktion "quelle"

```

function T = quelle(x,sigma_x,dx,sigma_dx,y,sigma_y,dy,sigma_dy,Teilchenzahl)
% T = quelle(x,sigma_x,dx,sigma_dx,y,sigma_y,dy,sigma_dy,Teilchenzahl)
% Teilchenquelle für Strahlführungsberechnungen 1. Ordnung in 2 Ebenen
%
% Die Anzahl der Teilchenvektoren muß in "Teilchenzahl" stehen.
%
% Folgende Annahmen gelten hier für die Extraktion:
%
% - Die Teilchen treten aus Orten x aus, die GAUSS-verteilt um
%   den Ort "x_Quelle" liegen (entspr.  $\mu$ ). Das Sigma hierfür
%   ist der Wert "sigma_x_Quelle". Das gleiche gilt für die
%   y-Richtung.
%
% - Die Teilchen treten in verschiedenen Richtungen aus den
%   Austrittspunkten. Diese Richtungen können maximal einen Winkel
%   +/- 90° annehmen. Der Austrittswinkel wird in Form der Bewegungs-
%   richtung dx/dz angegeben. Auch hier wird von einer GAUSS-
%   verteilten Funktion ausgegangen. Der am häufigsten auftretende
%   Winkel (entspr.  $\mu$ ) ist der Parameter "dx_Quelle". Der Wert
%   Sigma für diese Verteilung muß in der Variablen "sigma_dx_Quelle"
%   eingetragen sein. Das gleiche gilt für die y-Richtung.
%
% Der Teilchenvektor hat die Form:
%
%      T =      [x1   x2   x3   ...;
%                dx1  dx2  dx3  ...;
%                y1   y2   y3   ...;
%                dy1  dy2  dy3  ...]
%
% Generieren der Teilchen
T = [normrnd(x, sigma_x, 1, Teilchenzahl); ...
     normrnd(dx, sigma_dx, 1, Teilchenzahl); ...
     normrnd(y, sigma_y, 1, Teilchenzahl); ...
     normrnd(dy, sigma_dy, 1, Teilchenzahl)];

```

Anlage 5: Simulation eines Korrektorelementes; MATLAB-Funktion "wkorrr"

```
function Tw = wkorrr(T,dx,dy)
% Tw = wkorrr(T,dx,dy)
% gibt die Teilchenmatrix T nach Durchlaufen eines
% Winkellkorrektors mit der Ablenkung dx/dz und dy/dz zurück.
Tw = [T(1,:); T(2,:)+dx; T(3,:); T(4,:)+dy];
```

Anlage 6: Simulation eines Quadrupolmagneten; MATLAB-Funktion "quadrupol"

```

function L = quadrupol(k,l)
% L = quadrupol(k,l);
% Gibt die 4x4 Transportmatrix für ein Quadrupol-Singlett
% mit der Quadrupolstärke k und der effektiven Länge l
% zurück. Die Linse ist bei positivem k in der Richtung
% fokussierend, die beim Teilchenvektor durch die ersten
% beiden Elemente beschrieben wird.

% Bestimmung von Zwischenwerten
if k~=0
    wk = sqrt(abs(k)); % Wurzel aus |k|
    wk_r = 1/wk; % 1/(Wurzel aus |k|)
    o = wk*l; % Omega
    cos_o = cos(o);
    sin_o = sin(o);
    cosh_o = cosh(o);
    sinh_o = sinh(o);
end

if k<0
    L = [cos_o      wk_r*sin_o      0      0;...
        -wk*sin_o   cos_o          0      0;...
         0          0              cosh_o  wk_r*sinh_o;...
         0          0              wk*sinh_o cosh_o];
else if k>0
    L = [cosh_o     wk_r*sinh_o     0      0;...
        wk*sinh_o   cosh_o          0      0;...
         0          0              cos_o   wk_r*sin_o;...
         0          0              -wk*sin_o cos_o];
else
    L = [1      0      0      0;...
         0      1      0      0;...
         0      0      1      0;...
         0      0      0      1];
end
end

```

Anlage 7: Simulation einer Blende, MATLAB-Funktion "aperture"

```

function [T_in, outx1, outx2, outy1, outy2] = aperture(T,B)
% [T_in, outx1, outx2, outy1, outy2] = aperture(T,[x1 x2 y1 y2])
% Sortiert aus der Teilchenmatrix T die Teilchen heraus, die die
% Blende passieren (T_in). x1, x2, y1 und y2 sind die Orte der
% Blendenkanten. Dabei muß gelten: x1 < x2 und y1 < y2
% Alle Teilchenvektoren, deren Teilchen sich im Spalt zwischen
% x1 und x2 und gleichzeitig im Spalt zwischen y1 und y2 befinden, werden
% der Matrix T_in zugeordnet. Alle Teilchen, die auf die Blenden
% treffen, werden gezählt und die Summe in outx1 ... outy2 abgelegt.
% Teilchen mit genau der Position x1, x2, y1, y2 werden der
% Matrix T_in zugeordnet.

if B(1) > B(2)
    error('Bedingung x1 < x2 nicht eingehalten. Weiter Informationen mit help
aperture.');
```

```

end
if B(3) > B(4)
    error('Bedingung y1 < y2 nicht eingehalten. Weiter Informationen mit help
aperture.');
```

```

end
if length(B) ~= 4
    error('Anzahl Blendenparameter ungleich 4 ([x1 x2 y1 y2]). Weiter
Informationen mit help aperture.');
```

```

end

% Blendensegment x < x1
l1 = length(T);
T_in = T(:,find(T(1,:)>=B(1))); % Alle Teilchen aus T größer gleich x1
l2 = length(T_in);
outx1 = l1 - l2; % Alle Teilchen aus T kleiner x1

% Blendensegment x > x2
T_in = T_in(:,find(T_in(1,:)<=B(2))); % von den verbleibenden Teilchen alle
kleiner gleich x2
l1 = length(T_in);
outx2 = l2 - l1; % von den verbleibenden Teilchen alle größer x2

% Blendensegment y < y1
T_in = T_in(:,find(T_in(3,:)>=B(3))); % von den verbleibenden Teilchen alle
größer gleich x1
l2 = length(T_in);
outy1 = l1 - l2; % von den verbleibenden Teilchen alle kleiner x1

% Blendensegment y > y2
T_in = T_in(:,find(T_in(3,:)<=B(4))); % von den verbleibenden Teilchen
alle kleiner gleich x2
l1 = length(T_in);
outy2 = l2 - l1; % von den verbleibenden Teilchen alle Teilchen größer x2

```

Anlage 8: Simulation eines Faradaybechers; MATLAB-Funktion "cup"

```
function n = cup(T,d)
% n = cup(T,d)
% Gibt die Anzahl der Teilchen der Teilchenmatrix T
% zurück, die im Bereich des Faraday-Cup des Durchmessers
% d liegen. Der Faraday-Cup ist symmetrisch auf der
% z-Achse bei x=0 und y=0.

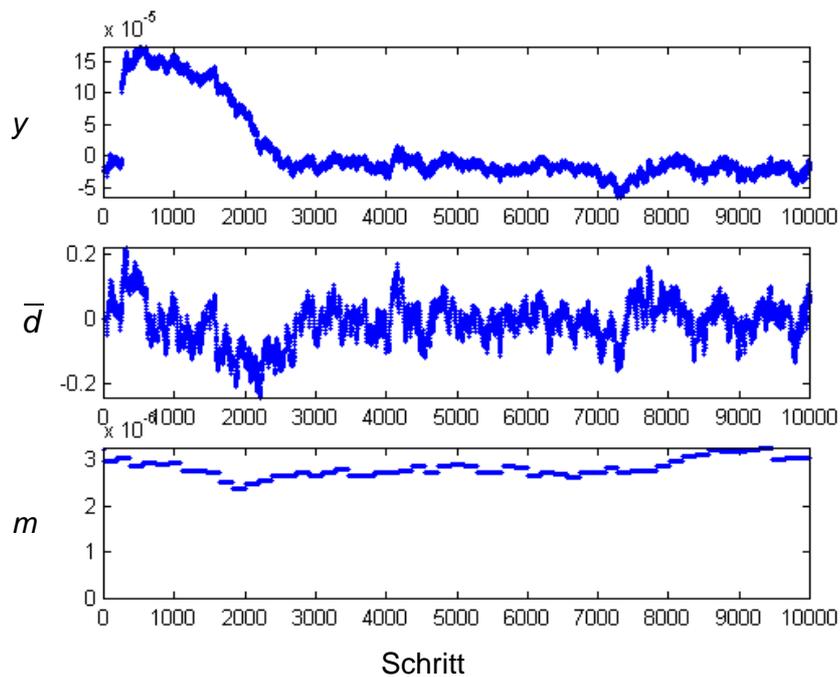
V = T(1,:).^2 + T(3,:).^2; % x^2+y^2 für jeden Teilchenvektor
V = V - (d/2).^2; % -r^2
% In V sind nun alle Elemente > 0, deren zugehörigen Teilchenvektoren
% außerhalb des Cups liegen.

n = length(find(V<=0));
```

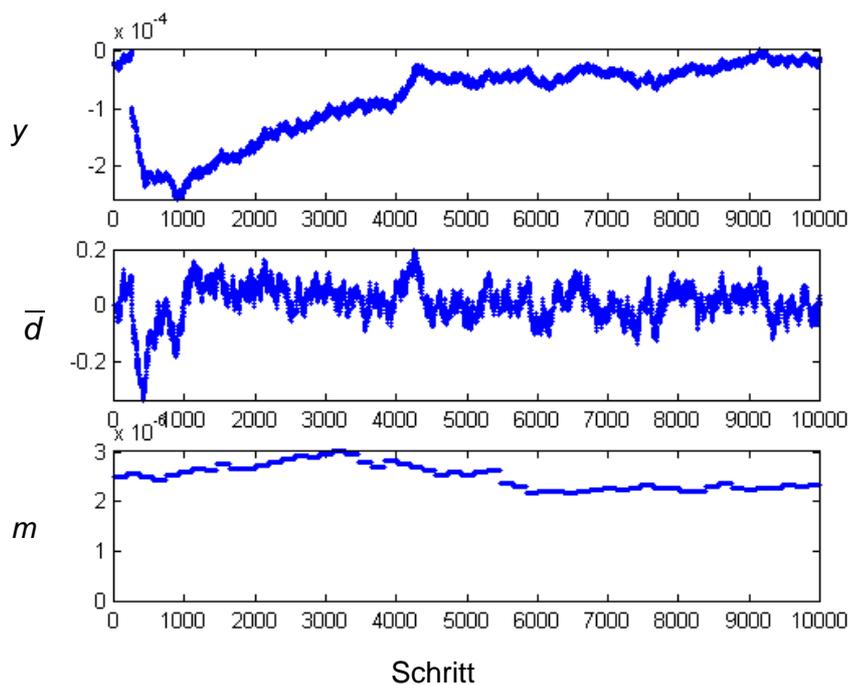
Anlage 9: Verlauf der Stellwerte bei der Simulation in Kapitel 3.5.2

Dargestellt sind die Verläufe von drei Größen für alle Stellgrößen über der Schrittzahl. Das oberste Diagramm zeigt jeweils den Verlauf des Stellwertes y . Das mittlere Diagramm zeigt den Verlauf der Größe \bar{d} und das untere Diagramm zeigt die Testsignalamplitude m .

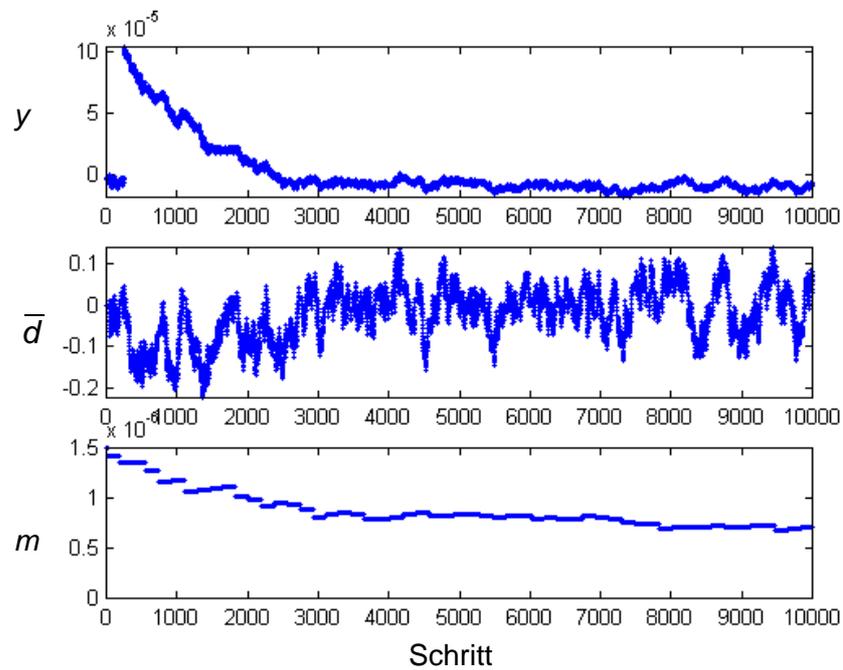
Korrektor K1ax:



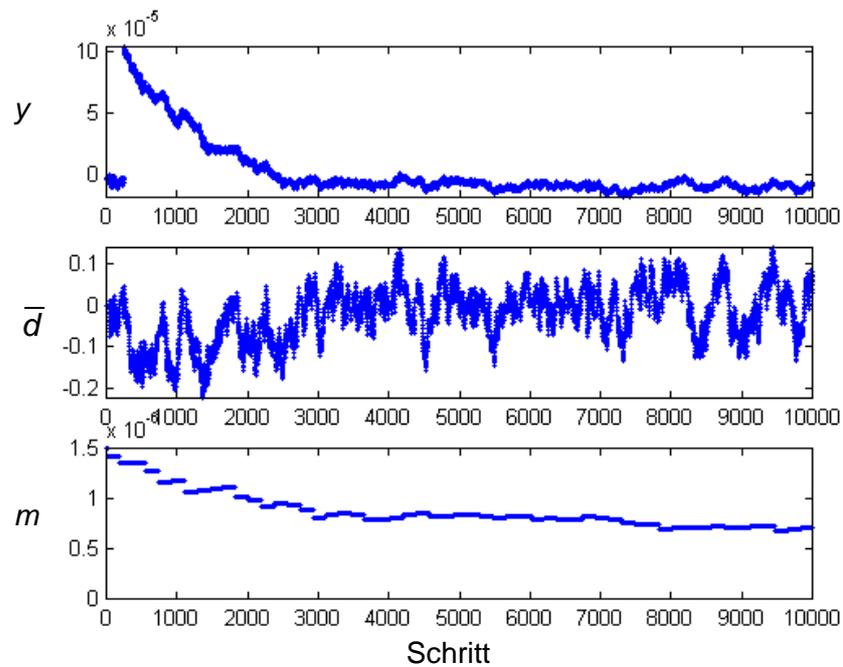
Korrektor K1ay:

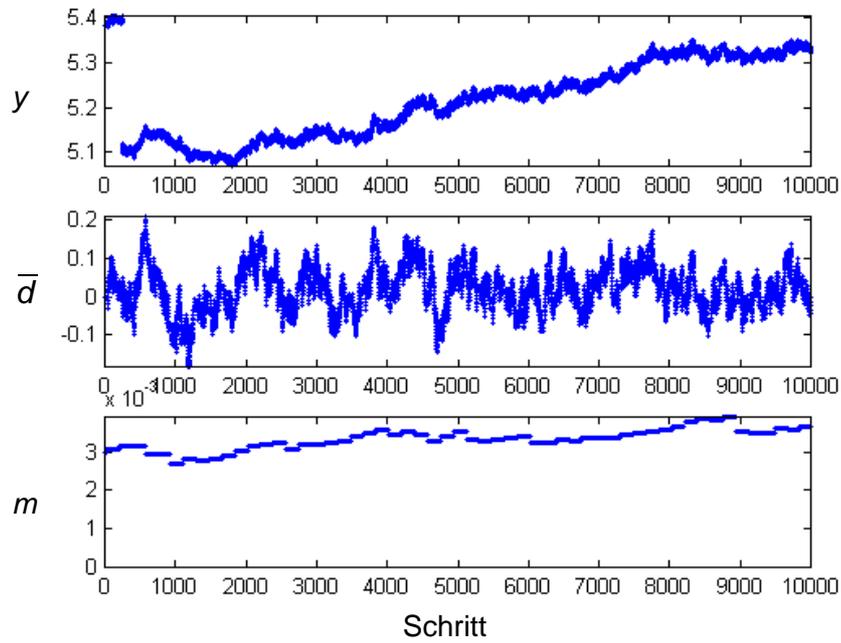
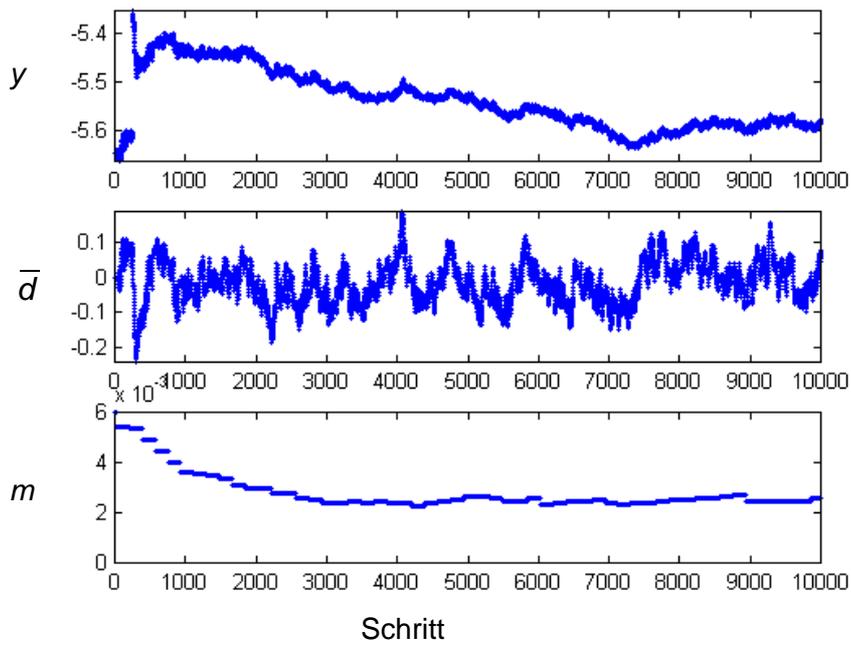


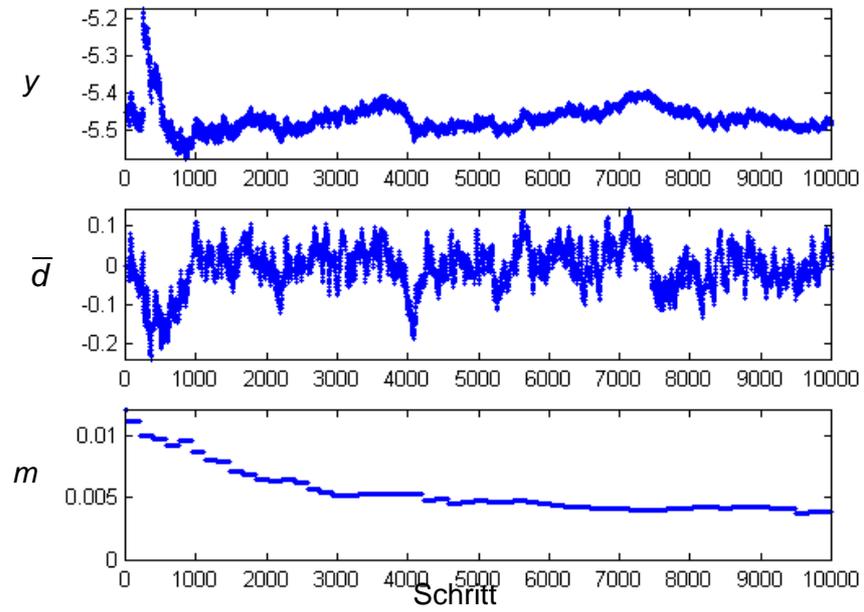
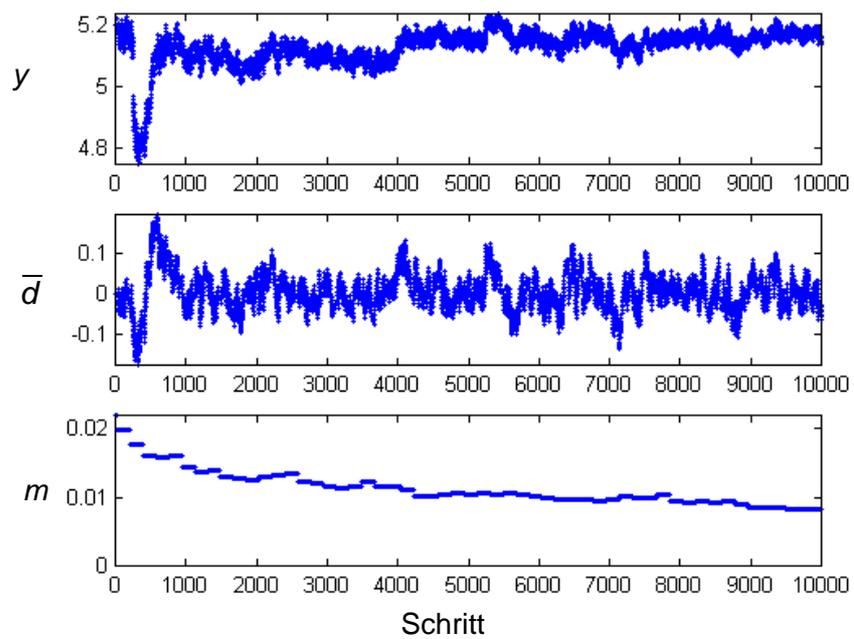
Korrektor K1bx:



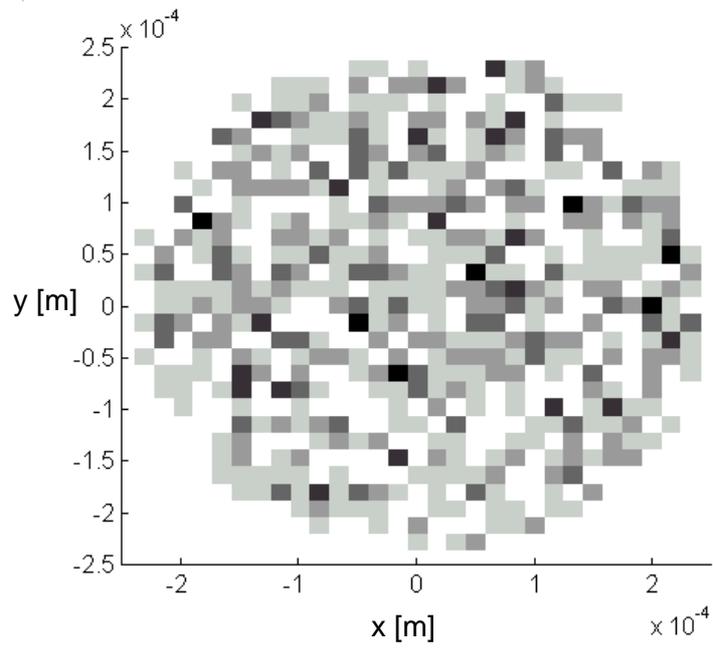
Korrektor K1by:



Quadrupol QP1a:Quadrupol QP1b:

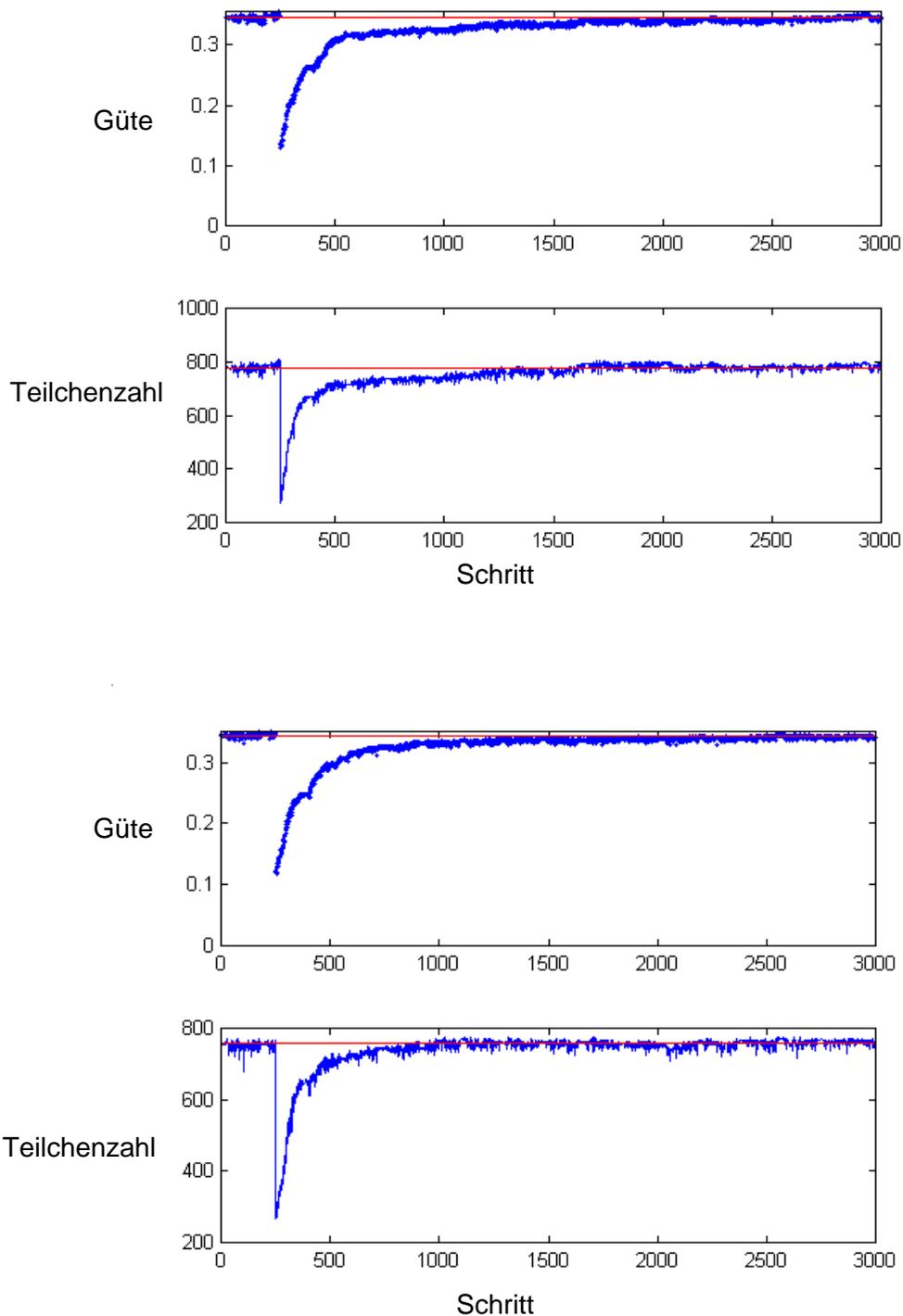
Quadrupol QP2a:Quadrupol QP2b:

Verteilung der Teilchen im Faradaybecher im Schritt 10000:



Anlage 10: Ergebnis von zwei weiteren Simulationsläufen aus Kapitel 3.5.2

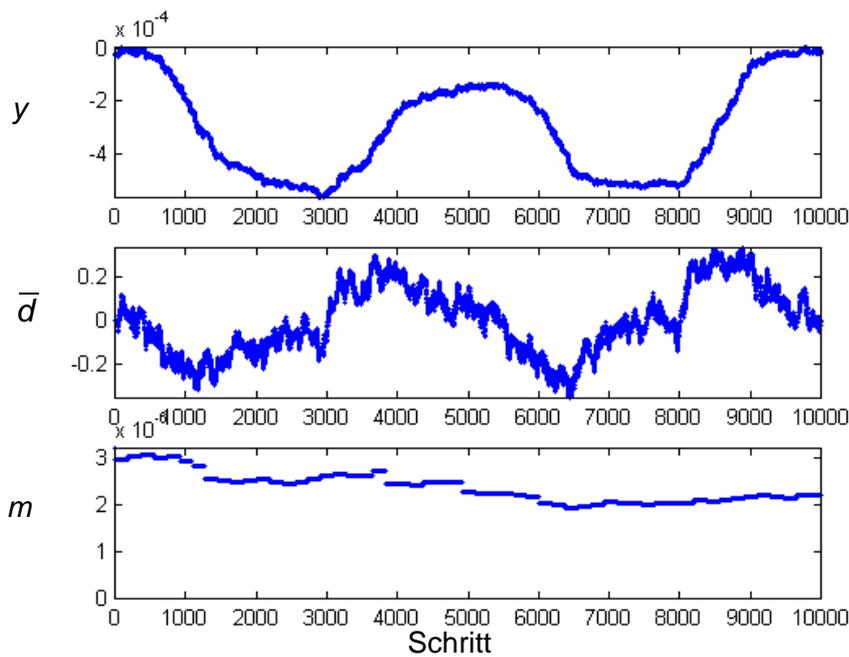
Das jeweils obere Diagramm zeigt den Verlauf des Gütewertes x über den ausgeführten 3000 Schritten. Das zugehörige untere Diagramm zeigt den Verlauf der Anzahl Teilchen, die auf den Faradaybecher auftreffen. Die gerade ausgezogenen Linien zeigen zum Vergleich die gleichen Größen bei konstant gehaltenen Stellwerten (Optimierung deaktiviert).



