

**ASDEX UPGRADE  
Montagefahrbahn**

K. Ennen, E. Lackner, W.H. Reese\*

IPP 1/243

Juni 1987



**MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK**

**8046 GARCHING BEI MÜNCHEN**

**MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK**  
**GARCHING BEI MÜNCHEN**

**ASDEX UPGRADE**  
**Montagefahrbahn**

K. Ennen, E. Lackner, W.H. Reese\*

IPP 1/243

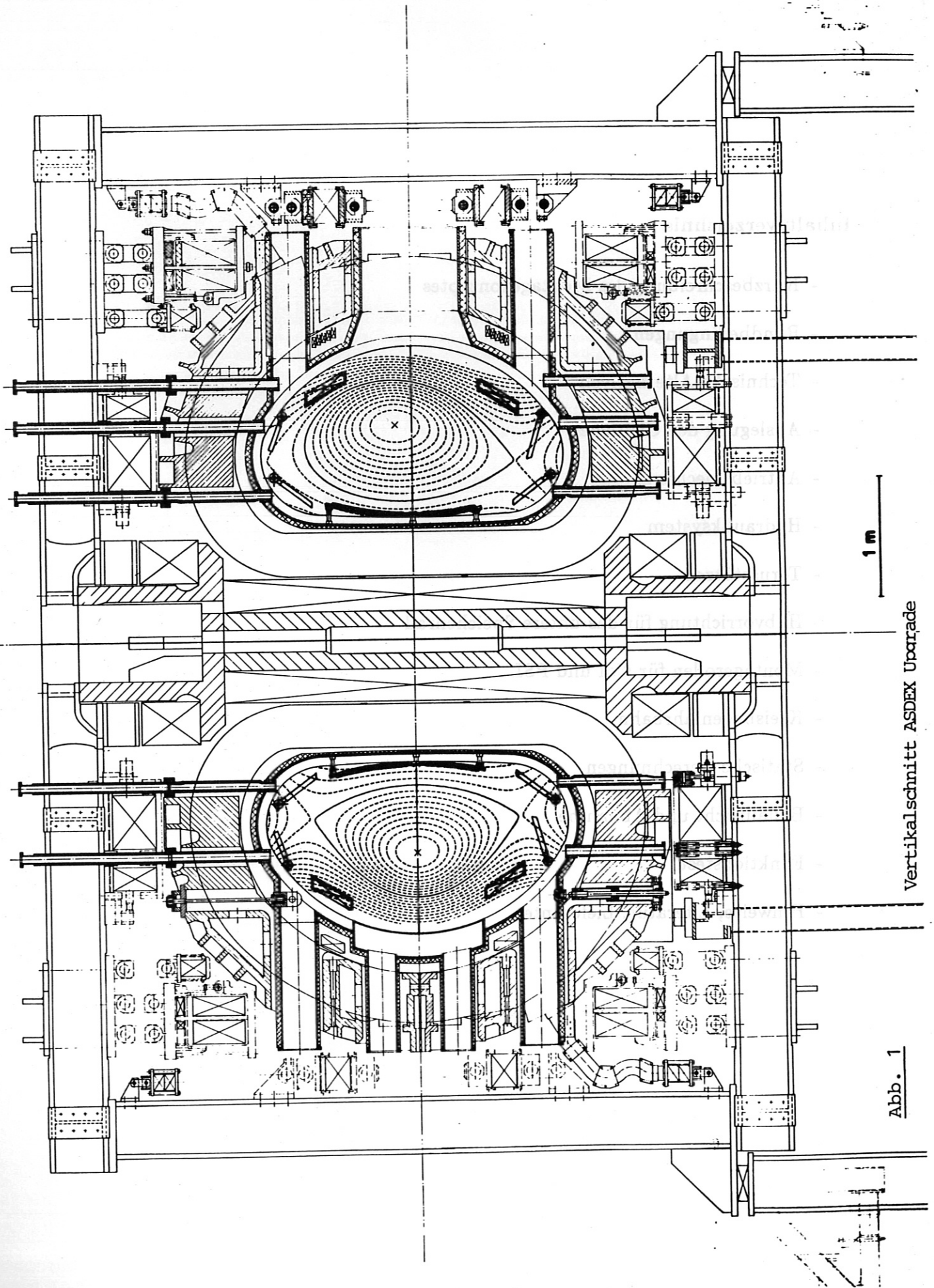
Juni 1987

\* Fa. Noell GmbH, Würzburg

*Die nachstehende Arbeit wurde im Rahmen des Vertrages zwischen dem Max-Planck-Institut für Plasmaphysik und der Europäischen Atomgemeinschaft über die Zusammenarbeit auf dem Gebiete der Plasmaphysik durchgeführt.*

## Inhaltsverzeichnis

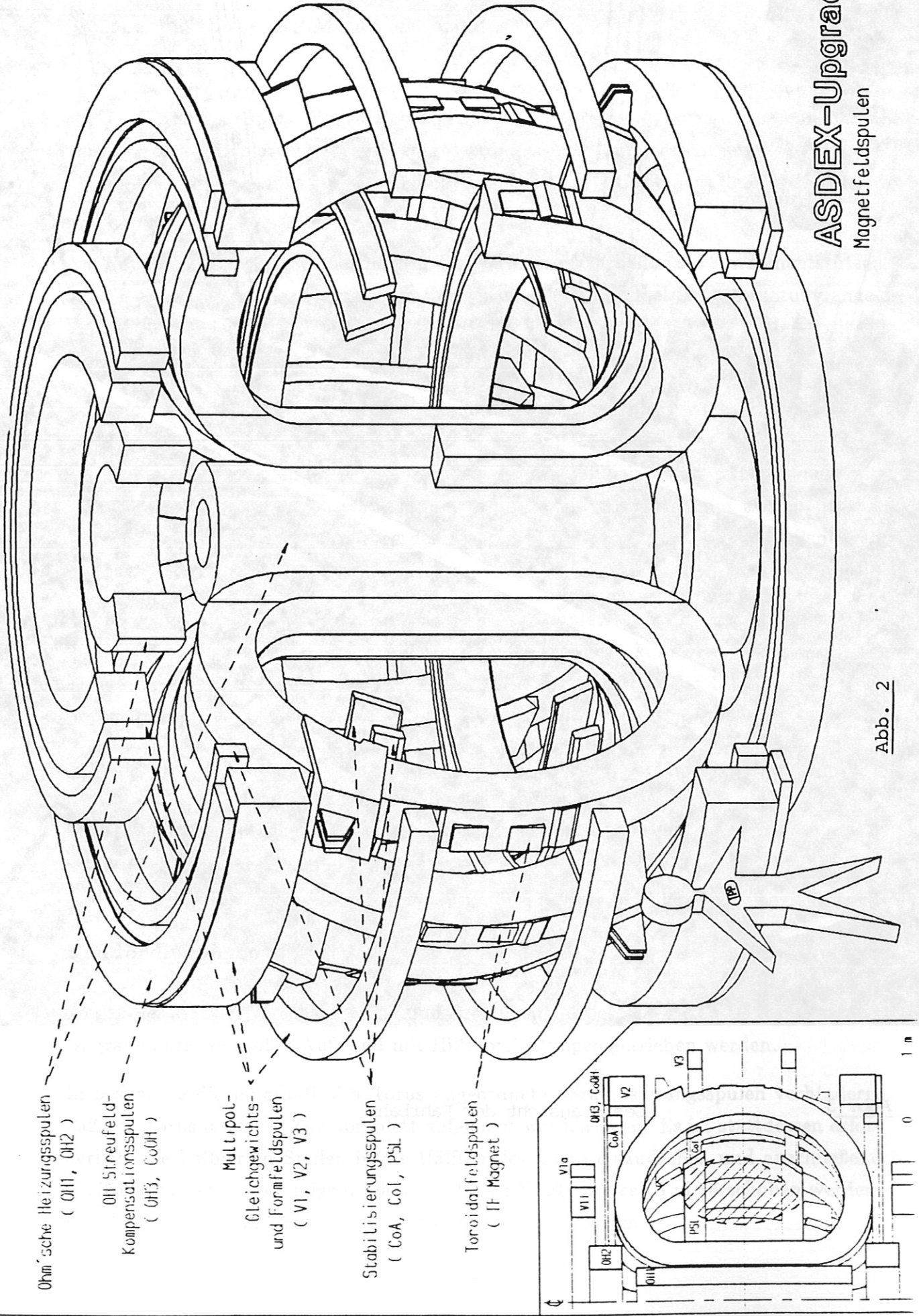
- Kurzbeschreibung des Montagekonzeptes
- Randbedingungen
- Technische Alternativen
- Auslegung der Gleitlager
- Antriebsmechanik
- Hydrauliksystem
- Torusstützen
- Hubvorrichtung für das untere Speichenrad
- Montagerollen für CoI und PSL
- Kreisbogenfahrbahn
- Statische Berechnungen
- Bauaufsicht und Abnahme
- Funktionstest
- Hinweise, Literatur, Lieferanten



1 m

Vertikalschnitt ASDEX Upgrade

Abb. 1



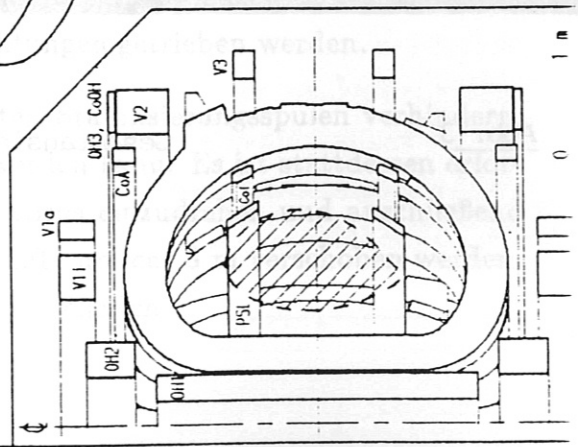
Ohm'sche Heizspulen  
( OH1, OH2 )

OH Streufeld-  
Kompensationspulen  
( OH3, CoOH )

Multipol-  
Gleichgewichts-  
und Formfeldspulen  
( V1, V2, V3 )

Stabilisierungsspulen  
( CoA, CoI, P5L )

Toroidalfeldspulen  
( IF Magnet )



