

Ein SIMATIC basiertes Kontrollsystem für die Undulatoren des TESLA Röntgenlasers

Beschreibung und Bewertung
eines Konzeptes
zur hochgenauen Positionierung
von Magnetstrukturen

*H.H. Radszuweit, J. Krunkowski,
Siemens AG, ATD TD HSE 31
Postfach 261840
20508 Hamburg, Germany*

*J. Pflüger, M. Tischer,
DESY-HASYLAB
Notkestr 85
22603 Hamburg, Germany*

TESLA FEL 2000-09

Dezember 2000

Zusammenfassung:

Die Undulatorsysteme für den Röntgen FEL bei TESLA werden über 300m lang sein und in ca 50 6.1m lange Einheiten, sogenannte Zellen, unterteilt werden. Damit an den einzelnen Undulatorsystemen die Wellenlänge des abgestrahlten Lichts unabhängig von der Elektronenstrahlenergie eingestellt werden kann muß das Gap im gesamten System mit großer Genauigkeit verstellt werden können. Hierzu werden Anforderungen und Nebenbedingungen definiert. Die vorliegende Studie untersucht ein geeignetes, auf industriell verwendeten Komponenten der SIMATIC Familie basiertes Konzept, zur synchronen Steuerung der Antriebe. Komponenten für den Aufbau eines Kontrollsystems für die Undulatorantriebe werden vorgeschlagen und ein Budgetpreis ermittelt.

Inhalt:

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Einleitung..... | 3 |
| 2 | Anforderungen..... | 4 |
| 3 | Konzept..... | 5 |
| 3.1 | Stand der Technik, Tendenz | 5 |
| 3.2 | System Aufbau..... | 5 |
| 3.3 | Räumliche Anordnung..... | 9 |
| 4 | Elemente: | 10 |
| 4.1 | Bedien-Geräte..... | 10 |
| 4.1.1 | Zentraler Leitstand..... | 10 |
| 4.1.2 | Zentrale Bedienstation..... | 10 |
| 4.1.3 | Handbediengerät..... | 11 |
| 4.2 | Zentrales Automatisierungs Gerät. | 12 |
| 4.3 | Bus-Systeme: | 14 |
| 4.3.1 | Industrial Ethernet..... | 14 |
| 4.3.2 | Profibus-DP..... | 14 |
| 4.3.3 | Profibus-CBP2..... | 15 |
| 4.3.4 | Simolink..... | 15 |
| 4.4 | Frequenzumformer..... | 17 |
| 4.5 | Servomotoren | 19 |
| 4.6 | Längen-Meßsystem | 20 |
| 4.7 | Peripheriegerät ET200..... | 21 |
| 5 | Funktionen:..... | 22 |
| 5.1 | Bedienungen zentral / örtlich..... | 22 |
| 5.1.1 | Zentraler Leitstand..... | 22 |
| 5.1.2 | Zentrale Bedienstation..... | 22 |
| 5.1.3 | Vor-Ort-Bedienung..... | 24 |
| 5.2 | Funktionen im Zentralgerät..... | 25 |
| 5.3 | Busübertragung..... | 26 |
| 5.4 | Verstellvorgang.für das Gap..... | 27 |
| 6 | System-Daten:..... | 29 |
| 6.1 | Elemente des Steuerungskonzeptes..... | 29 |
| 6.2 | Verstellgeschwindigkeit..... | 30 |
| 6.3 | Motorleistung..... | 30 |
| 6.4 | Nennwerten, Grenzwerte..... | 30 |
| 7 | Budget-Preis..... | 31 |
| 8 | Anhang: Antriebskonzept der Undulatoren für den X-FEL bei TESLA... | 32 |

1 Einleitung

Bei DESY wird derzeit der Technical Design Report (TDR) für das TESLA (Tera Electronvolt Superconducting Linear Accelerator) Projekt erstellt. Es umfasst neben dem Linear Collider einen integrierten Freie Elektronen Laser (FEL) im harten Röntgenbereich bei einer Wellenlänge von 0.1nm (X-FEL). Kernstück eines FEL ist immer ein langer Undulator. Für X-FEL wird die Länge ca 300m betragen. Im Anhang A ist die Funktionsweise eines Undulators und eines FEL näher beschrieben. Zum Verstellen der Feldstärke muß das Gap, der Luftspalt zwischen den beiden Strukturhälften verstellt werden. Ein 300m langes Undulatorsystem umfasst ca 200 Antriebe. Deren hochpräzise Steuerung ist ein anspruchsvolles und komplexes Problem, das in der Antriebstechnik bislang ohne Beispiel ist.

In dieser Studie wird ein Antriebskonzept erarbeitet, das vollständig auf industriellen Komponenten basiert, die Anforderungen erfüllt, die in Kapitel 2 näher erläutert werden und gleichzeitig eine wirtschaftlich vertretbare Lösung darstellt. Für die favorisierte Lösung sollen Kosten ermittelt werden.

Eine detaillierte Beschreibung eines Undulatorsystems und der daran zu stellenden Anforderungen befindet sich im Anhang A

2 Anforderungen

Es ist der Aufbau mehrerer Undulatoren geplant. Die Anzahl der Segmente eines Undulators variiert zwischen 10 und 54. Damit kann die Gesamtlänge eines Undulators bis über 300 m betragen.

Die Anforderungen an das Antriebssystem sind in Anlage A benannt und sollen hier noch einmal dargestellt werden:

| | | |
|--|----------|----------|
| Gapverstellbereich: | mm | 10 – 200 |
| Anzahl der Spindeln je Undulatorsegment: | | 4 |
| Hub je Spindel: | mm | 100 |
| Spindelsteigung: | mm / U | 5 |
| Kraft je Spindel: | kN | 100 |
| max. Gapverstellgeschwindigkeit | mm / sec | > 2 |
| Gap-Einstellgenauigkeit: | µm | 1 |
| Synchronisationsgenauigkeit der Achsen aller Zellen während der Verstellung | µm | < 10 |
| Anzahl der Undulatorzellen je Undulator | | 10 – 100 |

3 Konzept:

3.1 Stand der Technik, Tendenzen:

Die Planungen zum X-FEL befinden sich zur Zeit in einem frühen Planungsstadium. Mit der Realisierung des Projektes wird nicht vor Mitte dieses Jahrzehnts gerechnet.

Um eine hinreichende Sicherheit in der Beurteilung der Realisierbarkeit des Projektes zu gewinnen und um für die Einwerbung der erforderlichen Finanzmittel eine möglichst fundierte Planungssicherheit zu erhalten, ist die vorliegende Studie in Auftrag gegeben worden.

Das nachfolgend beschriebene Konzept basiert auf dem Stand der Technik im Jahr 2000. D.h., alle hier beschriebenen Geräte und Systeme und deren technische Daten entsprechen den technischen Möglichkeiten zum gegenwärtigen Zeitpunkt.

Aufgrund der Erfahrung in der Entwicklung technischer Einrichtungen ist davon auszugehen, daß zum Zeitpunkt der Realisierung Systeme zur Verfügung stehen werden, die in ihrer Leistungsfähigkeit die hier beschriebenen eher übertreffen und im Preisniveau eher unterhalb des weiter unten ermittelten Budgetpreise liegen werden.

3.2 System-Aufbau

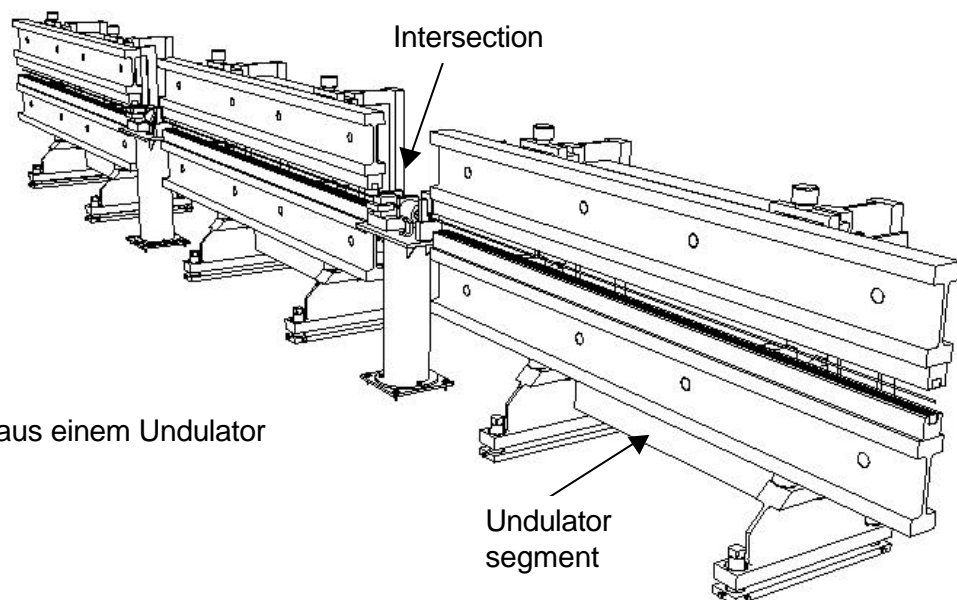


Fig. 1 Ausschnitt aus einem Undulator system

Fig 1 zeigt einen Ausschnitt aus einem Undulatorsystem, wie er in Anhang A näher erläutert ist. Es erfolgt eine Aufteilung in Zellen. Jede Zelle enthält ein

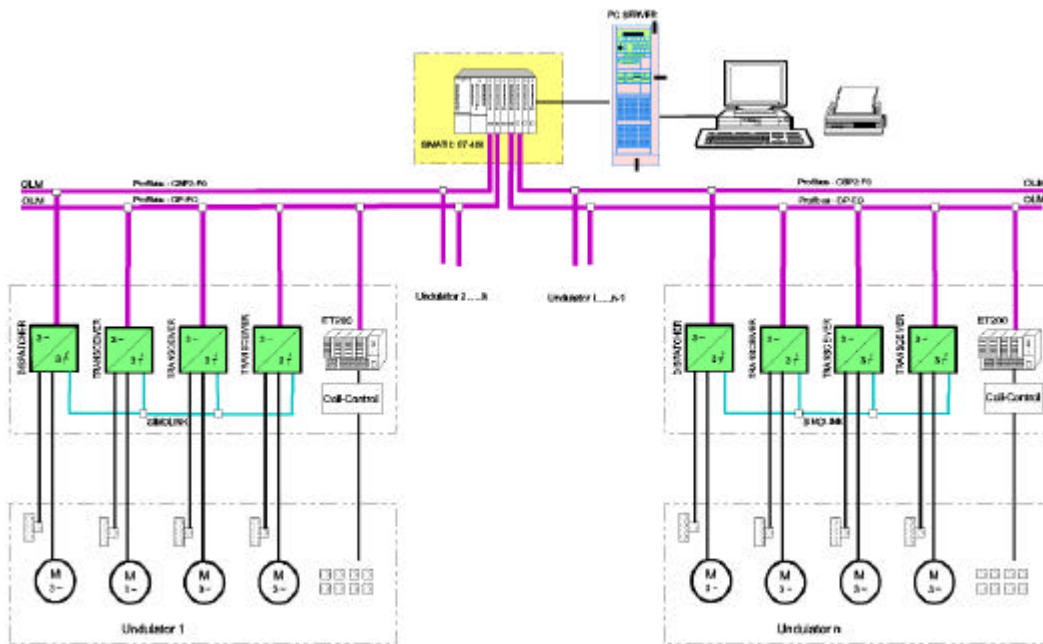


Fig. 2 Konzept der Antriebssteuerung

Undulatorsegment, welches 5m lang ist und Komponenten in der „Intersection“, dem Raum zwischen zwei aneinandergrenzenden Segmenten.

Das Konzept der Antriebssteuerung ist im Bild 2 wiedergegeben.

Es wurde wie beim mechanischen Aufbau auf einen möglichst modularen Aufbau der Steuerung Wert gelegt. Dadurch ist es möglich, in den o.g. Grenzen eine beliebige Anzahl von Undulator-Segmenten innerhalb eines Undulators aneinander zu reihen bzw. auszutauschen.