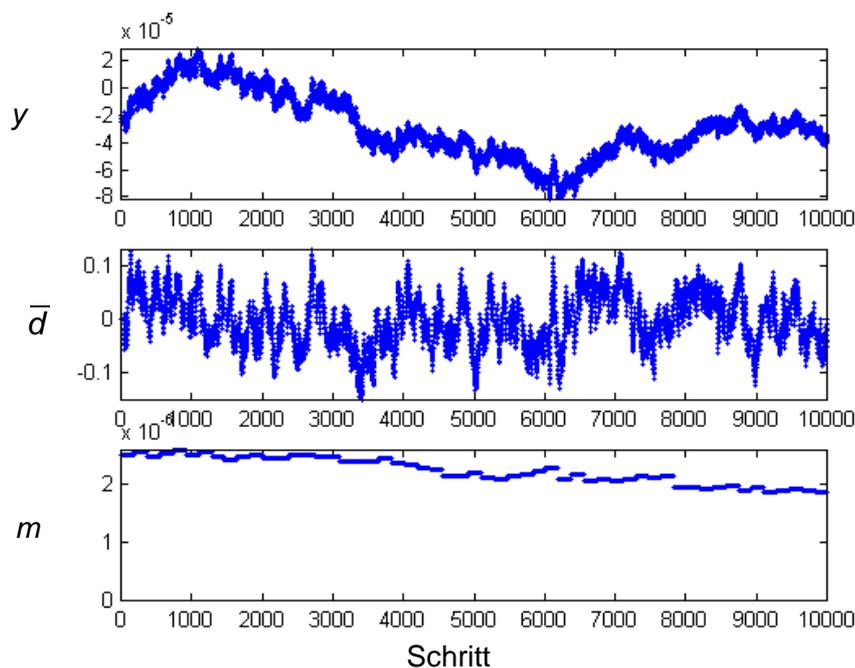
Anlage 11: Verlauf der Stellwerte bei der Simulation in Kapitel 3.5.3

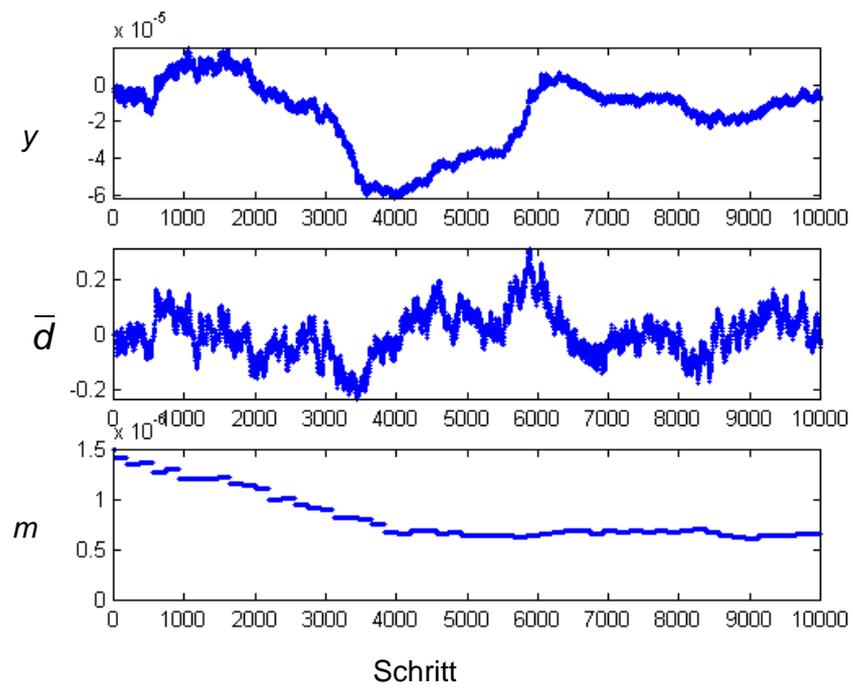
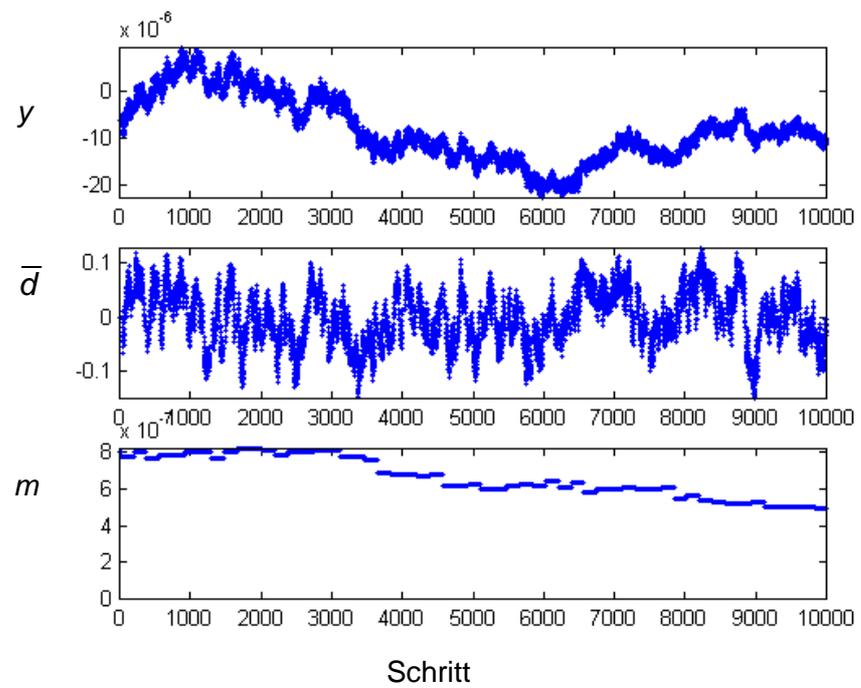
Dargestellt sind die Verläufe von drei Größen für alle Stellgrößen. Das oberste Diagramm zeigt jeweils den Verlauf des Stellwertes y . Das mittlere Diagramm zeigt den Verlauf der Größe \bar{d} und das untere Diagramm zeigt die Testsignalamplitude m .

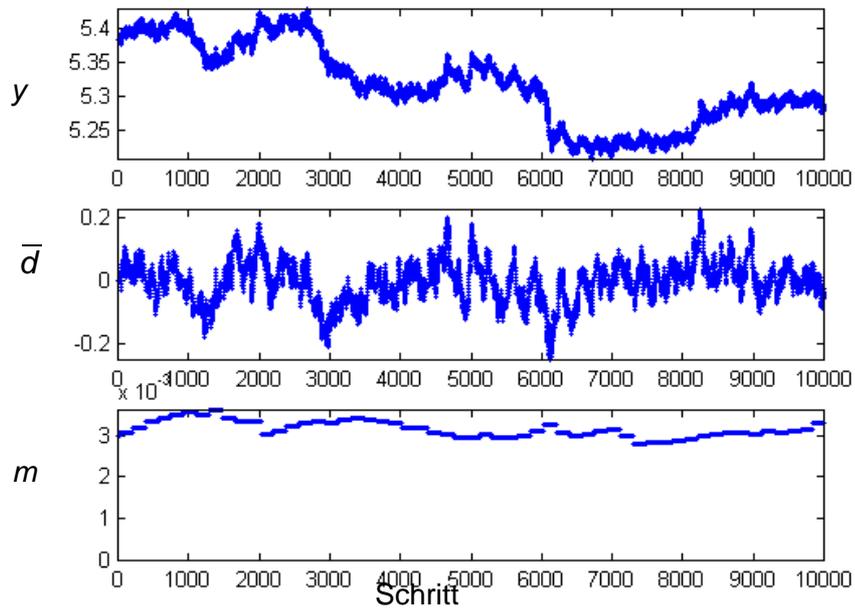
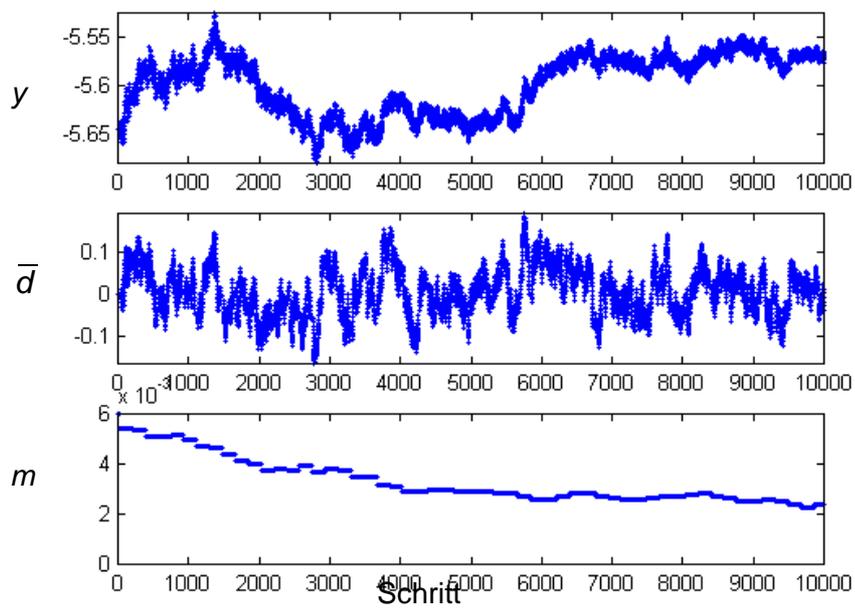
Korrektor K1ax:

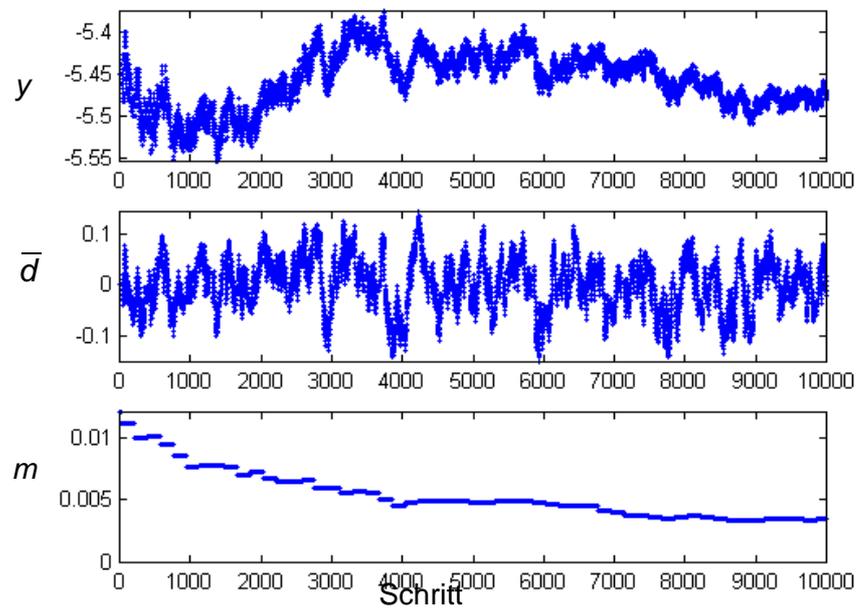
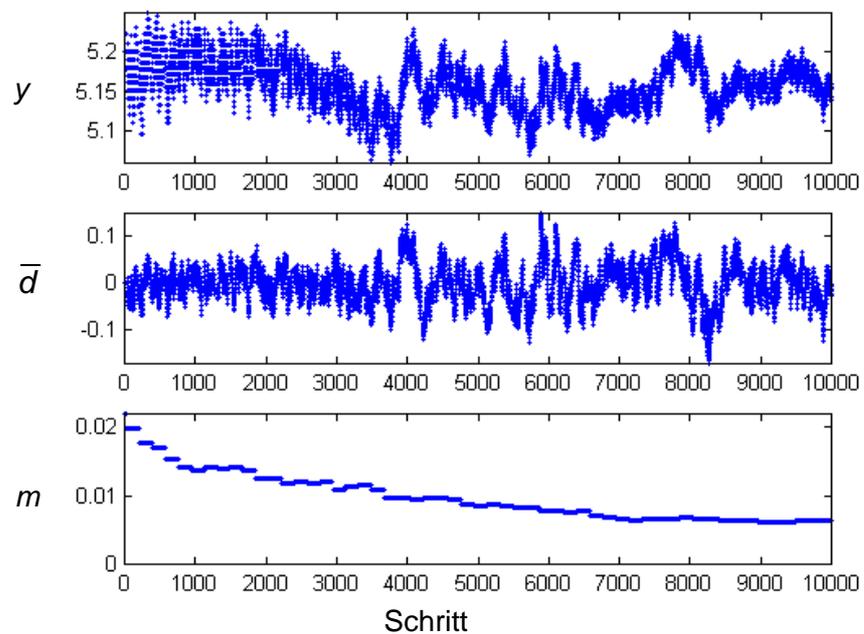


Korrektor K1ay:



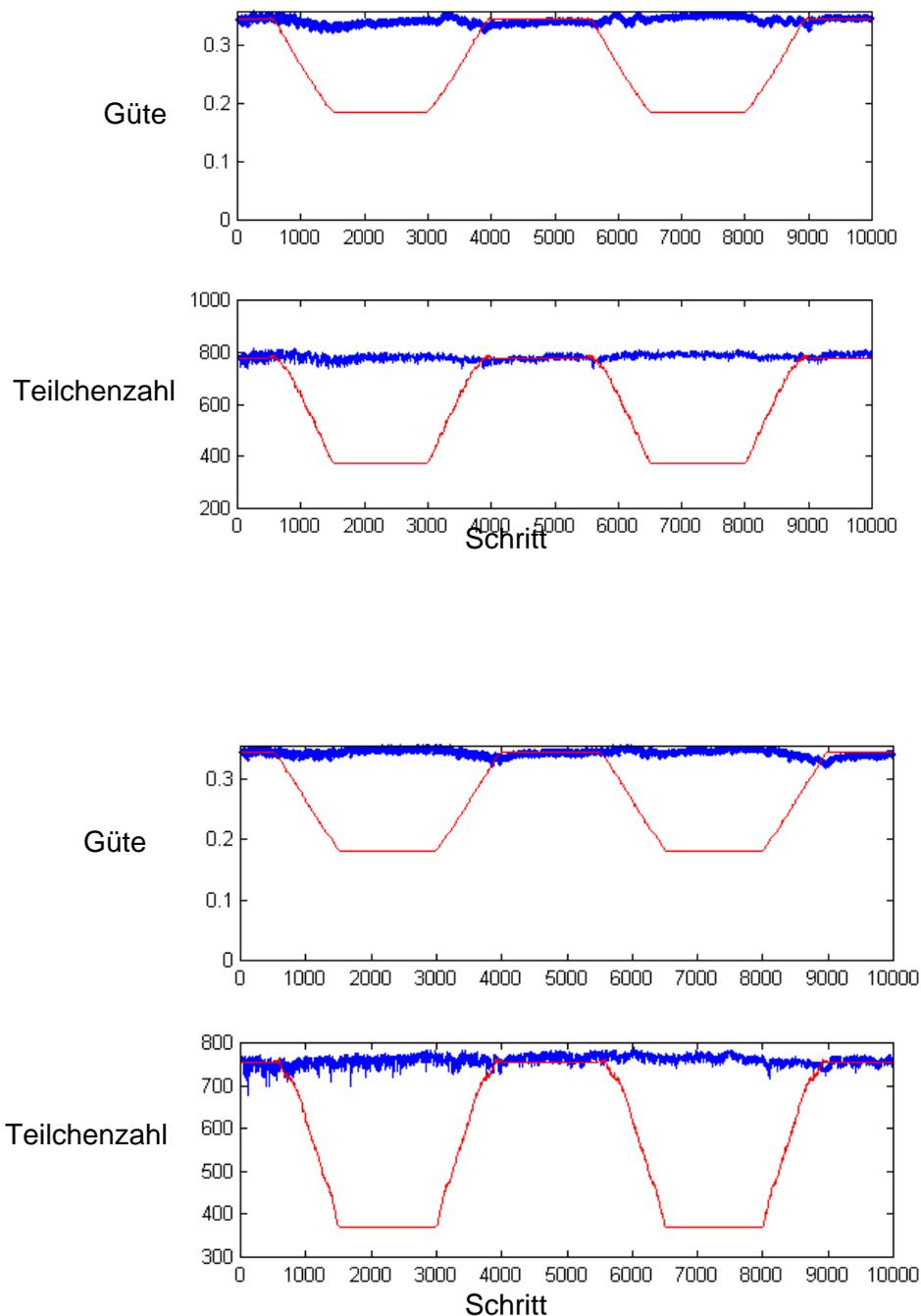
Korrektor K1bx:Korrektor K1by:

Quadrupol QP1a:Quadrupol QP1b:

Quadrupol QP2a:Quadrupol QP2b:

Anlage 12: Ergebnis von zwei weiteren Simulationsläufen aus Kapitel 3.5.3

Das jeweils obere Diagramm zeigt den Verlauf des Gütewertes x über den ausgeführten 10000 Schritten. Das zugehörige untere Diagramm zeigt den Verlauf der Anzahl Teilchen, die auf den Faradaybecher auftreffen. Die dünneren Linien mit trapezförmigem Verlauf zeigen zum Vergleich die gleichen Größen bei konstant gehaltenen Stellwerten (Optimierung deaktiviert).



Anlage 13: Dokumentation des Funktionsbausteins FB101 in der SIMATIC-Steuerung des Tandembeschleunigers.

Beim Aufruf dieses Funktionsbausteins aus dem Funktionsbaustein FB100 heraus muß der Datenbaustein der zu optimierenden Stellgröße geöffnet sein. Alle Zugriffe erfolgen nur innerhalb dieses Datenbausteines. Als Parameter wird ein Timer aufgerufen, der für diese spezielle Stellgröße angelegt sein muß. Mit diesem Timer wird die Abtastperiodendauer (mit dem Fehler der nicht konstanten Zykluszeit) für diese Stellgröße vorgegeben. Zum Vergleich kann der Signalfuß in Abbildung 4.5, Seite 67 herangezogen werden.

Hinweis: Um in diesem Dokument die bedingten Anweisungen mit der gleichen Bedingung wie im Programm zu verwenden, erfolgt häufig die Abfrage auf "Nein".

Netzwerk 1

Das Freigabewort "KO_FF" für die Korrelationsoptimierung wird geprüft.

KO_FF == 0?

- Ja: Funktionsbaustein beenden

Netzwerk 2

Test, ob die Zeit des übergebenen Timers abgelaufen ist.

Zeit ist nicht abgelaufen?

- Ja: Funktionsbaustein beenden
- Nein: Timer neu starten

Die Zeit mit der der Timer geladen wird, wird aus dem Datenbaustein der Stellgröße entnommen (KO_DELAY).

ACHTUNG: Die Zeit muß so groß sein, das mindestens ein SPS-Zyklus übersprungen wird. Dies ist notwendig, da erst am Ende des SPS-Zyklus die neuen Stellwerte gesetzt werden und sofort danach, nämlich am Anfang des nächsten Zyklus, die neuen Abtastwerte eingelesen werden. Die Tot- und Verzögerungszeiten zwischen Stellwertänderung und meßbaren Reaktionen der Meßglieder müssen mit dieser Zeit sicher überbrückt werden.

Netzwerk 3

Die Differenz des Stellwertes zwischen dem letzten Abtastschritt und diesem Abtastschritt wird ermittelt. Diese Änderung wird durch den aufgeschalteten Offset, die Veränderung des Stellwertes durch das Ergebnis der letzten Korrelationsoperation und durch Bedienereingriffe hervorgerufen.

$KO_STELLWDIF = STELLW - KO_STELLW_ -1$

Danach wird der momentane Stellwert für den nächsten Optimierungszyklus dieser Stellgröße zwischengespeichert:

$KO_STELLW_ -1 = STELLW$

Netzwerk 4

Das Pseudozufallssignal wird im Programm mit "Offset" bezeichnet, da es auf die Stellwertvariable als Zusatzwert zum eigentlichen Stellwert addiert wird. Dieser Offset kann zwei Zustände annehmen. Entweder ist er Null oder KO_M. Der Wert KO_M ist somit ein Verstärkungsfaktor für das 1-Bit-Pseudozufallssignal des rückgekoppelten Schieberegisters.

Der Offset des letzten Abtastzyklus (also 0 oder KO_M) wird an dieser Stelle wieder vom Stellwert subtrahiert, bevor dann im Netzwerk 6 der neue Offsetwert des laufenden Abtastzyklus auf den Stellwert addiert wird.

Letzter Offset (KO_OFFSET) ungleich Null?

- Ja:

$$\text{STELLW} = \text{STELLW} - \text{KO_M}$$

Netzwerk 5

Die Korrelationsoperation ist eine Vergleichsoperation zwischen der Änderung des Stellwertes vom vorletzten zum letzten Abtastzyklus und der Änderung des Gütewertes zwischen dem letzten und dem laufenden Abtastzyklus (jeweils die Reaktion auf den vorher eingestellten Stellwert). Das Ergebnis dieses Vergleichsprozesses kann die Werte -1 , 0 oder $+1$ annehmen. Die Änderungen der beiden Eingangssignale der Korrelationsoperation werden somit durch die Zustände "synchron" ($+1$) und "gegenphasig synchron" (-1) sowie "keine Änderung mindestens einer Eingangsgröße" (0) beschrieben. Der dritte Fall kann durch die begrenzte Auflösung der Meßglieder auftreten. Die Korrelationsoperation entspricht damit einem Polaritätskorrelator unter besonderer Berücksichtigung des Eingangswertes Null.

Der Vorteil des Einsatzes eines Polaritätskorrelators beruht darauf, daß das Ergebnis der Operation völlig unabhängig von den Absolutwerten der Eingangsgrößen ist. Das Optimierungsverfahren braucht deshalb an dieser Stelle nicht bezüglich des Anstiegs der Gütefunktion im abzutastenden Bereich parametrisiert werden. Dies ist um so wichtiger, da allgemein davon auszugehen ist, daß der Verlauf der Gütefunktion und damit auch deren Ableitung in bestimmten Grenzen nicht bekannt ist.

Um die Zeitkonstante des Integrators des Korrelationsergebnisses für eine sinnvolle Optimierungsgeschwindigkeit bei ausreichender Unterdrückung von Störungen einstellen zu können, wird das Korrelationsergebnis mit dem Faktor KO_V multipliziert. Für den Integrator des Korrelationsergebnisses wird danach unmittelbar das Register des Stellwertes benutzt.

