

**Versorgung und Schutz der  
Spulensysteme am Wendelstein  
7-X**

A. Wiczorek

IPP 2/329

JULI 1995



**MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK**

**85748 GARCHING BEI MÜNCHEN**

# MAX - PLANCK - INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK

## GARCHING BEI MÜNCHEN

### Versorgung und Schutz der Spulensysteme am Wendelstein 7-X

A. Wiczorek

IPP 2/329

JULI 1995

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit in der Technikgruppe von W7-X in der Zeit vom Juni 1993 bis August 1993. An dieser Stelle bedanke ich mich bei den IPP-Mitarbeitern für viele wertvolle Diskussionen, die zu dieser Arbeit geführt haben. Mein besonderer Dank möchte ich folgenden Personen aussprechen: Hr. Sapper, Dr. Pilssticker, Dr. Scheiner und Hr. Schoenewolf. Ebenfalls möchte ich mich für die geführten Diskussionen bei den Mitarbeitern folgender Firmen bedanken:  
ABB Tutzing - Hr. Linhofer,  
AEG Frankfurt - Hr. Kechn,  
Holec Hengelo - Hr. Boersema und Hr. van de Water,  
Siemens Erlangen - Dr. Bardahl, Hr. Hrabal, Hr. Schlegel und Hr. Schäfer.

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

## **ABSTRACT**

The electrical system of the Wendelstein 7-X Stellarator encloses seven superconducting coil groups, each of them consisting of ten coils connected electrically in series. These coil groups are magnetically coupled by the toroidal mutual reactance. The experimental flexibility of the confinement system is provided by the combination of the currents in the five modular field systems with those in the two ancillary field system i.e. could be described in a 7-dimensional space of currents. For that reasons, all these groups should be powered independently by power supplies of the thyristor type. The power supplies units must generate currents of up to 20 kA and positive and negative voltages (two-quadrant operation).

The safety system, inserted between each power supply unit and the coil group, protects the coils in case of faults. The risk of damaging superconducting coils demands very high reliability of this system. The stored magnetic energy in the coils must be safely transferred to a set of dump resistors.

### 2.5 Netzanschluss

#### 2.5.1 Leistungsfaktor, Blindleistungskompensation

#### 2.5.2 Strombeschränkung

## 3. FREQUENZ-SCHUTZSYSTEM

### 3.1. Konzept des Schutzsystems

### 3.2. Ablauf der Schutzmaßnahmen

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit in der Technikgruppe von W7-X in der Zeit vom Juni 1993 bis August 1995. An dieser Stelle bedanke ich mich bei den IPP-Mitarbeitern für viele wertvolle Diskussionen, die zu dieser Arbeit geführt haben. Mein besonderer Dank möchte ich folgenden Personen aussprechen: Hr.Sapper, Dr.Pillsticker, Dr.Schauer und Hr.Schoenewolf. Ebenfalls möchte ich mich für die geführten Diskussionen bei den Mitarbeitern folgender Firmen bedanken:

ABB Turgi - Hr.Linhofer,

AEG Frankfurt - Hr.Techen,

Holec Hengelo - Hr.Boersema und Hr.van de Water,

Siemens Erlangen - Dr.Bardahl, Hr.Hrabal, Hr.Schlegel und Hr.Schlüter.

## 6. ZUSAMMENFASSUNG

# 1. EINLEITUNG

## 2. VERSORGUNG DER SUPRALEITENDEN SPULENSYSTEME

### 2.1. Konfiguration des Systems

### 2.2. Lastverhalten der Stromversorgung

### 2.3. Genauigkeit der Stromregelung

### 2.4. Hochstromzuleitungen

### 2.5. Netzurückwirkungen

#### 2.5.1. Leistungsfaktor, Blindleistungskompensation

#### 2.5.2. Stromüberschwingungen

## 3. „QUENCH“-SCHUTZSYSTEM

### 3.1. Konzept des Schutzsystems

### 3.2. Ablauf der Schutzhandlungen

### 3.3. Technische Parameter des Systems

### 3.4. Zuverlässigkeit

## 4. PROBLEME BEI DER PLASMADISRUPTION

## 5. VERSORGUNG DER „SWEEP“-SPULEN

## 6. ZUSAMMENFASSUNG

## 1. EINLEITUNG

Das Experiment Wendelstein 7-X („W7-X“), das gegenwärtig im IPP vorbereitet wird (Bild 1), soll die Reaktortauglichkeit von Fusionsexperimenten des Typs Stellarator demonstrieren. Beim Stellarator wird das Plasma durch Magnetfelder eingeschlossen, die ausschließlich durch Magnetfeldspulen außerhalb des Plasmabereiches erzeugt werden. Dadurch sind Stellaratoren im Gegensatz zu den Tokamaks von vornherein für den Dauerbetrieb geeignet. Die Tokamaks, wo ein wesentlicher Teil des Feldes durch einen im Plasma fließenden elektrischen Strom erzeugt wird, können nur pulsweise betrieben werden.

Der Dauerbetrieb als wesentliche Stellaratoreigenschaft soll am W7-X mit Hilfe der supraleitenden Spulen untersucht werden.

Der Einsatz konventioneller, normalleitender Kupferspulen kommt wegen des hohen Energieverlustes in den Magneten nicht in Frage. Aus diesem Grund werden auch künftige Fusionskraftwerke, die auf dem Prinzip des magnetischen Einschlusses beruhen, mit supraleitenden Magneten ausgerüstet sein müssen.

Das magnetische Einschlußsystem von W7-X besteht aus 70 supraleitenden Spulen, die in sieben Spulensystemen (Systeme 1-5 und A-B), die je aus zehn in Reihe geschalteten Spulen bestehen, zusammengefaßt sind. Die Spulengruppen sind in toroidaler Richtung alle magnetisch miteinander gekoppelt. Der Spulenkonfiguration des Experimentes liegt eine Modulbauweise mit einer Fünfteilung zugrunde.

Das gesamte Magnetfeld-Spulensystem läßt sich in zwei Hauptsysteme unterteilen:

- das erste System - das Hauptfeldsystem - umfaßt 50 (fünf mal zehn) nichtplanare Hauptspulen (mit je 120 Windungen), die in fünf Spulengruppen zusammengefaßt sind (Systeme 1-5). Diese Spulen sind in fünf toroidale Perioden angeordnet und generieren die Standardfeldkonfiguration. Diese Konfiguration soll ein physikalisch verbessertes Magnetfeld erzeugen, das einen besonders stabilen und wärmeisolierenden Plasmaeinschluß verspricht („Advanced Stellarator“).

- das zweite System - das Zusatzfeldsystem - umfaßt 20 planare (zwei mal zehn), aber nicht kreisförmige Zusatzspulen (mit je 36 Windungen), die in den zwei Spulengruppen (Systeme A-B) zusammengeschaltet sind. Dieses System erlaubt eine 20%-Variation der Standardfeldkonfiguration.