Die gesamte Antriebssteuerung besteht aus den folgenden Komponenten:

- Zentrales Automatisierungsgerät
In diesem Gerät sind die unterschiedlichen Fahrweisen des X-FEL in Form von Daten und Programmen hinterlegt.
- Zentrale Bedienstation
Über die Bedienstation können alle installierten Funktionen aufgerufen, gestartet und beobachtet werden
- Profibus-Systeme
zur Datenübertragung zwischen Zentralem Automatisierungsgerät und den Masterdrive-Motorsteuerungen
- Motorsteuerungen (Frequenzumformer) Masterdrive Motion Control zur drehzahlveränderlichen Ansteuerung der Servomotoren
- Servomotoren
Vier Synchron-Servomotoren je Undulator-Zelle zum Antrieb der Spindeln

- Längenmeßsysteme
jedem Antrieb ist ein Absolutwertgeber zugeordnet zur hochgenauen Einstellung des Gap
- ET200
Dezentrales Peripheriegerät zur Ein- / Ausgabe von binären und analogen Signalen für die Steuerung der Korrekturspulen und ggf. weiteren Signalen

Ausführliche Beschreibungen der aufgeführten Geräte sind in Kapitel 4 zu finden. Bei den Überlegungen zur Anlagenkonzeption ist zu berücksichtigen, daß in Folge

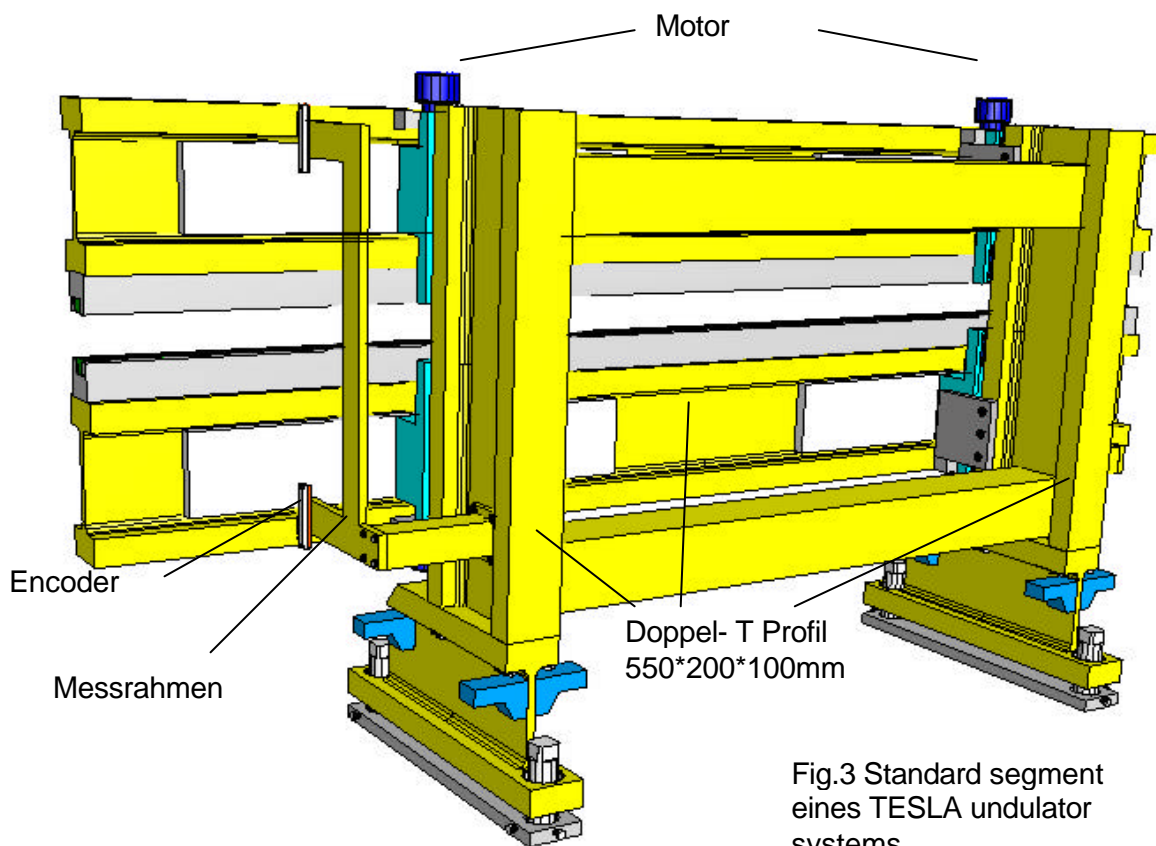


Fig.3 Standard segment eines TESLA undulator systems

der geforderten Genauigkeit der Gap-Einstellungen nicht von einem starren mechanischen Gesamtsystem, bestehend aus Magnetstrukturen und deren Grundrahmen, Halterungen ect. ausgegangen werden kann. Vielmehr ist davon auszugehen, daß Ober- und Unterteil eines Segmentes aufgrund der magnetischen Kräfte und der Gravitation unterschiedlichen elastischen Verformungen ausgesetzt sind, so daß die Mittellinie des Gaps sich gegenüber der Zentralachse des FEL verschiebt. Aufgrund fehlender Erfahrungen ist zur Zeit keine Aussage über die Größenordnung der zu erwartenden Unsymmetrien zu treffen. Um jedoch diese Effekte unabhängig von ihrer Größe in jedem Fall zu beherrschen,

sieht das vorgestellte Konzept eine geregelte Verstellung des Gap vor. Die ist in Bild 3 zu sehen. Es zeigt einen Entwurf der Antriebsmechanik eines Undulatorsegments. Jedem Antriebsmotor wird ein absolutes Längenmesssystem zugeordnet, welches auf einem separaten Messrahmen angebracht. Dieser Messrahmen wird an einer geeigneten Stelle des Undulatorrahmens befestigt, der sich bei Kraftwechseln nicht deformiert. Positionsänderungen werden somit nur relativ zu diesem Rahmen gemessen. Der Messrahmen dient somit als unabhängiges Referenzsystem. Der genaue Wert des Gaps kann durch Differenzbildung, der Wert der Gapmitte durch Mittelwertbildung der Positionsauslesen ermittelt werden. Die Positions-Meßwerte werden den Motorsteuerungen zugeführt und bilden die Regelgröße für den integrierten Lageregler. Sie werden im Regler mit dem vorgegebenen Sollwert verglichen. Bei einer Regeldifferenz wird durch den Antrieb nachgeregelt, so daß im Rahmen der Genauigkeit des verwendeten Längenmeßsystems der vorgegebene Wert erreicht wird. Eine ausführlichere Beschreibung der Regelung findet sich in Kapitel 5.4

3.3 Räumliche Anordnung

Wie bereits erwähnt, ist das Konzept der Antriebssteuerung auf eine größtmögliche Modularität ausgelegt.

Das bedeutet, daß alle einer Undulator-Zelle zugeordneten Geräte in unmittelbarer Nähe oder direkt auf der Undulator-Konstruktion installiert werden. Nach Anschluß der Stromversorgungen und der Profibus-Stecker kann das Segment in Betrieb genommen werden.

Die Masterdrive-Geräte und das Peripheriegerät ET200 einschließlich Zubehör, wie Absicherungen, Einspeise-Schalter, Betriebs- und Störmelde-Leuchten ect. werden in einem Steuerschrank installiert. Dieser Schrank kann als Wandschrank in der Größenordnung 1000 x 1000 mm oder als 19“ Rack ausgeführt sein. Er wird in jedem Fall in der Nähe der zugehörigen Undulator-Zelle montiert werden.

Die übergeordneten Einrichtungen wie Zentrales Automatisierungsgerät und Zentrales Bediengerät werden etwa in der Mitte eines Undulators positioniert. Hierdurch ergibt sich eine Optimierung der Busleitungslängen, was im Interesse möglichst hoher Übertragungsraten anzustreben ist.

4 Elemente

4.1 Bediengeräte:

Der Prozeß Antriebssteuerung der Undulator-Zellen eines X-FEL kann nach dem vorgesehenen Konzept von drei Bedien- und Beobachtungs-Ebenen beeinflusst werden:

- Zentraler Leitstand
- Zentrale Bedienstation
- Handbediengerät (vor-Ort)

4.1.1 Zentraler Leitstand:

Der Zentrale Leitstand ist ein übergeordnetes Kontrollsystem, das Zugriff auf die Funktionen der Steuerung haben muss. Von hier aus können alle Undulatoren gesteuert und beobachtet werden. Dieses System ist nicht Teil der Steuerung und somit nicht Gegenstand der vorliegenden Untersuchung.

4.1.2 Zentrale Bedienstation:

Für dieses System ist Simatic WinCC vorgesehen. Es ist ein industriebewährtes PC-basierte Bedien- und Beobachtungssystem, das unter Microsoft Windows 95/98 und Windows NT 4.0. ablauffähig ist.

Win CC ist für das Visualisieren und Bedienen von Prozessen, Fertigungsabläufen Maschinen und Anlagen konzipiert. Mit seiner leistungsfähigen Prozeßkopplung, insbesondere zur Simatic-Familie, und der sicheren Datenarchivierung ermöglicht WinCC hochverfügbare Lösungen für die Leittechnik. Das branchen- und technologieneutrale Basissystem ermöglicht den universellen Einsatz in allen Automatisierungsanwendungen.

Merkmale:

Industriegerechte Funktion zum Melden von Ereignissen, Archivierung von Meßwerten, Protokollieren sämtlicher Prozeß- und Konfigurationsdaten, Benutzerverwaltung und Visualisierung gehören zur Grundausstattung des Systems.

Control-Center für den schnellen Zugriff auf sämtliche Projektdaten und zentralen Einstellungen

Graphics Designer für die frei gestaltbare Visualisierung und Bedienung der Prozeßbilder

Alarm Logging für die Erfassung und Archivierung von Ereignissen, Meldungen und Alarmen

Tag Logging für die Speicherung aktueller oder verdichteter Meßwerte

Report-Designer für die zeit- und ereignisgesteuerte Projektdokumentation mit frei gestaltetem Layout

Global Scripts, grenzenlose Funktionalität durch Nutzung des eingebauten ANSI-C Compilers

User Administrator für die komfortable Verwaltung der Benutzer-Berechtigungen

Die universell einsetzbare WinCC Basis-Software bildet den Kern für modulare Erweiterungen. Diese WinCC Add-ons sind entweder als fertige Optionen erhältlich oder werden projekt- und aufgabenspezifisch erstellt. Hierzu gehören z.B. Instandhaltungs-Management, Energiemanagement oder automatisches Versenden von Funkrufen.

4.1.3 Hand-Bediengerät:

Zur Parametrierung der Masterdrive-Geräte und zur Bedienung im Service- und Einrichtungs-Betrieb wird das Komfortbedienfeld OP1S verwendet.

Die Parametrierung erfolgt menügeführt durch Anwahl der Parameternummer und Eingabe des Parameterwertes. Die Anzeigen erfolgen im 4-zeiligen LCD-Display als Klartext.

Das Bedienfeld verfügt über einen nichtflüchtigen Speicher und ist in der Lage, vollständige Parametersätze permanent zu speichern. Es ist deshalb zum Archivieren von Parametereinstellungen und zum Übertragen von Parametersätzen von einem Gerät in ein anderes verwendbar.

Die Kommunikation zwischen dem OP1S und dem zu bedienenden Gerät erfolgt über eine serielle Schnittstelle RS 485.

Darüberhinaus wird ein einfaches Handbediengerät verfügbar sein. Dieses Gerät dient ausschließlich zum Verfahren einzelner Antriebe oder einer Antriebegruppe innerhalb einer Undulator-Zelle. Diese Funktion ist erforderlich für Einstell-Arbeiten am Meßplatz und während der Ausrichtung der Undulator-Zellen nach erfolgter Montage.

Ein solches Gerät gehört nicht zum Standard-Lieferspektrum und ist individuell nach Anforderung zu fertigen.

4.2 Zentrales Automatisierungs-Gerät (ZG)

Im Zentralen Automatisierungs-Gerät sind die Programme für die unterschiedlichen Undulator-Betriebsarten hinterlegt und die Betriebsdaten in Archiven gespeichert.

Im Interesse einer uneingeschränkten Performance hinsichtlich Funktionalität und Datenhaltung ist für das Zentralgerät das derzeit leistungsfähigste Gerät der Simatic S7-Familie vorgesehen, das Simatic S7-400.

Der modulare und lüfterlose Aufbau, die hohe Ausbaufähigkeit und Robustheit, die umfangreichen Kommunikationsmöglichkeiten, die einfache Realisierung dezentraler Strukturen und die bedienerfreundliche Handhabung empfehlen dieses Gerät für anspruchsvolle Steuerungsaufgaben. Zudem hat sich das S7-400 in diversen industriellen Steuerungen für die unterschiedlichsten Branchen sowie für die Versorgungstechnik bewährt.

Es besitzt höchste Industrietauglichkeit durch hohe EMV-Festigkeit, zulässige Umgebungstemperaturen bis 60 CEL und hohe Beständigkeit gegenüber Schock- und Rüttelbeanspruchung. Darüberhinaus werden diverse nationale und internationale Standards erfüllt, wie z.B. DIN, UL, CSA, FM und ISO 9001.

Das Automatisierungssystem S7-400 ist modular aufgebaut. Auf einen Grundrahmen mit integriertem Rückwandbus zum schnellen Datenaustausch werden die einzelnen Baugruppen angehängt und festgeschraubt.