# ASDEX-Upgrade

Magnetfeldspulen

Abb. 2

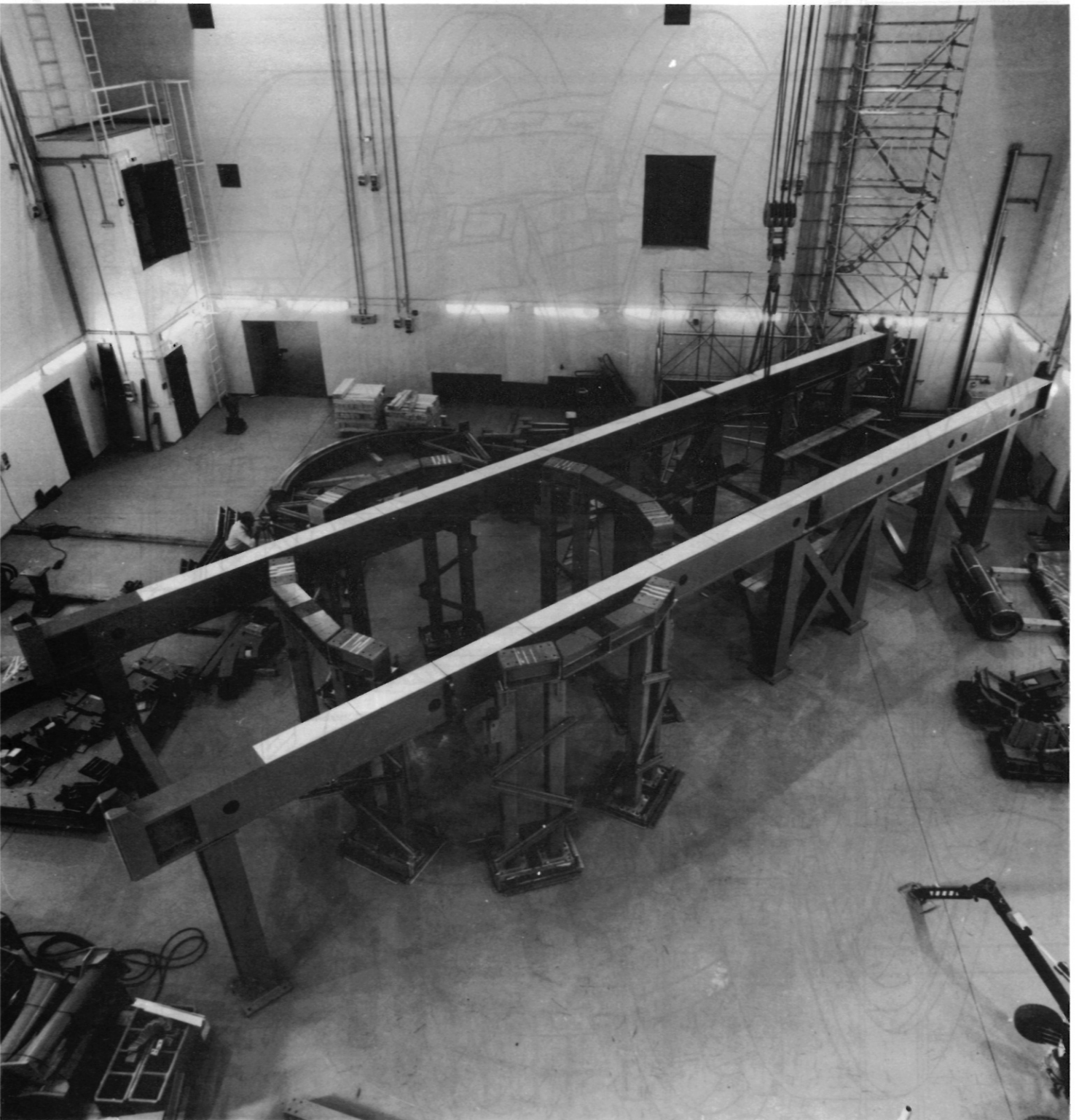


Abb. 3

Gesamtansicht der Fahrbahn

## **Kurzbeschreibung des Montagekonzeptes**

Der Torus von ASDEX Upgrade besteht aus 8 jeweils baugleichen Segmenten ("Oktanten"), die mit einer speziellen Vorrichtung ("Vormontagestand") vormontiert und später am Hauptmontageplatz zusammengefügt werden. Ein Oktant besteht jeweils aus einem Achtel des Vakuumgefäßes, einem Achtel (bestehend aus 4 Gußteilen) der Kippstruktur und 2 TF-Spulen.

Am Hauptmontageplatz werden nach ersten Vermessungsarbeiten die Fundamentstützen des TF-Systems montiert. An diesen Stützen wird eine Spindel-Hubvorrichtung angebracht, auf der das untere Speichenrad des PF-Systems zunächst in abgesenkter Position aufgebaut wird.

Über dem Speichenrad wird eine 16 m lange Montagefahrbahn errichtet, auf welcher der Torus, oder Teile davon, verschoben werden können. Insbesondere wegen der inneren Stabilisierungsspulen (PSL und CoI) ist es nicht möglich, den Torus in einem Zug komplett aufzubauen. Stattdessen werden beide Torushälften getrennt aufgebaut, damit die Spulenhälften eingedreht werden können. Erst dann können beide Torushälften zusammengefahren und verbunden werden.

Anschließend ist ein nochmaliges Verschieben des kompletten Torus erforderlich, um die unteren Ringspulen (OH2, V1, V2, CoA, V3) montieren zu können. Parallel zur Spulenmontage können die restlichen Gefäßports eingeschweißt und das Gefäß leckgetestet werden, damit die Montage der Gefäßeinbauten möglichst frühzeitig beginnen kann.

Wenn der Torus wieder in seiner endgültigen Position steht, wird die Fahrbahn demontriert und das untere Speichenrad auf Normalhöhe hochgefahren. Nachfolgend geschieht die Restmontage des PF-Systems und der Peripherie, auf die hier nicht weiter eingegangen wird.

## **Randbedingungen**

Wegen der starken Verschachtelung und der hohen Gewichte der Bauteile von ASDEX Upgrade muß ein großer Aufwand mit Hilfsvorrichtungen getrieben werden.

Insbesondere die innerhalb des Torus angeordneten Stabilisierungsspulen verhindern, daß der Torus in einem Zug komplett aufgebaut werden kann. Es ist stattdessen erforderlich, die halbierten Spulen in die Hälften des Torus einzudrehen und anschließend die Torushälften zu vereinigen. Dabei muß eine Hälfte um ca. 8 m verschoben werden, um Platz für die einzudrehenden Spulensegmente zu schaffen.

Zu einem späteren Zeitpunkt muß noch einmal der komplette Torus (Gewicht ca. 360 t) für die Montage der unteren Vertikalspulen verschoben werden, sodaß die Fahrbahn im Zentrumsbereich auch leicht demontierbar sein muß. Die Spurbreite der Fahrbahn wird durch die Anordnung der Torusstützen bereits weitgehend vorgegeben, vor allem, wenn insgesamt eine möglichst gleichmäßige Lasteinleitung in die Stützen erreicht werden soll. Auch die maximale Bauhöhe der Fahrbahn (inklusive Schlitten und Hubelemente) ist durch den Raum zwischen der Unterkante des Torus und der Oberkante der abgelegten V3-Spule bei abgesenktem unteren Speichenrad bereits vorgegeben.

Ausreichende Festigkeit bei geringen Durchbiegungen der Fahrbahnträger ist eine selbstverständliche Forderung, dies verbietet aber bereits die Verwendung und Ausnutzung höherfester Stähle (z.B. St 52-3).

Wichtig ist nach Fertigstellung des Torus, daß die Fahrbahn möglichst einfach wieder demontiert werden kann, wobei der Montageraum durch den Torus und das Speichenrad mit den Spulen stark eingengt ist.

Nicht zuletzt ist auch die Forderung nach einer optimalen Arbeitssicherheit ein entscheidender Punkt bei der Festlegung wichtiger Details.

### **Technische Alternativen**

Während des Entwurfs der Montagefahrbahn wurden einige Konzeptvarianten ausgearbeitet und diskutiert. Im wesentlichen war dabei die Auswahl des günstigsten Schienen- und Fahrwagensystems von Interesse. Für das Verschieben von Lasten im Bereich von 200 t bis 400 t gibt es zwar ausreichend Vorbilder, doch z.B. im Brückenbau hat man nicht die Höhenbeschränkungen und außerdem ein steifes Fundament mit einer relativ weichen Last. In unserem Fall müssen wir eine extrem steife Last über eine weiche Fahrbahn verschieben, so daß wesentliche größere Unsicherheit bei der Ermittlung der Auflagekräfte besteht.

Als Fahrbahnträger kommt sinnvollerweise nur ein großes I-Profil in Frage, das bei Bedarf lokal verstärkt werden muß. Beim Fahrschlitten ist das konstruktive Problem wesentlich größer, da beim Überfahren der Fahrbahnstützen mit Lastspitzen berechnet werden muß, während in Feldmitte, also im Maximum der Durchbiegung, nur eine unzureichendes Mittragen auftreten kann; dies ist allerdings von der Wahl des Systems stark abhängig.