Alle diese Kreise müssen elektrisch einzeln versorgt werden. Dies soll mittels Stromrichteranlagen erfolgen. Bei der Auslegung der Stromversorgung wurde der Stromwert von 20 kA pro System zur Grunde gelegt. Damit zählen diese Systeme zur den Anlagen der Hochstromtechnik, die bei einem Wert von ca. 3kA beginnt. Die Hochstromanlage als Oberbegriff umfaßt die Hochstromerzeuger (Stromrichteranlagen), die Hochstromverbraucher (hier - supraleitende Spulensysteme) und die Hochstromleitungen zwischen diesen Betriebsmitteln.

Für die Hochstromanlage (außer des Verbrauchers, der als vorgegeben gilt) soll ein technisch-ökonomisch optimaler Entwurf erarbeitet werden unter der Betrachtung der Gesamtkonzeption des Kernfusionsexperimentes. Als Optimierungskriterium gilt die Minimierung des Gesamtaufwandes. Dieser setzt sich aus dem Investitions- und Betriebsaufwand zusammen.

Die supraleitenden Spulensysteme als Hochstromverbraucher, die auf die Betriebstemperaturen von ca. 3,8°K abgekühlt und gehalten werden müssen, verbrauchen nach dem Einschalten des Stromes keine Energie mehr. Verluste entstehen lediglich in der Kälteanlage (Energie zum Kühlen der Spulen) und im elektrischen Kreis außerhalb des Spulensystems:

- in den Stromzuführungen vom „warmen“ Zustand ins „kalte“,
- in den Verbindungsschienen Stromrichter-Stromeinführung sowie
- in den Stromrichteranlagen.

Die technischen Parameter der Maschine:

der große Radius  $R_0 = 5.5$  m,

der mittlere Plasmaradius  $r_0 = 0.53$  m,

der Spulennennstrom  $I_N = 16$  kA

gespeicherte magnetische Energie  $W_m$  ca. 600 MJ,

die magnetische Induktion an der Maschinenachse  $B_0 = 3$  T,

die magnetische Induktion am Supraleiter  $B_{max} = 6$  T.

Die sieben Spulengruppen (Systeme 1-5 und A-B) sind in toroidaler Richtung alle magnetisch miteinander gekoppelt. Die Induktivitätsmatrix  $L$  (in H) des gesamten System:

$$L = \begin{bmatrix} L11 & L12 & L13 & L14 & L15 & L1A & L1B \\ L21 & L22 & L23 & L24 & L25 & L2A & L2B \\ L31 & L32 & L33 & L34 & L35 & L3A & L3B \\ L41 & L42 & L43 & L44 & L45 & L4A & L4B \\ L51 & L52 & L53 & L54 & L55 & L5A & L5B \\ \hline LA1 & LA2 & LA3 & LA4 & LA5 & LAA & LAB \\ LB1 & LB2 & LB3 & LB4 & LB5 & LBA & LBB \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} 0.7800 & 0.2230 & 0.0880 & 0.0440 & 0.0330 & 0.0930 & 0.0190 \\ 0.2230 & 0.6390 & 0.1760 & 0.0700 & 0.0410 & 0.1000 & 0.0250 \\ 0.0880 & 0.1760 & 0.6240 & 0.1650 & 0.0750 & 0.0610 & 0.0450 \\ 0.0440 & 0.0700 & 0.1650 & 0.6260 & 0.1940 & 0.0310 & 0.0870 \\ 0.0330 & 0.0410 & 0.0750 & 0.1940 & 0.7650 & 0.0210 & 0.1060 \\ \hline 0.0930 & 0.1000 & 0.0610 & 0.0310 & 0.0210 & 0.1000 & 0.0120 \\ 0.0190 & 0.0250 & 0.0450 & 0.0870 & 0.1060 & 0.0120 & 0.1000 \end{bmatrix}$$

Die gespeicherte magnetische Energie  $W_m$  in dem Spulensystem von W7-X beträgt:

$$W_m = \frac{1}{2} \mathbf{i}^T L \mathbf{i},$$

wo  $\mathbf{i}^T = [i_1, i_2, i_3, i_4, i_5, i_A, i_B]$  7-dimensionaler Vektor der Spulenströme.

Die Gefahr der Zerstörung der supraleitenden Spulensysteme verlangt nach einem

Schutzsystem mit höchstmöglicher Zuverlässigkeit. Beim Störfall entweder im Spulensystem oder in der Stromversorgung muß die im Spulensystem gespeicherte magnetische Energie gefahrlos abgebaut werden. Dieses Schutzsystem ist eine zusätzliche Komponente in der Hochstromanlage, die für große supraleitende Magnete spezifisch ist und in den industriellen, normalleitenden Anlagen (z.B. Metallurgie, Chemie etc.) nicht vorkommt.

Auf die Einzelheiten dieser Komponenten (Stromversorgung, Schutzsysteme) wird in den nächsten Kapiteln eingegangen.

## **2. VERSORGUNG DER SUPRALEITENDEN SPULENSYSTEME**

### **2.1. KONFIGURATION DES SYSTEMS**

Das elektrische Schaltbild für das Fusionsexperiment W7-X umfaßt sieben elektrische Kreise mit supraleitenden Spulensystemen. Jedes Spulensystem besteht aus zehn in Reihe geschalteten Einzelspulen, die mit „kalten“ Verbindungen verschaltet sind. Das Gesamtsystem kann in zwei Subsysteme unterteilt werden:

- das Hauptspulensystem umfaßt fünf Kreise (1-5) mit einer Induktivität von ca. 0.77 H pro Kreis
- das Zusatzfeldsystem umfaßt zwei Kreise (A-B) mit einer Induktivität von ca. 0.1 H pro Kreis.

Alle diese Kreise sind in toroidaler Richtung magnetisch miteinander verkoppelt. Die Verkopplung der Kreise wird durch die L-Matrix vollständig beschrieben.

Die o.g. Kreise müssen elektrisch einzeln versorgt werden können. Dies soll mittels Stromrichteranlagen erfolgen. Bemessungsgröße für die Stromversorgung ist der Stromwert von 20 kA pro System.

Die Stromversorgung muß folgende Funktionen erfüllen:

- Aufladen und Entladen der Magnete in ca. einer Stunde, was einem max.  $dI/dt$  von 5,5 A/s entspricht,
- Stabilisierung des Magnetfeldes während des physikalischen Experimentes mit einer Genauigkeit von  $10^{-4}$  in einem System sowie in allen Systemen zueinander.

Das elektrische Schaltbild der Magneteinspeisung am W7-X zeigt das Bild 2.



Die Speisung soll für sieben verschiedene Betriebsarten ausgelegt werden (Betriebsarten A-F). Sie muß auch das Wechseln der einzelnen Betriebsarten während des Experiments ermöglichen.