Zu einem System gehören:

Stromversorgungsbaugruppe:
zur Erzeugung der geräteinternen Spannungen. Anschluß an Versorgungsspannungen AC 120/230 V oder DC 24 V

Zentralbaugruppen (CPU):
Für unterschiedliche Leistungsbereiche stehen verschiedene CPUs zur Verfügung. In ein Zentralgerät (ZG) können zur Leistungssteigerung mehrere CPUs eingesetzt werden

Signalbaugruppen:
Für die Ein- und Ausgabe digitaler und analoger Signale stehen verschiedene Peripheriebaugruppen zur Verfügung

Kommunikations-Baugruppe (CP):

Für die Kopplung des Zentralgerätes mit der Bedien- und Beobachtungsebene über einen Sinec H1-Bus und zur Anschaltung der Profibus-Systeme werden Kommunikations-Prozessor CP 443 eingesetzt.

Darüberhinaus sind diverse weitere Funktions- und Anschaltbaugruppen verfügbar für spezielle Funktionen vom Zähler bis zum AT- kompatiblen Rechner bzw. für diverse Anschaltungen weiterer Geräte

4.3 Bus-Systeme

Es kommen insgesamt fünf Bussysteme zu Einsatz:

- Industrial Ethernet TCP/IP zwischen B+B-Server und übergeordnetem Leitsystem
- Industrial Ethernet H1-Bus zwischen Zentralem AG (ZG) und B+B-Server
- Profibus-DP zwischen ZG und MC-Geräten (Transceiver) sowie ET200-Geräten
- Profibus-CBP2 zwischen ZG und MC-Geräten (Dispatcher)
- Simolink zwischen MC-Geräten Dispatcher und Transceivern

4.3.1 Industrial Ethernet:

Das Industrial Ethernet-Netz arbeitet nach dem bei IEEE 802.3 genormten Zugriffsverfahren CSMA/CD (Carrier sense multiple access with collision detection).

Der physikalische Aufbau des Netzes kann als elektrisches Netz mit Kupferkabel, optisches Netz mit Lichtwellenleiter (LWL) oder gemischtes Netz ausgeführt sein. Entsprechende Anschaltungen sind verfügbar als Electrical Link Modules (ELM) für elektrische und Optical Link Modules (OLM) für optische Übertragungsmedien.

Die maximale Reichweite bei Verwendung von LWL beträgt z.Zt. ca. 4,5 km. Durch Verknüpfungen mehrerer Netze über Switches wie z.B. MultiLAN MR8-03 können noch größere Entfernungen erreicht werden. Ebenfalls ist eine Kopplung an das ISDN-Netz möglich.

4.3.2 Profibus-DP

Auch der Profibus ist in elektrischer oder optischer Übertragungstechnik ausführbar.

Profibus-DP ist konzipiert für den schnellen Datenaustausch mit Feldgeräten. Durch die Erfüllung der Anforderungen nach EN 50 170 gewährleistet Profibus Offenheit für die Anbindung normgerechter Komponenten anderer Hersteller.

Das Profibus-Zugriffsverfahren arbeitet nach dem Verfahren „Token Passing mit unterlagertem Master-Slave“ entsprechend EN 50 107, Volume 2. Dabei wird zwischen aktiven und Passiven Netzteilnehmern unterschieden. Nur aktive Teilnehmer erhalten den „Token“, das Senderecht, das innerhalb einer vorgegebenen Zeit von einem aktiven Teilnehmer zum nächsten weitergegeben wird.

Automatisch wird erkannt, ob ein Teilnehmer ausgefallen oder ob ein Teilnehmer neu hinzugekommen ist. Dadurch ist das Herausnehmen eines Teilnehmers möglich, ohne daß der Datenaustausch der übrigen Teilnehmer beeinträchtigt ist. Alle Teilnehmer im Netz sind auf die gleiche Übertragungsrate eingestellt.

Angesichts der großen Leitungslängen sowie wegen größerer Unempfindlichkeit gegen elektromagnetische Beeinflussung werden Glas Lichtwellenleiter verwendet. Kupferkabel scheiden wegen zu geringer maximaler Leitungslängen von lediglich 100m aus. Beim optischen Profibus ist die Übertragungsrate stufenweise von 9,6 kBit/s bis 1,5 MBit/s einstellbar. Die maximale Segmentlänge beim optischen Profibus ist unabhängig von der Übertragungsrate und kann bis zu 23 km betragen. Es sind maximal 32 Teilnehmer pro Segment möglich Die Anschaltung der Teilnehmer (ZG, MC-Module, ET200) an den optischen Profibus wird über Optical Link Modules hergestellt. Mit diesen Geräten ist eine hohe Verfügbarkeit durch redundante Spannungsversorgung und redundante Leitungsführung realisierbar.

4.3.3 Profibus-CBP2

Prinzipiell weist der CBP2-Bus die gleichen Leistungsmerkmale auf wie der Profibus-DP. Eine zusätzliche Eigenschaft empfiehlt den CBP2-Bus für die Übertragung von Positions-Sollwerten:

die taktsynchrone Übertragung der Nutzdaten.

Das Übertragungsprinzip (ähnlich wie beim Simolink) beruht darauf, daß zwei Telegramm-Arten übertragen werden:

- Daten-Telegramme
- Synchronisations-Telegramme

Über Datentelegramme werden zunächst die Nutzdaten übertragen, z.B. Positions-Sollwerte vom ZG an alle Dispatcher. Die Informationen werden in den Empfängern zwischengespeichert.

Anschließend wird ein Synchronisations-Telegramm an alle Busteilnehmer geschickt. Mit Empfang des Sync-Telegramms werden die zwischengespeicherten Daten in den Empfängern wirksam. Dadurch ist sichergestellt, daß allen Teilnehmern am Bus zum gleichen Zeitpunkt die aktuellen Daten zur Verfügung stehen.

Somit sind Unsymmetrien über die gesamte FEL-Anordnung auch während des Verstellvorgangs auszuschließen.

4.3.4 Simolink

Die vier Wechselrichter einer Undulator-Zelle sind über den Datenbus Simolink miteinander verbunden.

Der Einsatzschwerpunkt von Simolink ist der extrem schnelle und streng zyklische Austausch von Prozeßdaten zwischen Masterdrive-Geräten untereinander zur Synchronisation aller angeschlossenen Teilnehmer auf einen gemeinsamen Systemtakt.

Simolink ermöglicht durch seine extrem schnelle Datenübertragung und durch die Übertragung eines streng zeitäquidistanten und jitterfreien Sync-Telegramms in jedem Umlaufzyklus die Realisierung eines hoch dynamischen und winkelgetreuen Gleichlaufs aller angeschlossenen Masterdrive-Geräte. Die Übertragungsrate beträgt 11 Mbit/s.

Die Kommunikationsbaugruppe SLB dient der Anschaltung von Antrieben an Simolink. Die maximale Teilnehmerzahl ist auf 201 beschränkt. Die Datenübertragung zwischen den einzelnen Teilnehmern erfolgt mittels Lichtwellenleiter. Als Übertragungsmedium können Kunststoff- oder Glasfaserkabel verwendet werden. Die Struktur des Simolink ist ein Lichtwellenleiter-Ring, wobei jeder Teilnehmer als Signalverstärker wirkt. Die Synchronisation der Teilnehmer erfolgt durch ein Sync-Telegramm, das von einem Teilnehmer mit besonderer Funktion, der Dispatcher-Funktion, generiert wird. Die Zeit zwischen zwei Sync-Telegrammen ist die Busumlaufzeit des Simolink und entspricht gleichzeitig dem gemeinsamen Systemtakt für die Synchronisation aller angeschlossenen Teilnehmer.

4.4 Frequenzumrichter

Die Antriebsmotoren werden über Frequenzumrichter angesteuert. Damit sind beliebige Drehzahlwerte bis zur Nenndrehzahl der Antriebe einstellbar. Zum Einsatz kommen Kompakt-Geräte aus der Siemens-Familie Simover Masterdrive Motion Control (MC). Diese Geräte sind speziell auf Anwendungen im Bereich von Servoantrieben im Industrieinsatz zugeschnitten.

Um den spezifischen Anforderungen in unterschiedlichen Anwendungen gerecht zu werden, sind die Geräte sowohl in der Hardware-Konfiguration als auch in der Betriebs-Software modular aufgebaut.

Das Mastedrive-Konzept ist gekennzeichnet durch:

- sehr hohe Dynamik
- hochgenaue Positionierung
- winkelsynchronen Gleichlauf

Die vier Antriebe einer Undulator-Zelle bilden eine Einheit, d.h., die vier Antriebe werden während eines Verstellvorganges synchron angesteuert. Diese Anordnung wird als Mehrachs Antrieb bezeichnet.

Prinzipiell stehen mehrere Geräte-Varianten zur Verfügung. Im Sinne einer möglichst geringen Netzbelastung wird hier die Ausführung mit je einem Wechselrichter pro Antrieb und gemeinsamer Einspeise-Einheit gewählt.

Die Einspeiseeinheit übernimmt die Gleichrichtung der Netzspannung und versorgt die Wechselrichter über die Zwischenkreisverschaltung mit der Zwischenkreisspannung. Die Zwischenkreisverschaltung dient gleichzeitig dem Energieausgleich zwischen den einzelnen Achsen.

Für die Einspeiseeinheit ist hier ein Active Front End Gerät (AFE) vorgesehen. Diese Geräte garantieren eine minimale Netzbelastung durch Oberwellen. Durch intelligentes Schalten der Stromrichterventile und einen speziellen Filter (Clean Power Filter) werden nahezu sinusförmige Netzströme und Spannungen erzeugt.

Die AFE eignet sich hervorragend für die Rückspeisung ins Netz. Durch aktives Abschalten gibt es auch im Generatorbetrieb kein Wechselrichterkippen mit Sicherheitsfall. Auch bei kurzzeitigen Netzunterbrechungen im Millisekundenbereich wird der Betrieb aufrecht erhalten. Netzspannungsschwankungen bis zu Werten von 65% können ausgeregelt werden.

Durch aktives schnelles Schalten der Stromrichter wird die Zwischenkreisspannung auch bei hochdynamischen Lastwechseln der Antriebe konstant gehalten.

Ein weiteres Merkmal der AFE-Einspeiseeinheit ist der Leistungsfaktor nach Wahl:

Der Leistungsfaktor $\cos\phi$ kann in einem Bereich zwischen 0,8 und 1,0 gewählt werden. Die Einstellung kann entweder durch direkte Parametrierung oder

durch den Profibus erfolgen. Der Leistungsfaktor wird dann automatisch auf den eingestellten Wert geregelt.

Die Wechselrichter in der Bauform Kompaktgerät bestehen aus Grundgerät und Elektronik-Optionen.

Das Grundgerät hat die Gehäusemaße BxHxT = 90x425x350 mm. Es besteht aus der Leistungselektronik und einer Elektronikbox zur Aufnahme der Optionsbaugruppen.

Die folgenden Optionsbaugruppen werden benötigt:

Baugruppe SBR 1 für Resolver:

Der Resolver ist im Servomotor eingebaut und liefert sinusförmige Signale zur Auswertung von Antriebsdrehzahl und Rotorlage. Je eine Sinus- und Cosinus-Spur wird in der SBR-Baugruppe ausgewertet und dem Drehzahlregler des Wechselrichters zugeführt.

Baugruppe SBM2 für Absolutwertgeber:

Die Baugruppe dient der Auswertung der Signale zur Lageerfassung. Dazu wird durch das Längenmeßsystem der Absolutwert der Position über eine bidirektionale serielle Schnittstelle EnDat ausgegeben.

Die Baugruppe SBM2 wertet die Signale aus und führt sie dem Lageregler des Wechselrichters als Regelgröße zu.

Baugruppe SLB für Simolink:

Der Datenaustausch zwischen den Masterdrive-Geräten untereinander bzw. vom Dispatcher zu den Transceivern erfolgt über den Simolink-Bus, wie unter Kapitel 4.3.4 beschrieben.

Die dazu erforderliche Kommunikationsbaugruppe SLB ist in jedem Busteilnehmer zu installieren.

Die Baugruppe verfügt über einen 24 V Spannungseingang zur externen Spannungsversorgung. Dadurch wird sichergestellt, daß auch bei ausgeschaltetem Wechselrichter der Datenaustausch im Simolink aufrecht erhalten wird.

Baugruppe CBP2 für Profibus-DP:

Der Datenaustausch zwischen dem Zentralen Automatisierungsgerät und den als Dispatcher fungierenden Masterdrive-Geräten in jeder Undulator-Zelle wird über Profibus-CBP2 abgewickelt, wie unter Kapitel 4.3.3 beschrieben.

Aus Gründen der Reduzierung der Typenvielfalt wird diese Baugruppe auch für den weniger zeitkritischen Datenaustausch der Transceiver-Geräte mit dem ZG eingesetzt.

Somit ist jeder Wechselrichter mit einer CBP2-Baugruppe auszurüsten.

4.5 Servomotoren:

Servomotoren wurden speziell konzipiert, um den Anforderungen zu genügen, die an drehzahlveränderbare Antriebe gestellt werden.