Zur Diskussion standen folgende Konzepte:



- Verwendung eines echten Fahrwerks, ähnlich einem Kran-Kopfträger: Wegen der Unsicherheit bei den zu erwartenden Radlasten müßten die Räder für max. 100 t Punktlast ausgelegt werden. Das ergäbe einen Raddurchmesser von mindestens 500 mm zuzüglich der Spurkränze und der Laufschiene, so daß für den Fahrbahnträger kaum noch Höhe zur Verfügung stünde. Auch die Verwendung kleinerer, über Ausgleichswippen gekoppelter Laufräder, würde keine deutliche Verringerung der Bauhöhe bringen. Daher konnte diese Variante schnell als ungeeignet ausgesondert werden.
- Einsatz von Rollenumlaufschuhen in Kombination mit einem Fahrschlitten: Auch Rollenumlaufschuhe haben in den benötigten Größen noch große Abmessungen. Ähnlich wie bei Laufräder ist bei vielen kleinen Schuhen die Lastverteilung unsicher, wobei lokale Überlastung leicht zur Zerstörung der Rollen führen. Die Verwendung von vier 100 t-RUS wäre wohl machbar gewesen, aber es gibt für diesen Größenbereich nur einen möglichen Hersteller, der jedoch so große RUS noch nie angefertigt hat. Weiterhin stellen RUS sehr hohe Anforderungen an die Schienenqualität und an die Ebenheit von Schienenstößen (max. 0.05 mm Höhenversatz). Auch in Anbetracht des geringen Rollwiderstands von RUS überwog das zu hohe Betriebsrisiko, denn besonders die Qualität der Schienenstöße kann wegen der erforderlichen Demontage von Fahrbahnteilen nicht gewährleistet werden, so daß auch diese Lösung schließlich verworfen wurde.
- Realisierung einer möglichst großflächigen Auflage über eine Vielzahl von Laufrollen oder Kugeln und ein tragendes Fahrwerk: Dabei würde das Fahrwerk über ein "Kugelbett" hinwegrollen, und die hinter dem Fahrwerk austretenden Kugeln müßten vorn nachgefüttert werden. Mit einem aufwendigen FE-Modell wurde versucht, die Lastverteilung bei verschiedenen Fahrpositionen zu ermitteln, doch es blieb immer noch so viel Unsicherheit, daß die Kugeln mit hohen Sicherheitsfaktoren ausgelegt werden müßten. Dadurch würde das Gewicht der Kugeln recht hoch (mindestens 10 kg/Stück), so daß die Handhabung sehr umständlich wäre. Außerdem benötigt eine solche Konstruktion einen sehr steifen, also hohen, Fahrwerksrahmen, so daß der Fahrbahnträger zu weich sein würde. Günstig wären bei dieser Variante der geringe Rollenwiderstand und das einfache Überfahren von Schienenstößen, trotzdem wurde sie besonders wegen der unübersichtlichen Kraftverhältnisse und des hohen Bedienungsaufwands ausgeschieden. Außerdem hätte es höchstwahrscheinlich große Probleme bei der Beschaffung geeigneter Laufkugeln gegeben.
- Verwendung von PTFE-Gleitlagern: Solche Gleitlager haben nur einen sehr ge-

ringen Platzbedarf und sind auch an den Schienenstößen unproblematisch. Von Nachteil ist aber der, im Vergleich zu Rollenlagern, hohe Reibwert, der große Antriebskräfte erforderlich macht. Da jedoch das Antriebssystem ein relativ leicht zu lösendes Standardproblem ist, und der Gewinn an Höhe für die Fahrbahnträger erheblich ist, fiel die Entscheidung schließlich zugunsten der PTFE-Lager.

### Auslegung der Gleitlager

Nachdem die Entscheidung zur Verwendung von PTFE-Gleitlagern gefallen war, wurde nach Diskussion mit mehreren Teflon-Herstellern das Konzept im Detail festgelegt. Zur Auswahl stand noch, ob die Fahrbahn oder der Schlitten mit Teflon belegt werden sollte. Es zeigte sich jedoch, daß bei einer Lagerbefestigung am Schlitten Probleme beim Überfahren der Schienenstöße auftreten könnten. Damit war auch schon die Frage nach einer Kammerung des Teflons, um sein Fließen zu vermeiden (wie bei Brückenlagern üblich) geklärt, denn eine ganzflächig belegte Schiene kann nicht gekammert werden.

Also wurden die Fahrbahnträger komplett mit Teflonplatten ("Klingerflon Duplex") beklebt, wobei die flächige Verklebung einen leichten Kammerungseffekt bewirkt. Dabei kann das Teflon bei niedrigen Flächenpressungen noch nicht fließen bzw. kriechen, auch wenn die Last lange stehen bleibt.

Aus den Diagrammen des Herstellers war zu ermitteln, daß die geringsten Reibwerte mit einer ausreichenden Sicherheit gegen Fließen bei der Verwendung von reinem Teflon und einem Silikonschmiermittel bei einer Flächenpressung von  $7N/mm^2$  zu erwarten sind. Reibpartner am Schlitten ist eine Edelstahlkufe mit feingewalzter, aber nicht polierter Oberfläche (Abb. 4,5).

Der große Vorteil dieser einfach erscheinenden Technik ist die hohe Betriebssicherheit, die durch vielfache Erprobung z.B. im Großmaschinenbau und bei Brückenverschiebungen gewährleistet ist.

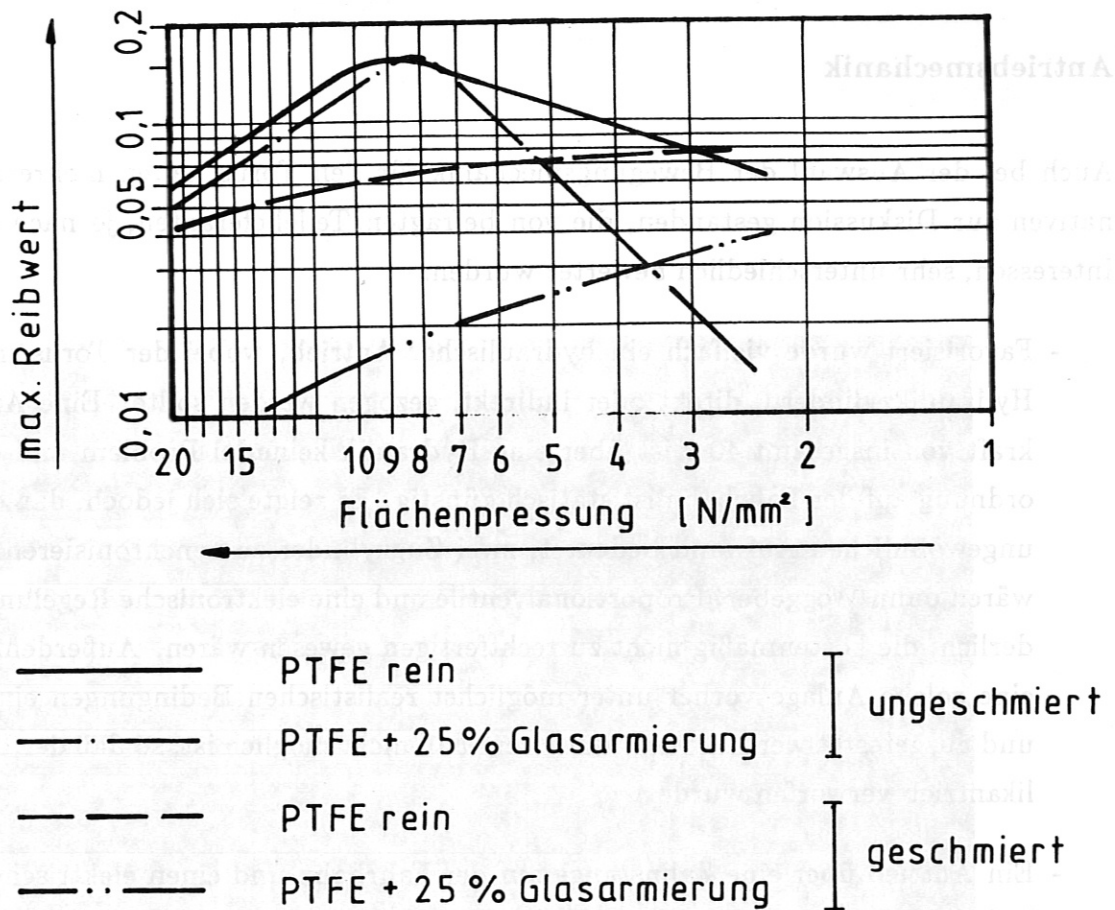


Abb. 4 Bemessungsdiagramm für Gleitbelag (Fa. Klinger)