An die Stromrichteranlagen werden folgende Anforderungen gestellt:

- möglichst niedrige Investitionskosten
- möglichst hoher Wirkungsgrad, auch bei Teillast
- Steuer- und Regelbarkeit innerhalb des von dem Experimentierbetrieb geforderten Stellbereiches
- hohe Zuverlässigkeit und Betriebssicherheit
- geringer Wartungsbedarf
- geringe Netzurückwirkung.

Wegen der Verkopplung des Gesamtsystems sind noch folgende Forderungen zu berücksichtigen:

- Die vom Experiment vorgegebene Stromtrajektorie (im max. 7-dimensionalen Stromraum) muß von den Stromversorgungen mit der geforderten Genauigkeit nachgefahren werden, d.h. die geforderten Daten müssen von den Stromversorgungen nicht nur im Einzelbetrieb, sondern auch bei gleichzeitigem Betrieb einiger oder aller Versorgungen als Anlage erbracht werden.
- Trotz der Beeinflussung von der Lastseite (die magnetischen Kopplungen zwischen den einzelnen Spulensystemen) und der Netzseite (die gemeinsame Netzimpedanz) dürfen es keine störenden gegenseitigen Beeinflussungen weder wegen Netzschwankungen noch wegen Änderung der Feldparameter einer Betriebsart noch wegen Änderung der Betriebsart auftreten.
- Die geforderte Genauigkeit ist auch im Verbundbetrieb einiger oder aller Versorgungen einzuhalten.

Das Verhalten des Gesamtsystems wird wie folgend beschrieben:

$$(\mathbf{U}) = d/dt[(\mathbf{L})(\mathbf{i})] + (\mathbf{R})(\mathbf{i}) = (\mathbf{L})d(\mathbf{i})/dt + (\mathbf{R})(\mathbf{i})$$

wobei:

$\mathbf{U}^T = [U_1, U_2, U_3, U_4, U_5, U_A, U_B]$  - 7-dimensionaler Vektor der Versorgungsspannungen  
 $\mathbf{R} = \text{diag}(R_i)$ ,  $i=1, 2, \dots, 5, A, B$  - 7-dimensionale, diagonale Matrix der Widerstände des Systems. Der Widerstand eines Systems umfaßt die Zuleitungen zwischen der Versorgungsanlage sowie die Übergangswiderstände der Stromzuführungen.

Der Einfluß der vielen passiven Kreise (Vakuumgefäß, Schirme, etc.) wurde in der o.g. Gleichung nicht berücksichtigt.

Das äquivalente elektrische System von W7-X wurde mit Pspice [2] für die geplanten sieben Betriebsarten simuliert (Bild 3). Gesucht wird an Hand des vorgegebenen Vektors der Spulenströme der Verlauf des Vektors der Versorgungsspannungen. Ein Simulationsergebnis mit dem maximalen Strom von 20kA wurde im Bild 4. gezeigt. Das Aufladen und das Entladen der Magnete geschieht in ca. einer Stunde, was einem max.  $dI/dt$  von bis 5,5 A/s entspricht. Bei dieser Vorgehensweise liegen die Klemmenspannungen der Stromversorgungen bei max. 10.5V bei Systemen 1-5 mit  $L=0.7H$  bzw. bei max 6V bei den Systemen A-B mit  $L=0.1H$  (Bild 5). Die Klemmenspannungen in der Flat-Top-Phase liegen bei max. 3V bei einem Strom von 20kA, bei kleineren Strömen werden sie noch kleiner.

Noch kleinere Spannungen und dadurch auch kleinere Anschlußleistungen für die Stromrichteranlagen ergeben sich, wenn man auf den linearen Stromanstieg verzichten würde und statt dessen in der gleichen Zeit (1 Stunde) einen exponentiellen Stromanstieg zulassen würde (Bild 6). Gleichzeitig stellt sich die Frage nach optimaler Stromtrajektorie bei vorgegebener Zeit in der Lade- und Entladphase, um minimale Spannungen (auch Anschlußleistungen) zu erzielen.

Für diese Anwendung (sehr niedrige Gleichspannung, hohe Gleichströme) bei großen Anforderungen an den Wirkungsgrad eignet sich am besten die Saugdrosselschaltung. Bei gleicher Spannungsbeanspruchung der Ventile liefert diese Schaltung im Vergleich zur Brückenschaltung bei nur der halben Gleichspannung den doppelten Gleichstrom. Die Reduktion der Netzoberschwingungen läßt sich durch die Erhöhung der Pulszahl erreichen. Dabei werden zwei für sich allein sechspulsige Saugdrosselschaltungen über eine weitere Saugdrossel parallel geschaltet, wodurch sich zwölfpulsiger Betrieb ergibt. Hierzu sind die beiden sekundären Phasenspannungen um  $30^\circ$  versetzt, was durch Stern bzw. Dreieck primär erreicht wird (Schaltung No. 5, IEC Publication No. 146 - siehe Bild 7a und 7b). Diese Schaltung erscheint als optimale Lösung hinsichtlich Thyristorausnutzung (ein Thyristor pro Stromrichterzweig - keine Parallelschaltung von Halbleiterelementen) und Stromrichterverlusten.

Der Wirkungsgrad einer Stromrichteranlage  $\eta$ , der so groß wie möglich gemacht werden soll, ist durch das Verhältnis der abgegebenen Wirkleistung zur eingespeisten Wirkleistung gegeben. Die eingespeiste Wirkleistung ist die Summe der abgegebenen Leistung und aller Verluste, die im Transformator, in den Drosseln, in den Thyristoren, in den angeschlossenen Hilfsaggregaten usw. auftreten. Die Verlustoptimierte

Konstruktion der Stromversorgungsanlagen ergibt einen hohen Wirkungsgrad, der auf ca. 92% geschätzt wird in Anlehnung an ausgeführte Anlagen. Weitere Steigerung des Wirkungsgrades erscheint im Bereich der Drosseln und Schienenverbindungen noch möglich. Besonders von Bedeutung ist, ob eine Ausführung mit oder ohne Sicherung gewählt wird.

Die Reduktion der Thyristoren pro Stromrichterzweig auf einen ergibt eine Verbesserung von Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit der Versorgungsanlage.

Die Anlage muß für den 2-Q-Betrieb ausgelegt sein, um die Rückspeisung der im Magneten gespeicherten Energie ins Netz zu ermöglichen. Durch diese Forderung ist der Einsatz der Elektrolysegleichrichter (Transformatorkombination aus einem Stelltransformator und nachgeschalteten Gleichrichtertransformator, Transduktordrosseln und Diodengleichrichter) bzw. Galvanikanlagen (Drehstromsteller und Diodengleichrichter) für W7-X nicht möglich.

Die Regelung der abgegebenen Gleichspannung erfolgt durch Anschnittsteuerung. Durch die bei Teilaussteuerung der Stromrichteranlage, besonders in der Flat-Top-Phase, tritt im speisenden Drehstromnetz erhebliche Steuerblindleistung auf, die durch Kompensationseinrichtungen beseitigt werden muß.