Sie zeichnen sich aus durch:

- kompakte Bauform
- hohe Leistungsdichte und Überlastfähigkeit
- hohe Maximaldrehzahlen
- integriertes Gebersystem
(Impulsgeber, Resolver, Encoder oder Absolutwertgeber)
- hohe Dynamik durch geringes Läufer-Trägheitsmoment
- ausgezeichnete Rundlaufeigenschaften
- robuste, weitgehend wartungsfreie Konstruktion

Für den Einsatz in Undulatoren werden Synchron-Servomotoren vom Typ Siemens 1FK6 gewählt, die sich durch hohe Stillstandsmomente und kleine Bauform auszeichnen.

Da die Servomotoren zum Antrieb von Spindeln verwendet werden, sind Rückstellkräfte zu berücksichtigen. Hierfür werden die Antriebe mit Einbau-Haltebremsen versehen. Diese Dauermagnet-Einflächenbremse arbeitet nach dem Ruhestrom-Prinzip. Der Dauermagnet bewirkt mit seinem Magnetfeld eine Zugkraft auf die Bremsen-Ankerscheibe. Im stromlosen Zustand wird die Bremse geschlossen und dadurch die Motorwelle festgehalten. Bei der Bemessungsspannung von 24 V DC an der Bremse baut die stromdurchflossene Spule ein Gegenfeld auf, das die Kraftwirkung des Dauermagneten aufhebt und die Bremse löst.

Da die Bemessungsdrehzahl der Servomotoren mit 6000 U/min für den Einsatz im Undulator zu hoch ist, wird ein Planetengetriebe mit einer Untersetzung 10 :1 zwischen Motor und Spindel zwischengeschaltet. Das Getriebe wird unmittelbar an den Motor angeflanscht.

Als Geber wird ein 2-poliger Resolver in den Antrieb eingebaut. Es erfolgt eine induktive Abtastung der Rotorlage, als Ausgangssignal wird je eine Sinus- und eine Cosinus-Spur ausgegeben.

Für die elektrische Verbindung der Servomotoren mit den Masterdrive-Geräten stehen vorkonfektionierte Kabel mit Steckern für Leistungs- und Steuerkabel zur Verfügung.

4.6 Längen-Meßsystem

Die Positioniergenauigkeit der Magnetstrukturen des Undulators hängt von der Genauigkeit des verwendeten Längen-Meßsystem ab.

Vorgesehen sind für diesen Anwendungsfall Absolutwertgeber LC181 der Firma Heidenhain. Diese Geräte sind für Meßschritte bis $0,1\ \mu\text{m}$ ausgelegt und damit für die geforderte Genauigkeit der reproduzierbaren Positionsbestimmung von $1\ \mu\text{m}$ geeignet.

Bei dem gekapselten Meßsystem LC181 schützt ein Gehäuse aus Aluminium den Maßstab, den Abtastwagen und dessen Führung vor Staub und Spritzwasser (Schutzart IP 53 nach EN 60 529). Elastische Dichtlippen schließen das Gehäuse nach unten ab.

Der Abtastwagen wird reibungsarm am Maßstab geführt. Eine Kupplung verbindet den Abtastwagen mit dem Montagefuß und gleicht die unvermeidlichen Fluchtungsabweichungen zwischen Maßstab und Maschinenschlitten aus.

Die Längenmeßsysteme arbeiten nach dem Prinzip der photoelektrischen Abtastung feiner Strichgitter, die auf der Maßverkörperung aufgebracht sind. Erfasst werden Änderungen von Lichtintensitäten über Photoelemente. Das absolute Längenmeßsystem LC181 bildet den Absolutwert aus sieben Inkrementalspuren. Die Teilungsperiode der einzelnen Spuren ist so gewählt, daß aus den Abtastsignalen aller Spuren eindeutig die Position innerhalb der Meßlänge gekennzeichnet ist. Aus der feinsten Spur mit der Teilungsperiode von $16\ \mu\text{m}$ läßt sich selbst bei einer Meßlänge von 3 m ein Absolutwert mit einer Auflösung von $0,1\ \mu\text{m}$ und kleiner realisieren. Die hier vorgesehenen Systeme werden mit einer Meßlänge von lediglich 200 mm benötigt und somit eine eher noch höhere Genauigkeit ermöglichen.

Die Übertragung des Absolutwertes vom Meßsystem zum Masterdrive-Gerät erfolgt seriell über das EnDat-Interface. Diese bidirektionale Schnittstelle ist in der Lage, sowohl absolute Positionswerte auszugeben als auch im Meßsystem gespeicherte Informationen abzufragen oder zu aktualisieren. Zusätzlich zur absoluten Positions-Information liefert das LC181 sinusförmige Inkremental-Signale.

Die Heidenhain-Längenmeßsysteme erfüllen bei vorschriftsmäßigem Aufbau die Richtlinien über die elektromagnetische Verträglichkeit 89/336/EWG.

4.7 Peripheriegerät ET200:

Neben den Antriebsfunktionen sind innerhalb einer Undulator-Zelle weitere Funktionen zu realisieren, beispielsweise die Ansteuerung von Korrekturspulen.

Um auch diese Funktionen an das Zentrale Automatisierungsgerät anschließen zu können, empfiehlt sich die Verwendung von dezentralen Peripheriebaugruppen aus der Gerätefamilie Siemens Simatic ET200M. Das Gerät ist modular aufgebaut und besteht aus:

einer Stromversorgungs-Baugruppe

einer Anschaltung IM153 für den Anschluß an den Profibus-DP

verschiedenen binären und analogen Ein- und Ausgabe-Baugruppen aus dem Programm des Automatisierungssystems Simatic S7-300, entsprechend der Anzahl binärer und analoger Signale

Auf die Ein- und Ausgänge des Gerätes kann vom Anwenderprogramm des Zentralen Automatisierungsgerätes zugegriffen werden.

5 Funktionen

5.1 Bedienung zentral / örtlich

Das Konzept sieht prinzipiell drei Bedien-Ebenen vor:

- Zentraler Leitstand
- Zentrale Bedienstation
- Vor-Ort-Bedienung

5.1.1 Zentraler Leitstand:

Dieser Leitstand stellt eine zentrale Einrichtung dar, die übergeordnet Einfluß nehmen kann auf alle X-FEL. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt sind fünf solcher Anordnungen geplant, die Anzahl ist jedoch problemlos änderbar.

Prinzipiell sind alle für das Zentrale Bediengerät beschriebenen Funktionen nach erfolgter Freigabe auch vom Zentralen Leitstand möglich.

5.1.2 Zentrale Bedienstation:

Wie oben beschrieben, besteht diese Station aus einem handelsüblichen Industrie-PC, einschließlich Monitor, Tastatur, Drucker, Maus ect. Dieses Gerät besitzt eine Schnittstelle zum zentralen Automatisierungsgerät in Form des Industriebusses Sinec H1 sowie eine weitere Schnittstelle zum Zentralen Leitstand über eine TCP/IP-Kopplung.

Auf dem PC ist das Visualisierungs-Programm WinCC installiert, das als Basisprogramm in industriell genutzten Leitsystemen verwendet wird. Über diese Bedienstation können grundsätzlich alle installierten Funktionen aufgerufen, gestartet und beobachtet werden sowie Parameter-Änderungen vorgenommen werden.

Für Gap-Einstellungen wird zunächst der Betrieb-Modus vorgewählt. Die folgenden Modi sind zur Zeit angedacht:

FEL Mode: Die Gaps aller Undulator-Zellen sind gleich groß und werden synchron verstellt.

Taper Mode: Die Gaps vergrößern sich stufenweise von Undulator-Zelle zu Undulator-Zelle. Die Taperfunktion, das Gap als Funktion der Undulator Zellenummer ist frei parametrierbar.

Diagnostik Mode: Eine Anzahl Gaps ist geschlossen (Minimaler Abstand), die anderen sind voll geöffnet. Die geschlossenen und geöffneten Zellen sind über Bedienung in Tabellen zu hinterlegen, diese Tabellen können beliebig geändert werden.

Vertical Gap alignment Mode: Die Mittelebene der Undulator-Zellen werden aufeinander ausgerichtet.

Local Mode: Dieser Modus wird zentral vorgewählt, die Gap-Einstellung erfolgt örtlich durch ein Handbediengerät

Weitere Modi sind vorstellbar und realisierbar. Dabei können Einstellungen folgendermaßen vorgenommen werden:

1. die Relation der Gaps zueinander ist entweder fest in Tabellenform hinterlegt, oder
2. die Relation ist in einer Rechenvorschrift abgelegt, oder
3. es gibt keine Relation der Gaps zueinander.

In den beiden ersten Fällen ist für Gap-Verstellungen der Sollwert für das erste Segment von Hand vorzugeben, die Werte für die anderen Zellen werden durch das System errechnet.

In der dritten Variante ist das Gap für jeden Undulator einzeln in das System einzugeben.

Nachdem die Werte vorgegeben sind, erfolgt über eine Start-Funktion die Übertragung der Sollwerte an die Undulator-Segmente.

In Abhängigkeit der Gaps ist der Strom für die Korrekturspulen vorzugeben. Prinzipiell sind zwei Arten der Stromwertbestimmungen möglich:

1. Es gibt einen linearen Zusammenhang zwischen Gap und Spulenstrom. Für diesen Fall errechnet das System für jeden Momentanwert des Gap den zugehörigen Strom und gibt diesen Wert über den Bus und das Peripheriegerät ET200 als Analogwert an die Spulensteuerung.

2. Der Stromwert wird diskontinuierlich verstellt. Dazu wird der Verstellbereich des Gap in Teilbereiche gegliedert. Bei Übergang des Gap von einem Teilbereich in einen anderen wird eine Bitinformation an die Spulensteuerung abgegeben.

Neben der Funktion der Gap-Einstellung sind weitere Funktionen über das Zentrale Bediengerät möglich:

Meldungen: Störmeldungen werden über das Bussystem übertragen und auf dem Monitor angezeigt. Meldungen werden von Hand quittiert. Das Kommen, Gehen und Quittieren von Meldungen wird in einem Archiv gespeichert.

Meßwerte: Meßwerte werden in Tabellenform oder in Anlagenbildern (Zahlenwert oder Balken) angezeigt. Für jeden Wert sind Grenzwerte parametrierbar. Das Erreichen eines Grenzwertes wird durch das System als Meldung behandelt. Meßwerte sind in einem Archiv zu speichern und Auswertungen in Form von Protokollen oder Kurvendarstellung am Bildschirm darzustellen oder über Drucker auszugeben.

Im Zentralen Bediengerät wird über Handeingabe festgelegt, ob Befehle an die Undulator-Zellen vom Zentralen Bediengerät oder vom Zentralen Leitstand erfolgen sollen. Eine entsprechende Freigabe-Meldung wird an den Zentralen Leitstand abgegeben.

5.1.3 Vor-Ort-Bedienung:

Wir betrachten hier zwei unterschiedliche Möglichkeiten der Bedienung vor Ort:

1. Bedienung über das Display der Frequenzumformer. Über dieses Display sind diverse Parametrier-Werte vorzugeben. Eine Umschaltung auf Display-Modus wird im Zentralen Bediengerät gemeldet. Eine Bedienung von zentraler Stelle ist dann nicht mehr möglich.
2. Bedienung über Handgerät. Dieses Handgerät ermöglicht lediglich eine Verstellung des Gap, nachdem vorher über einen Schlüsselschalter auf Ortbedienung umgeschaltet wurde. Auch in diesem Fall ist eine Bedienung von zentraler Stelle dann nicht mehr möglich.
Dieses Handbediengerät ist in erster Linie für die Einrichtungsphase vorgesehen, um direkt vor Ort Verstellungen zu ermöglichen. Dabei werden Sollwertvorgaben an den Dispatcher abgegeben, die beteiligten Transceiver werden über den Simolink mit verbunden.

5.2 Funktionen im Zentralen Automatisierungsgerät Simatic S7-400:

Das Zentrale Automatisierungsgerät kann als das Herz der Antriebssteuerung für den Undulator angesehen werden. Sämtliche Funktionen sind in Form von Programm-Modulen hier abgelegt, Betriebsdaten werden in diesem Gerät gespeichert. Über dieses Gerät findet auch der Datenaustausch zu den unterlagerten Antriebssteuerungen und der Zentralen Leittechnik statt.

Für Grundfunktionen stehen Standard-Bausteine zur Verfügung, die in industriellen Steuerungen eingesetzt werden.

Steuerungs-Funktionen sind einzelnen Programm-Modulen zugeordnet. Dadurch wird das Automatisierungs-Programm übersichtlich strukturiert. Änderungen und Ergänzungen sind zu einem späteren Zeitpunkt leicht durchführbar.

5.3 Busübertragung:

Wie im Antriebskonzept in Fig. 2 skizziert, ist das Zentrale Automatisierungsgerät über insgesamt vier Profibus-Systeme mit der Antriebsebene verbunden. Die Aufteilung ergibt sich aus der Forderung nach möglichst kleinen Laufzeiten.

Der Profibus-CBP2 ist überträgt Informationen taktsynchron. Das bedeutet, daß zunächst Nutzdaten wie z.B. Sollwerte oder Parameter über Telegramme an die angeschlossenen Teilnehmer (hier Dispatcher) übertragen werden und in Zwischenspeichern abgelegt werden. Diese Telegramme können je nach Informationsinhalt recht lang sein und damit eine hohe Buslaufzeit zur Folge haben.