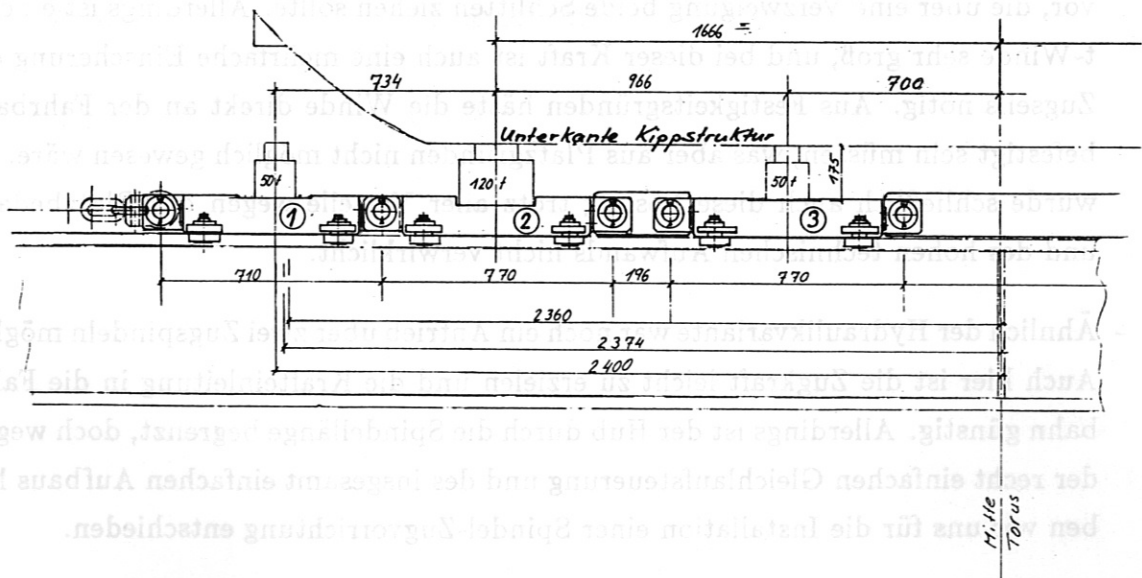


Abb. 5 Fahrbahnträger mit Gleitschlitten

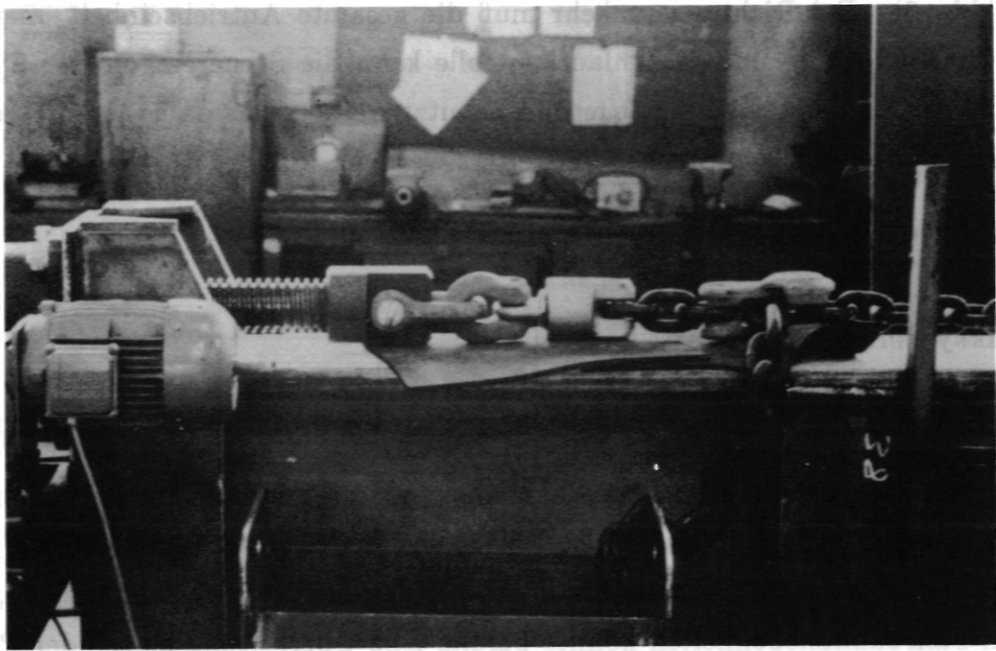
## Antriebsmechanik

Auch bei der Auswahl der Bewegungsmechanik für den Torus haben mehrere Alternativen zur Diskussion gestanden, die von befragten Teilelieferanten, je nach eigenen Interessen, sehr unterschiedlich bewertet wurden.

- Favorisiert wurde vielfach ein hydraulischer Antrieb, wobei der Torus mit zwei Hydraulikzylindern, direkt oder indirekt, gezogen werden sollte. Eine Antriebskraft von insgesamt 40 t ist über eine Hydraulik keinerlei Problem und die Anordnung auf der Fahrbahn ist statisch günstig. Es zeigte sich jedoch, daß es einen ungewöhnlichen Aufwand bedeutet, zwei Zugzylinder zu synchronisieren. Dafür wären dann Weggeber, Proportionalventile und eine elektronische Regelung erforderlich, die kostenmäßig nicht zu rechtfertigen gewesen wären. Außerdem müßte eine solche Anlage vorher unter möglichst realistischen Bedingungen eingestellt und ausgetestet werden, was in unserem Fall nicht möglich ist, so daß der Hydraulikantrieb verworfen wurde.
- Ein Antrieb über eine Zahnstange auf der Fahrbahn und einen elektrischen oder hydraulischen Motor mit Antriebsritzeln am Schlitten wäre auch interessant gewesen, hätte jedoch zuviel Bauraum benötigt, so daß diese Variante nicht infrage kommen konnte.
- Ein weiteres Konzept sah die Aufstellung einer großen Seilwinde am Fahrbahnende vor, die über eine Verzweigung beide Schlitten ziehen sollte. Allerdings ist eine 40 t-Winde sehr groß, und bei dieser Kraft ist auch eine mehrfache Einscherung des Zugseils nötig. Aus Festigkeitsgründen hätte die Winde direkt an der Fahrbahn befestigt sein müssen, was aber aus Platzgründen nicht möglich gewesen wäre. So wurde schließlich auch diese Lösung trotz aller Vorteile wegen des Platzbedarfs und des hohen technischen Aufwands nicht verwirklicht.
- Ähnlich der Hydraulikvariante war noch ein Antrieb über zwei Zugspindeln möglich. Auch hier ist die Zugkraft leicht zu erzielen und die Krafteinleitung in die Fahrbahn günstig. Allerdings ist der Hub durch die Spindellänge begrenzt, doch wegen der recht einfachen Gleichlaufsteuerung und des insgesamt einfachen Aufbaus haben wir uns für die Installation einer Spindel-Zugvorrichtung entschieden.

Der gebaute Antrieb sieht folgendermaßen aus: am Fahrbahnende befindet sich an beiden Schienenträgern eine Zugspindel mit 0,5 m Hub und 25 t Zugkraft. Die Zugvorrichtungen wurden so ausgelegt, daß der Torus auch unter ungünstigen Bedingungen,

also bei Versagen der Schweißung feststehend einen Belastwert von ca. 6 t) nach der  
 cher bewegt werden kann und eine Kraft von ca. 25 t zu übertragen ist. Der  
 nachfolgend erfolgt mit Belastungswerten, die besonders niedrig sein dürfen, und die  
 schwindigkeit beträgt 1,5 mm/sec. Zwischen Zugspindel und Schlitzen sind Zugketten  
 gespannt, und nach jedem Zugvorgang muß die Kette in der Kettenklaus nachgezogen



Nach Lastausgleich steht der Torus auf Hydraulikzylindern, die über ein Pump- und  
 Steuerungssystem gekoppelt sind. Da die beiden Zylinder der gleiche hydraulische  
 Druck anliegt, muß auch die gleiche Kraft übertragen werden. Beim Verschiebevorgang  
 "schwimmt" der Torus auf vier 120 t-Zylindern, die alle Fahrbahndurchbiegungen aus-  
 gleichen können (Abb. 7).

**Abb. 6** Zugmechanik

Im Endzustand wird der Torus auf acht mechanisch verteilbaren Edelstahl-Hydraulik-  
 zylindern abgestellt, die auch nach Inbetriebnahme von ASDEX Ugrade ein eventuelles  
 Nachverstellen ermöglichen. Die Beschaffung der amagnetischen Edelstahlzylinder war  
 nicht einfach, da es auf diesem speziellen Gebiet der Hochdruckhydraulik nur wenige  
 Anbieter gibt. Die Hochdruck-Schnellverschleißprüfung aus Edelstahl mußten vom  
 Hersteller speziell für diesen Auftrag entwickelt werden.

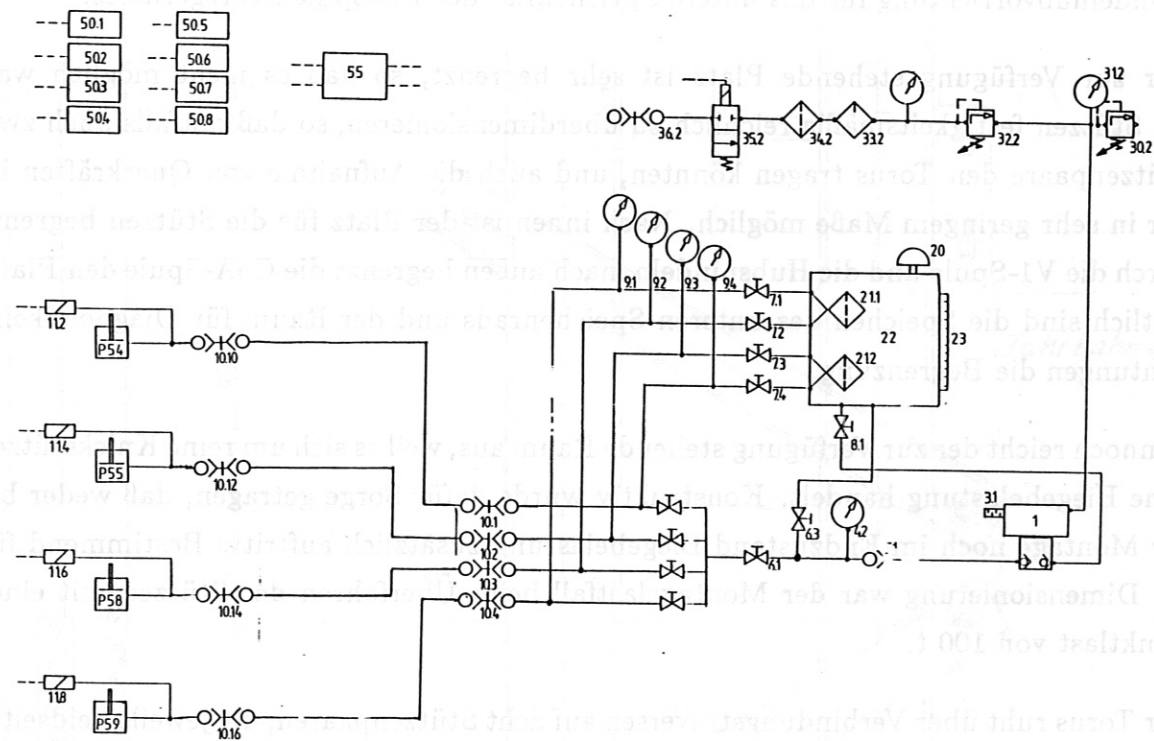
also bei Versagen der Schmierung (entsprechend einem Reibwert von ca. 0.1) noch sicher bewegt werden kann und eine Kraftreserve von ca. 25% zur Verfügung steht. Der Antrieb erfolgt mit Reluktanzmotoren, die besonders netzsynchron laufen, und die Geschwindigkeit beträgt 1.5 mm/sec. Zwischen Zugspindel und Schlitten sind Zugketten gespannt, und nach jedem Zugvorgang muß die Kette in der Kettenklaue nachgesetzt werden (Abb. 6). Bei Richtungsumkehr muß die gesamte Antriebseinheit umgesetzt werden. Zur Bedienung und Gleichlaufkontrolle kann die Steuereinheit der Spindel-Hubvorrichtung für das untere Speichenrad benutzt werden, das dafür bereits vorhandene Gerät konnte leicht entsprechend erweitert werden.

## Hydrauliksystem

Wegen des hohen Gewichts des Torus von ASDEX Upgrade ist es unbedingt erforderlich, die Gewichtskräfte kontrolliert in die Fahrbahn und die Fundamente zu übertragen. Es muß zu jedem Zeitpunkt gewährleistet sein, daß die Last an keinem Punkt 100 t übersteigt. Daher kann der Torus nicht direkt auf den Schlitten gestellt werden, denn bei kleinen Fahrbahnunebenheiten könnte bereits eine Überlastung einzelner Punkte auftreten.