Die Überlegung, die zu konzipierende Stromrichteranordnung so auszulegen, daß sie möglichst bei Vollaussteuerung arbeitet, ist wegen den unterschiedlichen Spannungsforderungen in der Auf- und Entregungsphase sowie in der Flat-Top-Phase nicht möglich.

Die Spannungsreduktion im Flattop durch die Vorschaltung von Stelltransformator bzw. Transduktor vor dem Stromrichtertransformator (Transformatoraggregat), um die Stromrichteranlage nahe der Vollaussteuerung zu betreiben, befriedigt nicht durch:

- mögliche Kontaktprobleme bei den Stelltransformatoren,
- gesteigerte und variable  $u_k$ -Werte je nach Spannungseinstellung,
- mögliche Unsymmetrie der Spannungen und Kommutierungsreaktanzen.

Der Verzicht auf die Stelltransformatoren bedeutet auch den Wegfall der periodischen Wartungen der Last-Stufenschalter und deren Mehrverluste und liefert damit einen höheren Wirkungsgrad der Anlage.

Die Energieversorgung des W7-X - Spulensystems soll direkt aus dem aus HEVAG-Netz über einen 4MVA, 110/20kV Abspanntransformator erfolgen. Die sieben Magnetspeisungen, die Blindleistungskompensationsanlage und, bei Bedarf, die OberschwingungsfILTER, werden an die 20kV-Schiene angeschlossen. Von dem gleichen Transformator soll auch die Kälteanlage versorgt werden (Bild 8).

Jede Magnetspeisung setzt sich aus folgenden Komponenten zusammen:

- Mittelspannungsschaltanlage
- Stromrichtertransformator
- Stromrichter
- Gleichstromapparat
- Steuerung, Regelung und Schutz
- Kühleinrichtung

Der Transformator soll in der Sonderausführung als Hochstromtransformator in Trockenausführung (Gießharz) für Innenraumausführung gebaut werden. Verbindungen zwischen Transformator und Stromrichter sollen möglichst kurz sein, um durch die darin fließenden Rechteckströme verursachten Verluste und Blindspannungsabfälle niedrig zu halten. Der Aufbau der Sekundärsysteme muß symmetrisch sein, um ungleiche Strombelastungen zu vermeiden. Die Saugdrosseln sollen aus Verlust- und Lärmgründen im Transformator-kessel eingebaut werden. Die beiden Transformatoren einer zwölfpulsigen Einheit sind identisch bis auf die Primärwicklung, wobei bei einem diese in Dreieck, im anderen in Stern geschaltet werden.

Es muß noch untersucht werden, ob der Transformator in der Ausführung als Dreiphasentransformator oder als zu einer Dreiphasengruppe zusammengefaßte Einphasentransformatoren ausgeführt wird, um die gewünschte Spannungssymmetrie und dadurch die geforderte Genauigkeit ( $10^{-4}$ ) zu erreichen.

Gewählt wurden folgende Parameter für die Stromrichteranlagen:

- fünf Anlagen mit Strömen von 20 kA, 15 V (Leerlaufspannung), 10.5 V (Lastspannung) für die Versorgung der Spulensysteme 1-5
- zwei Anlagen mit Strömen von 20 kA, 8 V (Leerlaufspannung), 6 V (Lastspannung) für die Versorgung der Spulensysteme A-B.

## 2.2. LASTVERHALTEN DER STROMVERSORGUNG

Entsprechend der Wirkungsweise von Thyristoren treten in Stromrichteranlagen auf der Gleichstromseite, auf der Primär- und Sekundärseite des Transformators Oberschwingungen auf. Die von einem Stromrichter abgegebene Spannung ist zerlegbar in eine Gleichspannung und eine überlagerte Wechselspannung, die sich ihrerseits in einzelne Oberschwingungen zerlegen läßt. Diese

Spannungsüberschwingungen haben die Ordnungszahlen  $v=kp$  ( $k=0,1,2,\dots$ ), wobei  $p$ -Pulszahl des Stromrichters. Größe und Frequenz dieser Überschwingungen hängen im wesentlichen von der Pulszahl und der Art des Betriebes ab. Die Erhöhung der Pulszahl bei den Stromversorgungsanlagen führt zu einer Verringerung der Strom- und Spannungsüberschwingungen und damit zu einer Verringerung des Aufwandes für die ev. wechselstrom- bzw. gleichstromseitigen Filter. Durch die Aussteuerung werden die Überschwingungen, vor allem die der höheren Frequenzen, wesentlich vergrößert. Im Bild 9 [1] sind die Gleichspannungsüberschwingungen verschiedener Ordnungszahlen  $v$  einer 6- und 12-pulsigen Stromrichteranlage in Abhängigkeit des induktiven Spannungsabfalles mit dem Zündwinkel  $\alpha$  als Parameter dargestellt. Diese ermittelten Gleichspannungsüberschwingungen können in erster Näherung als treibende Spannung für die entsprechenden Stromüberschwingungen aufgefaßt werden. Um die Stromüberschwingungen im verkoppelten Magnetfeldsystem von W7-X zu finden, wurde der gesamte elektrische Kreis mit den L- und R-Matrizen mit Pspice [2] simuliert (Bild 10). Der Vektor der treibenden Spannungen wurde aus dem Bild 9 gewonnen, wobei  $d_x$  von 6% angenommen wurde, was einem  $u_k$ -Wert des Transformators von 12% entspricht. Die Ergebnisse dieser Simulation sind auf dem Bild 11 dargestellt. Es ist offensichtlich, daß keine zusätzlichen Filterkreise erforderlich sind - die supraleitende Magnete bedämpfen genügend die Stromüberschwingungen im Gleichstromkreis.

### 2.3. GENAUIGKEIT DER STROMREGELUNG

Während der Flat-Top-Phase wird von der Stromversorgung eine Genauigkeit von  $10^{-4}$  gefordert. Dies gilt für sowohl für den Alleinbetrieb als auch für den Verbundbetrieb der Stromrichteranlagen. Es ist die Hauptaufgabe der Thyristorelektronik, trotz der Wechselwirkungen von der Netz- und der Lastseite, den Ausgangsstrom des Stromrichters auf dem vorgegebenen Wert mit der geforderten Genauigkeit konstant zu halten.

Das kann nur erfüllt werden, wenn man in der Lage ist, den Istwert des Regelkreises, den Spulenstrom, mit einer entsprechenden Genauigkeit zu messen. Auf dem Markt gibt es hochpräzise Meßsysteme, die eine Genauigkeit von ca. 10 ppm haben. Dabei handelt es sich um Produkte folgender Firmen:

1. Fa. Holec (Holland)
2. Fa. Foeldi (Schweiz)
3. Fa. Dan Physics (Dänemark).

Um die richtige Wahl des Meßsystems zu treffen, waren Informationen von Firmen und Institutionen notwendig, die diese Systeme bereits eingesetzt und erprobt haben:

- CERN
- DESY
- PSI.