In diesem Netzwerk wird das Stellwertregister mit dem Ergebnis aus folgender Tabelle addiert:

		Differenz der letzten Abtastwerte KO_ABTASTWERT – KO_ABTASTW-1		
		< 0	= 0	> 0
Differenz der letzten Stellwerte KO_STELLWDIF	< 0	+KO_V	0	-KO_V
	= 0	0	0	0
	> 0	-KO_V	0	+KO_V

Der Faktor KO_V soll im weiteren durch einen Algorithmus adaptiert werden, so daß zum einen eine möglichst schnelle Optimierung des Stellwertes bei großer Entfernung zum Extremwert erfolgt und zum anderen nach Erreichen des Extremwertes der Stellwert möglichst stabil in diesem Punkt stehen bleibt. Stabil bedeutet hierbei, daß die Schwankungen des Stellwertes um diesen Punkt bestimmte Grenzen nicht bzw. nur sehr selten überschreiten. Für diesen Adaptionsvorgang, der im Netzwerk 7 durchgeführt wird, wird das Korrelationsergebnis in einem weiteren Integrator "KO_INT" addiert. Dabei werden die ursprünglichen Werte der Korrelationsoperation, also -1, 0 und +1 benutzt.

Der neue Integrationswert KO_INT wird aus dem alten plus dem in folgender Tabelle aufgeführten Wert gebildet:

		Differenz der letzten Abtastwerte KO_ABTAZWERT - KO_ABTAZW-1		
		< 0	= 0	> 0
Differenz der letzten Stellwerte KO_STELLWDIF	< 0	+1	0	-1
	= 0	0	0	0
	> 0	-1	0	+1

Am Ende dieses Netzwerkes wird der Abtastwert und der Offsetwert (Testsignal) für den nächsten Zyklus abgelegt:

KO_ABTAZW-1 = KO_ABTAZW

KO_OFFSET-1 = KO_OFFSET

Netzwerk 6

In diesem Netzwerk wird der neue Wert des Testsignals ermittelt. Dazu wird ein binärer Pseudozufallsgenerator benutzt. Der sich daraus ergebende Binärwert (0 oder 1) wird mit dem Faktor KO_M multipliziert. Mit diesem Parameter wird die sinnvolle Amplitude des Testsignals gewählt. Der Pseudozufallsgenerator besteht aus einem 32-bit rückgekoppelten Schieberegister.

Das Schieberegister darf nicht leer sein. Aus diesem Grund wird es initialisiert, falls nötig:

KO_SR_L != 0?

- Nein:

KO_SR_H != 0?

- Nein:

KO_SR_L = 1

Anmerkung: In der SIMATIC-S5 ist nur eine Wort-Verarbeitung möglich. Bei den verwendeten 32-Bit-Werten sind deshalb zu jeder Größe zwei Worte vorhanden. Der Low- und High-Teil wird hier mit einer Erweiterung am Namen (..._L und ..._H) kenntlich gemacht.

Das Schieberegister wird mit KO_SR_L und KO_SR_H bezeichnet. Für die Parametrierung ist es notwendig, das für die Rückkopplung höchste Bit in diesem Schieberegister anzugeben. Damit ist eine variable Länge des Schieberegisters für die einzelnen Stellgrößen möglich. Die Maskierung des höchsten Bits erfolgt mit den Datenworten KO_MN_L und KO_MN_H. Ein gesetztes Bit in dieser Maske zeigt die höchste Stelle an. Die Bit-Positionen, die im Schieberegister zur Rückkopplung verwendet werden sollen, werden durch eine weitere Maske festgelegt. Diese Maske steht in den Datenworten KO_MXOR_L und KO_MXOR_H.

Mit den genannten Registern ergibt sich folgender Algorithmus:

$((\text{KO_SR_L} \ \& \ \text{KO_MN_L}) \neq 0) \ \text{OR} \ ((\text{KO_SR_H} \ \& \ \text{KO_MN_H}) \neq 0)?$

- Ja: (links schieben mit XOR-Fnktion)
 $\text{KO_SR_H} = \text{KO_SR_H} \ \text{XOR} \ \text{KO_MXOR_H}$
 $\text{KO_SR_H} \ 1^* \ \text{links schieben}$
 $\text{KO_SR_L} = (\text{KO_SR_L} \ \text{XOR} \ \text{KO_MXOR}) \ \text{OR} \ 1$
 $\text{KO_SR_L} \ 1^* \ \text{links schieben}$
 Überlauf?

- Ja: $\text{KO_SR_H} = \text{KO_SR_H} \ \text{OR} \ 1$ (unterstes Bit im höherwertigen Teil setzen)

$\text{KO_OFFSET} = \text{KO_M}$ (auszugebender Offset = KO_M)

- Nein: (links schieben ohne XOR-Funktion)
 $\text{KO_SR_H} \ 1^* \ \text{links schieben}$
 $\text{KO_SR_L} \ 1^* \ \text{links schieben}$
 Überlauf?

- Ja: $\text{KO_SR_H} = \text{KO_SR_H} \ \text{OR} \ 1$ (unterstes Bit im höherwertigen Wort setzen)

$\text{KO_MXOR_H} = 0$

Netzwerk 7

In diesem Netzwerk wird der Faktor KO_V (Arbeitsschrittweite) adaptiert. Dazu wird nach einer festen Anzahl Zyklen der Integrator KO_INT ausgewertet. Anhand dieses Integrators kann erkannt werden, ob eine Korrelation zwischen Ein- und Ausgangsgrößenänderungen am Prozeß vorhanden ist. Ist sie vorhanden, wächst der Integratorinhalt je nach Lage der Abtastpunkte bezüglich des Extremwertes positiv oder negativ. Nach der genannten festen Anzahl Abtastzyklen wird nun verglichen, ob der Betrag des Integratorinhaltes eine bestimmte Schranke KO_K überschritten hat. Ist dem so, wird der Faktor KO_V um einen festen Betrag, der im Parameter KO_V_DYN steht, vergrößert. Wird die Schranke jedoch nicht erreicht, wird KO_V um diesen Betrag verkleinert. Danach wird KO_V auf die Grenzen KO_V_MIN und KO_V_MAX begrenzt. Nach der Auswertung des Integrators KO_INT wird dieser immer auf 0 zurückgesetzt.

Der Algorithmus der Adaption des Faktors KO_V ist:

$\text{KO_Z1} = \text{KO_Z1} + 1$ (Zyklenzähler inkrementieren)

Zyklenzahl ≥ 15 ?

- Ja: $KO_Z1 = 0$ (Zyklenzähler zurücksetzen)
| KO_INT | $\geq KO_K$? (Schranke erreicht?)
 - Ja: $KO_V = KO_V + KO_V_DYN$
 $KO_INT = 0$
 - Nein: $KO_V = KO_V - KO_V_DYN$
 $KO_INT = 0$
- $KO_V \geq KO_V_MIN$? (über untere Begrenzung)
 - Nein: $KO_V = KO_MIN$
- $KO_V \leq KO_V_MAX$ (unter oberer Begrenzung)
 - Nein: $KO_V = KO_MIN$

Danach erfolgt die Addition des Testsignals auf den Stellwert und dessen Begrenzung. Dabei werden die Begrenzungen durch die Grenzwerte der Korrelationsoptimierung KO_STELLW_OG/UG) und die fest vorgegebenen Stellwertgrenzen im Automatisierungsgerät (ORG/UGR) berücksichtigt.

$STELLW = STELLW + KO_OFFSET$

$STELLW \leq KO_STELLW_OG$? (unterhalb Obergrenze?)

- Nein: $STELLW = KO_STELLW_OG$

$STELLW \leq OGR$? (unterhalb Obergrenze?)

- Nein: $STELLW = OGR$

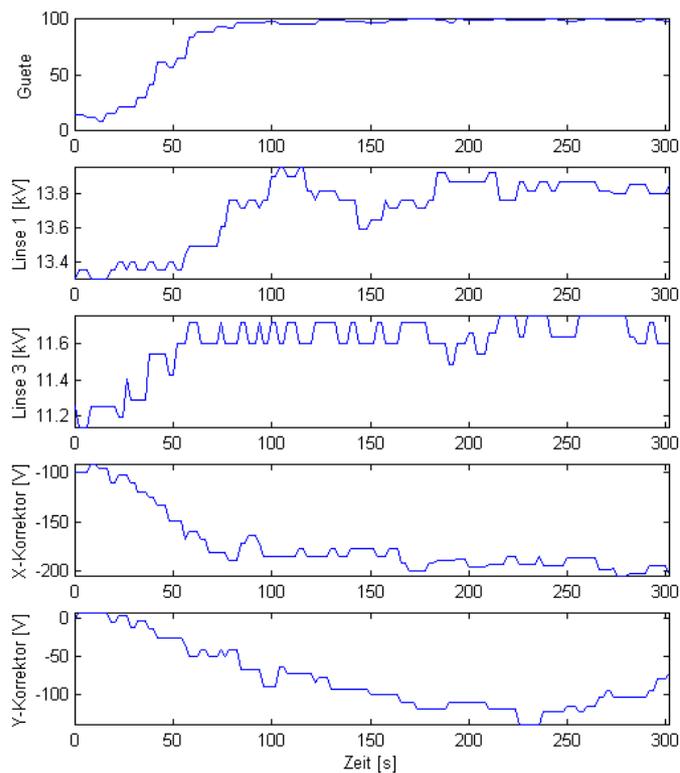
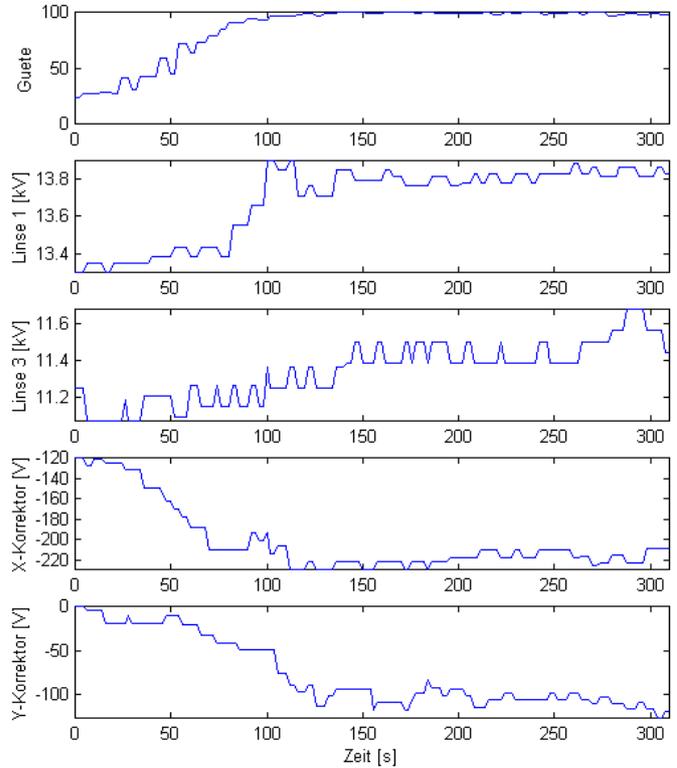
$STELLW \geq KO_STELLW_UG$? (oberhalb Untergrenze?)

- Nein: $STELLW = KO_STELLW_UG$

$STELLW \geq UGR$? (oberhalb Untergrenze?)

- Nein: $STELLW = UGR$

Anlage 14: Zwei Optimierungsläufe an der Tandem-Beschleunigeranlage entsprechend Kapitel 4.1.2



Anlage 15: Der Optimierungsalgorithmus als MATLAB-Funktion für die Simulation – Funktion "optimize6.m"

```

function [x,i,S] = optimize6(y,i,S,A,V,OF)
% Optimierungsalgorithmus in der Version 6
% Veränderungen gegenüber der Version 5:
% Amplitudenregelung und Optimierung erfolgt nicht mehr gleichzeitig.
% Der Optimierungsschritt wird mit dem Parameter OF = 3
% ausgelöst. Bei OF = 1 wird ein Meßschritt der Testsignal-
% amplitude ausgeführt. Bei OF = 2 wird der letzte Meßschritt noch
% ausgewertet und dann aus den Meßwerten ein Regelungsschritt ausgeführt
% und die Mittelwertspeicher zurückgesetzt. (OF = "Optimierungsflag")
% Zur Initialisierung muß OF = 0 sein.
% Zur Optimierung werden wieder nur 2 Abtastpunkte benutzt.

% Parameter:
% y - Messwert nach Anlegen des zuletzt zurückgegebenen Stellwertes
% (beim Erstaufwurf kann der Wert beliebig sein)
% i - interner Integratorwert (entweder der zuletzt zurückgegebene
% Integratorwert oder eine neue Stellwertvorgabe)
% S - interne Zustandsvariable / Primitives Polynom Modulo 2 für die
% Testsignalerzeugung
% (Variable muß beim Erstaufwurf den Zeilenvektor des Primitiven
% Polynoms enthalten; bei allen folgenden Aufrufen muß sie die
% zurückgegebene Zustandsvariable enthalten)
% 2 Beispiele für Initialisierungswerte:
% Gegeben ist das Primitive Polynom  $x^4 + x + 1$ 
% Der Zeilenvektor ist: [4 1 0]
% Gegeben ist das Primitive Polynom  $x^{12} + x^6 + x^4 + x + 1$ 
% Der Zeilenvektor ist: [12 6 4 1 0]
% Das Primitive Polynom ist Parameter für die Erzeugung des
% pseudozufälligen Testsignals. Bei mehrdimensionaler Optimierung
% muß für jede Stellgröße ein anderes Primitives Polynom gewählt
% werden.
% V - verschiedene Faktoren (Angaben dazu weiter unten)
% A - Verlustwert in Prozent vom aktuellen Gütemaximum, das durch das
% Testsignal hervorgerufen werden soll. (Sollwert für Testsignal-
% regelung.
% OF - s. oben
% Folgende Parameter entfallen gegenüber älteren Versionen dieser Funktion:
% F - Filterzeitkonstante für Meßwertfilterung zur Testsignalregelung
% Dieser Wert ist bezogen auf die Abtastrate anzugeben.
% AnzReg - Anzahl Abtastzyklen für einen Regelschritt
% AnzOpt - Anzahl Optimierungsschritte zwischen den Abtastregelzyklen
% Rückgabewerte:
% x - neuer Stellwert inkl. Testsignal
% i - interner Integratorwert (Stellwert ohne Testsignal)
% S - interne Zustandsvariable für nächsten Funktionsaufruf

% Test auf 6 vorhandene Parameter und Initialisierung
% =====
if nargin < 6
    error('Not enough parameters!')
end

if ~isa(S,'struct')
% Wenn S keine Strukturvariable -> Initialisierung
% -----

% Pseudozufallsgenerator
S.primpol = S; % Primitives Polynom
[S.maxmask S.xormask] = MasksFromPrimitivePolynom(S.primpol); % Schiebe-
% registermasken
S.SR = 0; % Initialisierung des Schieberegisters

% Zähler der Aufrufe dieser Funktion
S.lfdNr = 0; % Zähler für die Zahl der Aufrufe dieser Funktion
% Testsignalamplitude

% Meßwernerfassung zur Testsignalamplitudenregelung
S.y_m1 = 0; % linker Abtastpunkt
S.y_0 = 0; % mittlerer Abtastpunkts
S.y_p1 = 0; % rechter Abtastpunkt
S.lg = 0; % Merker für die Lage des letzten Meßpunktes

```

```

S.zReg_m1 = 0; % -1 = links; 0 = mitte; +1 = rechts;
S.zReg_0 = 0; % Zähler für die Anzahl der Meß-Abtastungen (links)
S.zReg_p1 = 0; % "-" (mitte)
S.zReg_p1 = 0; % "-" (rechts)

% Variablen fpr Plots
S.y_mlk = 0;
S.y_0k = 0;
S.y_plk = 0;

% Testsignalamplitudenregelung
S.m = V(1,6); % Startwert der Amplitude des Testsignals
S.Verlust = 0; % Suchverlustwert
S.eVerlust = 0; % Regelabweichung des Suchverlustes
S.Kleinsignalverstaerkung = 0; % geschätzte Kleinsignalverstärkung
S.RZ = V(1,7); % Zeitkonstante des Testsignalamplitudenreglers
S.mU = V(1,8); % Untergrenze der Testsignalamplitude

% Optimierung
S.initF = 1; % Initialisierungsflag (es erfolgt nur eine Stellwertausgabe
           % und keine Korrelationsbestimmung)
S.y_1 = 0; % vorhergehender Meßwert
S.x_1 = 0; % zugehöriger Stellwert
S.x = 0; % zuletzt ausgegebener Stellwert
S.dx = 0; % Änderung des Stellwertes
S.dy = 0; % Änderung des Meßwertes
S.korr = 0; % Ergebnis des Polaritätskorrelators
S.korrM = 0; % Signal nach Tiefpaß vom Korrelator
S.v = V(1,1); % Startwert für Integrationssschritt bei erkannter
Korrelation
% (1/Integrationszeitkonstante)
S.vO = 0; % Obergrenze für S.v
S.vU = 0; % Untergrenze für S.v
S.xt1 = 0;
S.bit = 0;
end

% nichts tun bei OF == -1
if OF == -1
    x = i;
end

% Zähler für die Zahl der Aufrufe erhöhen
% =====
S.lfdNr = S.lfdNr + 1;

% Gewinnung der Meßwerte zur Testsignalamplitude bei OF = 1 und 2
% =====

% Erster Schritt bei Zyklus 0: Ausgabe des ersten Abtastwertes an der
% Stelle -1
if OF == 0
    S.lg = -1; % Lage: -1
    x = i-S.m; % Stellwert an dieser Stelle
end

if OF == 1
    % Meßwertablage entsprechend der Abtastposition
    % -----
    switch S.lg
    case -1
        S.y_m1 = S.y_m1 + y;
        S.zReg_m1 = S.zReg_m1 + 1;

```

```

case 0
    S.y_0 = S.y_0 + y;
    S.zReg_0 = S.zReg_0 + 1;
case +1
    S.y_p1 = S.y_p1 + y;
    S.zReg_p1 = S.zReg_p1 + 1;
otherwise
    ; % sonst: nur Initialisierung der ersten Abtastposition
end

% Neue Abtastposition
% -----
S.lg = S.lg + 1;
if S.lg > 1
    S.lg = -1;
end

switch S.lg
case -1
    x = i-S.m;
case 0
    x = i;
case +1
    x = i+S.m;
end

end % Ende der Bedingung OF == 1 bzw. 2

% Ausführen eines Testsignalamplitudenregelungsschrittes
% =====
if OF == 2

    % Meßwertablage (letzte Abtastung) entsprechend der Abtastposition
    % -----
    switch S.lg
    case -1
        S.y_m1 = S.y_m1 + y;
        S.zReg_m1 = S.zReg_m1 + 1;
    case 0
        S.y_0 = S.y_0 + y;
        S.zReg_0 = S.zReg_0 + 1;
    case +1
        S.y_p1 = S.y_p1 + y;
        S.zReg_p1 = S.zReg_p1 + 1;
    otherwise
        ; % sonst: nur Initialisierung der ersten Abtastposition
    end

    % Bestimmung der Mittelwerte der abgetasteten Punkte
    % -----

    S.y_m1 = S.y_m1 / S.zReg_m1;
    S.y_0 = S.y_0 / S.zReg_0;
    S.y_p1 = S.y_p1 / S.zReg_p1;

    % Kopie der Werte für Plot
    S.y_mlk = S.y_m1;
    S.y_0k = S.y_0;
    S.y_plk = S.y_p1;

    % Bestimmung der Optimierungsverluste aus den Mittelwerten
    % -----

    % Gleichung zur Bestimmung der Suchverluste:
    %
    % S.Verlust = 1 - (Minimalwert der drei Mittelwerte) / (Maximalwert der
drei % Mittelwerte)
    %
    % S.Verlust ist also die Differenz zwischen dem kleinsten und größten
    % Abtastwert bezogen auf den größten der drei gemittelten Abtastwerte.
    % Dabei wird also angenommen, daß der größte Wert das Maximum darstellt,
    % in dem sich der Optimierungsalgorithmus befindet.
    % Befindet sich der Algorithmus nicht im Optimum, sondern in einem
    % ansteigenden Ast, gibt diese Berechnungsvorschrift ebenfalls die
momentanen % Suchverluste bezogen auf den momentanen Maximalwert an.

```

```

if max([S.y_m1 S.y_0 S.y_p1]) ~= 0
    S.Verlust = 1 - min([S.y_m1 S.y_0 S.y_p1]) / max([S.y_m1 S.y_0 S.y_p1]);
else
    disp('Alle Verlustwerte sind Null! Es wird angenommen: S.Verlust =
Verlustsollwert');
    S.Verlust = A/100; % Sollwert in Prozent durch 100
end
% Hinweis: diese Bestimmung funktioniert so nur bei positiven Meßwerten

% Regelung der Testsignalamplitude nach den Verlusten
% -----

% Es wird dabei auf die Versuche mit reglertest.m zurückgegriffen.
% Bestimmung des Absolutwertes der Regelabweichung
% .....

S.eVerlust = A/100 - S.Verlust; % Sollverlust - Istverlust

% Abschätzung der Streckenverstärkung (Anstieg im Abtastgebiet)
% .....

% Die Regelschleife besteht im hinführenden Zweig aus dem I-Regler und
% der Regelstrecke. Die Regelstrecke besteht im quasistatischen Fall
% (der für die gesamte Optimierung angenommen wird) aus einer
nichtlinearen
% Funktion. Diese Funktion ist der Verlauf des Gütewertes im Suchbereich.
% Im Gebiet des Optimums kann näherungsweise von einem quadratischen
Verlauf
% dieser nichtlinearen Kennlinie ausgegangen werden. Im
Kleinsignalverhalten
% der Regelung kann diese Kennlinie im Arbeitspunkt linear genähert
werden.
% Die Kennlinie kann also im Arbeitspunkt als Kleinsignalverstärkungs-
% faktor angegeben werden. Je nach Lage des Arbeitspunktes auf dieser
% Kennlinie stellt sich im Kleinsignalverhalten ein anderer Verstärkungs-
% faktor ein.
% Da die Optimierung unabhängig von der "Breite des Optimums" sein soll,
% muß beim Reglerentwurf davon ausgegangen werden, daß die Regelung des
% Testsignals unabhängig von diesem "Parameter" funktionieren soll.
% Aus diesem Grund wird im hinführenden Zweig der Regelschleife ein
% Proportionalglied mit dem Faktor 1/Kleinsignalverstärkung eingefügt.
% Der Wert "Kleinsignalverstärkung" wird deshalb an dieser Stelle
% nach folgendem Verfahren adaptiert:
%
% -> Es wird angenommen, daß sich die Regelung ungefähr im Arbeitspunkt
% befindet (Voraussetzung für die Betrachtung als
"Kleinsignalverhalten").
% Weiterhin wird angenommen, daß das Großsignalverhalten der Strecke
mit
% einer quadratischen Funktion statisch angenähert werden kann.
(x=a*y^2)
%
% Unter diesen Voraussetzungen ist die Kleinsignalverstärkung die
% 1. Ableitung der statischen Kennlinie. (v = x' = 2*a*y)
% Der Parameter für die statische Kennlinie (a) kann für den ausge-
% regelten Zustand (Istwert=Sollwert) im Arbeitspunkt unmittelbar
% berechnet werden:
% a = x/y^2; mit x=Sollwert und y=Stellwert
% Unter diesen Bedingungen ergibt sich im Arbeitspunkt die Klein-
% signalverstärkung aus:
% v = 2 * x/y^2 * y = 2 * x/y = 2 * Sollwert/Stellwert

if S.m ~=0 % wenn Stellwert der Testsignalamplitude nicht Null
    S.Kleinsignalverstärkung = 2 * A/100/S.m;
else
    disp('Stellwert ist Null, Kleinsignalverstärkung wird gehalten. ');
end

% Proportionalglied zum Ausgleich der Streckenverstärkung
% .....
% Die Verstärkung der Strecke im Arbeitspunkt soll nun durch den
% berechneten Wert ausgeglichen werden. Das Proportionalglied
% "1/Kleinsignalverstärkung" wird dazu vor dem I-Regler eingefügt:
% -> Die Regelabweichung wird durch die berechnete Kleinsignalverstärkung
% dividiert.