Nachdem die Nutzinformation übertragen wurde, werden kurze Takt-Telegramme versendet, die eine Weitergabe der Information aus den Zwischenspeichern an die Steuerungen bewirken. Auf diese Weise wird eine quasi synchrone Informations-Übertragung erreicht.

Aus Gründen der Laufzeitoptimierung wurde der CBP2-Bus auf zwei etwa gleichlange Segmente aufgeteilt, wie in Fig.2 angedeutet. Der CBP2-Bus überträgt die Gap-Sollwerte vom Zentralen Automatisierungsgerät an die Dispatcher der Undulator-Zellen.

Für weniger zeitkritische Signalübertragungen wie z. B. Betriebsmeldungen, Störmeldungen, Meßwerte oder Sollwerte für die Korrekturspulen-Ströme dient ein Profibus-DP. Im Interesse einer möglichst hohen Übertragungsrate wurde auch dieser Bus auf zwei Segmente aufgeteilt. Diese Aufteilung bietet sich an, da das Zentrale Automatisierungsgerät ohnehin in der Mitte des Undulator-Systems angeordnet werden wird.

5.4 Verstellvorgang für das Gap:

Eine Veränderung des eingestellten Gap geschieht über eine Änderung des Gap-Sollwertes. Wie oben beschrieben, sind dazu Handeingaben an einem der Bediengeräte vorzunehmen:

Zentrales Leitsystem
Zentrales Bediengerät
Handbediengerät

Gap-Einstellungen entsprechen einem Sollwert-Sprung, der grundsätzlich auf den Dispatcher aufgeschaltet wird. Dieses Gerät übernimmt für die Antriebssteuer-Einheit die Masterfunktion. Innerhalb des Dispatcher wird der Sollwert einem Anfahrgeber aufgeschaltet, siehe Funktionsplan Masterdrive, Bild 4.

Dieser formt aus dem Sprung eine definierte Rampenfunktion für den Lage-Sollwert. Die Steilheit der Rampe ist im Dispatcher parametrierbar.

Der zeitlich variable Lage-Sollwert wird sowohl auf den internen Lageregler aufgeschaltet als auch über Simolink an die drei Transceiver der Undulator-Zelle übertragen.

Den zugeordneten Istwert liefert das absolute Längenmeßsystem. Der verschlüsselte Wert wird über eine serielle Schnittstelle EnDat-Interface direkt auf eine Schnittstellenkarte SBM2 des Masterdrive-Gerätes aufgeschaltet.

Der nachfolgende Lage-Regler vergleicht den Sollwert mit dem gemessenen Wert für das Gap. Die Regeldifferenz wird in Abhängigkeit von den Regel-Parametern als Sollwert für die Antriebs-Drehzahl dem nachfolgenden Drehzahlregler vorgegeben.

Den Drehzahl-Istwert bzw. die Rotorstellungs-Erfassung liefert ein Resolver, der im Antrieb eingebaut ist. Dieser Wert wird dem Drehzahlregler zugeführt. Aus der Regeldifferenz wird in Abhängigkeit von den Regler-Parametern die Frequenz für den Antriebsmotor gebildet.

Die Gerätefunktionen des Masterdrive-Gerätes sind im Funktionsplan in Fig 4 näher erläutert.

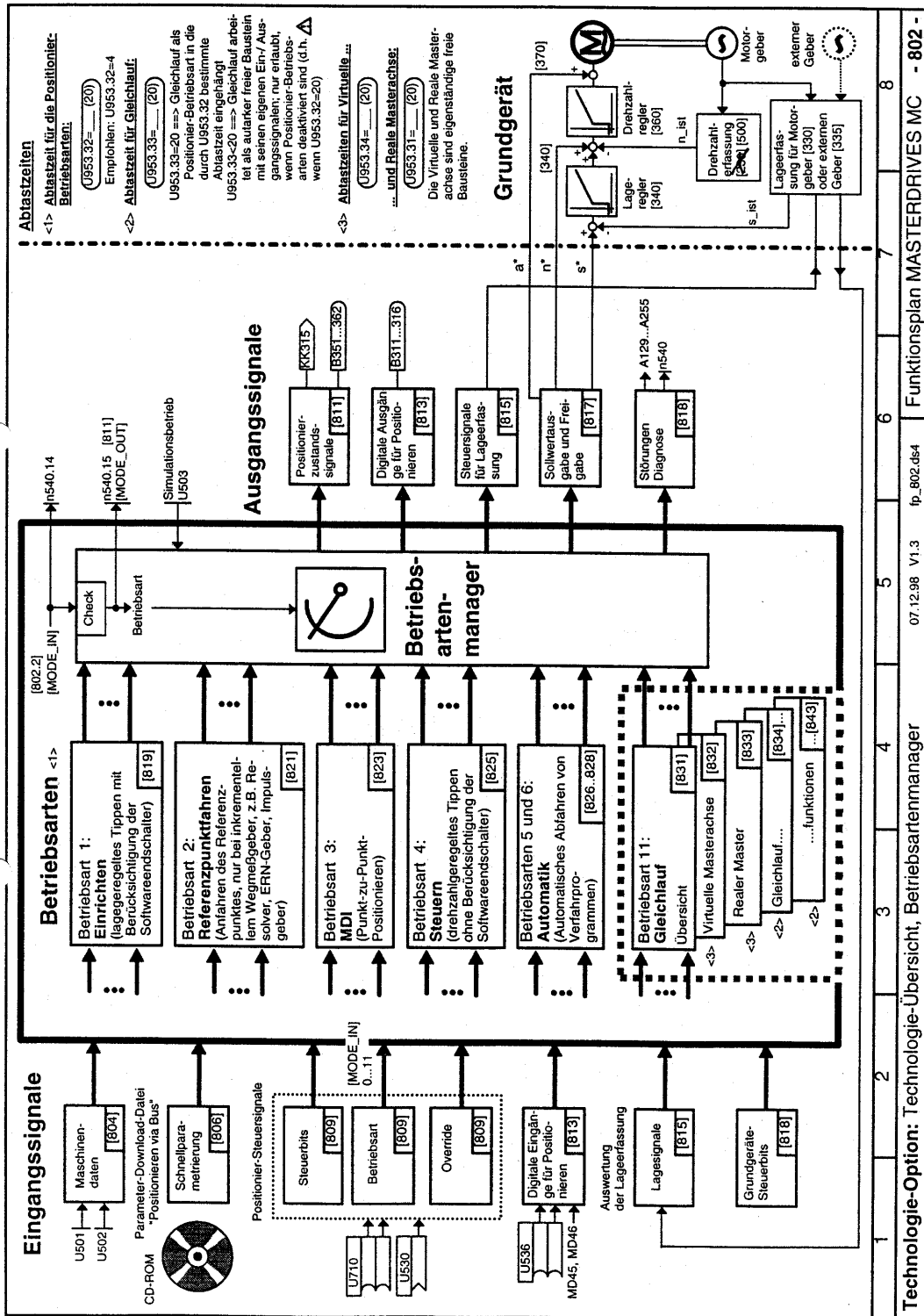


Fig. 4: Funktionsplan des Masterdrive MC

6 System-Daten

6.1 Die wesentlichen Elemente des FEL-Steuerungskonzeptes

- Geregelt Ansteuerung jedes Antriebes.
Dadurch erreichbare Einstell-Genauigkeit nur abhängig von der Genauigkeit des verwendeten Längenmeßsystems. Werte $\ll 1\mu\text{m}$ sind mit dem vorgesehenen Absolutsystem Heidenhain LC181 problemlos möglich.
Mechanische Einflußfaktoren wie Toleranzen, Verformungen, Spindelspiel ect. werden eliminiert.
Die Mittenachse der Magnetstrukturen entspricht der Zentralachse des FEL.
- Positions-Sollwertvorgabe für jedes Undulatorsegment vom Zentralgerät über Profibus CBP2.
Taktsynchronisation aller Busteilnehmer, dadurch Eliminierung von Laufzeit-Effekten, Gleichlauf während der Verstellphase über die gesamte Anordnung
- Simolink-Verbindung der Antriebe eines Undulatorsegments untereinander.
Der Dispatcher gibt den Lage-Sollwert den drei zugeordneten Transceivern vor.
Dadurch synchroner Gleichlauf aller Antriebe eines Undulators, kein „Verkanten“ der Strukturen möglich.
- Übertragung der Positionswerte von den Transceivern zum Dispatcher.
Zyklischer Vergleich der Werte, Mittelwertbildung und Überprüfung auf Abweichung zum Mittelwert. Bei Überschreitung eines einstellbaren Grenzwertes Erkennung auf Fehler und Abschaltung aller Antriebe einer Undulator-Zelle (Sicherheitsfunktion).

6.2 Verstellgeschwindigkeit

| | | | |
|----------------|--------------------------|------------|-------------------------------------|
| Voraussetzung: | Motor-Bemessungsdrehzahl | = | 6000 U / min |
| | Spindeldrehzahl | = | 1 / 10 x 6000 U / min = 600 U / min |
| | Spindelhub | = | 5 mm x 600 / min = 3000 mm / min |
| | | max | = 50 mm / sec |
| Forderung: | | | 2 mm / sec |

6.3 Motorleistung

| | | |
|---|----------------------|----------------|
| Spindelkraft | = | 100 kN |
| Verstellgeschwindigkeit (gefordert) | = | 2 mm / sec |
| Antriebsleistung (ohne Reibung) = Kraft x Weg / Zeit = 100 kN x 2 mm / sec | = | 200 W |
| Berücksichtigung des Spindel-Wirkungsgrades von 70 % | P_N | = 286 W |

6.4 Nenn-Daten, Grenzwerte:

| | | |
|--|---|------------|
| Anschlußwert für eine Undulator-Zelle (400 V) | = | ca. 1,5 kW |
| Verlustleistung / Undulator-Zelle | = | < 100 W |
| maximale Anzahl Teilnehmer / Profibus-DP Netz | = | 127 |
| maximale Anzahl Slaves / Profibus CBP2 Segment | = | 31 |
| maximale Anzahl Teilnehmer / Simolink-Bus | = | 201 |
| Ausfallrate Masterdrive-Frequenzumformer | = | 140.000 |

7 Budget-Preis:

Unter der Voraussetzung, daß die Realisierung des Projektes im Jahre 2001 erfolgen würde, ist mit nachfolgend aufgeführten Budget-Preisen zu rechnen:

Preis pro Undulator: **Eur 20.400**

Schaltschrank mit Masterdrive-Geräten, ET 200, Zubehör
Servo-Motoren, Längenmeßsysteme, Kabel
Schaltschrank-Fertigung, Montage, Inbetriebnahme

Preis für Zentrale Hardware: **Eur 26.000**

Preis für Zentrales Automatisierungsgerät
Zentrale Bedienstation, Handbediengerät

Preis für Engineering: **Eur 125.000**

Hardware-Planung
Software-Programmierung

Den Preisen liegen die folgenden Mengen-Angaben bezüglich Errichtung von Undulatoren zugrunde:

2x Undulator mit 53 Zellen

1 x Undulator mit 51 Zellen

1 x Undulator mit 29 Zellen

1 x Undulator mit 45 Zellen

5 x Undulator mit 10 Zellen

Insgesamt werden 10 Undulatorsysteme mit zusammen 281 Zellen aufgebaut.

8 Anhang A

Antriebskonzept der Undulatoren für den X-FEL bei TESLA

Allgemeines

Freie Elektronen Laser sind hochintensive Lichtquellen der neuesten Generation. Mit ihnen ist es möglich, je nach Auslegung und Wahl von Parametern, Licht mit Lasereigenschaften (Intensität, Kohärenz) im gesamten spektralen Bereich zu erzeugen. Von besonderem Interesse sind diese Eigenschaften dort wo es bisher keine Laser gab im Wellenlängenbereich unter etwa 120 nm beginnend im Ultravioletten Spektralgebiet bis zum Röntgengebiet mit Wellenlängen von ca. 0.1nm.

Bei DESY wird zur Zeit ein solcher Röntgen FEL geplant, der in Zusammenhang mit dem TESLA Projekt realisiert werden soll. TESLA steht für Tera Electronvolt Superconducting Linear Accelerator. Er ist das neue Zukunftsproject bei DESY Die Planungen haben begonnen und sind aber soweit sie den Aufbau des FEL's betreffen in einem frühen Stadium.

FEL's

Ein FEL ist ein komplexer Aufbau. Die Kernkomponenten sind:

- Eine sogenannte RF Gun, in der ein Elektronenstrahl hoher Qualität erzeugt wird Der Strahl wird in Paketen, den Bunchen erzeugt. In einem Bunch befinden sich etwa 10^9 Elektronen (1nC)
- Im Bunch Kompressor wird der Strahl räumlich und zeitlich komprimiert, so daß die Länge eines Bunches nur noch 20-50µm beträgt, was Pulsdauern von 100-200 Femtosekunden entspricht.
- Ein Linearbeschleuniger beschleunigt den Strahl auf Energien von ca 10-30 GeV (Gigaelektronenvolt)
- Im Undulator, dem Herzstück der Anlage findet der FEL Prozess statt. Dies ist unten weiter beschrieben

Bei DESY in Hamburg wurde bislang die TESLA Test Facility (TTF) aufgebaut. Diese Anlage ist ein Systemtest für den „großen“ Röntgen FEL und den TESLA Linearbeschleuniger.