Es herrscht einstimmig die Meinung, daß das Meßsystem der Fa. Holec die besten Meßergebnisse liefert, ist aber auch das teuerste System von allen dreien. Die weitere Reihenfolge ist wie oben.

Neben der hochgenauen Meßwerterfassung spielt die Regelung der Stromrichteranlage eine ebenfalls wichtige Rolle bei der Genauigkeitsforderung. Inzwischen bieten fast alle Stromrichterhersteller digitale Regelungen an (z.B. SIMADYN D, LOGIDYN D, etc), die diese Forderung erfüllen können. Wegen der großen Induktivität als Last wird man wahrscheinlich nur den P-Anteil aus dem PID-Algorithmus benötigen. Falls die genauere Analyse des Regelkreises es zeigen sollte, daß auch ein I-Anteil benötigt wird, könnte man ihn bei Bedarf auch noch einbeziehen. Die Umprogrammierung geschieht per Software.

Um die geforderte Genauigkeit in allen Systemen zueinander zu erfüllen, muß eine den Stromrichterregelungen übergeordnete Regelung aufgebaut werden. Diese soll den Charakter einer integrierenden Regelung haben und bewirkt bei Bedarf Sollwertkorrekturen für die einzelnen Systeme. Ob man für diese, übergeordnete Regelung neben der hochpräzisen Istwerterfassung in den einzelnen Systemen auch die Signale der ECRH-Messung verwenden soll, muß noch geklärt werden.

## 2.4. HOCHSTROMZULEITUNGEN

Die Zuleitungen verbinden die Stromrichteranlagen mit den supraleitenden Spulensystemen der W7-X-Anlage. Diese sind, wie die Stromversorgung, für den Strom von 20kA zu dimensionieren.

Bei der Auswahl des Leiterwerkstoffs und -querschnitts, der Leiteranordnung und -Legung sind Faktoren wie:

- Verlustleistung
  - Schienentemperatur
  - Kosten
- zu berücksichtigen.

Die elektrische Leistung soll mit Mittelspannung zum Stromrichtertransformator in unmittelbarer Nähe der supraleitenden Spulensysteme als Hochstromverbraucher geführt werden. Dadurch kann die Länge der Hochstromzuleitungen so kurz wie technisch möglich ausgeführt werden, um die Verlustleistungen ( $P_{\text{verl}} \sim$  der Länge der Zuleitungen) so klein wie möglich zu halten. In der Praxis bedeutet das, daß die Stromrichteranlagen samt Mittelspannungsschaltanlage, Gleichstromschaltanlage und dem Spulenschutzsystem unmittelbar hinter der Betonabschirmung des Experimentes aufgestellt werden sollen. Außerdem sind die kürzesten Verbindungen zwischen dem Stromrichtertransformator und dem Gleichrichter sowie zwischen den elektrotechnischen Betriebsmitteln innerhalb der Hochstromkreise (z.B. Trenner) zu wählen.

Bei der Wahl des Querschnittes und des Leiterwerkstoffes (Leiteroptimierung) sind ökonomische Gesichtspunkte (Kosten) zu beachten, wobei die querschnittsabhängigen Investitionskosten, bestehend aus Werkstoff- und Montagekosten, und die jährlichen elektrischen Verlustarbeitskosten in die Rechnung eingehen. Bei der Querschnittsfestlegung sind auch die Anschlußverhältnisse an der Stromrichteranlage und an den Verbrauchern (Stromeinführungen) zu berücksichtigen.

Der optimale Querschnitt wird neben dem Werkstoff und der Temperatur der Hochstromleitung sowie der Jahresbenutzungs- und Nutzungsdauer hauptsächlich vom Material- und Energiepreis bestimmt. Diese beiden ökonomischen Größen können jedoch bei Projektierungsarbeiten für den Inbetriebnahmezeitpunkt sowie für die Betriebsdauer nur teilweise vorausschauend abgeschätzt werden. Ein Beispiel für die Optimierung wurde im Bild 12 dargestellt (berechnet von Dr. Bardahl, Fa. Siemens).

Die Leiterwerkstoffe von Hochstromanlagen sind hauptsächlich Kupfer und Aluminium. Unter Beachtung der unterschiedlichen spezifischen Masse ( $8,93 \text{ g/cm}^3$  bei Kupfer,  $2,7 \text{ g/cm}^3$  bei Aluminium) und des Leitwertverhältnisses von  $1/1,63$  (Al/Cu) ergibt sich bei leitwertgleicher Auslegung der Hochstromleiter bei Einsatz von Aluminium nur etwa die halbe Masse gegenüber Kupfer. Entsprechend den aktuellen Weltmarktpreisen ist auf die Masseinheit bezogene Preis bei Kupfer 4- bis 8 mal größer als bei Aluminium. Diese Überlegung führt eindeutig zum Vorteil für Aluminium. Der Leiterwerkstoff Kupfer sollte aus ökonomischen Erwägungen heraus nur Anwendung finden, wo dies aus Raumgründen, bei hohen mechanischen Beanspruchungen sowie bei Dauertemperaturen oberhalb von ca.  $110 \text{ }^\circ\text{C}$  für dringend notwendig erachtet wird.

Die Hochstromzuleitungen sollen als luftgekühlte Schienenpakete aus Einzelschienen aufgebaut werden. Bei Einzelschienen ist die Wärmeabführung wegen der Größe der Oberfläche günstiger als bei Kompaktschienen.

Die Lagerung und Führung der Hochstromleitungen muß gewährleisten, daß die durch Leitertemperaturänderungen auftretende Änderungen der Leiterlängen weder zur einer Zerstörung der Stützpunkte der Leiter noch zur Zerstörung von Anschlüssen führen. Deshalb sind bei Verwendung von Schienen Dehnungsstellen einzubauen, wobei die im Betrieb auftretende Temperaturdifferenzen berücksichtigt werden müssen.

Die Leiterwerkstoffe einschließlich der Kontaktstellen und der Befestigung dürfen im Betrieb bestimmte Grenztemperaturen nicht überschreiten.

Die Isolation der Leiterstützpunkte und die zwischen den Hochstromleitungen ist für eine Nennspannung  $U_N$  von 8kV auszulegen. Die im Notfall (beim Versagen des Öffners im Sicherheitskreis) durch die Sprengung des Pyristors erzeugte transiente Überspannung liegt bei einem Wert von ca. 12kV. Den Zustand der Isolation wird vor dem Betrieb durch die Prüfspannung von  $2 \cdot U_N + 1\text{kV}$  d.h. mit 17kV geprüft und später während des Betriebes mit einer Wiederholprüfung von 80% der Anfangsprüfspannung d.h. mit 13,6kV. Diese Werte sind ausreichend, um die Aussage über der Zustand der Isolation zu machen.

Die Hochstromzuleitungen sind so zu Verlegen, daß ein Kurzschluß zwischen den beiden Polen ausgeschlossen werden kann („kurzschlußsichere Ausführung“). Dies läßt sich durch die Führung einer geerdeten Schiene zwischen den beiden Polen und Erdschlußüberwachung erreichen.