```

```

if S.Kleinsignalverstaerkung ~= 0
    S.eVerlust = S.eVerlust/S.Kleinsignalverstaerkung;
else
    disp('Kleinsignalverstaerkung ist Null, eVerlust wird nicht
normiert. ');
end

% I-Regler mit Untergrenze Null
% .....

% Bei einer Amplitudenregelung wird der Betrag des Spitzenwertes
% geregelt. Der kleinste Stellwert ist deshalb Null. Daraus folgt,
% daß der Integrator des Reglers nach unten auf Null begrenzt
% werden muß.

% Variante 1: I-Regler mit Begrenzung am Eingang
% Festlegung der Begrenzung: In einem Schritt darf sich der Stellwert
% (Testsignalamplitude) um maximal 10% ändern.
ra = S.eVerlust/S.RZ; % S.RZ ist die Reglerzeitkonstante
% Begrenzung:
raGr = abs(S.m/10); % 10%
if ra > raGr
    ra = raGr;
elseif ra < -raGr
    ra = -raGr;
end

S.m = S.m + ra;

% Begrenzung auf Untergrenze für Testsignalamplitude
% Sinnvoll ist hier der Wert des kleinsten Digits am Stellglied
% S.mU darf nicht kleiner Null sein.
if S.m < S.mU
    S.m = S.mU;
end

% Rücksetzten für neue Mittelwertbestimmung
S.y_0 = 0;
S.y_m1 = 0;
S.y_p1 = 0;
S.zReg_0 = 0;
S.zReg_m1 = 0;
S.zReg_p1 = 0;

S.Verlust = S.Verlust +1; % Umrechnung zur besseren Anzeige im
% Plot der Abtastpunkte, wenn das Maximum beim Wert 1 liegt.
%-> In der SIMATIC wird dieser Berechnungsschritt nicht ausgeführt.

S.lg = 2; % Neustart Meßwertausnahme
S.initF = 1; % Initialisierungsflag der Optimierung setzen

x = i;
end % Regelungsschritt

if OF == 3 % Optimierungsschritt
    if S.initF == 0 % wenn keine Initialisierung, dann...
        % Bestimmung der Differenzen für Stell- und Meßwert
        % =====
        S.dy = y - S.y_1; % Änderung des Meßwertes = letzter Meßwert - neuer
Meßwert
        S.dx = S.x - S.x_1; % Änderung der zugehörigen Stellwerte

        % Korrelationsoperation
        % =====
        % Benutzt wird eine sogenannte Polaritätskorrelation zwischen den
beiden
        % Differenzen des Meßwertes und des Stellwertes.
        % Damit ist das Korrelationsergebnis immer unabhängig von

```

Absolutwerten.

```

    % Korrelation bezüglich Stellwert
    S.korr = 0; % Null für alle im folgenden nicht berücksichtigten
Kombinationen
    if ((S.dy > 0) & (S.dx > 0)) | ((S.dy < 0) & (S.dx < 0))
        S.korr = 1; % aufsteigender Ast
    end
    if ((S.dy > 0) & (S.dx < 0)) | ((S.dy < 0) & (S.dx > 0))
        S.korr = -1; % absteigender Ast
    end

    % Integration des Stellwertes
    % =====

    i = i + (S.korr * S.v);
end

S.initF = 0; %Initialisierungsflag rücksetzen (Initialisierung ist
erfolgt)

% Bei beiden Varianten: Initialisierung und keiner Initialisierung...

% Testsignal auf Stellgröße geben
% =====

% neuen Pegel aus Pseudozufallsgenerator lesen
[S.bit S.SR] = pseudozfg(S.SR,S.maxmask,S.xormask);

% Bei Zufallssignal == 0 => linker Abtastwert
% bei Zufallssignal == 1 => rechter Abtastwert

switch S.bit
case 0
    x = i - S.m;
case 1
    x = i + S.m;
end

% Werte weiterschieben
% =====

S.y_1 = y;
S.x_1 = S.x;
S.x = x;

% Adaption der Korrelations-Integrator-Zeitkonstante (Suchschrittweite)
% =====

% Funktionsweise:
% -----

% In dieser Version wird an der mittleren Lage der 3 Abtastpunkte die
% Stellung zum Optimum erkannt. Ist der mittlere Abtastpunkt im
% Mittel (Störgrößenfilterung) höher als die beiden seitlich Abtast-
% punkte, dann befindet sich der Suchvorgang im Optimum, S.v wird bis
% auf einen Minimalwert verringert. Im anderen Fall wird S.v bis auf
% einen Maximalwert vergrößert.

% Abhängigkeit vom mittleren Korrelationsergebnis
[S.xtl S.korrm] = tl_glied(S.korr,S.korrm,100);

% Wenn im Optimum S.y_0 größer als die beiden anderen Punkte ist,
% wird S.korrm negativ. Außerhalb des Optimums ist einer der beiden
% anderen Punkte größer und das Ergebnis ist positiv. S.v wird
% entsprechend verändert.
% Bei zu starkem Rauschen treten die verschiedenen Abtastzustände

```

```

% dieser drei Abtastwerte etwa gleich häufig auf. Nach der Mittelwert-
% bildung unter Nutzung der sign- und max-Funktion tritt der positive
% Fall doppelt so häufig auf als der negative Fall. Um in diesem Fall
% in den sicheren Zustand überzugehen (S.v = S.vU), wird der negative
% Fall mit dem Faktor 4 überbewertet.

% S.korm sei der auf S.v0 normierte Wert für S.v
S.v0 = S.m*4;%4;
S.vU = S.m*0.5;%0.5;

% Variante 1:
if abs(S.xt1) < 0.1
    S.v = S.vU;
else
    %in älterer Version: S.v = (S.v0-S.vU)*abs(S.xt1) + S.vU;
    S.v = (S.v0-S.vU) * (abs(S.xt1) - 0.1)*1.111+S.vU;
end

% Begrenzung
if S.v > S.v0
    S.v = S.v0;
end
if S.v < S.vU
    S.v = S.vU;
end

end % Ende Optimierungsschritt

% Subfunktionen
% #####

% Funktionen für den Pseudozufallsgenerator
% =====

function [b,sr] = pseudozfg(sr,maxmask,xormask)
% Pseudozufallsgenerator
% sr - Schieberegisterinhalt
% maxmask - Maske für das oberste Bit des Schieberegisters
% xormask - XOR-Maske
%
% b = Resultierendes Bit (0 oder 1)
% sr = neuer Schieberegisterinhalt

% Bestimmung der Maske für das oberste Bit
% =====
srmask = bitor(maxmask,maxmask - 1); % Maske für alle relevanten Schiebe-
% registerbits
if bitand(sr,srmask) == 0 % wenn Schieberegister leer, dann
% Initialisieren (nach dieser Vorschrift beginnt der Vorgang in der Regel
% nicht mit einem fast leeren Schieberegister)
    sr = fix(maxmask.^0.9);
    b = 0; % Ausgang rücksetzen
else % , sonst rückgekoppelt linksschieben
    if (bitand(sr,maxmask))
% Bit in höchster Position des Schieberegisters gesetzt
        sr = bitxor(sr,xormask); % XOR mit Maske
        sr = bitshift(sr,1); % 1* hochschieben
        sr = bitand(bitset(sr,1),srmask); % unterstes Bit setzen, Bits
außerhalb % der SR-Länge löschen
        b = 1;
    else
% Bit in höchster Position des Schieberegisters NICHT gesetzt
        sr = bitand(bitshift(sr,1),srmask); % 1* hochschieben, Bits außerhalb
der % SR-Länge löschen
        b = 0;
    end
end

```

```

end

% Ende der Funktion pseudozfg
% -----

function [maxmask,xormask] = MasksFromPrimitivePolynom(primpol)
% Diese Funktion bestimmt die Maske für die Länge des Schieberegisters
% 'maxmask' und für die XOR-Verknüpfung 'xormask' aus einem
% Primitiven Polynom Modulo 2 'primpol', der als Zeilenvektor übergeben wird.
%
% Bsp.: Gegeben ist das Primitive Polynom  $x^4 + x + 1$ 
%
% MasksFromPrimitivePolynom([4 1 0]) gibt zurück:
% [maxmask xormask] = [8 1]
% dabei bedeutet: 15 - die 4 unteren Bits des Schieberegisters sind relevant
%                  (Binär: 1000)
%                  1 - Xor-Maske ist 1 (Binär: 0001)
% Beginnt der Zeilenvektor mit Elementen, die den Wert Null besitzen, dann
% werden diese Elemente nicht berücksichtigt.

% Führende Elemente mit dem Wert '0' entfernen
while primpol(1) == 0
    primpol = primpol(2:end);
end

% 'primpol' muß mindestens 3 Elemente besitzen
if length(primpol) < 3
    primpol
    error('Parametrierfehler: Primitives Polynom >primpol< zu kurz!')
end

% Letztes Element von 'primpol' muß immer '0' sein.
if primpol(1,length(primpol)) ~= 0
    primpol
    error('Parametrierfehler: Letztes Element im Primitiven Polynom >primpol<
    muß Null sein!')
end

% Bestimmung der Maske für die Länge des Schieberegisters
% -----
maxmask = 1;
maxmask = bitshift(maxmask,primpol(1)-1);
% Test, ob resultierende Schieberegisterlänge außerhalb der verarbeitbaren Größe
% liegt
if bitor(maxmask,maxmask-1) > bitmax
    error('Schieberegister zur groß! Kürzeres Primitives Polynom wählen!')
end

% Bestimmung der XOR-Maske
% -----

xormask = 0;
lv = primpol(1);
for i = 2:length(primpol)-1
    if primpol(1,i) >= lv
        primpol
        error('Parametrierfehler: >primpol< kann kein Primitives Polynom
        sein!')
    end
    lv = primpol(1,i);
    xormask = bitor(xormask, 2.^(lv-1));
end

% Ende der Funktion MasksFromPrimitivePolynom
% -----

function [x,sp] = t1_glied(u,sp,T1)
% T1-Glied mit dem Speicher sp

sp = u + sp*exp(-1/T1);
x = 1/T1 * sp;

```

Anlage 16: Funktionsbaustein und Funktion zur Extremwertregelung mit der SIMATIC S7-400 (FB100, FC107)

Die Gesamtheit der Optimierung und Testsignalregelung mit allen Stellgrößen wird durch den Funktionsbaustein FB 100 gesteuert. Dieser Funktionsbaustein nutzt dabei die Funktion FC107 zur Durchführung der eindimensionalen Optimierungsschritte. Die Funktion FC107 in der SIMATIC ist direkt vergleichbar mit der Funktion "optimize6" in Anlage 15. Eine Übersicht über die verwendeten Variablenbezeichnungen in beiden Programmen kann Anlage 2 entnommen werden.

FB100:

```

FB100 - <offline>
"opt_OPTIMIERUNG"      Haupt-FB der Optimierung mit Korrelationsverfahren
Name: OPTIMRG          Familie: OPT
Autor: Herbrand        Version: 00.01
                        Bausteinversion: 2
Zeitstempel Code:     28.08.00 10:38:22
                        Interface: 16.03.00 15:33:26
Längen (Baustein / Code / Daten): 03774 03462 00050

```

Adresse	Deklaration	Name	Typ	Anfangswert	Kommentar
	in				
	out				
	in_out				
	stat				
0.0	temp	MESSWERTREAL			Messwert
4.0	temp	Schritt WORD			Ablaufschritt der Optimierung/ Testsignalregelung
6.0	temp	OF_KY1_1INT			O_F für KY-1.1
8.0	temp	OF_DP1_1INT			O_F für DP-1.1
10.0	temp	OF_KY1_2INT			O_F für KY-1.2
12.0	temp	OF_DP1_2INT			O_F für DP-1.2
14.0	temp	OF_KY1_3INT			O_F für KY-1.3
16.0	temp	OF_QP2_1INT			O_F für QP-2.1
18.0	temp	OF_QP2_2INT			O_F für QP-2.2
20.0	temp	OF_DP2_1INT			O_F für DP-2.1
22.0	temp	OF_KY2_1INT			O_F für KY-2.1
24.0	temp	OF_DP3_1INT			O_F für DP-3.1
26.0	temp	OF_KY3_1INT			O_F für KY-3.1
28.0	temp	OF_KY3_2INT			O_F für KY-3.2
30.0	temp	OF_QP4_1INT			O_F für QP-4.1
32.0	temp	OF_QP4_2INT			O_F für QP-4.2

Baustein: FB100 Haupt-FB der Optimierung mit Korrelationsverfahren

Dieser FB stellt die Einsprungstelle für die Abarbeitung eines Optimierungsschrittes für mehrere Stellgrößen dar.

Die Optimierung beruht auf einem Korrelationsverfahren mit kleinen Testschritten zur Auffindung eines Optimalpunktes. Der Optimalpunkt wird durch das Maximum des Wertes bestimmt, der beim Aufruf des eindimensionalen Optimierungsalgorithmuses im FC106 als "MESSWERT" übergeben wird.

Jede so zu optimierende Stellgröße muß mit dem für dieses Projekt definierten Standard-DB ausgerüstet sein. Als Mindestanforderung an diesen DB ist für diese Optimierungsaufgabe erforderlich:

- eine Länge von 4 Worten
- ein DINT-Wert auf der Adresse 4.0 (STELLWERT).

Die DB-Nummer dieses Datenbausteines ist beim Aufruf von FC107 als Wert "ADR_DB_STELLW" zu übergeben. Der FC107 greift indirekt auf die Adresse 4 zu.

Zusätzlich zu diesem Datenbaustein, der neben dem MESSWERT die Schnittstelle zum restlichen Steuerungsprogramm darstellt, ist zur Parametrierung und Zwischenspeicherung ein weiterer Datenbaustein je Stellgröße erforderlich. Die Spezifikation ist dem ersten für diesen Zweck verwendeten DB (DB500) zu entnehmen. Dem FC107 ist die Nummer dieses Datenbausteines als Wert "ADR_DB_OPT" zu übergeben. Die Werte in diesem DB, die als Parameter für den Optimierungsalgorithmus verwendet werden, können jederzeit sinnvoll verändert werden. Sie werden mit dem nächsten Optimierungszyklus übernommen. Die Werte, die vom Optimierungsalgorithmus als

Ablagewerte für den nachfolgenden Optimierungsschritt hinterlegt werden, sollten nicht ausserhalb des Optimierungsalgorithmus überschrieben werden, da sonst u.U. falsche logische Zusammenhänge und Schlußfolgerungen durch den Algorithmus im darauffolgenden Zyklus zu einem fehlerhaften Optimierungsverhalten führen können.

Netzwerk: 1 Messwert (Gütwert) einlesen und umrechnen

Der Gütwert wird von der Adresse 572 gelesen, ins REAL-Format gewandelt, in den Stromwert in [A] umgerechnet und als MESSWERT abgelegt.
Der Strom von 10µA ergibt den Wert 27648 am 10V Analogeingang.
Diese Aktion läuft immer, auch wenn die Optimierung abgeschaltet ist.

```

L      0
L      PEW  572           // AD-Wandler 13Bit
<=I           // auf Null begrenzen
SPB     ML1
TAK
ML1:  ITD           // in 32-Bit
      DTR           // in REAL-Zahl
L      2.764800e+009
/R
T      "opt_Global".MESSWERT

```

Netzwerk: 2 globale Freigabe der Optimierung abfragen

Die Optimierung der einzelnen Stellgrößen kann in den zugeordneten Datenbausteinen separat ein- und ausgeschaltet werden. ZUSÄTZLICH kann hier mit dem Bit DB502.DBX0.0 die gesamte Optimierung freigegeben oder gesperrt werden.

```

UN      "opt_Global".GlobalFreigabe // Bit nicht gesetzt
BEB                    // dann Baustein beenden, keine
Optimierung

```

Netzwerk: 3 Zeit abwarten

Es wird hier nur ein einziger global auf die Optimierung wirkender Timer benutzt. Seine Zeit wird so eingestellt, daß sie etwas größer als die längste Zugriffszeit bei der Ausgabe auf die Stellgrößen ist. Nach Ablauf des Timers ist damit sichergestellt, daß die Reaktion auf eine Stellwertänderung am Meßeingang nachweisbar ist. Es wird der Timer T50 benutzt.

```

U      "opt_TIME"           // Wenn Zeit nicht abgelaufen
BEB                    // Baustein beenden

// Zeit neu starten
CLR
L      "opt_Global".Schrittwartezeit
SV     "opt_TIME"
SET
L      "opt_Global".Schrittwartezeit
SV     "opt_TIME"

```

Netzwerk: 4 Unterscheidung: Testsignalregelung / Optimierung

Es wird entweder eine Testsignalregelung der einzelnen Stellgrößen oder eine Optimierung aller Stellgrößen durchgeführt. Die Testsignalregelung wird nach Ablauf der Zeit "Optimierungszeit" (DB502) gestartet. Danach wird ein Testsignalamplitudenregelungszyklus aller Stellgrößen ausgeführt. Dieser Zustand wird durch das gesetzte Bit "Regelungszyklen" (DB502) angezeigt. Danach startet die Optimierungszeit erneut.

```

U      "opt_Global".Regelungszyklen // Regelungszyklen aktiv ?
SPB     TSA1           // ja -> TSA1 (Regelung)
// -> Kein aktiver Regelvorgang

U      "opt_OptTIME"     // Optimierungszeit läuft noch ?
SPB     OPT1           // ja -> OPT1 (Optimierung)
// -> Regelung beginnen

```

Netzwerk: 5 Testsignalamplitudenregelung

Zyklus der Testsignalregelung

Zur Meßwerterfassung werden jeweils 4 Abtastpunkte gemittelt. Das ergibt 12 Abtastpunkte pro Stellgröße.

```

// Erster Durchlauf der Regelung: Initialisierung
// =====

```

```

        SET
        =      "opt_Global".Regelungszylinder // Flag aktiv halten: Regelung
//          aktiviert

        L      0
        T      "opt_Global".Regelschritt

// Alle Durchläufe
// =====

// Regelschritt inkrementieren
// -----
TSA1: L      1
      L      "opt_Global".Regelschritt
      +I
      T      "opt_Global".Regelschritt

// O_F-Werte aller Stellgrößen rücksetzen (auf -1)
// -----
      L      -1
      T      #OF_KY1_1
      T      #OF_DP1_1
      T      #OF_KY1_2
      T      #OF_DP1_2
      T      #OF_KY1_3
      T      #OF_QP2_1
      T      #OF_QP2_2
      T      #OF_DP2_1
      T      #OF_KY2_1
      T      #OF_DP3_1
      T      #OF_KY3_1
      T      #OF_KY3_2
      T      #OF_QP4_1
      T      #OF_QP4_2

// Bestimmung des aktuellen Regelungsschrittes
// -----
// KY-1.1
// oooooo
// OF=0; Ausgabe des ersten Abtastpunktes
      L      "opt_Global".Regelschritt
      L      1
      >I
      SPB    TS01
      L      0
      T      #OF_KY1_1
      SPA    TSAZ
// OF=1; weitere Abtastung
TS01: TAK
      L      12
      >I
      SPB    TS02
      L      1
      T      #OF_KY1_1
      SPA    TSAZ
// OF=2; letzte Abtastung und Regelschritt
TS02: TAK
      L      13
      >I
      SPB    TS03
      L      2
      T      #OF_KY1_1
      SPA    TSAZ

// DP-1.1
// oooooo
// OF=0; Ausgabe des ersten Abtastpunktes
TS03: TAK
      L      14
      >I
      SPB    TS04
      L      0
      T      #OF_DP1_1

// OF=1; weitere Abtastungen
TS04: TAK
      L      25
      >I
      SPB    TS05
      L      1
      T      #OF_DP1_1

```

```

    SPA    TSAZ
// OF=2; letzte Abtastung und Regelschritt
TS05: TAK
    L      26
    >I
    SPB    TS06
    L      2
    T      #OF_DP1_1
    SPA    TSAZ

// KY-1.2
// oooooo
// OF=0; Ausgabe des ersten Abtastpunktes
TS06: TAK
    L      27
    >I
    SPB    TS07
    L      0
    T      #OF_KY1_2
    SPA    TSAZ
// OF=1; weitere Abtastungen
TS07: TAK
    L      38
    >I
    SPB    TS08
    L      1
    T      #OF_KY1_2
    SPA    TSAZ
// OF=2; letzte Abtastung und Regelschritt
TS08: TAK
    L      39
    >I
    SPB    TS09
    L      2
    T      #OF_KY1_2
    SPA    TSAZ

// DP-1.2
// oooooo
// OF=0; Ausgabe des ersten Abtastpunktes
TS09: TAK
    L      40
    >I
    SPB    TS10
    L      0
    T      #OF_DP1_2
    SPA    TSAZ
// OF=1; weitere Abtastungen
TS10: TAK
    L      51
    >I
    SPB    TS11
    L      1
    T      #OF_DP1_2
    SPA    TSAZ
// OF=2; letzte Abtastung und Regelschritt
TS11: TAK
    L      52
    >I
    SPB    TS12
    L      2
    T      #OF_DP1_2
    SPA    TSAZ

// KY-1.3
// oooooo
// OF=0; Ausgabe des ersten Abtastpunktes
TS12: TAK
    L      53
    >I
    SPB    TS13
    L      0
    T      #OF_KY1_3
    SPA    TSAZ
// OF=1; weitere Abtastungen
TS13: TAK
    L      64
    >I
    SPB    TS14
    L      1
    T      #OF_KY1_3
    SPA    TSAZ
// OF=2; letzte Abtastung und Regelschritt

```

```
TS14: TAK
      L      65
      >I
      SPB    TS15
      L      2
      T      #OF_KY1_3
      SPA    TSAZ

// QP-2.1
// oooooo
// OF=0; Ausgabe des ersten Abtastpunktes
TS15: TAK
      L      66
      >I
      SPB    TS16
      L      0
      T      #OF_QP2_1
      SPA    TSAZ
// OF=1; weitere Abtastungen
TS16: TAK
      L      77
      >I
      SPB    TS17
      L      1
      T      #OF_QP2_1
      SPA    TSAZ
// OF=2; letzte Abtastung und Regelschritt
TS17: TAK
      L      78
      >I
      SPB    TS18
      L      2
      T      #OF_QP2_1
      SPA    TSAZ

// QP-2.2
// oooooo
// OF=0; Ausgabe des ersten Abtastpunktes
TS18: TAK
      L      79
      >I
      SPB    TS19
      L      0
      T      #OF_QP2_2
      SPA    TSAZ
// OF=1; weitere Abtastungen
TS19: TAK
      L      90
      >I
      SPB    TS20
      L      1
      T      #OF_QP2_2
      SPA    TSAZ
// OF=2; letzte Abtastung und Regelschritt
TS20: TAK
      L      91
      >I
      SPB    TS21
      L      2
      T      #OF_QP2_2
      SPA    TSAZ

// DP-2.1
// oooooo
// OF=0; Ausgabe des ersten Abtastpunktes
TS21: TAK
      L      92
      >I
      SPB    TS22
      L      0
      T      #OF_DP2_1
      SPA    TSAZ
// OF=1; weitere Abtastungen
TS22: TAK
      L      103
      >I
      SPB    TS23
      L      1
      T      #OF_DP2_1
      SPA    TSAZ
// OF=2; letzte Abtastung und Regelschritt
TS23: TAK
      L      104
```

```

>I
SPB TS24
L 2
T #OF_DP2_1
SPA TSAZ

// KY-2.1
// oooooo
// OF=0; Ausgabe des ersten Abtastpunktes
TS24: TAK
L 105
>I
SPB TS25
L 0
T #OF_KY2_1
SPA TSAZ
// OF=1; weitere Abtastungen
TS25: TAK
L 116
>I
SPB TS26
L 1
T #OF_KY2_1
SPA TSAZ
// OF=2; letzte Abtastung und Regelschritt
TS26: TAK
L 117
>I
SPB TS27
L 2
T #OF_KY2_1
SPA TSAZ

// DP-3.1
// oooooo
// OF=0; Ausgabe des ersten Abtastpunktes
TS27: TAK
L 118
>I
SPB TS28
L 0
T #OF_DP3_1
SPA TSAZ
// OF=1; weitere Abtastungen
TS28: TAK
L 129
>I
SPB TS29
L 1
T #OF_DP3_1
SPA TSAZ
// OF=2; letzte Abtastung und Regelschritt
TS29: TAK
L 130
>I
SPB TS30
L 2
T #OF_DP3_1
SPA TSAZ

// KY-3.1
// oooooo
// OF=0; Ausgabe des ersten Abtastpunktes
TS30: TAK
L 131
>I
SPB TS31
L 0
T #OF_KY3_1
SPA TSAZ
// OF=1; weitere Abtastungen
TS31: TAK
L 142
>I
SPB TS32
L 1
T #OF_KY3_1
SPA TSAZ
// OF=2; letzte Abtastung und Regelschritt
TS32: TAK
L 143
>I
SPB TS33

```

```

        L      2
        T      #OF_KY3_1
        SPA    TSAZ

// KY-3.2
// oooooo
// OF=0; Ausgabe des ersten Abtastwertes
TS33: TAK
        L      144
        >I
        SPB    TS34
        L      0
        T      #OF_KY3_2
        SPA    TSAZ
// OF=1; weitere Abtastungen
TS34: TAK
        L      155
        >I
        SPB    TS35
        L      1
        T      #OF_KY3_2
        SPA    TSAZ
// OF=2; letzte Abtastung und Regelschritt
TS35: TAK
        L      156
        >I
        SPB    TS36
        L      2
        T      #OF_KY3_2
        SPA    TSAZ

// QP-4.1
// oooooo
// OF=0; Ausgabe des ersten Abtastwertes
TS36: TAK
        L      157
        >I
        SPB    TS37
        L      0
        T      #OF_QP4_1
        SPA    TSAZ
// OF=1; weitere Abtastungen
TS37: TAK
        L      168
        >I
        SPB    TS38
        L      1
        T      #OF_QP4_1
        SPA    TSAZ
// OF=2; letzte Abtastung und Regelschritt
TS38: TAK
        L      169
        >I
        SPB    TS39
        L      2
        T      #OF_QP4_1
        SPA    TSAZ

// QP-4.2
// oooooo
// OF=0; Ausgabe des ersten Abtastwertes
TS39: TAK
        L      170
        >I
        SPB    TS40
        L      0
        T      #OF_QP4_2
        SPA    TSAZ

TS40: TAK
        L      181
        >I
        SPB    TS41
        L      1
        T      #OF_QP4_2
        SPA    TSAZ
// OF=2; letzte Abtastung und Regelschritt
TS41: TAK
        L      182
        >I
        SPB    TS42
        L      2