Mit dem an der TTF aufgebauten FEL wurde das allen Röntgen FEL's zugrunde liegende SASE Prinzip (= Self Amplified Spontaneous Emission) im Februar 2000 erstmalig bestätigt. Die TTF Anlage hat mit Undulator eine Gesamtlänge von ca. 105m Sie erzeugt Strahlung bei 100nm im Vakuum Ultravioletten (VUV) Spektralgebiet ist also noch weit vom harten Röntgenbereich entfernt. Röntgen FEL's sind deshalb um ein vielfaches größer. Die folgende Beschreibung konzentriert sich auf den Undulator und die damit verbundene Probleme des Antriebskonzepts. Eine weitergehende Beschreibung der anderen Aspekt würde den Rahmen dieser Beschreibung bei weitem sprengen.

Undulatorprinzip

Ein Undulator (von Unda, lat. die Welle) ist ein Gerät welches ein Magnetfeld erzeugt, dessen Stärke entlang der Geräteachse periodisch näherungsweise sinusförmig variiert. Ein entlang dieser Achse laufender Elektronenstrahl läuft dann auf einer näherungsweise sinusförmigen Bahn wobei hochintensive Strahlung emittiert wird, die sich entlang der Geräteachse selbst exponentiell verstärkt. Das Magnetfeld wird mit einer Anordnung aus starken Permanentmagneten aus NdFeB Material erzeugt. Abb A1 zeigt eine sogenannte Hybrid Struktur in welcher Magnete und Pole aus weichmagnetischem Material kombiniert

werden. Die Struktur ist aus Symmetriegründen in zwei Hälften, eine obere und eine untere unterteilt. Die Magnete, erkenntlich an den Magnetisierungspfeilen, sind so angeordnet, daß der Fluß in die Pole „hineigepresst“ bzw. „herausgesogen“ wird. Auf diese Weise werden die magnetischen Feldlinien durch die Pole im Luftspalt zwischen den beiden Strukturhälften, dem Gap konzentriert. Die Richtung des magnetischen Feldes ändert sich von Pol zu Pol. Die Feldstärke hängt stark vom Gap ab. Eine **genaue Kontrolle des Gaps ermöglicht somit eine genaue Kontrolle der magnetischen Feldstärke.**

Praktisch baut man die Magnetstruktur auf zwei Träger, einen unteren und einen oberen auf. Die Träger werden mit stabilen Supporten verbunden. Eine geeignete Führung mit Schlitten, Spindeln und passenden Antrieben ermöglicht es das Gap und somit die magnetische Feldstärke präzise einzustellen.

Bei DESY werden Undulatoren seit 1984 zwar nicht für FEL'S sondern zur Erzeugung von Synchrotronstrahlung verwendet wird. Ihr Aufbau hat aber mit den geplanten Magnetstrukturen für FEL's sehr viel gemeinsam. Abb.A2 zeigt eine solches Gerät vor dem Einbau. Die erforderliche Vakuumkammer für den Elektronenstrahl sowie der Beschleuniger sind noch nicht zu sehen.

Man kann die Anordnung der Magnete entsprechend Abb. A1 gut erkennen. Die Gesamtlänge beträgt hier 4.0m Ein massiver Aufbau und großzügige Auslegung der Komponenten wie z.B. der Trägerprofile und Führungssäulen ermöglichen eine große mechanische Stabilität und Genauigkeit. Der Antrieb zur Gapverstellung erfolgt über einen zentralen Drehstrommotor, einem T-Getriebe, zwei Winkelgetrieben sowie zwei Doppelspindeln mit rechts-links Gewinde. Mit dem gezeigten Gerät lassen sich maximale Feldstärken von 1.15 Tesla bei einem Gap von 30mm erzielen. Die magnetischen Anziehungskräfte betragen ca. 100kN. Die Einstellgenauigkeit des Gaps ist besser 25µm und lediglich durch die verwendete Steuerung des Drehstrommotors begrenzt. Für die vorgesehene Verwendung in DORIS ist das ausreichend.

Undulatoren für FEL's

Das Arbeitsprinzip eines Undulators für einen FEL ist mit dem oben beschriebenen identisch. Es gibt jedoch zwei Unterschiede. Zum einen sind für FEL's die Genauigkeitsanforderungen an die Kontrolle des Gaps erheblich größer, zum andern sind hier Undulatoren mit einer erheblich größeren Gesamtlänge erforderlich. Röntgen FEL's erfordern typische Gesamtlängen von etwa 2-300m. Sie können nicht am Stück gebaut werden.

Abb A3 zeigt als Beispiel den Aufbau des Undulators für den FEL an der TTF. Der Undulator ist in drei Segmente unterteilt. Die Gesamtlänge des Aufbaus beträgt ca. 14.5m. Ein Segment ist 4.5m lang. Davor und dazwischen befinden sich Monitore, Korrekturspulen und Strahldiagnostik. Röntgen FEL's werden im Prinzip gleich aufgebaut werden, jedoch wird die Anzahl der Segmente erheblich größer sein.

Undulatorkonzept für den TESLA - FEL

Aufteilung in Zellen

Für den Röntgen FEL ist eine Gesamtlänge von bis zu 320m erforderlich. Geplant ist, den Undulator, wie oben erwähnt, in 5m langen **Undulatorsegmenten** zu fertigen. Die einzelnen Undulatorsegmente werden hintereinander in wohldefinierten Abständen angeordnet. In den Zwischenräumen befinden sich elektronenoptische Komponenten, sogenannte Quadrupole sowie Diagnoseelemente und Korrekturspulen. Die Komponenten in den Zwischenräumen werden jeweils einem Undulatorsegment zugeordnet. Eine Einheit, bestehend aus Undulatorsegment, Quadrupol, Diagnoseelementen und Korrekturspulen wird als **Undulatorzelle** bezeichnet.

Eine solche Zelle ist im oberen Teil von Abb. A4 schematisch dargestellt, wobei nur die für den Undulator antrieb relevanten Komponenten gezeigt werden. Der untere Teil von Abb A4 zeigt schematisch die Aneinanderreihung von Zellen zum Undulatorgesamtsystem.

Undulatorsegment

Bei DESY wird zur Zeit eine Studie durchgeführt, die ein mechanisches Konzept für ein Standard Undulatorsegment erarbeiten soll, wobei folgende Bedingungen zu erfüllen sind:

- Konzeption als Standard Undulatorsegment, . Alle Teile werden für die höchste zu erwartende Beanspruchung ausgelegt. Es soll für alle Magnetstrukturen verwendet werden.
- Berücksichtigung der räumlichen Nebenbedingungen (Bauhöhe, Einbautief, Transport etc.)
- Gewährleistung der mechanischen Präzision, (Belastung durch wechselnde Magnetkräfte, mechanische Stabilität, Verfahrengenauigkeit der Antriebe)
- Kostenmäßige Optimierung der Konstruktion im Hinblick auf spätere Fertigung großer Stückzahlen („Massenfertigung“)

Abb. A5 zeigt einen Entwurf, auf dessen Grundlage die weitere Entwicklung vorangetrieben werden soll. Er verdeutlicht die wesentliche Prinzipien und zeigt Unterschiede im Vergleich mit Fig.A2 und A3. Die Träger sowie die Rahmenstruktur wurden wesentlich verstärkt, die Form vereinfacht. Die Führungen für die Gapverstellung wurden so nahe wie möglich an die Magnetstruktur herangebracht um Momente an den Führungselementen zu minimieren. Der Antrieb erfolgt mit vier Einzelmotoren, die zum Gleichlauf elektronisch synchronisiert sein müssen, wobei vollkommen auf Verteilergetriebe, Wellen, Kupplungen, Winkelgetriebe etc verzichtet werden kann. Der Antrieb erfolgt nun mit vier einzelnen Motoren und bietet dadurch zusätzliche Freiheitsgrade, die bei der Konzeption vorteilhaft genutzt werden können. Der Gleichlauf der Motoren muß überwacht werden um einerseits eine synchrone Bewegung aller vier Motoren zu erreichen und andererseits Beschädigungen an Magnetstrukturen und Beschleunigerkomponenten z. B. beim Ausfall eines einzelnen Motors zu vermeiden. Hier wäre ein Verkeilen der beiden Träger mit Überbelastung bzw. Beschädigung von Magnetstrukturen, Führungen etc. die Folge. Eine vorläufige Spezifikation mit Daten, die für die Auslegung des Antriebs relevant sind ist in Tabelle A1 zusammengefaßt.

Korrekturspulen, Diagnose, Quadrupole

Neben dem Undulatorsegment gehört zu einer Undulatorzelle ein Satz von voraussichtlich 4-5 Korrekturspulen, Elektronenstrahldiagnosekonponenten sowie ein Quadrupol. Elektronenstrahldiagnosekonponenten und Quadrupol arbeiten unabhängig vom zugeordneten Undulator. Auf die Korrekturspulen trifft das jedoch nicht zu. Die einer Zelle zugeordneten Komponenten sind in Abb A4 schematisch zu sehen. Im allgemeinen Fall ist der Korrekturstrom in einer Spule eine Funktion des Gaps des betreffenden Undulatorsegments, also der Strom für die K-te Korrekturspule (voraussichtlich: K: 1...5) in der Undulatorzelle J ist somit eine Funktion des Gaps dieses Undulatorsegments :

$$I_{J,K} = F_{J,K}(\text{gap}_J)$$

Diese Funktion kann prinzipiell für jede Korrekturspule und jedes Undulatorsegment unterschiedlich sein. Sie ist aber bekannt und kann z.B. in Form einer Tabelle von 10-20 Werten angenähert angegeben werden wobei Zwischenwerte interpoliert werden. Es wird von Zeit zu Zeit erforderlich sein diese Werte zu aktualisieren. Innerhalb einer Undulatorzelle muß das Antriebssystem jedes Undulatorsegments für die zugeordneten Stromversorgungen die Sollwerte bereitstellen. Über Details wie Formate,

Schnittstellen etc. kann zur Zeit noch frei verfügt werden. Es sollen jedoch marktübliche Komponenten und Schnittstellen verwendet werden.

Anforderungen an die Antriebsteuerung

In diesem Abschnitt werden die Anforderungen an das Antriebssystem eines Undulatorsystems beschrieben soweit es beim derzeitigen Stand der Planung überschaubar ist.

Bis zum regulären Betrieb durchläuft ein Undulatorsegment mehrere Stadien, die auf die Konzeption des Antriebssystems Einfluß haben können und die hier beschrieben werden.

- Nach der Fertigung beim Hersteller wird an jedem Undulatorsegment ein ausgiebiges Test und Messprogramm durchgeführt, das vor allem der Sicherstellung und der Einhaltung von magnetischen Toleranzen dient. Hierzu wird es Messanlagen geben, die vom eigentlichen Aufbau des Undulatorsystems vollständig getrennt aufgebaut werden. Auf diesen Messanlagen werden die magnetischen Eigenschaften als Funktion des Gaps gemessen und erforderlichenfalls korrigiert. So werden z.B. auch die Bestromungskurven der 5 zugeordneten Korrekturspulen bestimmt. Jede Undulatorzelle muss mitsamt ihres Antriebssystems an der Messanlage unabhängig betrieben werden können.
- Nach der Vermessung werden die Undulatorsegmente im Gesamtsystem installiert. Hierbei sind zwei Anforderungen zu berücksichtigen: Zum einen ist für Eistellararbeiten ‚Vor Ort‘ ein Handsteuermodus notwendig, mit dem das Gap des betreffenden Segments lokal und ohne das Mitwirken des Kontrollsystems verändert werden kann. Dieser ‚Lokale Betriebsmodus‘ ist auch bei der Montage der Undulatorsegmente sehr nützlich. Zum zweiten soll der 4-Achsantrieb für die Feinjustage der Mittelebene, zwischen den beiden Trägerhälften verwendet werden. Hierzu wird es sowohl geeignete Messmarken als auch eine brauchbare Vermessungsmethode geben.
- Im regulären Betrieb kommen Betriebsarten vor, die im nachfolgenden näher beschrieben werden. In diesen Betriebsarten wird die Anlage von einem übergeordneten Kontrollsystem / Steuerrechner gesteuert. Abb. A6 zeigt eine schematische Übersicht zusammen mit den bereits angesprochenen ‚Lokalen Betriebsmodus‘ und dem ‚Justiermodus‘: Alle diese Betriebsarten sind heute absehbar und werden in jedem Fall benötigt.
Im regulären Betrieb werden die Gaps aller Undulatorsegmente synchron verfahren (Abb. A6 / Modus 1). Die jedem Undulatorsegment zugeordneten Korrekturspulen werden wie oben beschrieben synchron mitgeführt. Diese Betriebsart wird ‚FEL Mode‘ genannt. Gapverfahrgeschwindigkeiten, Genauigkeit der Gapeinstellung, der Synchronisation, der Stromkompensation ist in Tabelle A1 festgelegt.
Im ‚FEL Taper Mode‘ (Abb. A6 / Modus 2) sind die Verhältnisse ähnlich wie im ‚FEL Mode‘, jedoch ändert sich das Gap geringfügig von Undulatorsegment zu Undulatorsegment. Der ‚Taper‘ d.h. die Gapzunahme muß dabei einstellbar sein. Korrekturspulen etc. werden entsprechend synchronisiert. Vollkommen anders ist der ‚Diagnostik Modus‘. (Abb. A6 / Modus 3). Hierbei werden an einzelnen Undulatorsegmenten oder an Gruppen von Segmenten die Gaps geschlossen und die übrigen weit geöffnet, wobei an den geschlossenen Segmenten die Stromsynchronisation angeschaltet sein soll. In diesem Modus können eine Reihe von Diagnoseproblemen bearbeitet werden. So z.B. das Feinjustieren des Strahls (Photon Beam Based Alignment) oder ein Feinabgleich der Korrekturspulen und der Phaseschiebermagnete.