Zum Lastausgleich steht der Torus auf Hydraulikzylindern, die über ein Pump- und Steuerungssystem gekoppelt sind. Da an allen Hubelementen der gleiche Hydraulikdruck anliegt, muß auch die gleiche Kraft übertragen werden. Beim Verschiebevorgang "schwimmt" der Torus auf vier 120 t-Zylindern, die alle Fahrbahndurchbiegungen ausgleichen können (Abb. 7).

Im Endzustand wird der Torus auf acht mechanisch verriegelbaren Edelstahl-Hydraulikzylindern abgestellt, die auch nach Inbetriebnahme von ASDEX Upgrade ein eventuelles Nachnivellieren ermöglichen. Die Beschaffung der amagnetischen Edelstahlzylinder war nicht einfach, da es auf diesem speziellen Gebiet der Hochdruckhydraulik nur wenige Anbieter gibt. Die Hochdruck-Schnellverschlußkupplungen aus Edelstahl mußten vom Hersteller speziell für diesen Auftrag entwickelt werden.



**Abb. 7** Hydraulikschaltplan

Als Werkstoff für die Toraxstützen wurden die amagnetischen Stähle 1.4311 und für weniger belastete Teile 1.4301 gewählt. Die Stützen selbst sind 700 x 200 x 12,5; weil sie als solche nicht erhältlich sind, wurden sie aus zwei abgekanteten U-Profilen mit dem UP-Verfahren zusammen geschweißt. Alle geschweißten Bauteile wurden spannungsgesteuert geglättet und anschließend korrosionsgeprüft, aber nicht lackiert.

(Abb. 8)

## Torusstützen

Die Torusstützen ("TF-Stützen") müssen den ca. 360 t schweren Torus von ASDEX Upgrade tragen und die Gewichtskräfte in das Fundament leiten. Gleichzeitig sind die TF-Stützen tragender und funktioneller Bestandteil der Montagefahrbahn und der Spindelhubvorrichtung für das untere Speichenrad des PF-Spulenstützgerüsts.

Der zur Verfügung stehende Platz ist sehr begrenzt, so daß es nicht möglich war, die Stützen festigkeitsmäßig reichlich zu überdimensionieren, so daß notfalls auch zwei Stützenpaare den Torus tragen könnten, und auch die Aufnahme von Querkräften ist nur in sehr geringem Maße möglich. Nach innen ist der Platz für die Stützen begrenzt durch die V1-Spule und die Hubspindeln, nach außen begrenzt die CoA-Spule den Platz. Seitlich sind die Speichen des unteren Speichenrads und der Raum für Diagnostikeinrichtungen die Begrenzung.

Dennoch reicht der zur Verfügung stehende Raum aus, weil es sich um reine Knickstützen ohne Biegebelastung handelt. Konstruktiv wurde dafür Sorge getragen, daß weder bei der Montage noch im Endzustand Biegebelastung zusätzlich auftritt. Bestimmend für die Dimensionierung war der Montagelastfall beim Überfahren der Stützen mit einer Punktlast von 100 t.

Der Torus ruht über Verbindungstraversen auf acht Stützenpaaren, die jeweils beidseitig von jeder zweiten PF-Speiche angeordnet sind. Die Stützenpaare können bei Bedarf über Diagonalen zusätzlich verstrebt werden, diese Diagonalen sind aber in der Statik nicht eingerechnet. Oben an den Stützen sind die Stehlager für die Hubspindeln des Speichenrads befestigt, daraus ist aber nominell keine Belastung zu erwarten.

Die Torusstützen sind untereinander und in sich elektrisch isoliert, so daß keine elektrischen Kreise Störfelder erzeugen können.

Als Werkstoff für die Torusstützen wurden die amagnetischen Stähle 1.4311 und, für weniger belastete Teile, 1.4301 gewählt. Die Stützen selbst sind Vierkantrohre 200 x 200 x 12.5; weil sie als solche aber nicht erhältlich sind, wurden sie aus zwei abgekanteten U-Profilen mit dem UP-Verfahren zusammengeschweißt. Alle geschweißten Bauteile wurden spannungsarm gegläht und anschließend korundgestrahlt, aber nicht lackiert (Abb. 8).



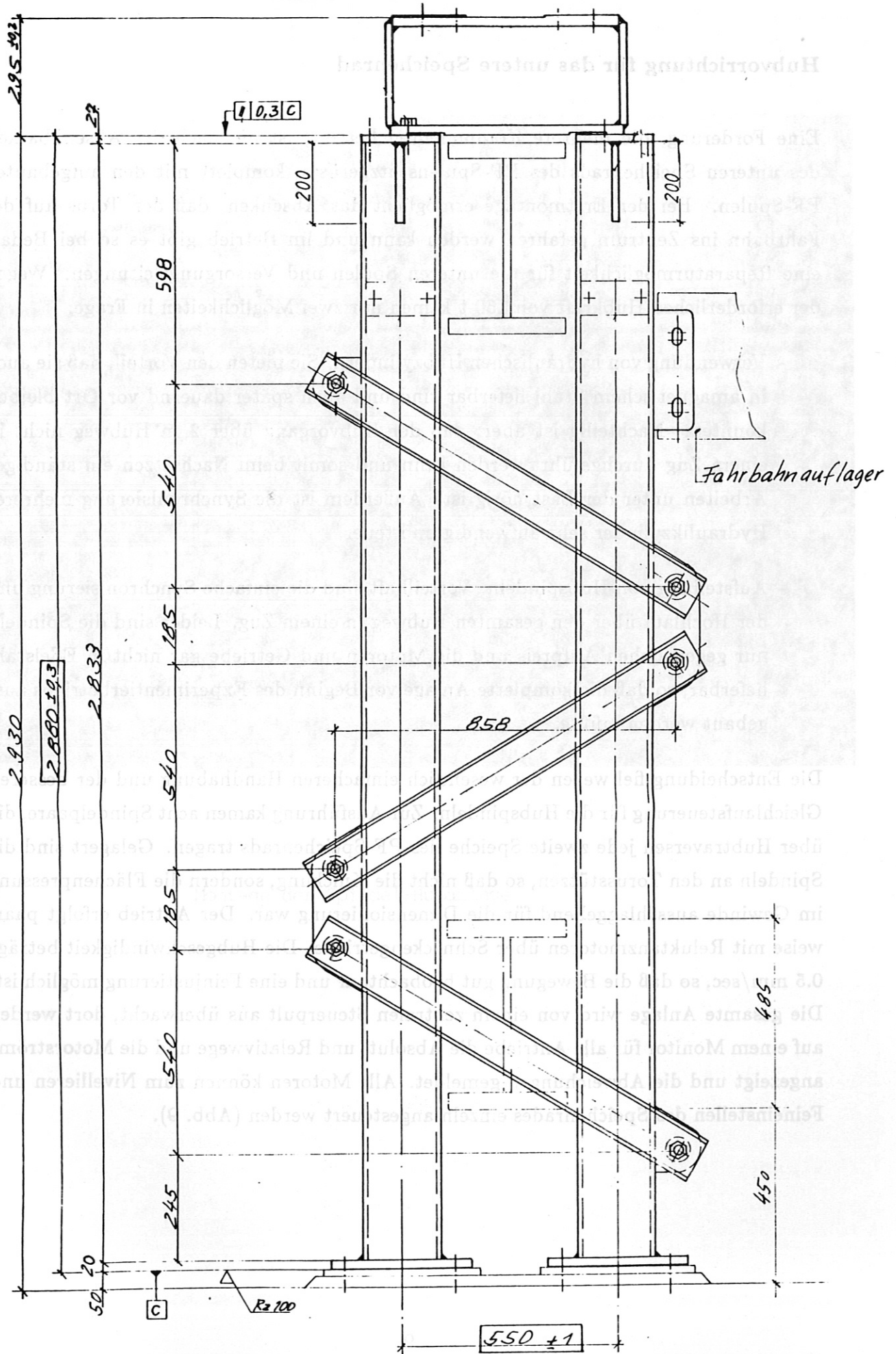


Abb. 8

## Hubvorrichtung für das untere Speichenrad

Eine Forderung, die mehrere Komponenten betrifft, ist die nach der Absenkbarkeit des unteren Speichenrads des PF-Spulenstützgerüsts, komplett mit den aufgebauten PF-Spulen. Bei der Erstmontage ermöglicht das Absenken, daß der Torus auf der Fahrbahn ins Zentrum gefahren werden kann und im Betrieb gibt es so bei Bedarf eine Reparaturmöglichkeit für die unteren Spulen und Versorgungsleitungen. Wegen der erforderlichen Hubkraft von 150 t kamen nur zwei Möglichkeiten in Frage:

- Verwendung von hydraulischen Hubzylindern. Sie bieten den Vorteil, daß sie auch in amagnetischem Stahl lieferbar sind und auch später dauernd vor Ort bleiben könnten. Nachteilig ist aber, daß der Hubvorgang über 2 m Hubweg nicht in einem Zug durchgeführt werden kann und somit beim Nachsetzen ein ständiges Arbeiten unter der Last nötig ist. Außerdem ist die Synchronisierung mehrerer Hydraulikzylinder sehr aufwendig und teuer.
- Aufstellung von Hubspindeln. Vorteilhaft sind die einfache Synchronisierung und der Hochlauf über den gesamten Hubweg in einem Zug. Leider sind die Spindeln nur gegen hohen Aufpreis und die Motoren und Getriebe gar nicht in Edelstahl lieferbar, so daß die komplette Anlage vor Beginn des Experimentierbetriebs ausgebaut werden müßte.