```

t

```

T      #OF_QP4_2
SPA    TSAZ

// Im Schritt 183 bis 184 werden die Handeinstellwerte ausgegeben.
// Der Optimierungsalgorithmus (FC107) wird dabei nicht aufgerufen.

TS42: TAK
L      184
>I
SPB    TS43

// Handeinstellwerte aus DB503 ausgeben

L      "opt_SW_HAND".SW102      // Stellwert DB102 (DP2-1.1)
T      "W-DP2-1.1".STELLWERT

L      "opt_SW_HAND".SW103      // Stellwert DB103 (DP2-1.2)
T      "W-DP2-1.2".STELLWERT

L      "opt_SW_HAND".SW104      // Stellwert DB104 (DP2-2.1)
T      "W-DP2-2.1".STELLWERT

L      "opt_SW_HAND".SW105      // Stellwert DB105 (DP3-3.1)
T      "W-DP3-3.1".STELLWERT

L      "opt_SW_HAND".SW111      // Stellwert DB111 (QP1-2.1)
T      "W-QP1-2.1".STELLWERT

L      "opt_SW_HAND".SW112      // Stellwert DB112 (QP1-2.2)
T      "W-QP1-2.2".STELLWERT

L      "opt_SW_HAND".SW113      // Stellwert DB113 (QP1-4.1)
T      "W-QP1-4.1".STELLWERT

L      "opt_SW_HAND".SW114      // Stellwert DB114 (QP1-4.2)
T      "W-QP1-4.2".STELLWERT

L      "opt_SW_HAND".SW120      // Stellwert DB120 (KY1-1.1)
T      "W-KY1-1.1-(SR3-1)".STELLWERT

L      "opt_SW_HAND".SW121      // Stellwert DB121 (KY1-1.2)
T      "W-KY1-1.2-(SR3-2)".STELLWERT

L      "opt_SW_HAND".SW122      // Stellwert DB122 (KY1-1.3)
T      "W-KY1-1.3-(SR3-3)".STELLWERT

L      "opt_SW_HAND".SW123      // Stellwert DB123 (KY1-2.1)
T      "W-KY1-2.1-(SR3-4)".STELLWERT

L      "opt_SW_HAND".SW124      // Stellwert DB124 (KY1-3.1)
T      "W-KY1-3.1-(SR3-5)".STELLWERT

L      "opt_SW_HAND".SW125      // Stellwert DB125 (KY-3.2)
T      "W-KY1-3.2-(SR3-6)".STELLWERT

L      1                          // "Handwerteflag" auf 1 setzen
T      "opt_Global".Handwerteflag

BE                                          // Baustein-Ende ohne Optimierungsschritt

// Letzter Durchgang: T51 (opt_OptTime) starten und das Flag
// "opt_Global".Regelungszyklen auf Null setzen. Danach sofort ersten
// Optimierungslauf durchführen.

TS43: CLR
=      "opt_Global".Regelungszyklen

CLR
L      "opt_Global".Optimierungszeit
SV     "opt_OptTIME"

SET
L      "opt_Global".Optimierungszeit
SV     "opt_OptTIME"

SPA    OPT1

```

```
TSAZ: NOP    0
// Nach dem letzten Schritt die Zeit T51 (opt_OptTime) starten und das Flag
// "opt_Global".Regelungszyklen auf Null setzen.

// Ausführung des ermittelten Regelschrittes
// -----

// KY-1.1
CALL  "opt_SINGLE_OPT"
ADR_DB_STELLW:=W#16#78          // DB120
ADR_DB_OPT   :=W#16#26C        // DB620
O_F         :=#OF_KY1_1
MESSWERT    :="opt_Global".MESSWERT

// DP-1.1
CALL  "opt_SINGLE_OPT"
ADR_DB_STELLW:=W#16#66          // DB102

O_F         :=#OF_DP1_1
MESSWERT    :="opt_Global".MESSWERT

// KY-1.2
CALL  "opt_SINGLE_OPT"
ADR_DB_STELLW:=W#16#79          // DB121
ADR_DB_OPT   :=W#16#26D        // DB621
O_F         :=#OF_KY1_2
MESSWERT    :="opt_Global".MESSWERT

// DP-1.2
CALL  "opt_SINGLE_OPT"
ADR_DB_STELLW:=W#16#67          // DB103
ADR_DB_OPT   :=W#16#25B        // DB603
O_F         :=#OF_DP1_2
MESSWERT    :="opt_Global".MESSWERT

// KY-1.3
CALL  "opt_SINGLE_OPT"
ADR_DB_STELLW:=W#16#7A          // DB122
ADR_DB_OPT   :=W#16#26E        // DB622
O_F         :=#OF_KY1_3
MESSWERT    :="opt_Global".MESSWERT

// QP-2.1
CALL  "opt_SINGLE_OPT"
ADR_DB_STELLW:=W#16#6F          // DB111
ADR_DB_OPT   :=W#16#263        // DB611
O_F         :=#OF_QP2_1
MESSWERT    :="opt_Global".MESSWERT

// QP-2.2
CALL  "opt_SINGLE_OPT"
ADR_DB_STELLW:=W#16#70          // DB112
ADR_DB_OPT   :=W#16#264        // DB612
O_F         :=#OF_QP2_2
MESSWERT    :="opt_Global".MESSWERT

// DP-2.1
CALL  "opt_SINGLE_OPT"
ADR_DB_STELLW:=W#16#68          // DB104
ADR_DB_OPT   :=W#16#25C        // DB604
O_F         :=#OF_DP2_1
MESSWERT    :="opt_Global".MESSWERT

// KY-2.1
CALL  "opt_SINGLE_OPT"
ADR_DB_STELLW:=W#16#7B          // DB123
ADR_DB_OPT   :=W#16#26F        // DB623
O_F         :=#OF_KY2_1
MESSWERT    :="opt_Global".MESSWERT

// DP-3.1
CALL  "opt_SINGLE_OPT"
ADR_DB_STELLW:=W#16#69          // DB105
ADR_DB_OPT   :=W#16#25D        // DB605
O_F         :=#OF_DP3_1
MESSWERT    :="opt_Global".MESSWERT

// KY-3.1
CALL  "opt_SINGLE_OPT"
```

```

ADR_DB_STELLW:=W#16#7C           // DB124
ADR_DB_OPT   :=W#16#270         // DB624
O_F          :=#OF_KY3_1
MESSWERT     :="opt_Global".MESSWERT

// KY-3.2
CALL "opt_SINGLE_OPT"
ADR_DB_STELLW:=W#16#7D           // DB125
ADR_DB_OPT   :=W#16#271         // DB625
O_F          :=#OF_KY3_2
MESSWERT     :="opt_Global".MESSWERT

// QP-4.1
CALL "opt_SINGLE_OPT"
ADR_DB_STELLW:=W#16#71           // DB113
ADR_DB_OPT   :=W#16#265         // DB613
O_F          :=#OF_QP4_1
MESSWERT     :="opt_Global".MESSWERT

// QP-4.2
CALL "opt_SINGLE_OPT"
ADR_DB_STELLW:=W#16#72           // DB114
ADR_DB_OPT   :=W#16#266         // DB614
O_F          :=#OF_QP4_2
MESSWERT     :="opt_Global".MESSWERT

// Ende des Regelungsschrittes

L      0                          // "Handwerteflag" auf 0 setzen
T      "opt_Global".Handwerteflag

BE

```

Netzwerk: 6 Optimierung aller Stellgrößen

Es wird die Optimierung mit allen Stellgrößen durchgeführt. (OF = 3) Ob die einzelnen Stellgrößen zur Optimierung freigegeben sind, wird im FC 107 geprüft.

```

// KY-1.1
OPT1: CALL "opt_SINGLE_OPT"
ADR_DB_STELLW:=W#16#78           // DB120
ADR_DB_OPT   :=W#16#26C         // DB620
O_F          :=3
MESSWERT     :="opt_Global".MESSWERT

// DP-1.1
CALL "opt_SINGLE_OPT"
ADR_DB_STELLW:=W#16#66           // DB102
ADR_DB_OPT   :=W#16#25A         // DB602
O_F          :=3
MESSWERT     :="opt_Global".MESSWERT

// KY-1.2
CALL "opt_SINGLE_OPT"
ADR_DB_STELLW:=W#16#79           // DB121
ADR_DB_OPT   :=W#16#26D         // DB621
O_F          :=3
MESSWERT     :="opt_Global".MESSWERT

// DP-1.2
CALL "opt_SINGLE_OPT"
ADR_DB_STELLW:=W#16#67           // DB103
ADR_DB_OPT   :=W#16#25B         // DB603
O_F          :=3
MESSWERT     :="opt_Global".MESSWERT

// KY-1.3
CALL "opt_SINGLE_OPT"
ADR_DB_STELLW:=W#16#7A           // DB122
ADR_DB_OPT   :=W#16#26E         // DB622
O_F          :=3
MESSWERT     :="opt_Global".MESSWERT

// QP-2.1
CALL "opt_SINGLE_OPT"
ADR_DB_STELLW:=W#16#6F           // DB111
ADR_DB_OPT   :=W#16#263         // DB611
O_F          :=3
MESSWERT     :="opt_Global".MESSWERT

// QP-2.2
CALL "opt_SINGLE_OPT"
ADR_DB_STELLW:=W#16#70           // DB112

```

```
ADR_DB_OPT      :=W#16#264          // DB612
O_F             :=3
MESSWERT       :="opt_Global".MESSWERT

// DP-2.1
CALL "opt_SINGLE_OPT"
ADR_DB_STELLW:=W#16#68          // DB104
ADR_DB_OPT   :=W#16#25C        // DB604
O_F          :=3
MESSWERT     :="opt_Global".MESSWERT

// KY-2.1
CALL "opt_SINGLE_OPT"
ADR_DB_STELLW:=W#16#7B          // DB123
ADR_DB_OPT   :=W#16#26F        // DB623
O_F          :=3
MESSWERT     :="opt_Global".MESSWERT

// DP-3.1
CALL "opt_SINGLE_OPT"
ADR_DB_STELLW:=W#16#69          // DB105
ADR_DB_OPT   :=W#16#270        // DB624
O_F          :=3
MESSWERT     :="opt_Global".MESSWERT

// KY-3.1
CALL "opt_SINGLE_OPT"
ADR_DB_STELLW:=W#16#7C          // DB124
ADR_DB_OPT   :=W#16#270        // DB624
O_F          :=3
MESSWERT     :="opt_Global".MESSWERT

// KY-3.2
CALL "opt_SINGLE_OPT"
ADR_DB_STELLW:=W#16#7D          // DB125
ADR_DB_OPT   :=W#16#271        // DB625
O_F          :=3
MESSWERT     :="opt_Global".MESSWERT

// QP-4.1
CALL "opt_SINGLE_OPT"
ADR_DB_STELLW:=W#16#71          // DB113
ADR_DB_OPT   :=W#16#265        // DB613
O_F          :=3
MESSWERT     :="opt_Global".MESSWERT

// QP-4.2
CALL "opt_SINGLE_OPT"
ADR_DB_STELLW:=W#16#72          // DB114
ADR_DB_OPT   :=W#16#266        // DB614
O_F          :=3
MESSWERT     :="opt_Global".MESSWERT

L      0          // "Handwerteflag" auf 0 setzen
T      "opt_Global".Handwerteflag

BE
```

FC107:

```

FC107 - <offline>
"opt_SINGLE_OPT"      Ablauf der Korr.-Optimierung einer einzelnen Stellgröße
Name:                 Familie:
Autor:                Version: 00.01
                     Bausteinversion: 2
Zeitstempel Code:    29.08.00 15:33:15
                     Interface: 06.07.00 12:17:05
Längen (Baustein / Code / Daten): 02202 01924 00050

```

Adresse	Deklaration	Name	Typ	Anfangswert	Kommentar
0.0	in	ADR_DB_STELLW	WORD		DB-Nr. des zu
bearbeitenden					Stellwertes
2.0	in	ADR_DB_OPT	WORD		DB-Nr. des zu dieser
					Stellgröße gehörenden
4.0	in	O_F	INT		Optimierungs-DB's
					Operations-Flag; zeigt
					den durchzuführenden
					Bearbeitungsschritt
6.0	in	MESSWERT	REAL		an
					Messwert der letzten
					Abtastung
	out				
	in_out				
0.0	temp	ADR_DB_STELLW_t	WORD		Temporäre Ablage des
					Zeigers ADR_DB_STELLW
2.0	temp	ADR_DB_OPT_t	WORD		Temporäre Ablage des
					Zeigers ADR_DB_OPT
4.0	temp	STELLWERT_t	DINT		Zwischenwert der
					STELLWERT-Bestimmung
8.0	temp	VERLUST	REAL		Suchverlustistwert
12.0	temp	Y_max	REAL		Zwischenwert: Maximum
					der 3 Abtastpunkt-
					mittelwerte
16.0	temp	Y_min	REAL		Zwischenwert: Minimum
					der 3 Abtastpunkt-
					mittelwerte
20.0	temp	E_VERLUST	REAL		Verlust-Regelabweichung
					(VERLUSTSOLLWERT-VERLUST)
24.0	temp	RA	REAL		Zwischenwert Abtastsignal-
					amplitudenregelung
28.0	temp	RA_GR	REAL		Zwischenwert Abtastsignal-
					amplitudenregelung
32.0	temp	D_MESS	REAL		Messwertdifferenz zum
					vorhergehenden
Abtastschritt					
36.0	temp	D_STELLW	REAL		Stellwertdifferenz zum
					vorhergehenden Abtast-
					schritt
40.0	temp	KORR	INT		Korrelationsergebnis
					(Wertebereich: -1,0,+1)
42.0	temp	ZFS	BOOL		1-Bit-Zufalssignal
44.0	temp	ADT_OUT	REAL		Ausgabewert des T1-G1
iedes					der Integrations-
					zeitkonstantenadaption

Baustein: FC107 Optimierung Einzelstellgröße

Dieser FC enthält den Programmablauf zur Optimierung einer einzelnen Stellgröße.
 =====

ACHTUNG beim Aufruf:

Zwischen zwei Aufrufen muß

- soviel Zeit verstreichen, daß sich der Messwert auf den neuen Stellwert eingestellt hat und
- mindestens ein vollständiger SPS-Zyklus liegen, da erst am Ende eines Zyklus die Stellwerte ausgegeben werden und fast gleichzeitig die neuen Messwerte eingelesen werden.

Folgende Schritte werden durch diesen FC ausgeführt:

- Schrittzähler erhöhen / Optimierungszustand EIN/AUS behandeln
- Stellwert- und Messwertdifferenzen bestimmen
- Regelung der Testsignalamplitude

Zur Steuerung der Betriebszustände Testsignalamplitudenregelung und Optimierung gibt es ein Operation-Flag OF, daß dieser Funktion übergeben werden muß.

Dieses Flag kann folgende Werte annehmen:

OF-Wert	Bedeutung
-1	nichts tun; Ausgabewert == Integratorwert
0	Erster Schritt: Ausgabe des ersten Abtastwertes
1	Meßwertablage und nächster Abtastschritt
2	Meßwertablage, Mittelwertbestimmung, Optimierungsverluste bestimmen
3	und Regelschritt der Testsignalamplitude Optimierungsschritt

Netzwerk: 1 Pointer temporär ablegen

Zur indirekten Adressierung müssen die übergebenen Zeiger in temporäre Variablen abgelegt werden.

```
L   #ADR_DB_STELLW
T   #ADR_DB_STELLW_t

L   #ADR_DB_OPT
T   #ADR_DB_OPT_t
```

```
//                                     offener DB: keiner
```

Netzwerk: 2 Schrittzähler erhöhen / Beenden bei Zustand "AUS"

Der Schrittzähler wird erhöht, wenn die Optimierung für diese Stellgröße freigegeben ist. Ist die Freigabe nicht erteilt, wird
 - der Schrittzähler auf Null gesetzt
 - der Integratorwert mit dem anliegenden Stellwert überschrieben und
 - der FC beendet
 Der Schrittzähler ist ein Doppelwort und dient nur der Information. Ein Überlauf wird nicht überwacht.

```
AUF  DB [#ADR_DB_OPT_t]
```

```
UN   DBX   0.0           // Optimierung "AUS"?
SPB  SZE1
```

```
// Optimierung eingeschaltet
```

```
L   DBD   2           // SCHRITT_NR inkrementieren
L   1
+D
T   DBD   2
SPA  SZE2           // -> SZE2
```

```
// Optimierung ausgeschaltet
```

```
SZE1: L   L#0           // SCHRITT_NR rücksetzen
T   DBD   2
```

```
AUF  DB [#ADR_DB_STELLW_t] // Stellwert-DB öffnen
L   DBD   4           // STELLWERT holen
AUF  DB [#ADR_DB_OPT_t]   // Optimierungs-DB öffnen
DTR  // in REAL-Wert umformen
T   DBD  100         // in INTEGRATOR schreiben
```

```
BEA // Baustein beenden
```

```
SZE2: NOP  0           // Netzwerkende
```

```
//                                     Geöffneter DB: [ADR_DB_OPT]
```

Netzwerk: 3 O_F == -1

Bei O_F == -1 wird nur der Ausgabewert mit dem Integratorwert überschrieben.

```
L   #O_F
L   -1
<>I // wenn nicht O_F == -1
SPB OFmE // dann Netzwerk umgehen
```

```
L   DBD  100           // Integratorwert holen
RND // in Ganzzahl runden
T   #STELLWERT_t
```

```
// auf Grenze beschneiden
```

```
L   DBD  66           // Stellwert-Obergrenze
<=D
```

```

        SPB   OFm1           // kleiner -> OFm1
        T     #STELLWERT_t
        DTR           // Integrator auf Grenze setzen
        T     DBD   100
        RND
        SPA   OFm3

OFm1: TAK
      L     DBD   70           // Stellwert-Untergrenze
      >=D
      SPB   OFm2
      T     #STELLWERT_t
      DTR           // Integrator auf Grenze setzen
      T     DBD   100
      RND
      SPA   OFm3

OFm2: TAK
OFm3: AUF   DB [#ADR_DB_STELLW_t] // Stellwert ausgeben
      T     DBD   4
      AUF   DB [#ADR_DB_OPT_t]

OFmE: NOP   0           // Netzwerkende

//                               Geöffneter DB: [ADR_DB_OPT]

```

Netzwerk: 4 O_F == 0 Ausgabe des ersten Abtastpunktes

Zur Regelung der Testsignalamplitude werden 3 Stellwerte abgetastet. Dieses Netzwerk wird hierbei beim ersten Schritt aufgerufen: wenn noch kein Meßwert da ist und der erste Abtastwert ausgegeben wird.

```

      L     #O_F
      L     0
      <>I           // wenn nicht O_F == 0
      SPB   OF0E           // dann Netzwerk umgehen

      L     -1
      T     DBW   104           // Lagespeicher auf -1 setzen

      L     DBD   100           // INTEGRATOR
      L     DBD   38           // + TESTSIGN_AMPL
      ABS
      -R           // -----
      RND           // (in Ganzzahl runden)
      T     #STELLWERT_t           // STELLWERT_t

// Begrenzung des Stellwertes
      L     DBD   66           // Stellwert-Obergrenze
      <=D
      SPB   OF01           // kleiner -> OF01
      T     #STELLWERT_t
      DTR           // Integrator auf Grenze setzen
      T     DBD   100
      RND
      SPA   OF03

OF01: TAK
      L     DBD   70           // Stellwert-Untergrenze
      >=D
      SPB   OF02           // größer -> OF0E
      T     #STELLWERT_t
      DTR           // Integrator auf Grenze setzen
      T     DBD   100
      RND
      SPA   OF03

OF02: TAK
OF03: AUF   DB [#ADR_DB_STELLW_t] // Stellwert-DB
      T     DBD   4           // Stellwert ausgeben
      AUF   DB [#ADR_DB_OPT_t]

OF03: NOP   1
//                               Geöffneter DB: [ADR_DB_OPT]

```

Netzwerk: 5 O_F == 1; Abtastung für Testsignalamplitudenregelung

Es werden die nacheinander die 3 Punkte LINKS MITTE und RECHTS dem Integratorwert abgetastet, um später die Suchverluste zu bestimmen.

```

      L     #O_F

```

```

L      1
<>I                               // wenn nicht O_F == 1
SPB   OF1E                         // dann Netzwerk umgehen

// linker Abtastschritt
L      DBW 104                     // LG
L      -1
<>I                               // ungleich -1
SPB   OF11                         // -> OF11

L      DBD 14                      // Y_m1
L      #MESSWERT                  // + MESSWERT
+R                                         // -----
T      DBD 14                      // Y_m1

L      DBD 106                    // ZM1
L      1.000000e+000              // inkrementieren
+R
T      DBD 106

SPA   OF13

// mittlerer Abtastschritt
OF11: L      DBW 104               // LG
L      0
<>I                               // ungleich 0
SPB   OF12                         // -> OF12

L      DBD 18                     // Y_0
L      #MESSWERT                  // + MESSWERT
+R                                         // -----
T      DBD 18                     // Y_0

L      DBD 110                    // Z0
L      1.000000e+000              // inkrementieren
+R
T      DBD 110

SPA   OF13

// rechter Abtastschritt
OF12: L      DBW 104               // LG
L      1
<>I                               // ungleich 1
SPB   OF13                         // -> OF13

L      DBD 22                     // Y_p1
L      #MESSWERT                  // + MESSWERT
+R                                         // -----
T      DBD 22                     // Y_p1

L      DBD 114                    // ZP1
L      1.000000e+000              // inkrementieren
+R
T      DBD 114

// (sonst: kein oder falsch deklarerter Abtastschritt)

// neue Abtastlage (-position links, Mitte, rechts)
// bestimmen (-1 -> 0 -> 1 -> -1 ...)
OF13: L      DBW 104               // LG
L      1                           // + 1
+I                                         // ----

L      1
<=I                               // kein Überlauf
TAK                                         // neuen LG-Wert zurückholen
SPB   OF14                         // -> OF14

// Überlauf: LG = -1
L      -1

OF14: T      DBW 104               // in LG ablegen

// neuen Stellwert ausgeben

L      DBD 100                    // INTEGRATOR
L      DBD 38                     // - TESTSIGN_AMPL
-R                                         // -----
RND                                         // (in Ganzzahl runden)
T      #STELLWERT_t               // STELLWERT_t (linker Schritt)

```

```

L      DBW  104          // LG == -1  -> Ende
L      -1
==I
SPB    OF15

L      DBD  100          // INTEGRATOR
RND    // (als Ganzzahl)
T      #STELLWERT_t     // STELLWERT_t

L      DBW  104          // LG == 0  -> Ende
L      0
==I
SPB    OF15

L      DBD  100          // INTEGRATOR
L      DBD  38           // + TESTSIGN_AMPL
+R     // -----
RND    // (als Ganzzahl)
T      #STELLWERT_t     // STELLWERT_t

// auf Grenze beschneiden
OF15: L      #STELLWERT_t
L      DBD  66           // Stellwert-Obergrenze
<=D
SPB    OF16             // kleiner -> OFm1
T      #STELLWERT_t
DTR    // Integrator auf Grenze setzen
T      DBD  100
RND
SPA    OF18

OF16: TAK
L      DBD  70           // Stellwert-Untergrenze
>=D
SPB    OF17             // größer -> OFm2
T      #STELLWERT_t
DTR
T      DBD  100
RND
SPA    OF18

OF17: TAK
OF18: AUF  DB [#ADR_DB_STELLW_t]
T      DBD  4           // Stellwert ausgeben
AUF    DB [#ADR_DB_OPT_t]

OF1E: NOP  0
//          Geöffneter DB: [ADR_DB_OPT]

```

Netzwerk: 6 Testsignalamplitudenregelungsschritt bei O_F == 2

Es wird der Messwert vom letzten Abtastschritt verarbeitet und dann mit den Mittelwerten der Abtastpunkte ein Regelungsschritt der Testsignalamplitude ausgeführt.

```

L      #O_F
L      2
<>I          // wenn nicht O_F == 2
SPB    OF2E     // dann Netzwerk umgehen

// Einlesen und Ablage des letzten Meßwertes
// =====

// linker Abtastschritt
L      DBW  104          // LG
L      -1
<>I          // ungleich -1
SPB    OF21           // -> OF21

L      DBD  14           // Y_m1
L      #MESSWERT        // + MESSWERT
+R     // -----
T      DBD  14           // Y_m1

L      DBD  106          // ZM1
L      1.000000e+000    // inkrementieren
+R
T      DBD  106
SPA    OF23

```

```

// mittlerer Abtastschritt
OF21: L   DBW  104           // LG
      L   0
      <>I           // ungleich 0
      SPB  OF22           // -> OF22

      L   DBD  18           // Y_0
      L   #MESSWERT       // + MESSWERT
      +R           // -----
      T   DBD  18           // Y_0

      L   DBD  110          // Z0
      L   1.000000e+000    // inkrementieren
      +R
      T   DBD  110
      SPA  OF23

// rechter Abtastschritt
OF22: L   DBW  104           // LG
      L   1
      <>I           // ungleich 1
      SPB  OF23           // -> OF23

      L   DBD  22           // Y_p1
      L   #MESSWERT       // + MESSWERT
      +R           // -----
      T   DBD  22           // Y_p1

      L   DBD  114          // ZP1
      L   1.000000e+000    // inkrementieren
      +R
      T   DBD  114

// (sonst: kein oder falsch deklarerierter Abtastschritt=

// Bestimmung der Mittelwerte aus den Summen der Abtastmesswerte
// Y_m1, Y_0, Y_p1 und den zugehörigen Zählern ZM1, Z0 und ZP1.
// =====

OF23: L   DBD  14           // Y_m1
      L   DBD  106          // dividiert durch ZM1
      /R
      T   DBD  14           // und in Y_m1 ablegen.

      L   DBD  18           // Y_0
      L   DBD  110          // dividiert durch Z0
      /R
      T   DBD  18           // und in Y_0 ablegen.

      L   DBD  22           // Y_p1
      L   DBD  114          // dividiert durch ZP1
      /R
      T   DBD  22           // und in Y_p1 ablegen.

// Bestimmung des Suchverlustes
// =====

// Test, ob überhaupt Suchverluste messbar waren
      L   DBD  14           // Y_m1
      L   DBD  18           // +Y_0
      +R
      L   DBD  22           // +Y_p1
      +R
      L   0.000000e+000
      <>R           // wenn ungl. Null -> weiter
      SPB  OF24

// sonst: Annahme Suchverluste sind 50% vom Sollwert
// (führt zu einer kontinuierlichen Vergrößerung der Testsignalamplitude)
      L   DBD  30           // VERLUSTSOLLWERT als Teil von 1
      L   5.000000e-001    // mal 0.5 (entspr. 50%)
      *R
      T   #VERLUST
      SPA  OF25           // -> weiter mit Bestimmung

Regelabweichung

// Suchverluste berechnen
OF24: CALL "opt_min3"
      x1 :=DBD14
      x2 :=DBD18