Diese Bedingung ist deshalb so wichtig, weil sonst die Funktion des Schutzsystems ausgeschaltet wäre und der Strom in dem gestörten System würde mit einer Zeitkonstante abklingen, wo sich der ohmsche Anteil aus den Verlusten in den Zuleitungen und im Störlichtbogen ergibt.

## 2.5. NETZRÜCKWIRKUNGEN

Stromrichter haben Rückwirkungen auf das speisende Drehstromnetz. Sie entnehmen ihm induktive Blindleistung und nicht sinusförmigen Strom.



### 2.5.1. Leistungsfaktor, Blindleistungskompensation

Die Stromrichteranlagen werden direkt aus dem Netz versorgt. Sie müssen den von den EVU geforderten Leistungsfaktor  $\lambda$  als Verhältnis von übertragener Wirkleistung zur auftretenden Scheinleistung von  $\geq 0.9$  erfüllen.

Die Kompensation der Grundschiwungs-Blindleistung in Drehstromnetzen kann durch zusätzlich vorzusehende Kompensationskondensatoren vorgenommen werden. Die Kondensatoren werden entsprechend der erforderlichen Blindleistung und der Spannung am Anschlußpunkt in Reihen- und Parallelschaltung als Batterien aufgebaut und in Gerüsten in Freiluftausführung angeordnet. Besonders die bei der Teilaussteuerung einer Stromrichteranlage auftretende Steuerblindleistung, die das speisende Netz in unerwünschter Weise belastet, soll durch Kondensatoren kompensiert werden. Mit einer in Stufen schaltbaren Kompensationsanlage ist eine grobe Angleichung an den Blindleistungsbedarf möglich.

Die Entscheidung, ob die Kompensationsanlage unverdrosselt oder verdrosselt (verstimmte Saugkreise) gebaut werden soll, muß noch durch Simulationen getroffen werden. Dies hängt auch davon ab, ob die Oberschwingungen der Ströme gefiltert werden müssen.

### 2.5.2. Stromüberschwingungen

Der vom Stromrichter aus dem Netz entnommene Strom kann im stationären Zustand in einen Grundschiwungsanteil mit Netzfrequenz und einer Reihe von Oberschwingungen, deren Frequenzen ganzzahlige Vielfache der Netzfrequenz sind, zerlegt werden. Die Frequenzen der Oberschwingungen im Netzstrom sind abhängig von der Pulszahl  $p$  der Stromrichter. Im allgemeinen gibt die Ordnungszahl  $v$  an, mit welchem Vielfachen der Netzfrequenz auftreten:  $v = kp \pm 1$  ( $k=1,2,3,\dots$ ), wobei die Amplituden der zugehörigen Oberschwingungen im idealisierten Falle ergeben sich nach der Formel  $I_v/I_1 = 1/v$ .

Eine Zwölfpulsige Stromrichterschaltung kann also eine 11., 13., 23., 25., usw. Oberschwingungen hervorrufen (Bild 13 [1]).

Die Stromrichteranlage erzwingt dem Drehstromnetz die Oberschwingungsströme, also eine Stromquelle darstellt. Hierdurch entstehen an der Netzimpedanz Oberschwingungsspannungen, die sich der Spannungsgrundschiwung überlagern und eine Verzerrung der Netzspannung zur Folge haben. Über diese gemeinsame Netzimpedanz beeinflussen sich gegenseitig auch die Magnetspeisungen. Durch die Filterkriese (abgestimmte Saugkreise) sollen die Stromüberschwingungen abgesaugt

und der parallele Betrieb der Stromversorgungen sichergestellt werden. Deren Dimensionierung erfolgt bei der Kenntnis aller Parameter des Speisernetzes, des Abspanntransformators sowie der Stromrichtertransformatoren.

Die Oberschwingungen der Ströme sind nur für stationäre Vorgänge (z.B. während der Flat-Top-Phase) definierbar. Instationäre Vorgänge (z.B. in der Aufregungs- oder Entregungsphase der Magneten, während der Parameteränderung bei einem Betriebsfall oder bei Änderung des Betriebsfalles) dagegen haben immer ein un stetiges Spektrum an Oberschwingungen. Die Filter haben die Aufgabe, einen sicheren Betrieb aller Speisungen zu ermöglichen, nicht jedoch die Oberschwingungen vom Netz fernzuhalten.

### 3. „QUENCH“-SCHUTZSYSTEM FÜR W-7

#### 3.1. DAS KONZEPT DES SCHUTZSYSTEMS AM W7-X

Das Schutzsystem am W7-X, eingebaut zwischen der Versorgungseinheit und der supraleitenden Spule, hat die Aufgabe, das Spulensystem im Störfall vor Zerstörung zu schützen. Die im Spulensystem gespeicherte magnetische Energie  $W_m$  muß dann auf Entladewiderstände transferiert und dort in Wärme umgesetzt werden.

Wegen der magnetischen Verkopplung aller Spulensysteme muß im Störfall der Strom nicht nur im gestörten System, sondern in allen Systemen abgeschaltet werden. Andernfalls würde die Abschaltung des Stromes in einem System zu Überströmen in allen anderen Systemen führen (toroidale Flußerhaltung)- siehe Bilder 14-16.

Bevor man mit der Simulation des Störfalles „Quench“ des gesamten Systems von W7-X beginnt, muß man folgende Überlegung anstellen, um Abschätzungen für die Auslegung der Schalterelemente und der Entladewiderstände zu bekommen:

das magnetische Einschlußsystem am W7-X kann grob in zwei Subsysteme unterteilt werden:

- in das Hauptfeldsystem mit der Induktivität  $L_M$  und
- in das Zusatzfeldsystem mit der Induktivität  $L_A$ .

Diese beiden Subsysteme sind durch die Gegeninduktivitäten  $L_{MA} = L_{AM}$  verkoppelt.  
Die equivalente Induktivitätsmatrix  $L_{eqv}$  (in H) eines solchen Systems beträgt:

$$L_{eqv} = \begin{bmatrix} L_M & L_{MA} \\ L_{AM} & L_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5,652 & 0,588 \\ 0,588 & 0,223 \end{bmatrix},$$

wobei  $L_M = \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 L_{ij}$  - die Summe Induktivität der fünf Gruppen des  
Hauptsystems,

$L_A = \sum_{i=6}^7 \sum_{j=6}^7 L_{ij}$  - die Summe Induktivität der beiden Gruppen des  
Zusatzsystems,

$L_{MA} = \sum_{i=1}^5 \sum_{j=6}^7 L_{ij} = L_{AM} = \sum_{i=6}^7 \sum_{j=1}^5 L_{ij}$  - die Kopplungsinduktivität der beiden  
Systeme.