Die Entscheidung fiel wegen der wesentlich einfacheren Handhabung und der besseren Gleichlaufsteuerung für die Hubspindeln. Zur Ausführung kamen acht Spindelpaare, die über Hubtraversen jede zweite Speiche des PF-Speichenrads tragen. Gelagert sind die Spindeln an den Torusstützen, so daß nicht die Knickung, sondern die Flächenpressung im Gewinde ausschlaggebend für die Dimensionierung war. Der Antrieb erfolgt paarweise mit Reluktanzmotoren über Schneckengetriebe. Die Hubgeschwindigkeit beträgt 0.5 mm/sec, so daß die Bewegung gut beobachtbar und eine Feinjustierung möglich ist. Die gesamte Anlage wird von einem zentralen Steuerpult aus überwacht, dort werden auf einem Monitor für alle Antriebe die Absolut- und Relativwege und die Motorströme angezeigt und die Abweichungen gemeldet. Alle Motoren können zum Nivellieren und Feineinstellen des Speichenrades einzeln angesteuert werden (Abb. 9).

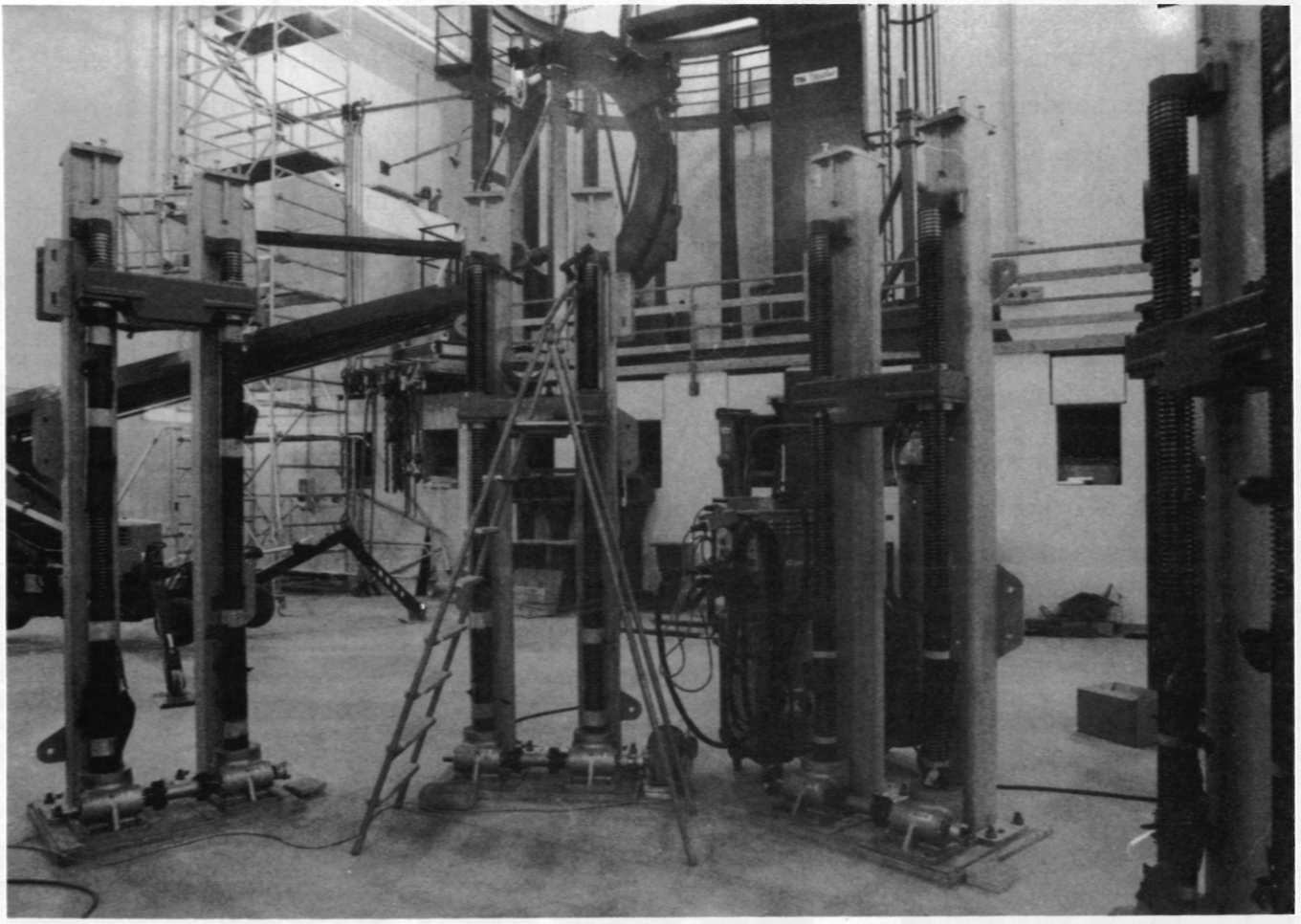


Abb. 9 Montage der Spindel-Hubanlage

Die Spindel-Hubanlage besteht aus zwei Spindelstützen, die auf einer gemeinsamen Spindel montiert sind. Die Spindelstützen sind durch eine Spindel verbunden, die in einem Gehäuse montiert ist. Die Spindelstützen sind durch eine Spindel verbunden, die in einem Gehäuse montiert ist. Die Spindelstützen sind durch eine Spindel verbunden, die in einem Gehäuse montiert ist. Die Spindelstützen sind durch eine Spindel verbunden, die in einem Gehäuse montiert ist.

## Kreisbogenfahrbahn

Weil der Stromanschluß der CoI-Spule nicht an der Verbindungsstelle der Spulenhälften sein darf, sondern  $45^{\circ}C$  versetzt angeordnet ist, muß für die Montage des Oktanten Nr. 5 ein besonderer Aufwand getrieben werden. Die CoI-Hälfte muß daher eingedreht werden, wenn drei Oktanten aufgebaut sind. Der vierte Oktant muß nun über das herausstehende Ende der CoI-Spule "aufgefädelt" werden, ohne die Spule zu beschädigen.

Ein solcher Vorgang ist keinesfalls mit einem Kran machbar, weil der Oktant exakt auf einer Kreisbahn geführt werden muß. Daher wurde in die Fahrbahn noch eine kleine Kreisbogenfahrbahn integriert, auf welcher der Oktant mit einem speziellen Rollenschemel eingefahren werden kann (Abb. 10). Weil hier die Bauhöhe ausreichte, wurde hier kein PTFE-Belag eingesetzt, zugunsten einer exakteren Führung des Wagens und eines geringeren Fahrwiderstandes.

Nach Beendigung des Montagevorgangs für den Oktanten Nr. 5 muß die Kreisbogenfahrbahn wieder demontiert werden, damit stattdessen der zweite Fahrbahnträger komplettiert werden kann.

## Montagerollen für PSL und CoI

ASDEX Upgrade besitzt innerhalb des Torus zwei Stabilisierungsspulen: den Passiven Stabilisierungsleiter ("PSL") und die aktive Regelspule ("CoI"). Naturgemäß können diese Spulen nicht als ganzes eingebaut werden, sondern sie müssen als  $180^{\circ}C$ -Segmente in den Torus eingedreht werden. Besonders kompliziert ist dies bei den CoI-Spulen, die zwischen Vakuumgefäß und den TF-Spulen angeordnet sind, da die Spulen exakt auf einer Kreisbahn geführt werden müssen. Das Gewicht des kompletten PSL-Systems beträgt ca. 8 t, die obere und untere CoI-Spulen wiegen je ca. 2 t.

Für diese Montagevorgänge sind in die Fahrbahn abnehmbare Rollenböcke integriert, mit denen die Halbspulen genau auf den richtigen Radien vorsichtig eingedreht werden können (Abb. 11). Für den PSL gibt es noch zusätzliche kleine Rollenböcke, die im Vakuumgefäß eingesetzt werden und dort während der Montage den Spulenring tragen.