```

```

x3      :=DBD22
x_min:=#Y_min

CALL "opt_max3"
x1      :=DBD14
x2      :=DBD18
x3      :=DBD22
x_max:=#Y_max

L      #Y_min          // VERLUST = 1 - Ymin/Y_max
L      #Y_max
/R
L      1.000000e+000
TAK
-R
T      #VERLUST

// Regelabweichung bestimmen
// =====
in OF25: L      DBD      30          // VERLUSTSOLLWERT (als Teil von 1; nicht
//                                     %!)
L      #VERLUST
-R
T      #E_VERLUST

// Bestimmung der Kleinsignalverstaerkung
// =====
L      DBD      38          // TESTSIGN_AMPL
L      0.000000e+000      // gleich Null?
==R
SPB    OF26          // ja -> OF26          (Kleinsignalverstärkung wird
// gehalten)

// 2*VERLUSTSOLLWERT/100/TESTSIGN_AMPL
L      2.000000e+000      // 2
L      DBD      30          // VERLUSTSOLLWERT
*R      // *
L      DBD      38          // TESTSIGN_AMPL
/R      // /
T      DBD      34          // V_KLEINSIGNAL

// Proportionalglied zum Ausgleich der Streckenverstärkung
// =====
OF26: L      DBD      34          // V_KLEINSIGNAL
L      0.000000e+000      // wenn Null, dann wird nicht normiert
==R
SPB    OF27

// Normierung
L      #E_VERLUST
L      DBD      34
/R      // E_VERLUST / V_KLEINSIGNAL
T      #E_VERLUST

// I-Regler mit Begrenzung der Änderungsgeschwindigkeit
// =====
OF27: L      #E_VERLUST      // aus E_VERLUST und
L      DBD      50          // TSRZ die neu auf den Integrator zu
/R      // addierende Größe bilden
T      #RA

L      DBD      38          // TESTSIGN_AMPL
L      1.000000e+001      // durch 10
/R
ABS      // Betrag davon (ist eigentlich nicht nötig
// da TESTSIGN_AMPL positiv sein sollte)
T      #RA_GR

// Begrenzung
L      #RA
>=R      // Wenn RA < RA_GR -> OF28
SPB    OF28
TAK      // sonst RA := RA_GR
T      #RA
SPA    OF29

OF28: L      #RA_GR          // RA in AKKU2
NEGR      // -RA_GR in AKKU1

```

```

    >=R                                // WENN RA >= -RA_GR -> OF29
    SPB  OF29
    T    #RA                            // sonst: RA := -RA_GR

OF29: L  #RA                            // TESTSIGN_AMPL = RA + TESTSIGN_AMPL
      L  DBD  38
      +R
      T  DBD  38

// Begrenzung der Testsignalamplitude auf Ober- und Untergrenze
      L  DBD  42                        // wenn < TESTSIGN_AMPL_UGR,
      >=R                                // dann Untergrenze ablegen
      SPB  OF2a
      T    DBD  38

OF2a: TAK                                // TESTSIGN_AMPL zurückholen
      L  DBD  46                        // wenn > TESTSIGN_AMPL_OGR
      <=R                                // dann Obergrenze ablegen
      SPB  OF2b
      T    DBD  38

// Initialisierung der Variablen für nächsten Abtastschritt
// =====
OF2b: L  0.000000e+000
      T  DBD  18                        // Y_0
      T  DBD  14                        // Y_m1
      T  DBD  22                        // Y_pl
      T  DBD  110                       // Z0
      T  DBD  106                       // ZM1
      T  DBD  114                       // ZP1

      SET                                // VKE setzen
      =  DBX  0.3                       // INIT_F setzen (Initialisierungsschritt
//                                     im nachfolgenden Teil (O_F ==
// 3) )

// Stellwert auf Integratorwert setzen
      L  DBD  100                       // Integratorwert holen
      RND                                // auf Ganzzahl runden
      T  #STELLWERT_t

// auf Grenze beschneiden
      L  DBD  66                        // Stellwert-Obergrenze
      <=D
      SPB  OF2c
      T  #STELLWERT_t
      DTR                                // Integrator auf Grenze setzen
      T  DBD  100
      RND
      SPA  OF2d

OF2c: TAK                                // Stellwert-Untergrenze
      L  DBD  70
      >=D
      SPB  OF2d                          // größer -> OFm2
      T  #STELLWERT_t
      DTR                                // Integrator auf Grenze setzen
      T  DBD  100
      RND

OF2d: L  #STELLWERT_t
      AUF  DB [#ADR_DB_STELLW_t]
      T  DBD  4                          // Stellwert ausgeben
      AUF  DB [#ADR_DB_OPT_t]

OF2E: NOP  0
//                                     Geöffneter DB: [ADR_DB_OPT]

```

Netzwerk: 7 Optimierungsschritt bei O_F gleich 3

Bei der Polaritätskorrelation in diesem Schritt werden die Differenzen der Stell- und Messwerte logisch ausgewertet.

Es gilt folgende Logiktablelle:

KORR	D_STELLW		
	<0	=0	>0
<0	1	0	-1
D_MESS =0	0	0	0
>0	-1	0	1

```

// Prüfen ob O_F == 3
// =====
L      #O_F
L      3
<>I
SPB   OF3E                // wenn nicht O_F == 3
                        // dann Netzwerk umgehen

// Folgende Schritte nur, wenn INIT_F nicht gesetzt
// -----
SET
U     DBX    0.3          // Wenn Initialisierungsschritt,
SPB   OF31                // dann den ersten Teil umgehen.

// Bestimmung der Differenzen für Stell- und Meßwert
// =====

// Messwertdifferenz
L      #MESSWERT          // MESSWERT
L      DBD    6           // - MESSW_ml
-R
T      #D_MESS            // D_MESS

// Stellwertdifferenz
AUF   DB [#ADR_DB_STELLW_t]
L      DBD    4           // Stellwert
AUF   DB [#ADR_DB_OPT_t]
DTR
L      DBD    10          // (Stellwert in Gleitpunktzahl wandeln)
                        // - vorh. Stellwert (STELLW_ml)
RND
DTR
-R
T      #D_STELLW          // (als ganze Gleitpunktzahl)
                        // -----
                        // D_STELLW (Stellwertdifferenz)

// Ausführung der Korrelation
// =====

L      0                  // Initialisierung für die Fälle
T      #KORR              // in denen KORR gleich Null ist

// D_MESS und D_STELL grösser Null
// -----
L      #D_MESS
L      0.000000e+000
<=R
SPB   OF33

L      #D_STELLW
L      0.000000e+000
<=R
SPB   OF33

L      1
T      #KORR
SPA   OF32

// D_MESS und D_STELL kleiner Null
// -----
OF33: L      #D_MESS
L      0.000000e+000
>=R
SPB   OF34

L      #D_STELLW
L      0.000000e+000
>=R
SPB   OF34

L      1
T      #KORR
SPA   OF32

```

```

// D_MESS kleiner Null und D_STELL größer Null
// -----
OF34: L      #D_MESS
      L      0.000000e+000
      >=R
      SPB    OF35

      L      #D_STELLW
      L      0.000000e+000
      <=R
      SPB    OF35

      L      -1
      T      #KORR
      SPA    OF32

// D_MESS größer Null und D_STELL kleiner Null
// -----
OF35: L      #D_MESS
      L      0.000000e+000
      <=R
      SPB    OF31

      L      #D_STELLW
      L      0.000000e+000
      >=R
      SPB    OF31

      L      -1
      T      #KORR

// Integration des Stellwertes
// =====
OF32: L      #KORR
      ITD
      DTR
      L      DBD    54
      *R
      L      DBD    100
      +R
      T      DBD    100
// wandeln in 32Bit-Ganzzahl
// wandeln in REAL
// INT_FAK
// Multiplizieren
// auf INTEGRATOR addieren

// Für alle Schritte
// -----
als OF31: CLR
      =      DBX    0.3
// Initialisierung für zukünftige Aufrufe
// beendet markieren.

      CALL "opt_PSEUDO_ZFG"
      maxMask:=DBD78
      xorMask:=DBD82
      ZFS      :=#ZFS
      SR      :=DBD74

      SET
      U      #ZFS
      SPB    OF36
// wenn Zufallssignal gesetzt, dann
// -> OF36

// Zufallssignalbit gleich Null => linker Abtastpunkt
      L      DBD    100
      L      DBD    38
      -R
      RND
      T      #STELLWERT_t
      SPA    OF37
// INTEGRATOR
// - TESTSIGN_AMPL
// -----
// STELLWERT_t

// Zufallssignalbit gleich Eins => rechter Abtastpunkt
OF36: L      DBD    100
      L      DBD    38
      +R
      RND
      T      #STELLWERT_t
// INTEGRATOR
// + TESTSIGN_AMPL
// -----
// (als Ganzzahlwert)
// STELLWERT_t

// Werte für nächsten Zyklus weiterschieben/merken
OF37: L      #MESSWERT
      T      DBD    6
      AUF    DB [#ADR_DB_STELLW_t]
      L      DBD    4
      AUF    DB [#ADR_DB_OPT_t]
      DTR
      T      DBD    10
// MESSW_ml
// bisherigen Stellwert holen
// in Gleitkommazahl wandeln
// STELW_ml

```

```

// Stellwert begrenzen und ausgeben
L      #STELLWERT_t
L      DBD    66           // Stellwert-Obergrenze
<=D
SPB    OF38           // kleiner -> OFm1
T      #STELLWERT_t
DTR    DBD    100        // Integrator auf Grenze setzen
RND
SPA    OF39

OF38: TAK
L      DBD    70           // Stellwert-Untergrenze
>=D
SPB    OF39           // größer -> OFm2
T      #STELLWERT_t
DTR    DBD    100        // Integrator auf Grenze setzen
RND

OF39: L      #STELLWERT_t
AUF    DB [#ADR_DB_STELLW_t]
T      DBD    4           // Stellwert ausgeben
AUF    DB [#ADR_DB_OPT_t]

// Adaption der Korrelationszeitkonstante
// =====

// Fehlervorbeugung: Begrenzung des Wertes DBD90 = ADT_MITTELWERT auf die
// Schranken 0 und 1.

L      DBD    90
L      0.000000e+000
>=R
SPB    OF3a
T      DBD    90
SPA    OF3b

OF3a: TAK
L      1.000000e+000
<=R
SPB    OF3b
T      DBD    90

// T1-Glied auf das Korrelationsergebnis anwenden:
OF3b: CALL "opt_T1GlieD"
      Eingang      :=#KORR
      Zeitkonstante:=DBD86
      Ausgang      :=#ADT_OUT
      Speicher      :=DBD90

// Grenzen ablegen
L      DBD    38
L      1.500000e+000      // geändert, vorher wie in der Simulation:
4
      *R
T      DBD    58           // INT_FAK_OGR

L      DBD    38
L      2.000000e-001      // geändert, vorher wie in der Simulation:
0.5
      *R
T      DBD    62           // INT_FAK_UGR
// Bestimmung von INT_FAK nach Variante 1:
L      #ADT_OUT
ABS
L      1.000000e-001
>=R
SPB    OF3c

// Betrag < 0.1
L      DBD    62           // INT_FAK_UGR
T      DBD    54           // INT_FAK
SPA    OF3d

OF3c: L      DBD    58           // INT_FAK_OGR
L      DBD    62           // INT_FAK_UGR
-R
T      DBD    54           // Zwischenwert in INT_FAK speichern
//neu
L      #ADT_OUT
ABS

```

```
L      1.000000e-001      //neu
-R
L      1.111000e+000      //neu
*R
L      DBD    54          //neu Zwischenwert wieder holen
*R
L      DBD    62          // INT_FAK_UGR
+R
T      DBD    54          // INT_FAK

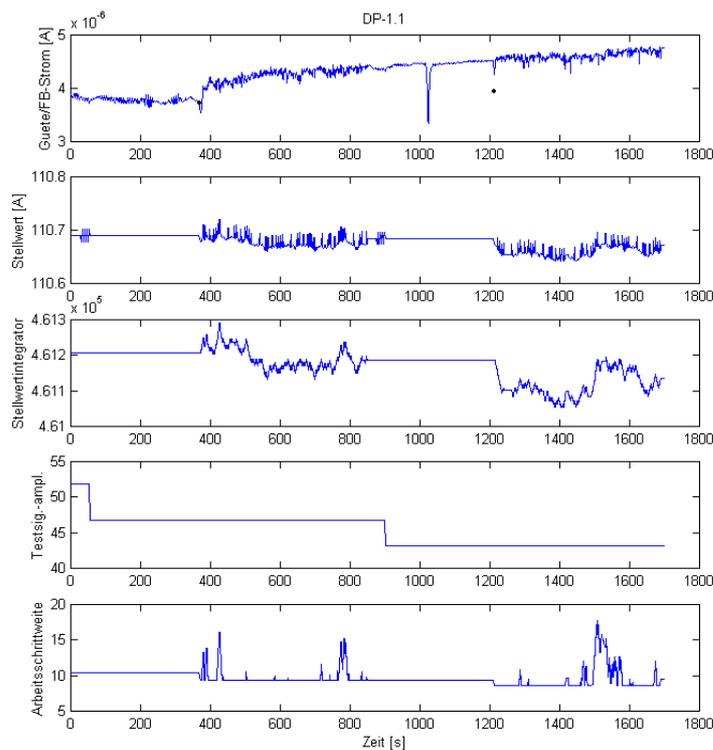
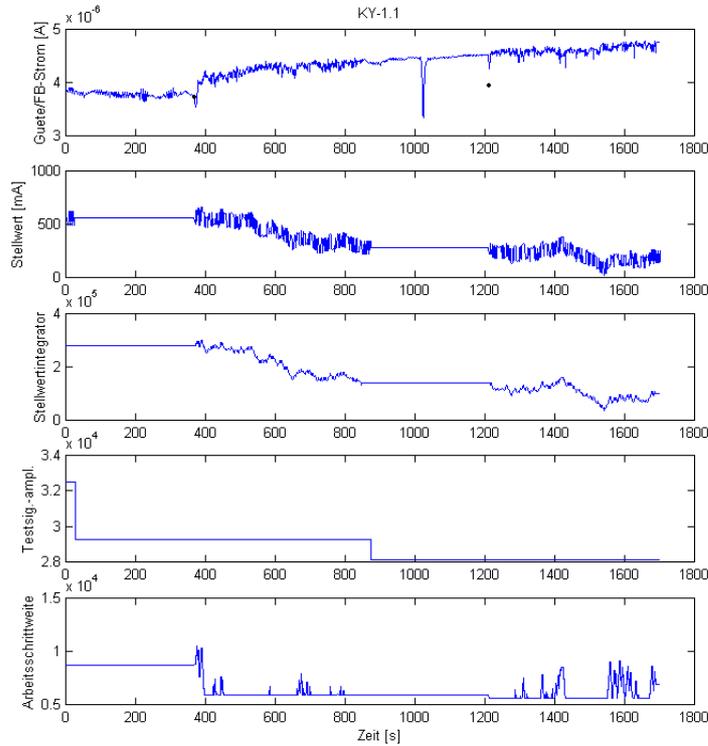
// Sicherheitshalber begrenzen:
OF3d: L      DBD    54          // INT_FAK
      L      DBD    58          // INT_FAK_OGR
      <=R
      SPB    OF3f
      T      DBD    54
      SPA    OF3g

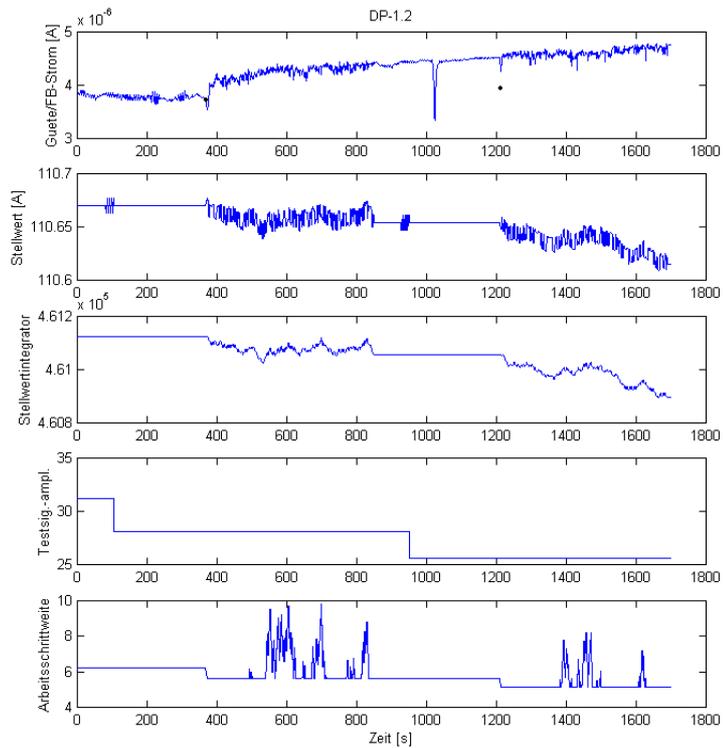
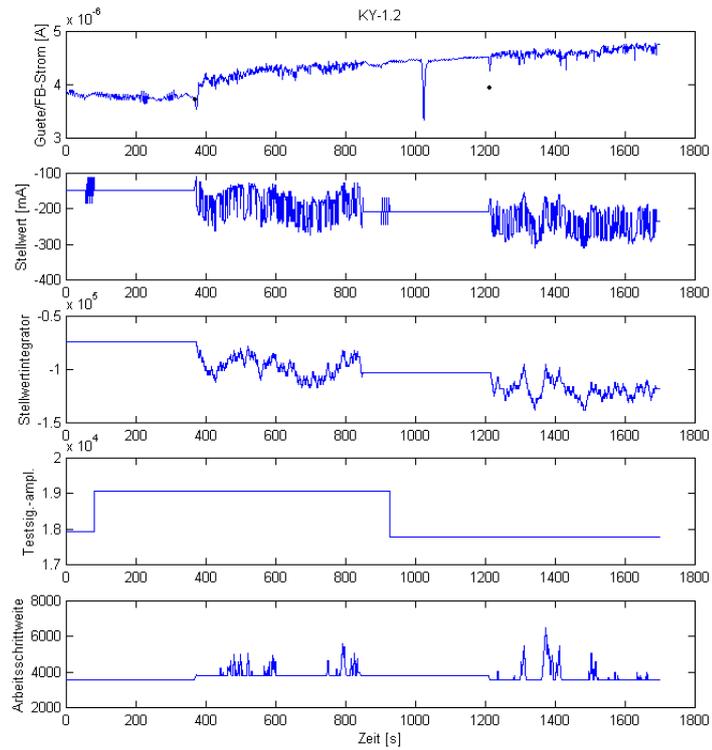
OF3f: TAK
      L      DBD    62          // INT_FAK_UGR
      >=R
      SPB    OF3g
      T      DBD    54

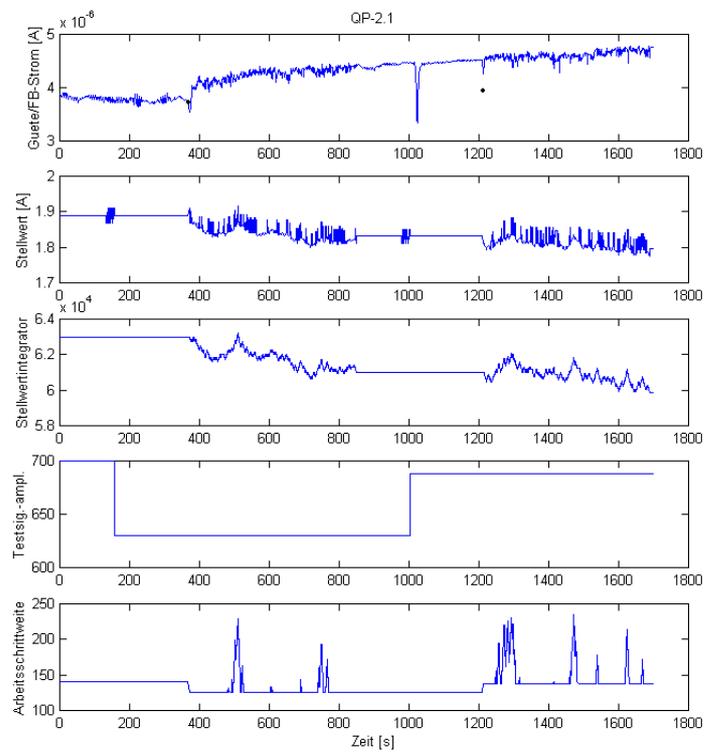
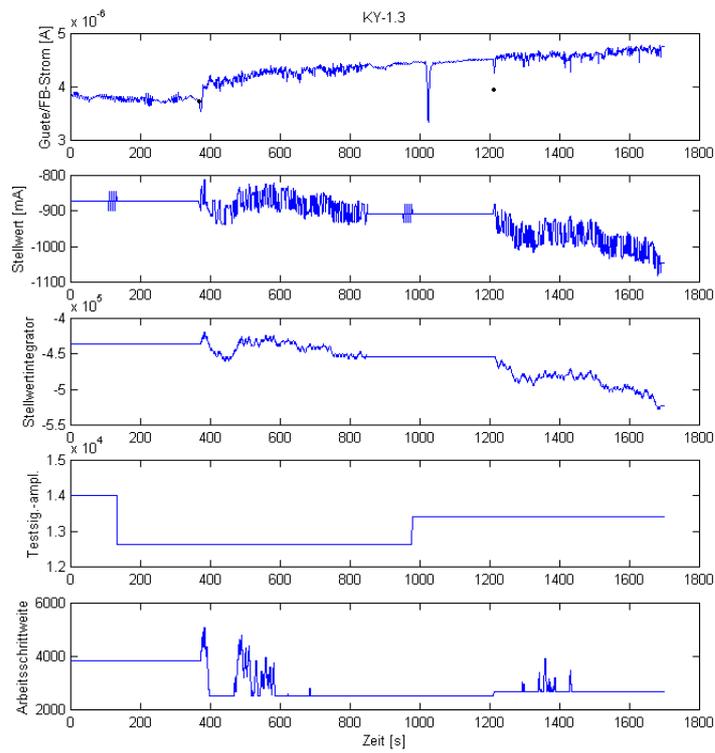
OF3g: NOP    0

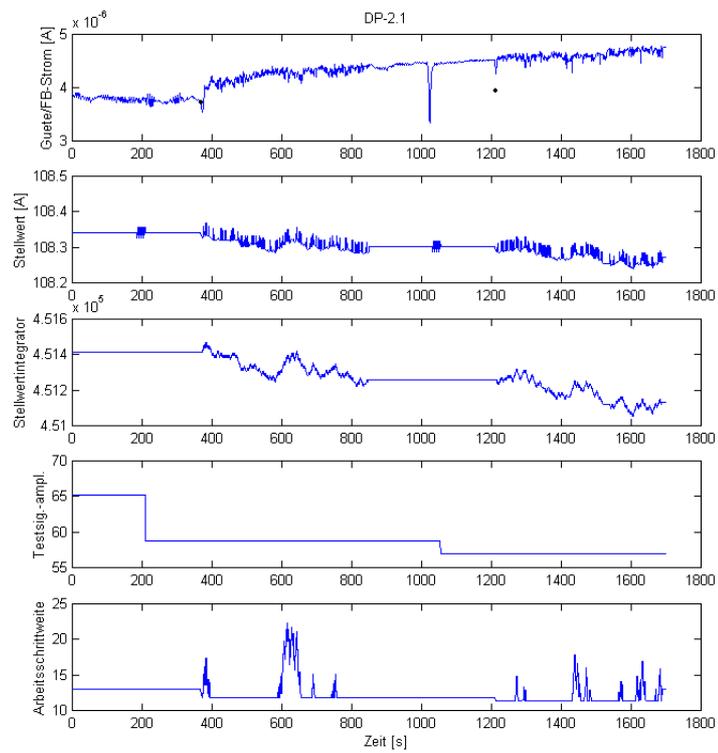
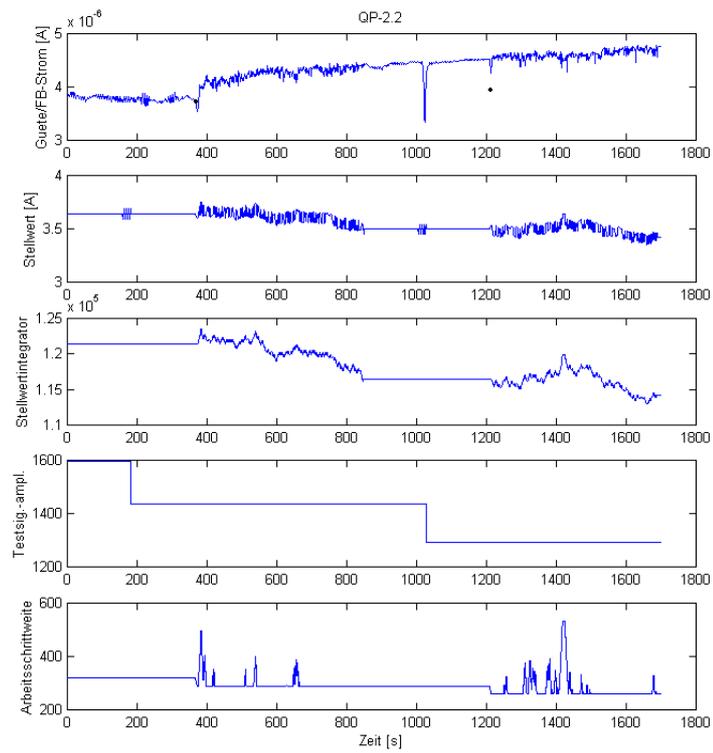
// Ende von O_F == 3
OF3E: NOP    0
```