Es sind über die hier beschriebenen weitere Betriebsarten für Diagnosezwecke denkbar: So z. B. ein Modus, bei dem Teile des Undulators am Anfang oder Ende nicht benutzt werden, die Gaps dort also weit geöffnet sind.

In einer weiteren Betriebsart werden nur die Ströme in den Korrekturspulen verändert werden ohne daß die Gaps verstellt werden. Ebenso kann es erforderlich sein nur die Gaps ohne die Korrekturströme zu verstellen. Alle Anforderungen können heute noch nicht mit Sicherheit vorausgesehen und angegeben werden. Sehr von Vorteil wäre deshalb ein System, welches eine hohe Flexibilität bietet und so programmierbar ist, daß zukünftige Anforderungen erfüllt werden können.

Die Planungen für den TDR gehen von 10 Undulatorsystemen mit insgesamt 281 Zellen aus. Deren Gesamtlänge beträgt 1714m. Diese Zahlen könne sich aber noch ändern. Ein offen erweiterbares Antriebssystem, bei dem Undulatorzellen auf einfache Weise hinzugefügt oder auch weggenommen werden können ohne das Gesamtsystem grundsätzlich zu ändern ist hier von großem Vorteil. Die Anforderungen an den Antrieb sind in Tabelle A1 näher zusammengefasst.

Tabelle A1 : Anforderungen an das Antriebssystem

| | | |
|---|--------|--------------------------------------|
| Gapverstellbereich | mm | 10 - 200 |
| Anzahl der Antriebe je Undulatorsegment | - | 4 |
| Hub je Spindel | mm | 100 |
| Spindelsteigung | mm | 5 |
| Max. Kraft je Spindel | kN | 100 |
| Max. Gapverstellgeschwindigkeit | mm/sec | > ≈ 2 |
| Gap Einstellgenauigkeit | µm | 1 |
| Synchronisationsgenauigkeit der Achsen aller Zellen während der Fahrt | µm | < 10 |
| Max. Anzahl der zu synchronisierenden Stromquellen je Undulatorzelle | - | 5 |
| Stromsynchronisationsintervall | µm | < ≈ 200 |
| Resultierende Stromsynchronisationsfrequenz | Hz | > ≈. 10 |
| Anzahl der Undulatorzellen je Undulator | | 10 - 100 (variabel konfigurierbar) |

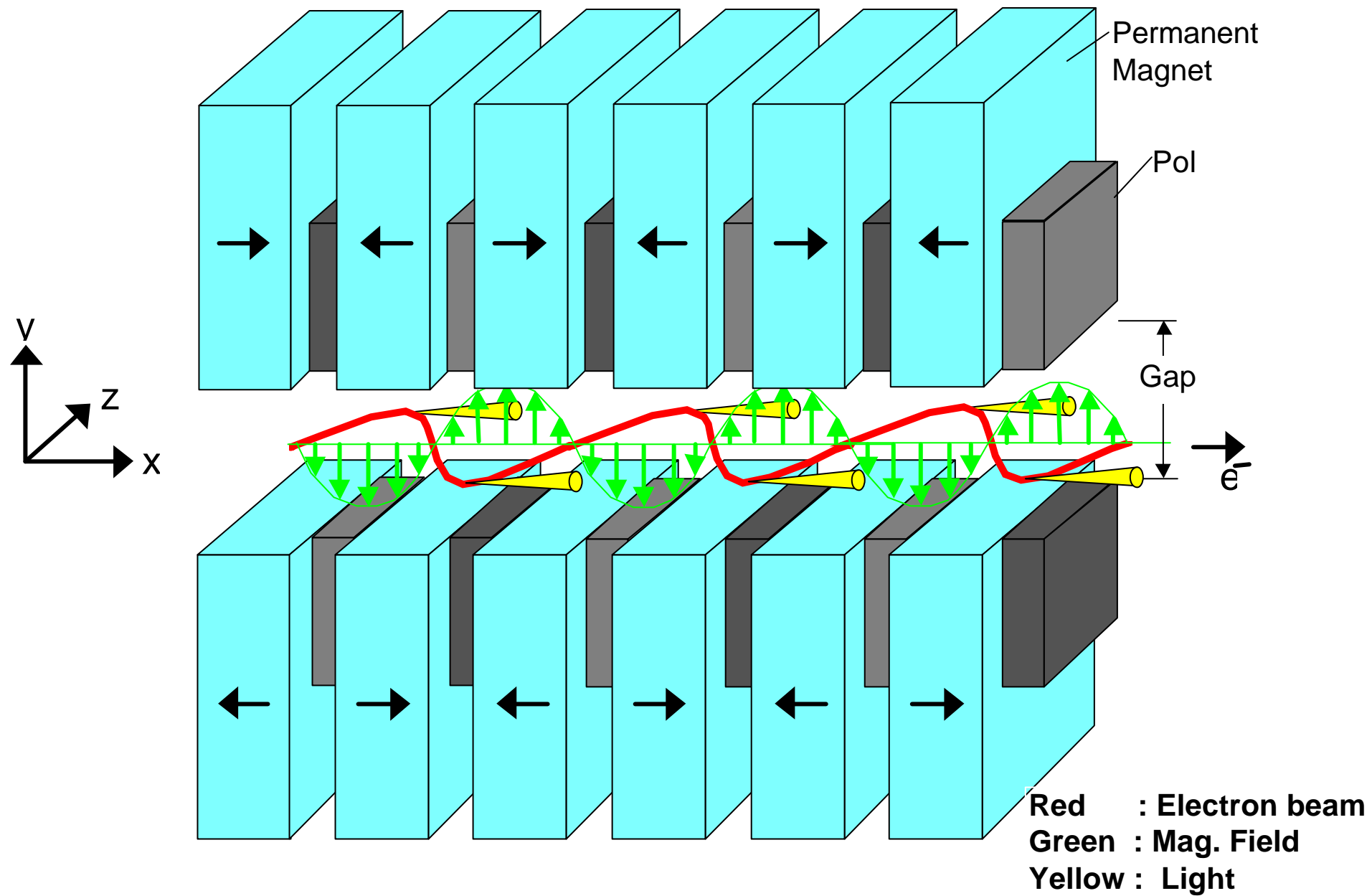


Fig. A1 Arbeitsprinzip eines Undulators

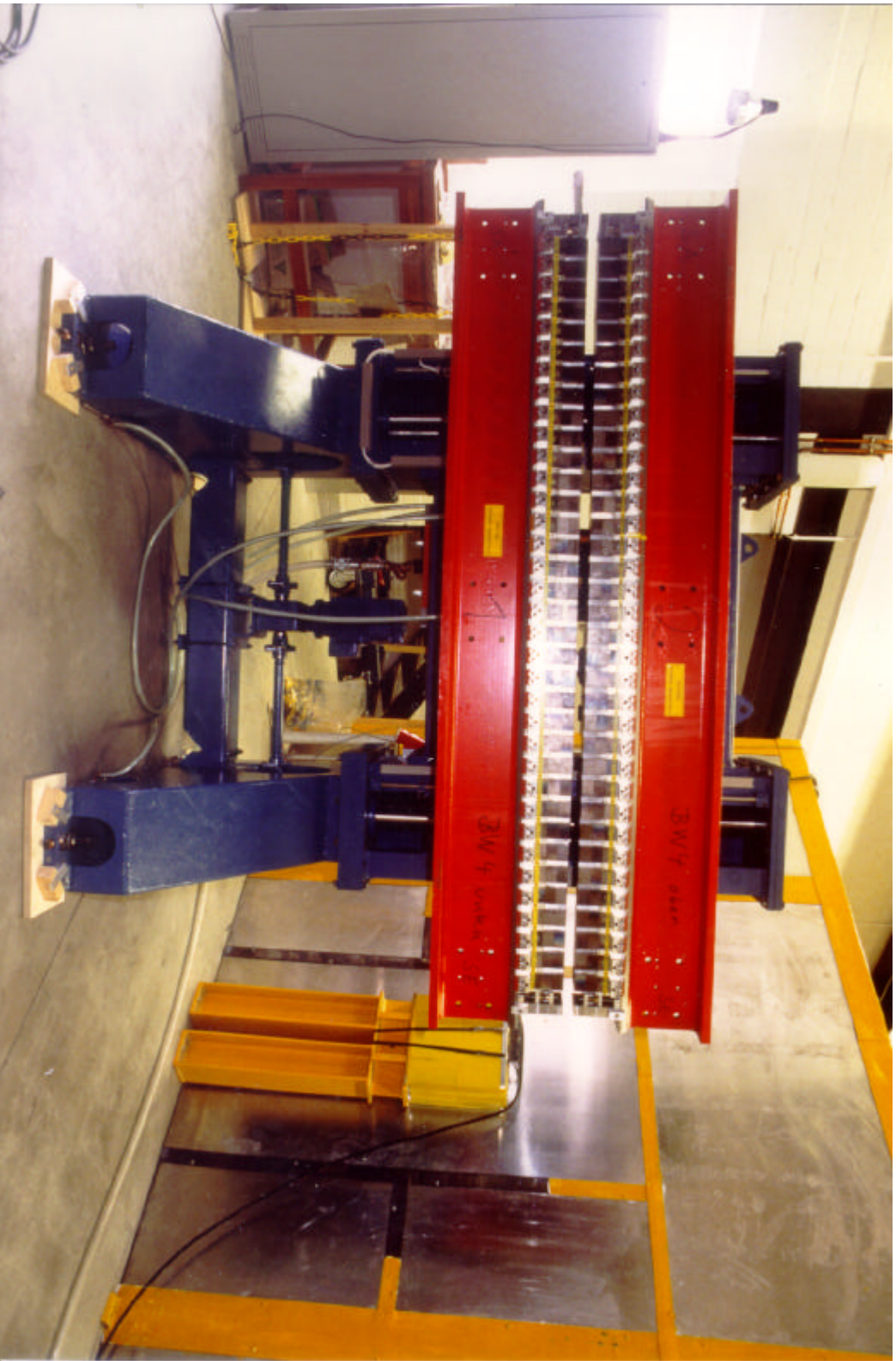


Fig. A2 Undulatorsegment, wie es zur Zeit im DORIS Speicherring eingesetzt wird.