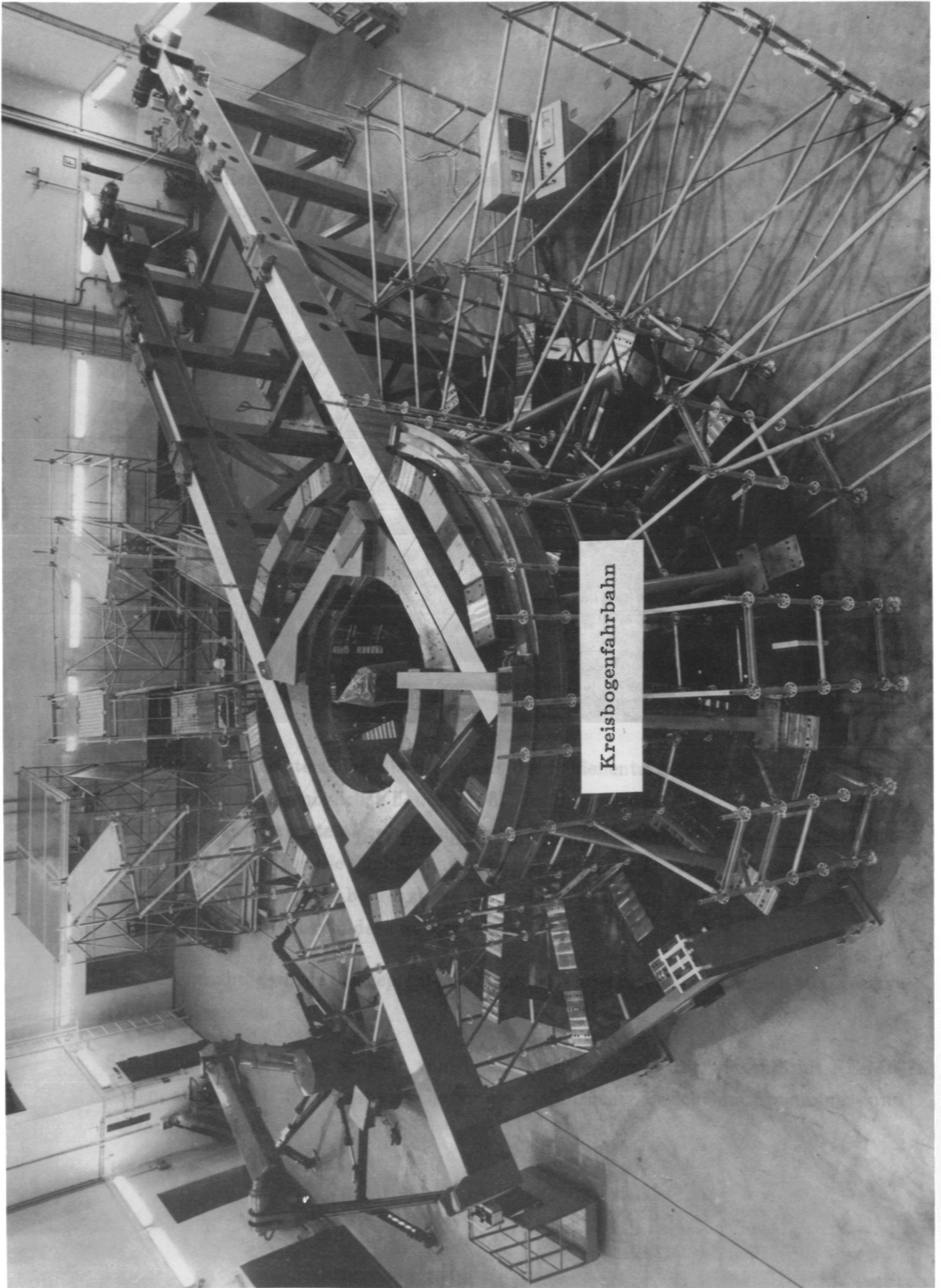


Abb. 10

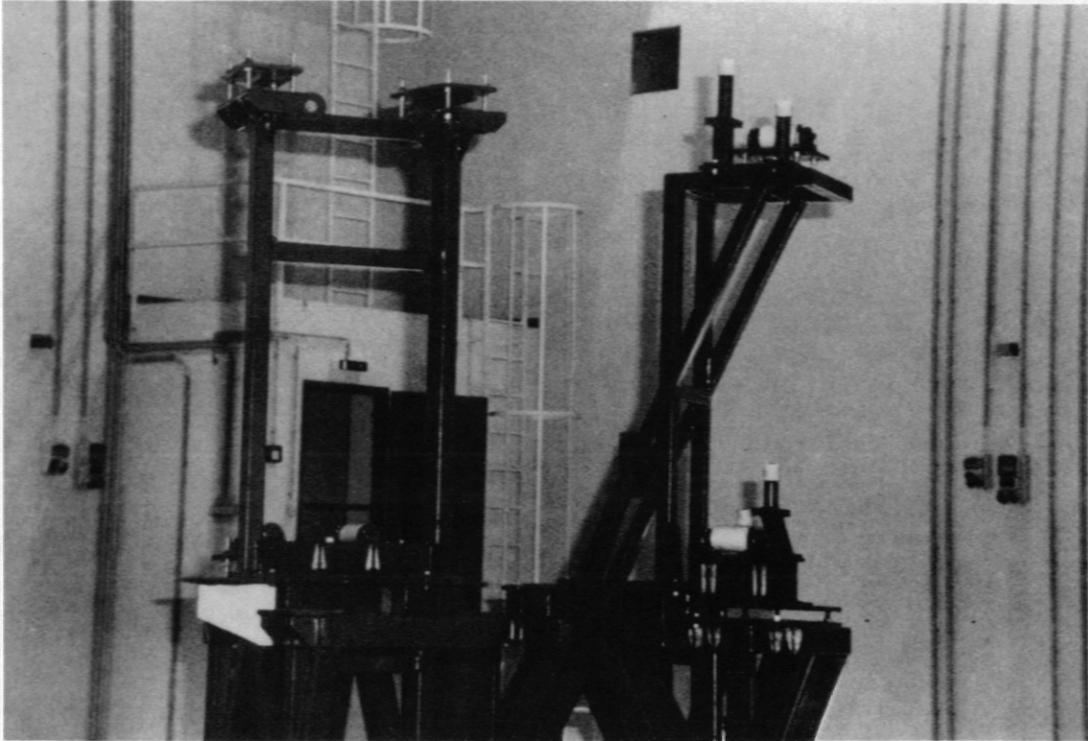


Abb. 11      **Montagerollen für PSL und CoI**

## Statische Berechnungen

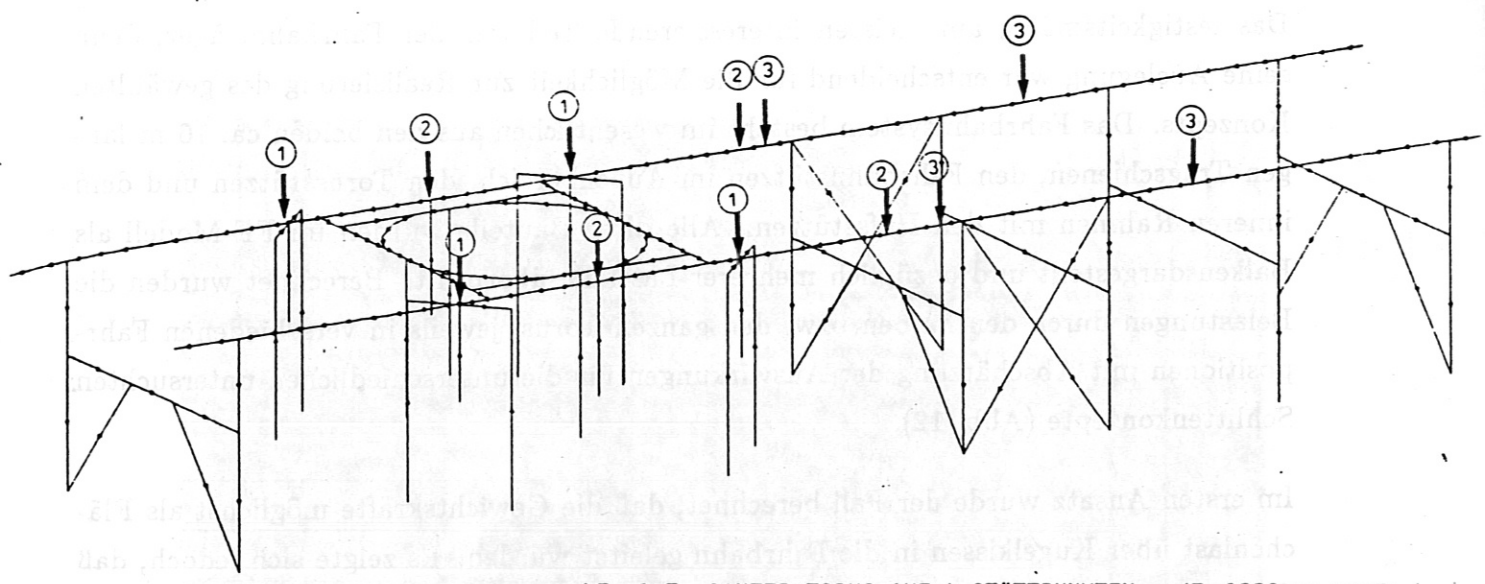
Das festigkeitsmäßig am meisten interessierende Teil war der Fahrbahnträger, denn seine Auslegung war entscheidend für die Möglichkeit zur Realisierung des gewählten Konzepts. Das Fahrbahnsystem besteht im wesentlichen aus den beiden ca. 16 m langen Tragschienen, den Fahrbahnstützen im Außenbereich, den Torusstützen und dem inneren Rahmen mit den Hilfsstützen. Alle diese Bauteile wurden im FE-Modell als Balken dargestellt und bezüglich mehrerer Lastfälle überprüft. Berechnet wurden die Belastungen durch den halben bzw. den ganzen Torus, jeweils in verschiedenen Fahrpositionen mit Abschätzung der Auswirkungen für die unterschiedlichen untersuchten Schlittenkonzepte (Abb. 12).

Im ersten Ansatz wurde der Fall berechnet, daß die Gewichtskräfte möglichst als Flächenlast über Kugelkissen in die Fahrbahn geleitet würden. Es zeigte sich jedoch, daß durch die Durchbiegung der Schienenträger (4 mm in Feldmitte) die Lasteinleitung so unsicher ist, daß eine Überlastung und Zerstörung einzelner Laufkugeln möglich wäre. Ähnliche Probleme wären auch bei der Verwendung von Rollenumlaufschuhen aufgetreten, denn 4 mm Durchbiegung bei 2.5 m Feldlänge bedeuten ca. 0.5 mm auf der Baulänge des RU's, so daß die vorderen und hinteren Rollen sicher überlastet gewesen wären.

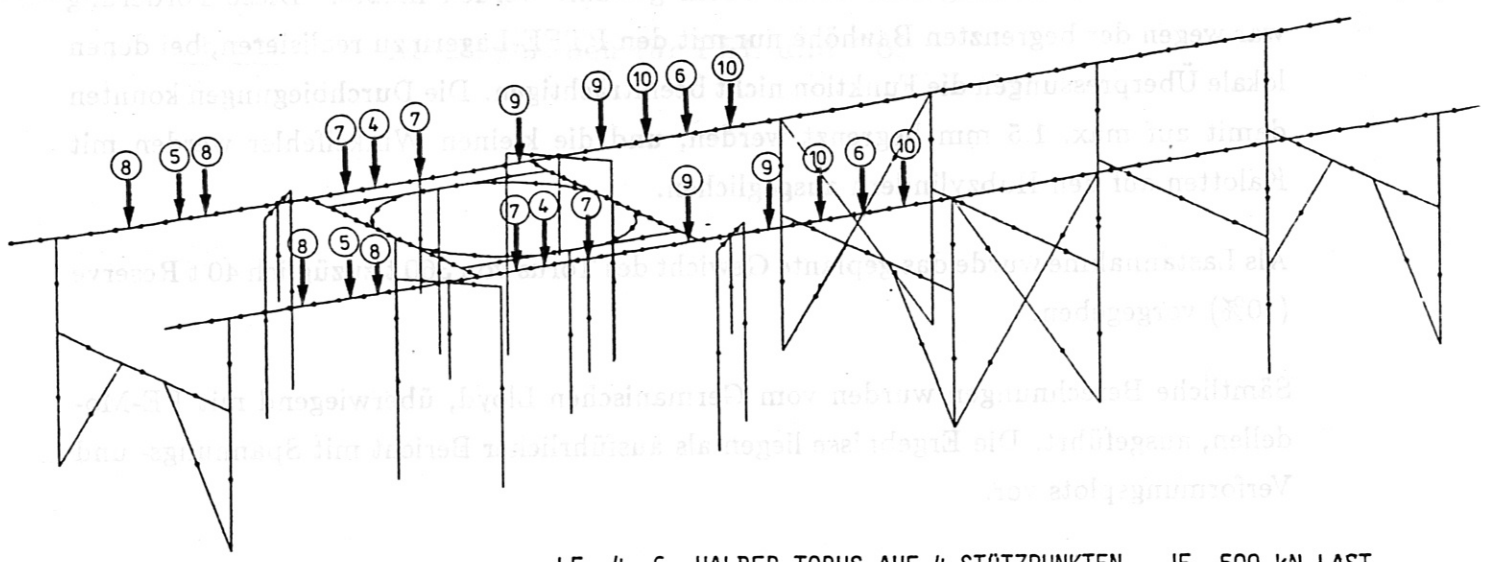
Alle Ergebnisse zeigten, daß die Steifigkeit des Schienenträgers von großer Bedeutung war und somit ein möglichst hohes Profil gewählt werden mußte. Diese Forderung war wegen der begrenzten Bauhöhe nur mit den PTFE-Lagern zu realisieren, bei denen lokale Überpressungen die Funktion nicht beeinträchtigen. Die Durchbiegungen konnten damit auf max. 1.5 mm begrenzt werden, und die kleinen Winkelfehler werden mit Kalotten auf den Hubzylindern ausgeglichen.