Die Quenchberechnungen haben gezeigt, daß im Quenchfall die Ströme in allen Spulensystemen mit einer Zeitkonstante  $\tau_{ent} \approx 3$  s abklingen müssen, um die "hot-spot"-Temperatur unterhalb von 100 K zu halten. Die Quenchdetektionszeit muß  $t_{det} < 1$ s sein, wobei sich diese Zeit wie folgend aus zwei Komponenten zusammensetzt:

1. die „reine“ Detektionszeit des Quenches  $t_{rdet}$
2. die „Schaltverzugszeit“  $t_{schtot}$ , die  $< 0,5$  s ist.

Diese Zeiten determinieren die Werte der Entladewiderstände:

- in den Systemen 1-5:

$$R_{dump1} = (L_M / \tau_{ent}) / 5 = 0,377 \text{ Ohm} \approx 0,4 \Omega,$$

- in den Systemen A-B:

$$R_{\text{dump2}} = ((L_M + L_A + L_{MA} + L_{AM}) / \tau_{\text{ent}}) - 5 * R_{\text{dump1}}) / 2 = 0.175 \text{ Ohm} \cong 0.15 \Omega.$$

Dies ergibt die folgenden Parameter der Schalterelemente:

- in den Systemen 1-5:

$$U_{\text{ENT}} (I_N = 16\text{kA}) = R_{\text{dump1}} * I_N = 6.4 \text{ kV},$$

$$U_{\text{ENT}} (I_{\text{MAX}} = 20\text{kA}) = R_{\text{dump1}} * I_{\text{MAX}} = 8.0 \text{ kV},$$

- in den Systemen A-B:

$$U_{\text{ENT}} (I_N = 16\text{kA}) = R_{\text{dump2}} * I_N = 2.4 \text{ kV},$$

$$U_{\text{ENT}} (I_{\text{MAX}} = 20\text{kA}) = R_{\text{dump2}} * I_{\text{MAX}} = 3.0 \text{ kV}.$$

Aus diesem Grund müssen die Schalterelemente (Öffner) dimensioniert werden für folgende Parameter:

- in den Systemen 1-5: **20 kA, 8 kV,**
- in den Systemen A-B: **20 kA, 3 kV.**

Gleichstromschalter, die einen Dauerstrom von 20kA tragen und diesen gegen eine wiederkehrende Spannung von 8kV bzw. 3kV schalten, sind auf dem Markt nicht verfügbar.

Durch die Anordnung des Schalters in einem Bypass zu dem Hauptstromkreis kann erreicht werden, daß der Schalter die o.g. Strom von max. 20kA nur für einen Zeitraum von max. 1s tragen muß. Dadurch wird nur ein Schalter für gepulste Betriebsweise benötigt. Diese Art von Gleichstromschalter befinden sich im IPP im Einsatz:

- OH-Vakuumschaltanlage für 50kA/3s, 30kV [3]
- Thyristor-Überstromschutzschalter für die COI-Spule für 30kA/4s, 1,8kV mit einer Sprengsicherung als Back-up-Lösung [4].

Das Konzept des Schutzsystemes basiert auf einem Gleichstromschalter im Bypass unter Ausnutzung der Komponenten der beiden o.g. Schaltanlagen.

Auf die technischen Details für das gewählte Schutzsystem wird im nächsten Kapitel eingegangen.

### 3.2. DIE TECHNISCHEN PARAMETER DES SCHUTZSYSTEMS

Das „Quench“-Schutzsystem für Systeme 1-5 des W7-X - Projekt ist dargestellt auf dem Bild 17, für die Systeme A-B auf dem Bild 18. Jedes dieser Schutzsysteme besteht aus folgenden Komponenten:

- schnelle Trenner (Schalter  $Q_{1a}$  und  $Q_{1b}$ ), um die Energieversorgung von dem Sicherheitssystem und dadurch von der hohen Spannung abzuschalten,
- Vakuum-Schnellzuschalter (Schalter  $Q_{2a}$  und  $Q_{2b}$ ),
- Öffner (Schalter  $Q_{3a}$  und  $Q_{3b}$ ), der wiederum in den Systemen 1-5 als 20kA, 8kV zwangskommutierter Vakuumschalter und in den Systemen A-B als 20kA, 3kV Gleichstromschnellschalter aufgebaut wird,
- PYROBREAKER ( $Q_4$ ),
- Entladewiderstand  $R_{dump}$ .

Das Konzept des Schalters basiert auf den Erfahrungen von ASDEX-Upgrade sowohl von der OH-Schaltanlage für den Öffner als auch von dem Überstromschutzsystem für die Regelungsspulen COI für die Lösung mit dem PYROBREAKER als Sicherheitsschalter.

Bei den Schaltelementen planen wir aus Redundanzgründen immer zwei Schalter zu benutzen und zwar:

- parallelgeschaltet für Schließer
- geschaltet in Reihe für Öffner.

Der Öffner für die Systeme 1-5 (Bild 19) basiert auf einem Vakuumschalter, ist für einen Dauerstrom von 2kA ausgelegt, trägt den Strom von max. 20kA für eine Zeit  $< 1.0$  s, kommutiert ihn auf den Entladewiderstand und muß der wiederkehrenden Spannung bis 8kV standhalten. Der Kommutierungskreis besteht aus einer Kapazität  $C_k$  (12 kV, 640  $\mu$ F) mit einem Ladegerät, einer Induktivität  $L_k$  (40  $\mu$ H) und einem Thyristor-Kommutierungsschalter  $T_k$ . Der Kommutierungsschalter besteht wiederum aus sechs in Reihe geschalteten Thyristoren Bst U68. Die Kommutierungsfrequenz liegt bei ca. 1,2kHz, was zu einer sicheren Abschaltung des Gleichstromes führt, wie die Erfahrungen am ASDEX-Upgrade zeigen. Falls bis zum Baubeginn von W7-X

neue Erkenntnisse über die Abschaltmöglichkeiten von Vakuumschaltröhren mit noch höher Frequenz vorliegen sollten, wird dies in das Sicherheitskonzept einfließen, um die Kommutierungskapazität noch kleiner bauen zu können.

Als 20kA-3kV Öffner für die Systeme A-B wollen wir den Gleichstromschnellschalter type UR 236 (Secheron) benutzen. Dieser Schalter arbeitet ohne Zwangskommutierung, ist für einen Dauerstrom von 6 kA ausgelegt, kann aber kurzzeitig einen Strom bis 20kA für eine kurze Zeit ( $<1.0$  s) tragen, ihn auf einen Entladewiderstand kommutieren und einer Wiederkehrenden Spannung bis 4kV standhalten.

Der Entladewiderstand  $R_{dump}$  wird ähnlich wie die Bremswiderstände des EZ4 Generators aus Edlestahlelementen aufgebaut. Der Entladewiderstand ist für die Freiluftaufstellung vorgesehen. Ein fremdfeldarmer Hochspannungs-/Hochstromaufbau muß berücksichtigt werden. Im „Quench“-Fall müssen die Widerstände die in den Magneten gespeicherte magnetische Energie adiabatisch aufnehmen ( $<300$  MJ in jedem System der Gruppen 1-5 und  $<100$  MJ in den Systemen der Gruppen A-B). Sie heizen sich dabei auf ca.  $700^{\circ}\text{C}$  auf. Danach ist eine Abkühlpause von ca. 2 Std. notwendig.