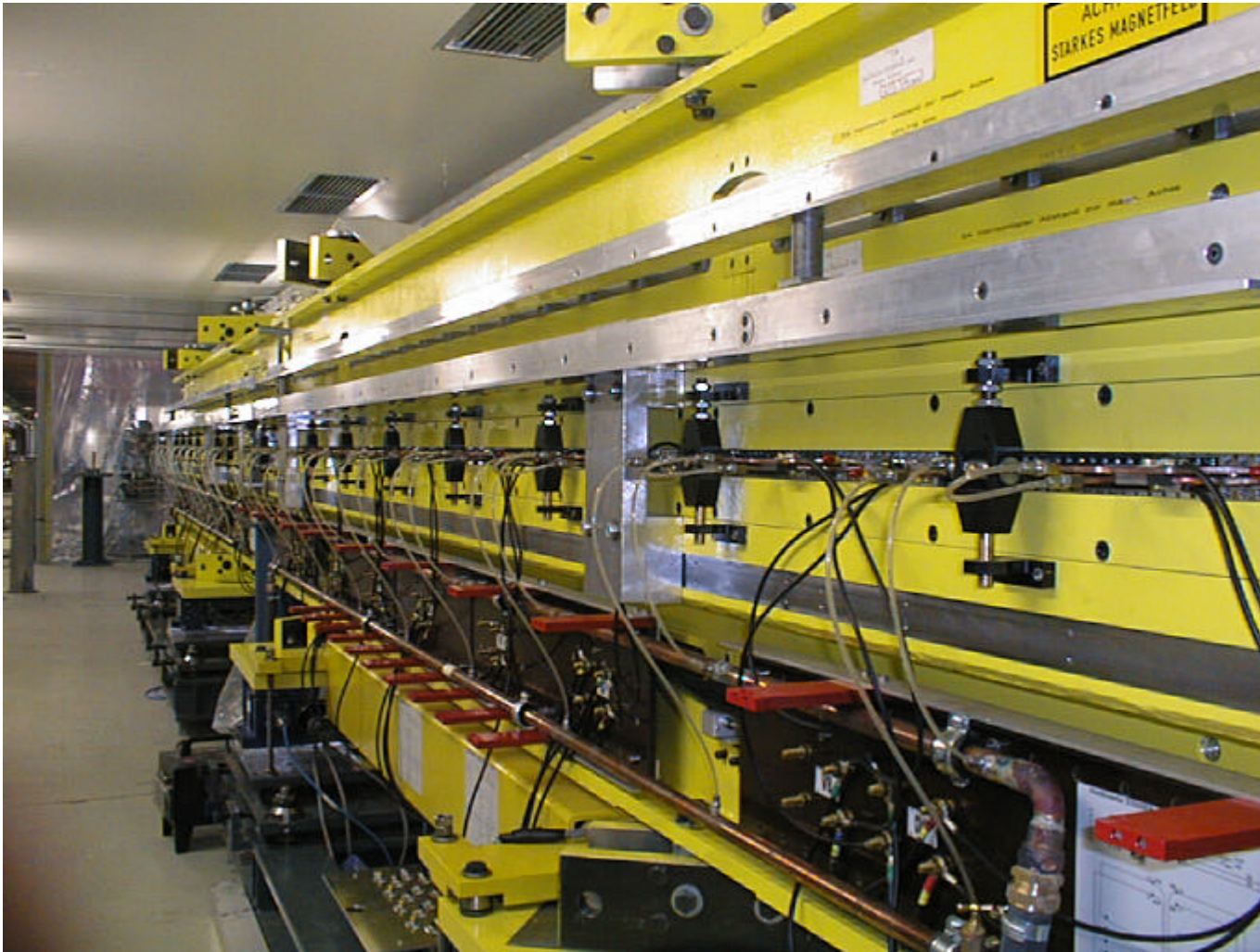
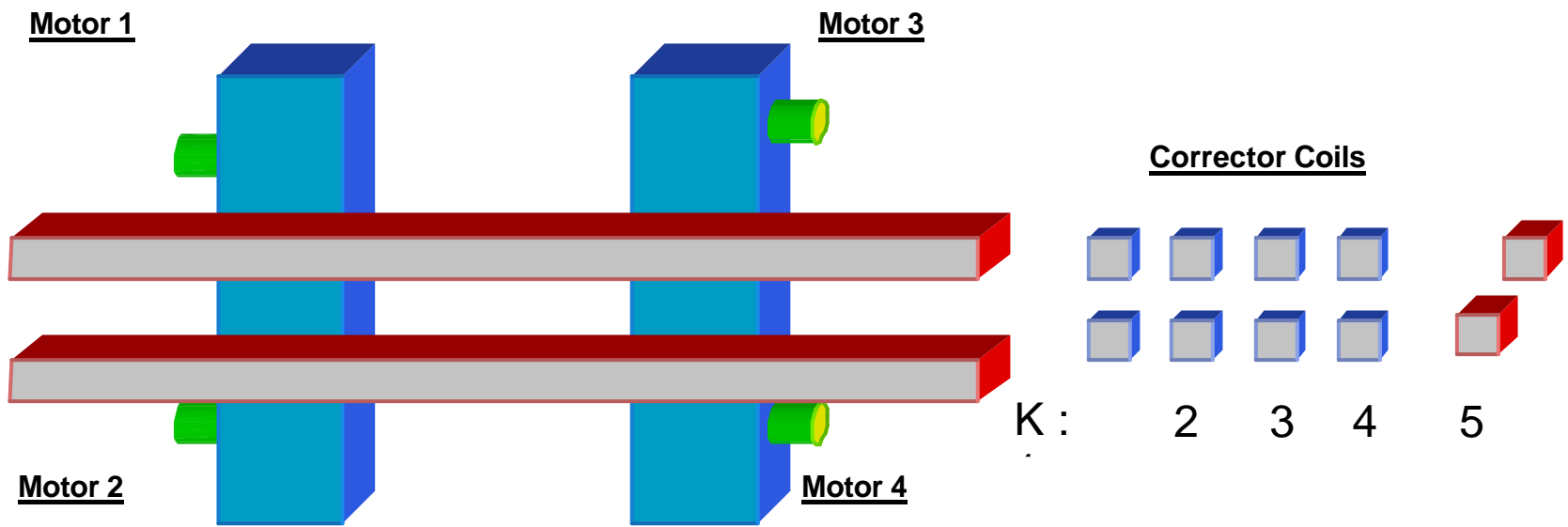


Fig A3 : Undulatorsystem für den VUV FEL an der TESLA Test Facility.
Die Gesamtlänge beträgt ca. 15m



Undulator Cells in Series

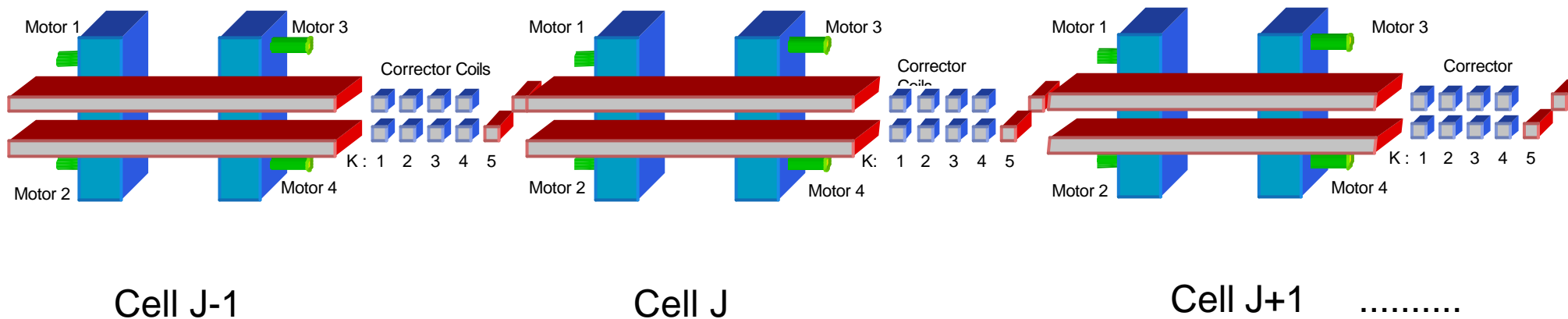


Fig A4 Zellenstruktur eines Undulatorsystems für den TESLA-FEL

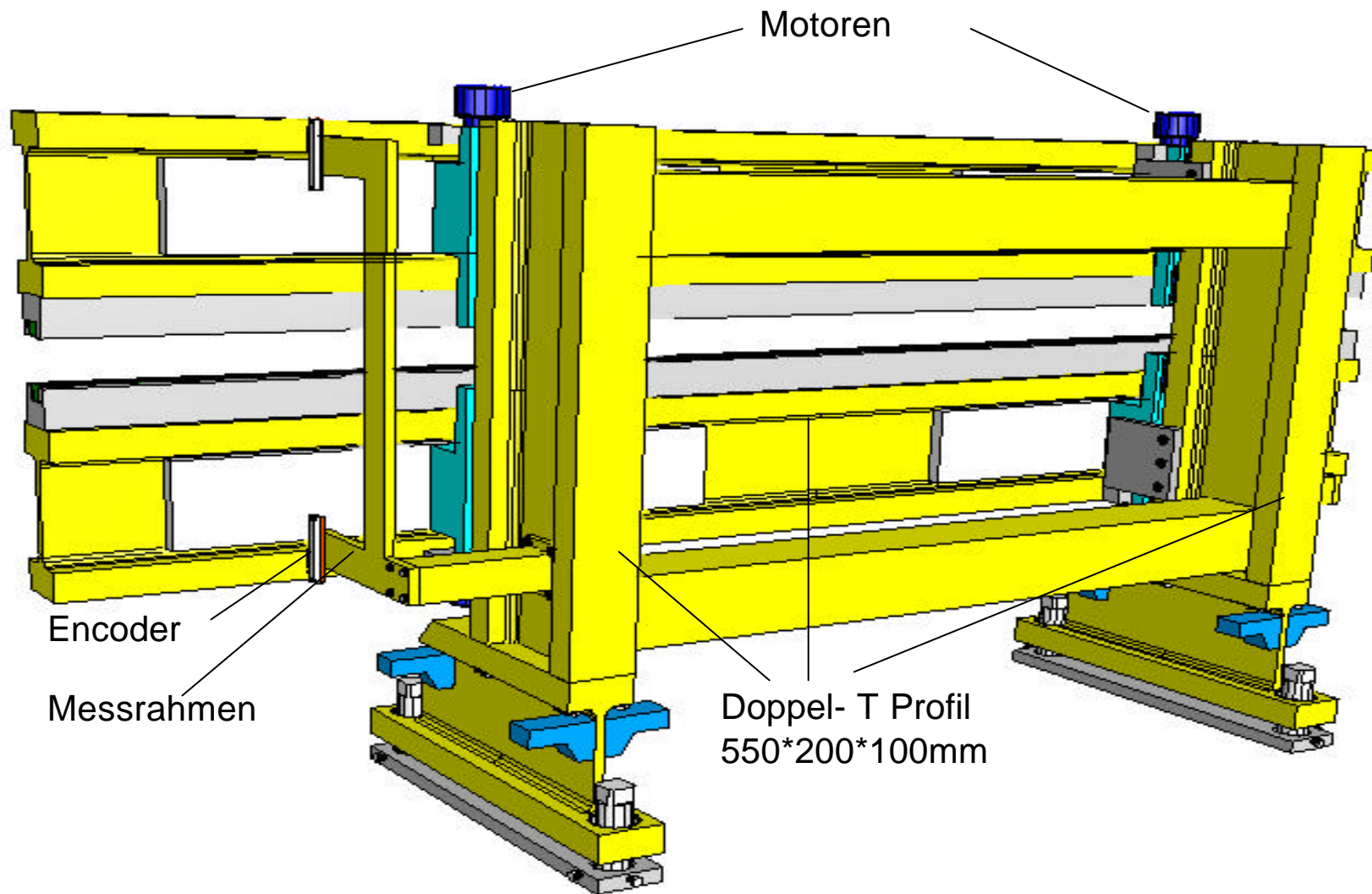
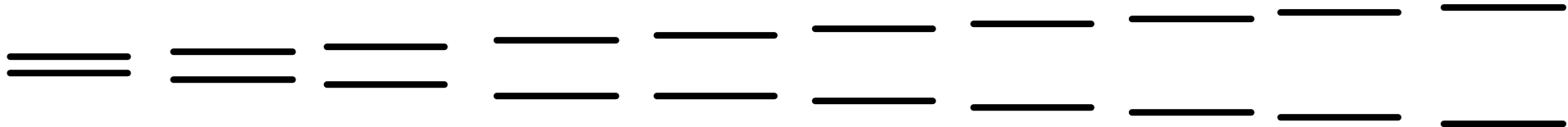


Fig. A5 Standard Segment eines TESLA Undulatorsystems

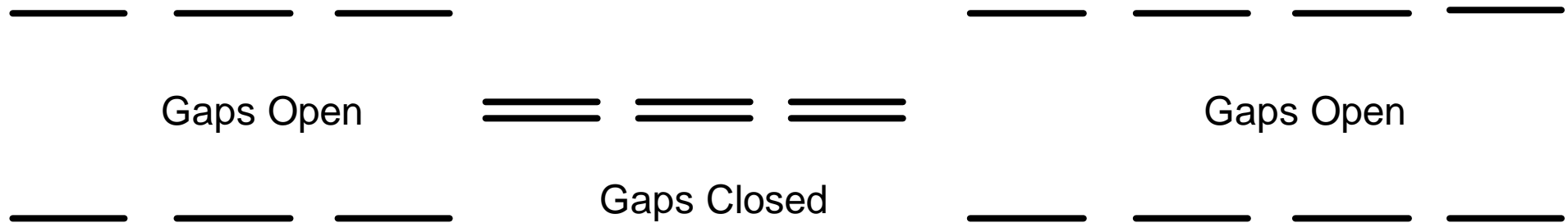
1 . FEL Mode : All gaps move synchronously



2. FEL Taper Mode : Gaps increase from device to device



3. Diagnostik Mode: Few devices closed, all other open



4. Vertical Gap alignment Mode : The center plane of each undulator segment is aligned

5. Local Mode : The gap of each undulator segment is adjusted locally with pushbutton control

6. More modes: Control of power supplies without gaps, gaps without power supplies, operate only a part of the undulator

Fig A6: Einige Betriebsmodi eines Undulatorsystems