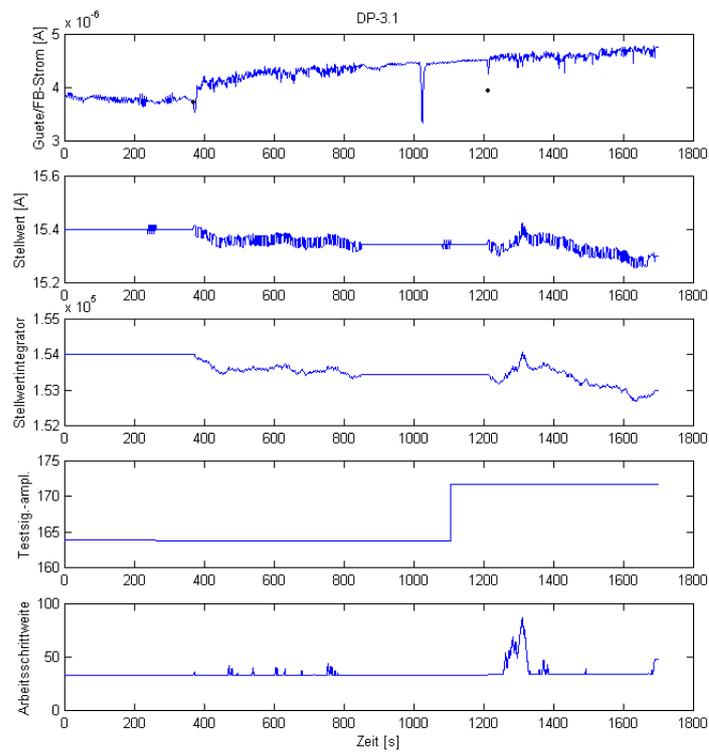
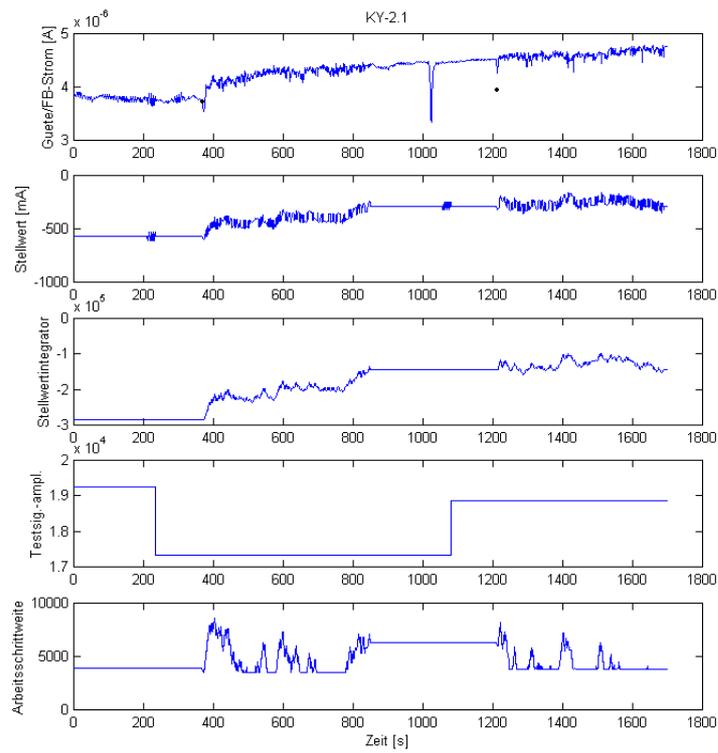
Anlage 17: Versuchsergebnisse aus dem zuerst beschriebenen Versuch in Kapitel 4.2.2

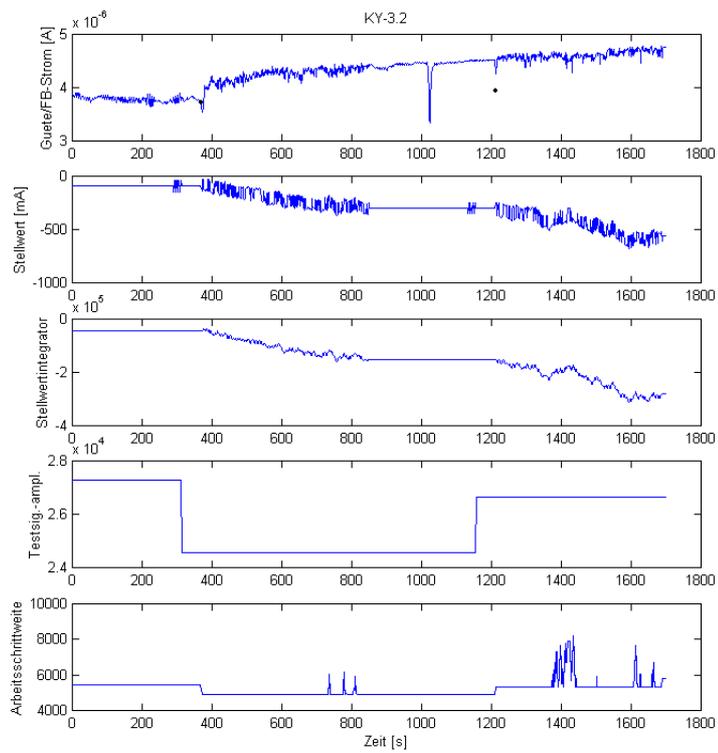
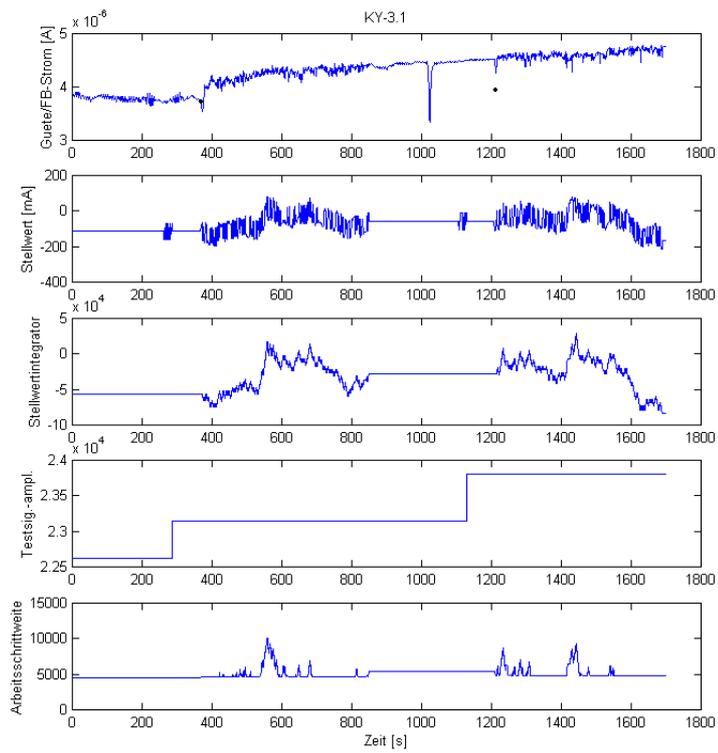


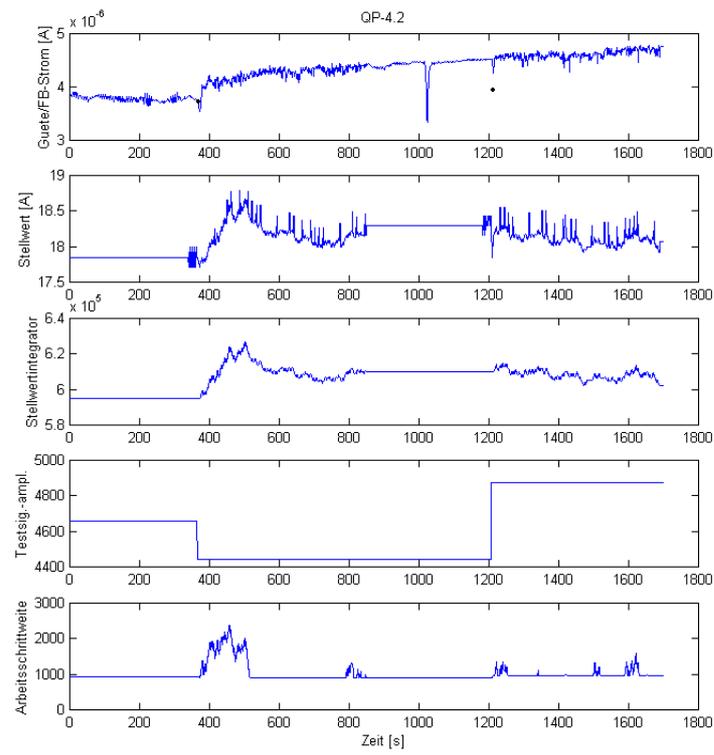




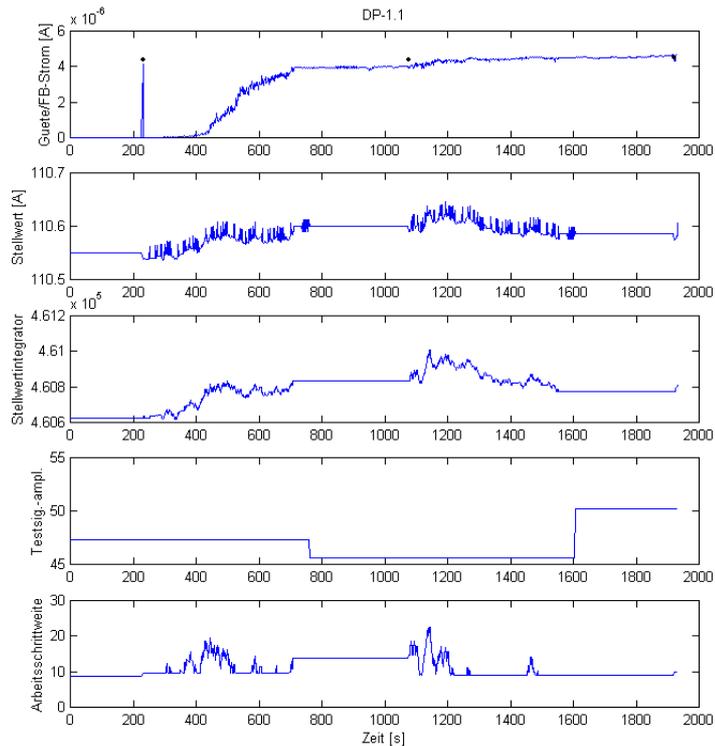
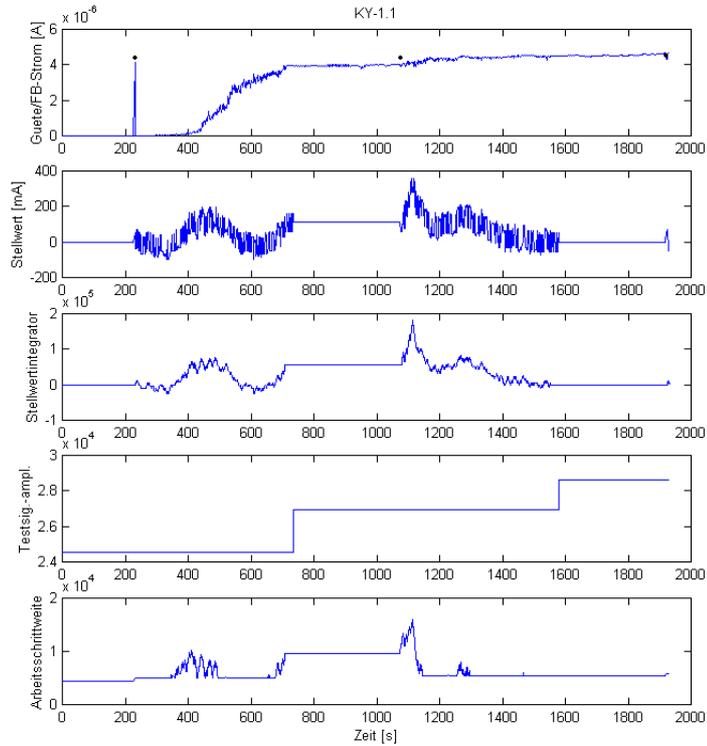


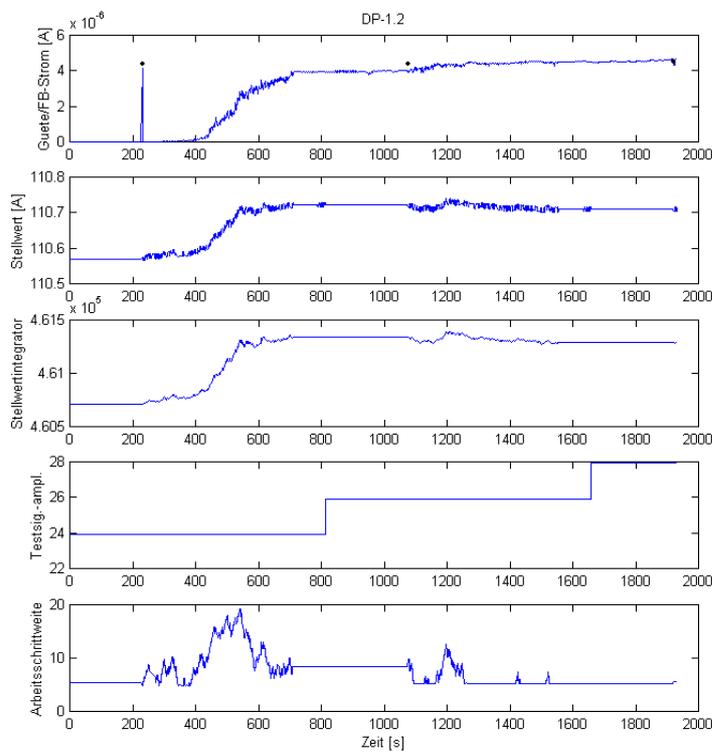
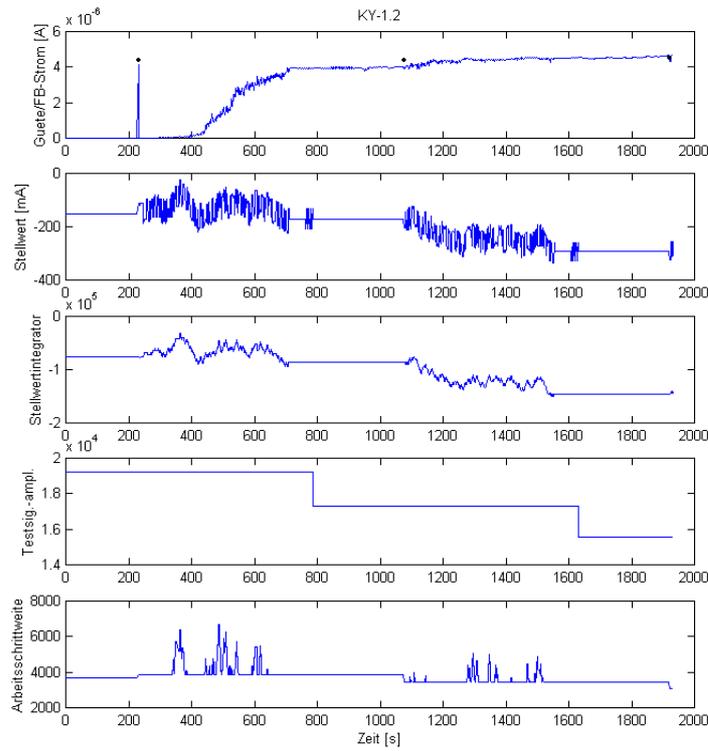


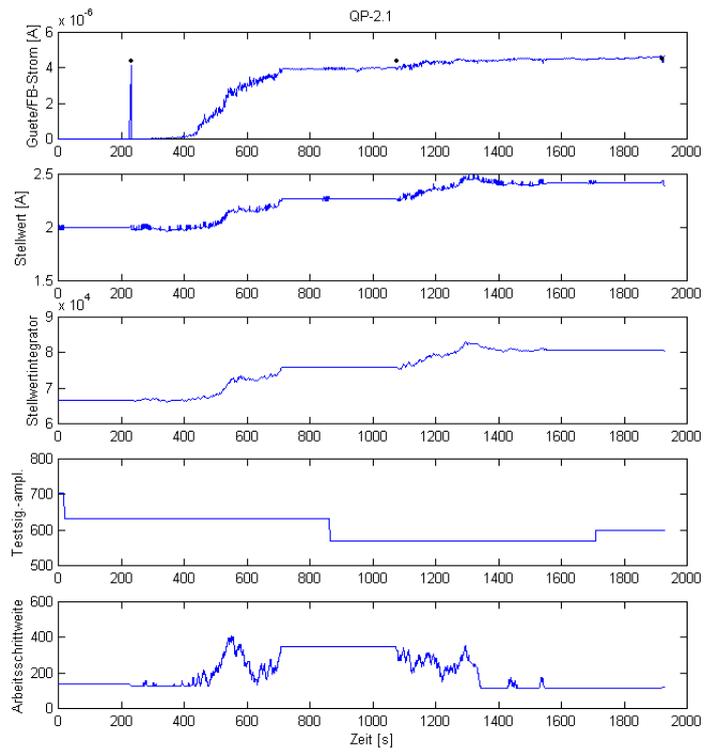
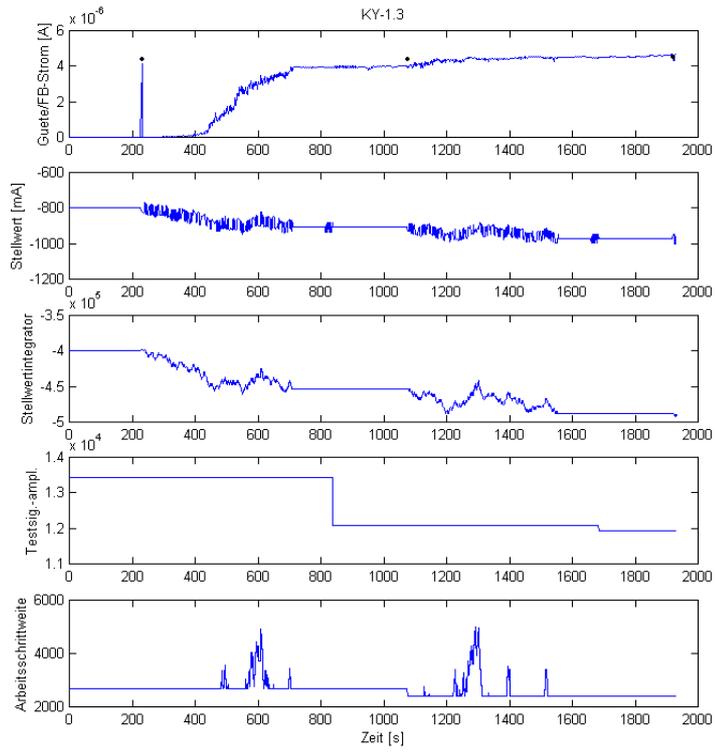


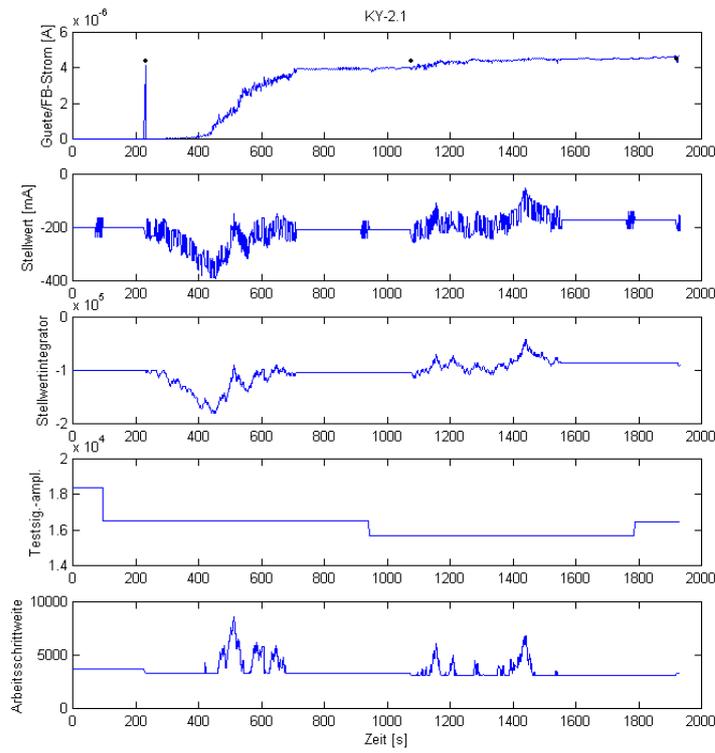
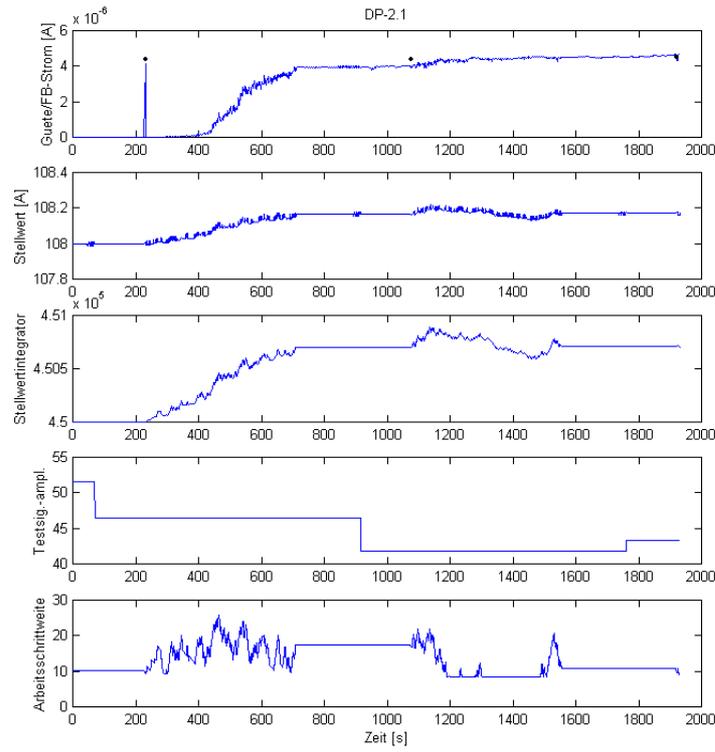


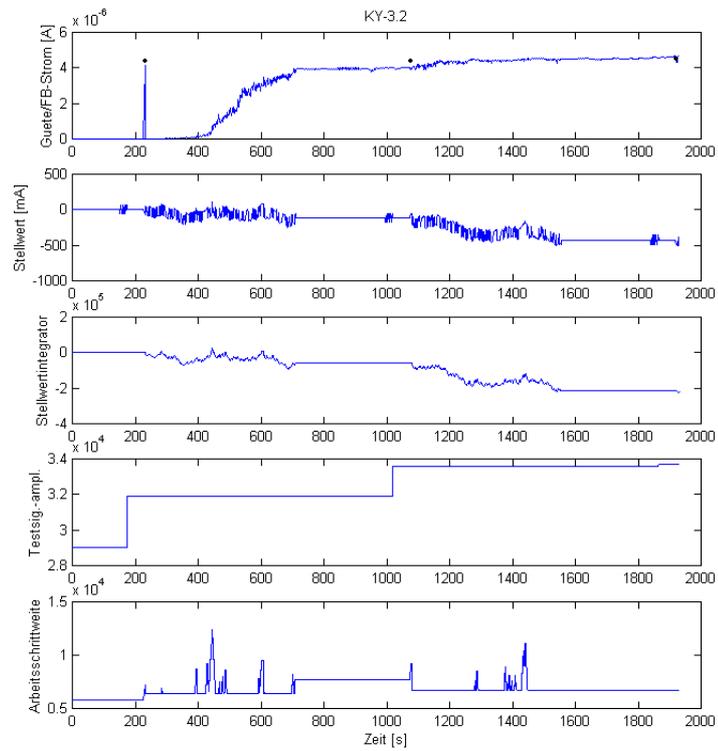
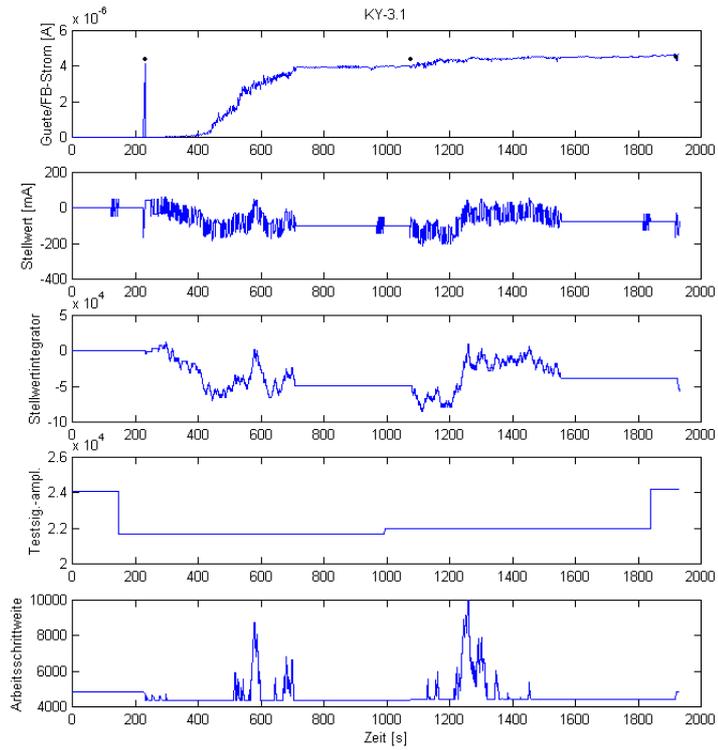
Anlage 18: Versuchsergebnisse aus dem zweiten beschriebenen Versuch in Kapitel 4.2.2