Als Lastannahme wurde das geplante Gewicht des Torus von 360 t zuzüglich 40 t Reserve (10%) vorgegeben.

Sämtliche Berechnungen wurden vom Germanischen Lloyd, überwiegend mit FE-Modellen, ausgeführt. Die Ergebnisse liegen als ausführlicher Bericht mit Spannungs- und Verformungsplots vor.



LF. 1-3: GANZER TORUS AUF 4 STÜTZPUNKTEN - JE 1000 KN LAST



LF. 4--6: HALBER TORUS AUF 4 STÜTZPUNKTEN - JE 500 KN LAST

LF. 7-10: HALBER TORUS AUF 2 STÜTZPUNKTEN - JE 1000 KN LAST

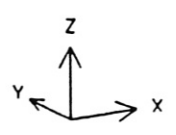


Abb. 12



## Bauaufsicht und Abnahme

Die gesamte Vorrichtung ist ausschließlich für die Montage da, das bedeutet, daß ständig Monteure damit arbeiten müssen. Das verlangt besondere Aufmerksamkeit bezüglich der Sicherheit der Anlage und Beachtung der betreffenden Unfallverhütungsvorschriften.

Aus diesem Grund wurde der Germanische Lloyd als anerkannte Genehmigungsbehörde damit beauftragt, Zeichnungsprüfung, Berechnungen und Bauaufsicht durchzuführen und abschließend ein Prüfzertifikat auszustellen. Zunächst wurde eine Vorprüfung der Ausschreibungszeichnungen durchgeführt, später kamen dann auftragsbegleitend die Prüfung aller Werkstattzeichnungen, Bauüberwachung, und die Begutachtung der Werkszulassungen, Schweißerqualifikationen und Werkstoffqualitäten. Durch mindestens wöchentliche Besuche des Inspektors beim Hersteller der Vorrichtung und seine Aufsicht bei wichtigen Prüfungen (US, Röntgen etc.) und Teilnahme bei abschließenden Funktionstest wurde die Qualitätssicherung gewährleistet. Zusätzlich wurden natürlich eigene Besichtigungen und vor allem Maß- und Funktionskontrollen durchgeführt.

## Funktionstest

Vor Auslieferung der Vorrichtung wurde beim Hersteller ein Funktionstest mit möglichst hoher Last durchgeführt. Zu diesem Zweck wurden 200 t Stahl als Probelast von einem Stahlwerk ausgeliehen und auf einem provisorischen Tragrahmen aufgelegt. Der Rahmen wurde von vier originalen Hubzylindern getragen und von der bereits fertigen Zugmechanik angetrieben (Abb. 13).

Die Schienenträger wurden an den vorgesehenen Auflagerpunkten unterstützt, jedoch nicht in Originalhöhe, sondern dicht über Boden, um den Zugang und die Überwachung zu erleichtern und das Risiko zu vermindern. Mit Meßuhren wurde die Fahrbahndurchbiegung gemessen, und die Ermittlung der Zugkraft erfolgte durch Drehen am freien Motorende mit einem Drehmomentschlüssel.

Beim Zugversuch wurden beide Ketten einzeln leicht vorgespannt und anschließend liefen beide Antriebe synchron bis zum Ansprechen eines Endschalters. Wegen leichter Unregelmäßigkeiten in der Kettenteilung sind die möglichen Wege rechts und links unterschiedlich.

Bei diesem Versuch wurden sehr erfreuliche Ergebnisse erzielt. Die Bewegung erfolgte praktisch ruckfrei, und es stellte sich ein Reibwert von 0.04 ein, so daß bei der doppelt so hohen Nennlast voraussichtlich noch geringere Werte zu erwarten sind. Das heißt

Die gesamte Vorrichtung ist ausschließlich für die Montage des Bauteils bestimmt, das zu prüfen ist. Die Montagearbeiten müssen besonders sorgfältig durchgeführt werden, da die Sicherheit der Versuchsgegenstände davon abhängt.

Die Vorrichtung ist so konstruiert, dass die Belastung des Bauteils gleichmäßig erfolgt und die Versuchsgegenstände während des Versuchs nicht verschieben können.



Funktionstest

Vor Auslieferung der Vorrichtung wurde beim Hersteller ein Funktionstest mit möglichst hoher Last durchgeführt. Zu diesem Zweck wurden 200 t Stahl als Probelast von einem Stahlwerk ausgeliehen und auf einem provisorischen Trosssystem aufgelegt. Der Funktionstest wurde von vier ortsfesten Hubwinden geführt und von der bereits fertigen Montage durchgeführt.

Abb. 13 Funktionstest mit 200 t Probelast

Die Schwenkträger wurden an den vorgesehenen Anlagenspannen aufgestellt, jedoch nicht in Originalhöhe, sondern dicht über dem Boden, um den Zugang und die Überwachung zu erleichtern und das Risiko zu vermindern. Mit Messern wurde die Trossenabstände gemessen, und die Brücken der Zugkraft erfolgte durch Drehen der Rollen mit einem Drehmomentschlüssel.

Beim Versuch wurden beide Ketten einzeln leicht vorgespannt und anschließend für beide Anteile synchron bis zum Anspannen eines Endschalters. Wegen leichter Unebenheiten in der Kettenstellung sind die möglichen Wege rechts und links unterschiedlich.

Bei diesem Versuch wurden keine erhebliche Ergebnisse erzielt. Die Bewegung erfolgte praktisch reibungslos und es zeigte sich ein Hebevermögen von 0,01 ein, so daß der Hebevermögen demnach voraussichtlich noch geringere Werte zu erwarten sind. Das heißt

auch, daß wir im Normalbetrieb nur 1/3 der installierten Antriebsleistung benötigen und bei Bedarf, z.B. bei ungenügender Schmierung, noch genügend Reserve zur Verfügung haben.

Das Überfahren der Fahrbahnstöße war völlig problemlos, lediglich scharfe Kanten aufgrund eines Fertigungsfehlers an den Gleitkufen führten zu Beschädigungen am Teflonbelag. Der Fehler konnte aber gleich vor Ort behoben werden, und weitere Versuche zeigten nun eine einwandfreie Funktion der Kufen.

Ein unerwarteter Effekt war ein unbedeutendes Ruckeln beim Fahren, ausgelöst durch die Zusatzkräfte aufgrund des hohen Eigengewichts der Kette. Wenn die Kette frei schwebt, überlagert sich eine zusätzliche Zugkraft, daraufhin bewegt sich der Schlitten etwas, dann hängt die Kette wieder etwas durch, liegt auf der Fahrbahn auf, und die Kraft fällt weg, u.s.w. Mit kürzer werdender Kettenlänge nahm dieser Effekt deutlich ab; um ihn ganz zu unterdrücken, soll die Kette jetzt auf der ganzen Länge mit Holzbrettern unterstützt werden.

Auch das eingesetzte Hydrauliksystem hat sich bei dieser Gelegenheit gut bewährt. Die Lastüberwachung ging einwandfrei, und das Nivellieren war genau nach Plan möglich. Am Hydraulikaggregat zeigte sich ein kleiner Mangel, weil beim Schalten des Hauptahns auf die Nullstellung wegen der Ventilcharakteristik der Druck ganz abfiel. Abhilfe wurde durch das Nachrüsten von Rückschlagventilen geschaffen.

Insgesamt hat der Funktionstest das gewählte Konzept voll bestätigt, und die vorhandenen Mängel konnten leicht behoben werden, so daß dem späteren Einsatz nichts mehr entgegensteht.

#### **Hinweise, Literatur, Lieferanten**

- Berechnung und Bauaufsicht:  
Bericht des des Germanischen Lloyd,  
Vorsetzen 32, D-2000 Hamburg 11
- Entwurf der Vorrichtung:  
Studie der MAN-Neue Technologie  
Dachauer Str. 667,  
D-8000 München
- Teflonbeläge:  
Klinger GmbH

Rich.-Klinger-Str.,  
D-6270 Idstein/Taunus

- Hub-/Zugspindeln:

Pfaff Silberblau  
Industriestr. 14,  
D-8904 Freising

- Fahrbahn:

Häupler-Wenker GmbH  
Augsburger Str. 90,  
D-8832 Weissenburg/Bay.

- Hydraulik:

Hy Power  
Brettergartenstr. 16,  
D-8500 Nürnberg

- Torussstützen:

Deggendorfer Werft  
Werftstr. 17,  
D-8360 Deggendorf

- IPP-Berichte:

W. Köppendörfer and ASDEX Upgrade Design Team, Proc. 13th SOFT, Varese  
1984, Comm. EC, 0.08.

W. Köppendörfer and ASDEX Upgrade Design Team, Proc. 14th SOFT, Avignon  
1986, Comm. EC, EI03.

ASDEX Upgrade Design Team, Tokamak Theory Group, ASDEX Upgrade, Defi-  
nition of a Tokamak Experiment with a Reactor-Compatible Poloidal Field, IPP  
1/197, (1982).

ASDEX Upgrade Team, ASDEX Upgrade project proposal, IPP 1/217, (1983).