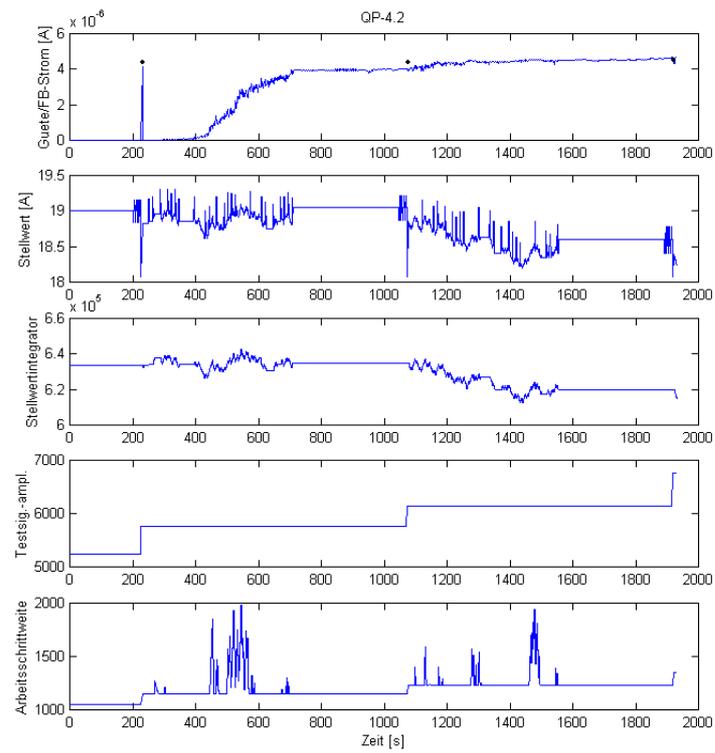












8 Verzeichnis der Abkürzungen und Formelzeichen

a	Koeffizient
A	Adaptionsblock
A_p	Blende
AP	Arbeitspunkt
B	magnetische Flußdichte
d	Ausgangssignal der Korrelationsoperation
\bar{d}	geglätteter Wert des Signals d
DP	Dipol, Stellgröße des Dipols
e	Elementarladung
G	Testsignalgenerator
i	Index
I	Integrator
I_B	Blendensymmetriewert
I_F	Faradaybecherstrom
I_R	Faradaybecher-Randstrom
I_Z	Faradaybecher-Zentrumstrom
k	Quadrupolstärke
K	Korrektorelement, Stellgröße des Korrektorelements
KY	Korrektorelement mit Wirkung in y -Richtung, Stellgröße des Korrektorelements
l	Länge
L	Linse
m	Testsignalamplitude, Masse
m_{AP}	Testsignalamplitude im Arbeitspunkt
M	Block zur Testsignalamplitudenregelung
\mathbf{M}	Transfermatrix
\mathbf{M}_x	Transfermatrix für die x - z -Ebene
\mathbf{M}_y	Transfermatrix für die y - z -Ebene
n	Testsignal, Ladungszustand
\underline{p}	Vektor Prozeßverhalten
P	Korrelationsoperator, Prämisse
PAP	Programmablaufplan
QP	Quadrupol, Stellgröße des Quadrupols

r	Radius
s	Koordinatenrichtung
t	Zeit
T	Periodendauer
\mathbf{T}	Teilchenvektor
\mathbf{T}_x	Teilchenvektor für die Komponenten der x - z -Ebene
\mathbf{T}_y	Teilchenvektor für die Komponenten der y - z -Ebene
T_A	Abtastperiodendauer
T_{AR}	Periodendauer der Regelschritte der Testsignalamplitude
T_I	Integrationszeitkonstante
T_R	Reglerzeitkonstante der Testsignalamplitudenregelung
U	Spannung
V	Kleinsignalverstärkung
V_{AP}^*	Schätzwert der Kleinsignalverstärkung im Arbeitspunkt
W	Führungsgröße
W_V	Verlustsollwert
x	Koordinatenrichtung, Gütegröße, Regelgröße
x_0	Gütewert im Arbeitspunkt y_0
x_a	Ausgangsgröße
x_e	Eingangsgröße
x_{max}	maximaler Gütewert
x_{min}	minimaler Gütewert
x_{-m}	Gütewert bei Stellwert $y_0 - m$
x_{+m}	Gütewert bei Stellwert $y_0 + m$
x_V	Suchverlust
y	Koordinatenrichtung, Stellgröße
y_0	Stellwertarbeitspunkt
z	Koordinatenrichtung, Operator der z -Transformation
Z_B	Teilchenanzahl auf Blendensegment
Z_F	Teilchenanzahl im Faradaybecher
Z_Q	Teilchenanzahl im Quellpunkt
Δ	Blöcke zur Differenzenbildung
w	Kreisfrequenz

9 Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen

Abbildung 2.1	Koordinatensystem für den Bewegungsvorgang der Strahlteilchen	15
Abbildung 3.1	Verlauf der Meßgrößen bei der Optimierung am Tandem-Beschleuniger /21/	27
Abbildung 3.2	Extremwertregelungsprinzip nach VDI/VDE /55/	29
Abbildung 3.3	Extremwertregelung mit Synchrondetektor /53/	29
Abbildung 3.4	Funktionsweise der Synchrondetektierung	30
Abbildung 3.5	Suchverluste bei stark variierenden Gütekennlinien	32
Abbildung 3.6	Extremwertregelung mit Polaritätskorrelator für P und Differenzenbildung an den Eingängen von P	33
Abbildung 3.8	Extremwertregelung mit binärem Testsignal	34
Abbildung 3.7	Abtastschritte mit Vergleich der Differenzen von Testsignal und Meß- bzw. Gütesignal	33
Abbildung 3.9	Mit einer Adaption der Integrationszeitkonstante vervollständigter Extremwertregler auf Basis einer Polaritätskorrelation /53/	34
Abbildung 3.10	Mehrdimensionale Extremwertregelung auf Basis der Polaritätskorrelation	35
Abbildung 3.11	Suchverluste an der Gütefunktion $x=f(y)$	36
Abbildung 3.12	Gütekennlinie als Funktion der Testsignalamplitude im Optimum	37
Abbildung 3.13	Testsignalamplitudenregler	38
Abbildung 3.14	Optimierung mit und ohne gleichzeitiger Testsignalamplitudenregelung	38
Abbildung 3.15	Kennlinie der Arbeitsschrittweite (Reziprokwert der Integrationszeitkonstante) bei der Simulation	40
Abbildung 3.16	Programmablaufplan (PAP) der obersten Ebene zur Steuerung der Optimierungs- und Testsignalregelungsschritte	42
Abbildung 3.17	PAP Optimierungsschritt	43
Abbildung 3.18	PAP Testsignalregelung	44
Abbildung 3.19	Strahlführungsabschnitt der Simulation	49
Abbildung 3.22	Stromdichteverteilung (Anzahl Teilchen pro Flächensegment) in der x-y-Ebene im Startpunkt	51
Abbildung 3.21	Funktionsprinzip eines elektrostatischen Lagekorrektors bestehend aus zwei einzelnen Korrektorelementen	51
Abbildung 3.20	Funktionsprinzip einer Kreuzschlitzanordnung	50
Abbildung 3.23	Stromdichteverteilung im Faradaybecher im optimierten Zustand	52
Abbildung 3.24	Envelope zu Beginn der Simulation im optimierten Zustand	52
Abbildung 3.25	Emittanzflächen im transversalen Phasenraum bis zur Blende 1	53

Abbildung 3.26	Emittanzflächen im transversalen Phasenraum vor Blende 2 bis zum Faradaybecher	54
Abbildung 3.27	Zuordnung der Zählvariablen für die Teilchenzahlen auf den unterschiedlichen Blendensegmenten	56
Abbildung 3.28	Verteilung der Teilchen im Faradaybecher im Simulationsschritt 250	57
Abbildung 3.29	Envelope im Simulationsschritt 250	58
Abbildung 3.30	Envelope im Simulationsschritt 2250	58
Abbildung 3.31	Verteilung der Teilchen im Faradaybecher nach Simulationsschritt 2250	59
Abbildung 3.32	Verlauf des Gütewertes x und des Faradaybecherstromes IF über 3000 Simulationsschritte	59
Abbildung 3.33	mittlerer Austrittsort der Teilchen in Abhängigkeit vom Simulationsschritt	60
Abbildung 3.34	Envelope im Simulationsschritt 1500	61
Abbildung 3.35	Verlauf der Stellgröße Lagekorrektor $K1ax$	62
Abbildung 3.36	Verlauf des Gütewertes (oben) und der Zahl der Teilchen im Faradaybecher (unten) während der Optimierung (dick) und zum Vergleich bei deaktivierter Optimierung (dünn)	62
Abbildung 4.1	Die für die Experimente wichtigen Elemente des Tandem-Beschleunigers	64
Abbildung 4.2	Kreuzschlitzsystem und Drahtscanner	65
Abbildung 4.3	Auswerteeinheit für Drahtscanner	65
Abbildung 4.5	Signalfluß für Extremwertregelung in der SIMATIC S5	67
Abbildung 4.6	Extremwertregelung mit 4 Stellgrößen am Injektor des Tandembeschleunigers	69
Abbildung 4.7	Versuch zum Stabilitätsverhalten des Extremwertregelungsvorgangs	70
Abbildung 4.8	Gütewert bei abgeschalteter Extremwertregelung	70
Abbildung 4.9	Strahlführungsanlage zur Strahlkopplung von 3MV-Tandetron und 500kV-Implanter	72
Abbildung 4.10	Strahlführungselemente an der Strahlkopplungsanlage	73
Abbildung 4.11	Steuerschrank mit SIMATIC S7-400	74
Abbildung 4.12	Gütewert und ausgewählte Werte der Stellgröße QP-2.1	76
Abbildung 4.13	Gütewert (Faradaybecherstrom) bei der Optimierung von sehr ungünstigen Startwerten beginnend	77
Abbildung 4.14	Güteverlauf beim Halten des Optimums im dritten Experiment	78
Abbildung 4.15	Abtastung des Vergleichswertes im Schritt 17365s	79
Abbildung 4.16	kurzzeitiger Einbruch des Strahlstroms während der Testsignalamplitudenregelung	80
Abbildung 4.17	kurzzeitiger Einbruch des Strahlstroms während der Optimierung	80

Abbildung 4.18	Anlagenteil des Beschleunigers VERA für die Optimierungsexperimente	81
Abbildung 4.19	Steuerungssystem für die Experimente mit dem Extremwertregelungsverfahren an VERA	82
Abbildung 4.20	Verlauf des relativen Gütwertes bei der Optimierung mit dem Extremwertregelungsverfahren und zum Vergleich mit dem Verfahren nach POWELL in der von STEIER modifizierte Form	84
Abbildung 5.1	Anordnung eines Strahlprofilmonitors (Drahtscanner) in den letzten Fokus vor dem Target	86
Abbildung 5.2	Simulation einer schiefen Strahlage in der x-z-Ebene	87
Tabelle 2.1	Prämissen für die Auswahl und Anpassung eines geeigneten Optimierungsalgorithmus	23
Tabelle 3.1	Polaritätskorrelation	39
Tabelle 3.2	Transfermatrizen für die Simulation	47
Tabelle 3.3	Stellwerte der Korrektoren im Schritt 250	57
Tabelle 4.1	Periodendauer der Optimierungsschritte der einzelnen Stellgrößen	68
Tabelle 4.2	Vorgegebene Parameter der Extremwertregelung	68
Tabelle 4.3	Kurzbezeichnungen der Strahlführungselemente	71
Tabelle 4.4	Strahlführungselemente, die zur Optimierung benutzt werden können	73

10 Literaturverzeichnis

- /1/ Gersch, H.-U. Strahlleitung an elektrostatischen Generatoren. Akademie der Wissenschaften der DDR. Zentralinstitut für Kernforschung Rossendorf bei Dresden. ZfK-246 März 1973
- /2/ Wille, K. Physik der Teilchenbeschleuniger und Synchrotronstrahlungsquellen: Eine Einführung. 2. Aufl., Teubner Studienbücher. Verlag Teubner. Stuttgart 1996
- /3/ Friedrich, M. BROHR UND SYSFIT - ein Programmsystem zur Berechnung der Strahlführung an elektrostatischen Beschleunigern. Akademie der Wissenschaften der DDR. Zentralinstitut für Kernforschung Rossendorf bei Dresden. ZfK-577. Januar 1986
- /4/ Hentschel, R. Definition von Emittanz und Helligkeit. Akademie der Wissenschaften der DDR. Zentralinstitut für Kernforschung Rossendorf bei Dresden. Arbeitsbericht G 53/82
- /5/ Teichert, J. TRANS-86 - A third-order beam computer code for designing and optimization of particle-optical systems. Akademie der Wissenschaften der DDR. Zentralinstitut für Kernforschung Rossendorf bei Dresden. ZfK-618. März 1987
- /6/ Rieke, A.;
Sadeghi, A.;
Poguntke, W. Liste von Polynomen über $GF(2)$ (für jeden Grad eins, vollständig für Grad $m \leq 512$). <http://www.et-online.fernuni-hagen.de/~rieke/primitiv/polynom.txt>
- /7/ Turner, S. CAS Cern Accelerator School, Third General Accelerator Physics Course. CERN European Organization for Nuclear Research. CERN 89-05, April 1989
- /8/ Schmidt, G. Heuristische Such- und Optimierungsmethoden in der Automatisierungstechnik. AT 3/1995 S. 109
- /9/ Sprave, J. Evolutionäre Algorithmen zur Parameteroptimierung. AT 3/1995 S.110-117
- /10/ Bastian, A. Eine neue Variante genetischer Programmierung zur Identifikation nichtlinearer Modelle ATP 2/1997 S.58-64
- /11/ Hoffmann, U.;
Hofmann, H. Einführung in die Optimierung. Verlag Chemie. Weinheim/Bergstraße 1971

- /12/ Steier, P.;
Puchegger, S.;
Golser, R.;
Kutschera, W.;
Priller, A.;
Rom, W.;
Wallner, A.;
Wild, E. Developments towards a fully automated AMS system. Proceedings of the Fourteenth International Conference on Ion Beam Analysis / Sixth European Conference on Accelerators in Applied Research and Technology. Dresden. Germany. 26-30 July 1999
- /13/ Westervelt, R.T.;
Klein, W.B.;
Luger, G. Framework for a General Purpose, Intelligent Control System for Particle Accelerators. Proceedings of the Particle Accelerator Conference. Dallas. USA. 1-5 May 1995
- /14/ Klein, W.;
Stern, C.;
Luger, G.;
Olsson, E. Designing a Portable Architecture for Intelligent Particle Accelerator Control. Proceedings of the Particle Accelerator Conference. Vancouver. Canada. 12-16 May 1997
- /15/ Klein, W.;
Stern, C.;
Kroupa, M.;
Westervelt, R.;
Luger, G.;
Olsson E. Tuning and Optimization at Brookhaven and Argonne: Results of Recent Experiments. Proceedings of the Particle Accelerator Conference. Vancouver. Canada. 12-16 May 1997
- /16/ Schultz, D.E.;
Brown, P.A. The Development of an Expert System to tune a Beam Line. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. A 293. 1990
- /17/ Press, W.H.;
Teukolsky, S.A.;
Vetterling, W.T.;
Flannery, B.P. Numerical Recipes in C. The Art of Scientific Computing. Second Edition. Cambridge University Press 1992. ISBN 0-521-43108-5
- /18/ Steier, P. Persönliche Mitteilung.
- /19/ Zurmühl, R. Praktische Mathematik für Ingenieure und Physiker. Springer-Verlag. Berlin, Göttingen, Heidelberg 1953
- /20/ Herbrand, F. Optimierung von Strahlenquellen mittels Fuzzy-Regler. Diplomarbeit. TU Dresden 1995
- /21/ Herbrand, F. Automatische Strahlführung an Teilchenbeschleunigern. Bericht der Frühjahrstagung der Studiengruppe für Elektronische Instrumentierung vom 7.-9. April 1997 in Darmstadt (GSI). Forschungszentrum Rossendorf, FZR-185 Juli 1997
- /22/ Fülle, R.;
Hartmann, B.;
Hiekmann, S.;
Linnemann, W.-J. Einsatz des Simplexverfahrens zur Prozeßführung an Beschleunigern. AT Heft 5, 1992 S. 192-196

- /23/ Fülle, R.;
Hiekmann, S. Anpassung des Simplexverfahrens an die automatisierte Optimierung des Betriebes von technischen Anlagen. msr Heft 11, 1989 S. 508-513
- /24/ Hartmann, B. mündliche Mitteilung
- /25/ Solodovnikov, W. W. Nichtlineare und selbststellende Systeme. Verlag Technik, Berlin 1975
- /26/ Iwachnenko, A. G. Technische Kybernetik. Einführung in die Grundlagen automatischer, adaptiver Systeme. 2. Aufl. Verlag Technik, Berlin 1964
- /27/ Pun, L. Abriss der Optimierungspraxis. Akademie-Verlag, Berlin 1974
- /28/ Feldbaum, A. A. Rechengeräte in automatischen Systemen. Oldenbourg Verlag, München 1962
- /29/ Tsien, H. S. Technische Kybernetik. Verlag Berliner Union und Verlag Technik Berlin 1958
- /30/ Schulze, K.-P.;
Rehberg, K.-J. Entwurf von adaptiven Systemen. Eine Darstellung für Ingenieure. Verlag Technik, Berlin 1988
- /31/ Hartmann, K.;
Lezki, E.;
Schäfer, W. Statistische Versuchsplanung und -auswertung in der Stoffwirtschaft. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1974
- /32/ Schäbitz, R. Zur Stabilität eines diskontinuierlichen Extremalsystems bei Drift. msr Heft 4 S. 136-139, 1969
- /33/ Cramer, S. Extremwertregelung eines Dampfkessels. Teil 1. msr Heft 7 S. 233-238, 1965
- /34/ Cramer, S. Extremwertregelung eines Dampfkessels. Teil 2. msr Heft 8 S. 263-268, 1965
- /35/ Cramer, S. Extremalregelung einer Zweistoff-Rektifikationskolonne unter Einfluß äußerer Störungen. msr Heft 10 S. 335-341, 1966
- /36/ Morossanow, I. S. Relais-Extremwertregelungssysteme. Verlag Technik, Berlin 1967
- /37/ The MathWorks, Inc. MATLAB. The Language of Technical Computing. Using MATLAB. The MathWorks, Inc. 1996
- /38/ The MathWorks, Inc. Documentation (help desk).
<http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/helpdesk.shtml>
- /39/ Ross, A. H. M. Linear Feedback Shift Registers.
<http://www.amug.org/~ahmrphd/LFSR.html>

- /40/ Turner, S. CAS Cern Accelerator School, Fifth General Accelerator Physics Course. Proceedings. Cern European Organization for Nuclear Research, Vol. 1, CERN 94-01, 1994
- /41/ Großer, J. Einführung in die Teilchenoptik. B. G. Teubner, Stuttgart 1983. (Teubner Studienbücher)
- /42/ Wangler, Th. Principles of RF Linear Accelerators. Verlag John Wiley & Sons, Inc. New York, Chichester, Weinheim, Brisbane, Toronto, Singapore 1998
- /43/ Septier, A. Focusing of Charged Particles. Volume 2, Verlag Academic Press Inc. New York, London 1967
- /44/ Clearwater, S.; Papcun, G.; Clark, D. Developing an Expert System to Control a Beam Line at the Los Alamos Meson Physics Facility. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A247. 1986. S. 193-196
- /45/ Howell, J. A.; Barnes, C. W.; Brown, S. K.; Flake, G. W.; Jones, R.D.; Lee, Y. C.; Qian, S.; Wright, R. M. Control of a Negative-Ion Accelerator Source Using Neural Networks. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A293. 1990. S. 517-522
- /46/ Klein, W. B.; Stern, C. R.; Luger, G. F.; Olsson, E. T. An Intelligent Control Architecture for Accelerator Beamline Tuning.
<http://www.cs.unm.edu/research/ai/projects/IAAI971.html>
- /47/ Friedrich, M. The Rossendorf Electrostatic Accelerators.
http://www.fz-rossendorf.de/FWI/FWIB/beschleuniger_e.htm
- /48/ Kolitsch, A. AIM - Center for Application of Ion Beams in Materials Research. List of installations.
<http://www.fz-rossendorf.de/FWI/LSF/LSFinstallations.htm>
- /49/ Catani, L. A Simple Tool for Beamline Commissioning and Transport Optimization. CAP'96. AIP conference proceedings, 391(1), Febr. 1997 S.309-316
- /50/ Friedrich, M. Ionenoptische Untersuchungen am Rossendorfer Tandem-beschleuniger EGP-10-1. Akademie der Wissenschaften der DDR. Zentralinstitut für Kernforschung Rossendorf bei Dresden. ZfK-593. August 1986
- /51/ Keithley Instruments GmbH TestPoint.
http://www.keithley.com/products/prod_pages/daq_lv13_pages/summary_pgs/testpnt.html

- /52/ Herbrand, F. Use of Search Methods at Optical Elements of Linear Accelerator Systems for Ions. Proceedings of EPAC 2000, Wien
- /53/ Herbrand, F. Extremwertregler zur automatischen Strahlführung an Teilchenbeschleunigern. Bericht der Herbsttagung der Studiengruppe für Elektronische Instrumentierung vom 25.9. bis 27.9. 2000 in Berlin (HMI). Forschungszentrum Rossendorf, Wissenschaftlich-Technische Berichte FZR-305 November 2000. ISSN 1437-322X
- /54/ Büttig, H. Sensoren für die Ionenstrahldiagnostik. Dissertation. Akademie der Wissenschaften der DDR. Zentralinstitut für Kernforschung Rossendorf 1989
- /55/ Verein Deutscher Ingenieure, Gesellschaft Meß- und Automatisierungstechnik, Fachausschuß Adaptive Geräte und Systeme VDI/VDE-Richtlinie 3685 Teil 2. Jan 1992
- /56/ Göpfert, A.; Bittner, L.; Elster, K.-H.; Nozicka, F.; Piehler, J.; Tichatschek, R. Optimierung und optimale Steuerung. Lexikon der Optimierung. Akademie-Verlag, Berlin 1986
- /57/ Unbehauen, H. Regelungstechnik 3. Identifikation, Adaption, Optimierung. Verlag Vieweg, Braunschweig, Wiesbaden 1993
- /58/ Schmitz, P. Persönliche Mitteilung
- /59/ Hempel, H. u.a. Verfahren und Schaltungsanordnung zur Extremwertregelung des Arbeitspunktes eines Energiewandlers, vorzugsweise einer regenerativen Energieversorgungsanlage. Patentschrift. Deutsches Patentamt, DE 43 24 701 C1, Int. Cl. G 05 F 1/67, 3. 11. 1994
- /60/ Keller, G. Verfahren und Vorrichtung zur Steuerung eines Anpassungsgerätes zur Extremwertregelung einer Gleichspannungs- bzw. Gleichstromquelle mit arbeitspunktabhängigem Innenwiderstand auf maximale Leistung (MPP-Regelung), vorzugsweise eines regenerativen Energiewandlers. Offenlegungsschrift. Deutsches Patentamt, DE 44 46 627 A1, Int. Cl. G 05 F 1/67, 27. 6. 1996

- /61/ Institut für Solare
Energieversorgungs-
technik
Extremwertregler zur optimalen Arbeitspunkteinstellung regenerativer Energiekonverter (MPP-Regler), vorzugsweise für einphasige bzw. netzgeführte Wechselrichter im Netzparallelbetrieb. Gebrauchsmuster. Deutsches Patentamt, G 92 17 595.3, Hauptklasse G05F 1/67, 12. 08. 1993
- /62/ Keviczky, L.;
Vajk, I.;
Hetthéssy, J.
A Self-Tuning Extremal Controller for the Generalized Hammerstein Model. Prep. IFAC Symp. on Identification and System Parameter Estimation, Darmstadt 1979, S.1147-1152
- /63/ Britannica.com Inc.
Online-Ausgabe der Encyclopædia Britannica.
<http://www.britannica.com>, Stichwort "particle accelerator"
- /64/ A Med-World
Aktiengesellschaft zur
Darstellung von
Medizin und
Gesundheit im
Internet
Medicine Worldwide. Enzyklopädie. Thema: Beschleuniger.
<http://www.m-ww.de/enzyklopaedie/medizingeraete/beschleuniger.html>
- /65/ Hahn-Meitner-Institut
ISL-Berlin: Das Ionenstrahllabor am HMI. Ionen-Strahl-Labor Berlin. http://www.hmi.de/bereiche/F/Fl/isl_berlin/isl_pkt1_5.html
- /66/ Universität Wien,
Institut für
Isotopenforschung
und Kernphysik
VERA – Vienna Environmental Research Accelerator
<http://www.univie.ac.at/Kernphysik/VERA/welcome.htm>

Lebenslauf

<i>Name:</i>	Frank Herbrand	
<i>Geschlecht:</i>	männlich	
<i>Geburtsdatum:</i>	23.09.1969 in Dresden	
<i>Wohnsitz:</i>	01139 Dresden, Homiliusstraße 6	
<i>Staatsangehörigkeit:</i>	Bundesrepublik Deutschland	
<i>Familienstand:</i>	verheiratet	
<i>Fachgebiet der Promotion:</i>	Regelungstechnik	
<i>Schulbildung:</i>	1976 – 1986	22. Polytechnische Oberschule, Dresden
	1986 – 1988	Erweiterte Oberschule, Dresden Abschluß: Abitur
<i>Praxis:</i>	9/1988 – 10/1988	Zentrum für Mikroelektronik Dresden, Vorpraktikum als Bauelementemonteur
<i>Grundwehrdienst:</i>	11/1988 – 1/1990	Bereitschaftspolizei Dresden
<i>Praxis:</i>	2/1990 – 8/1990	Zentrum Mikroelektronik Dresden GmbH, Vorpraktikum als Bauelementemonteur
<i>Hochschulausbildung</i>	9/1990 – 1/1996	Technische Universität Dresden Studiengang: Elektrotechnik Studienrichtung: Elektroenergietechnik Vertiefungsrichtung: Elektrische Antriebe und Steuerungen Abschluß: Diplom, Prädikat "gut"
	1/1996	Erlangung des akademischen Grades Diplomingenieur
<i>Berufspraxis:</i>	2/1996 – 12/2000	Forschungszentrum Rossendorf e.V. Doktorand
	seit 1/2001	Forschungszentrum Rossendorf e.V. Wissenschaftlicher Mitarbeiter

Dresden, den 12.3.2001