Der Pyristor (PYROBREAKER oder Sprengsicherung), vorgesehen als Notschalter für den Öffner, funktioniert ähnlich wie die IS-Begrenzer beim Generatorschutz, ist aber für Gleichstromkreise konzipiert. Die funktionsweise des Pyristors und des Gleichstromöffner ist selektiv, dh. der Pyristor wird nur bei einem Fehler des Gleichstromschalters gezündet.

Der schnelle Trenner, eingebaut zwischen der Stromversorgung und dem Schutzsystem, muß in der Lage sein, einen Strom von max. 20kA auf einen Bypass gegen eine max. Spannung von 50V zu kommutieren. Dieser muß auch für eine Spannung von 15kV zwischen den geöffneten Messern sowie von Messer zur Erde ausgelegt sein. Dieser Trenner wird mit Druckluft angetrieben, was eine Öffnungszeit von ca. 250ms ermöglicht.

Außer der oben vorgeschlagenen Lösung haben wir ebenfalls eine Lösung untersucht, wo der Schalter ohne Zwangskommutierung im Hauptstromkreis liegt und den gesamten Laststrom auf die Dauer tragen muß. Man muß in den elektrischen Kreis zwei solche Schaltkreise mit je 4kV einbauen, um eine Spannung von 8kV zu erreichen. Um den Strom von 20kA tragen zu können muß ein Schaltermodul aus

sieben parallelgeschalteten Einzelschaltern bestehen. Daraus resultiert, daß man in einem der Systeme 1-5 vierzehn solcher Schalter einbauen müßte (Bild 20), in allen Systemen 1-5 insgesamt siebenzig Schalter. Bei dieser Anzahl von Schaltern, die im Störfall alle funktionieren müssen, sinkt die Zuverlässigkeit des gesamten Systems dramatisch.

### 3.3 DER ABLAUF DER SCHUTZHANDLUNGEN

**I.** Es liegt eine Störung in einem oder mehreren Kreisen der Spulensysteme vor (Quench, Erdschluß, Windungskurzschluß, etc). Die Schutzmaßnahmen, die wegen der starken Verkopplung aller Systeme in allen Systemen gleichzeitig eingeleitet werden müssen, sollen folgendermaßen ablaufen, wobei die Zeitangaben nach der Detektion des Störfalls gelten:

1. die Stromversorgung wird umgehend in Wechselrichterbetrieb umgesteuert
2. nach ca. 20-25 ms (die Energieversorgung arbeitet im Wechselrichterbetrieb) wird der parallele Zweig mit dem Endladewiderstand über einen Vakuumschalter (Schließer) zugeschaltet, wobei der Endladewiderstand zunächst über einen Öffner kurzgeschlossen bleibt
3. nach ca. 300-500 ms, nachdem der Strom der Stromversorgung zu Null abgeklungen ist und der Spulenstrom über den kurzgeschlossenen Parallelzweig fließt, wird die Stromversorgung durch das Öffnen von den schnellen Trennschaltern im stromlosen Zustand von dem Kreis Spule - Endladewiderstand (kurzgeschlossen) getrennt
4. nach ca. 600ms wird der Strom vom zwangskommutierten Schalter auf den Endladewiderstand kommutiert, wodurch sich eine Spannung ( $R_{ent} \cdot I_{sp}$ ) zwischen den Spulenklammern aufbaut, die den Spulenstrom mit einer Zeitkonstante von  $\tau = (L_{sp} / R_{ent})$  zum abklingen zwingt. Nach ca. drei Zeitkonstanten ist der Strom auf 3% des Anfangswertes abgeklungen.

**II.** Bei einer Störung in der Energieversorgungsanlage Kommt zusätzlich zu den o.g. Schutzhandlungen nur das Abschalten des netzseitigen Leistungsschalters. Dabei muß ein Freilauf für den Spulenstrom gewährleistet sein, d.h. daß der zur Energieversorgung und zur Spule parallele Zweig mit dem kurzgeschlossenen

Entladewiderstand vor dem Abschalten des netzseitigen Leistungsschalters zugeschaltet werden muß. Dies verursacht nur eine Aufteilung des Spulenstromes zwischen diese zwei Zweige (Stromversorgungskreis und Entladekreis). Der schnelle Öffner muß unter Teilstrom öffnen, zieht Lichtbogen und kommutiert dadurch den restlichen Teilstrom von der Stromversorgung auf den immer noch kurzgeschlossenen Entladewiderstandskreis. Der weitere Ablauf wie I. 4.

Die Simulationen des Quenchfalls am W7-X wurde unter Berücksichtigung der adiabatischen Erwärmung der Entladewiderstände und der Verkopplung des Gesamtsystems mit Pspice [2] durchgeführt (Bilder 21 und 22). Das Bild 21 zeigt die Situation ab dem Abkommutieren der Ströme von den Öffnern auf die Entladewiderstände, das Bild 22 zeigt den Einfluß der Adiabatischen Erwärmung der Entladewiderstände auf die Entwicklung des Modells. Die Simulationsergebnisse für die Anfangsströme von 20kA (Auslegungsdaten der Stromversorgung und der Schutzsysteme) sind auf den Bilder 23 und 24 dargestellt.

Ebenfalls untersucht wurde der Einfluß der Verzögerungszeit bei den Öffnern. Es wurden bewußt Zeiten zwischen 50ms und 100ms angenommen. Dieses Effekt führt zunächst zur Stromanhebung in den verspäteten Kreisen, kann aber die korrekte Abschaltung nicht verhindern (Bild 25 und 25a).

### 3.4. DIE ZUVERLÄSSIGKEIT DES SCHUTZSYSTEMS VON W 7-X

Das Unfallrisiko eines Systems mit supraleitenden Spulen, verbunden mit finanziellen Risiko, mit der ev. Stilllegung des Experiments, verlangt nach einem Sicherheitssystem mit einer extrem hoher Zuverlässigkeit.

Aus Gründen der Redundanz werden bei den Schaltgeräten des Sicherheitssystems immer zwei Schalter eingesetzt und zwar:

- parallelgeschaltet bei der Schließern (Q<sub>2a</sub> and Q<sub>2b</sub>)
- geschaltet in Reihe für Öffner (Q<sub>1a</sub>, Q<sub>1b</sub>, Q<sub>3a</sub> and Q<sub>3b</sub>).

Die Zuverlässigkeitszahlen bei den kritischen Komponenten des Sicherheitssystems:

- die MTBF-Zahlen für Mittelspannungsvakuumschalter (bis 36 kV) gemessen an einer Population von 150000 Schaltern liegt bei 1200 Jahren. Dieser Wert ist relevant für die Schließer Q<sub>2a</sub> und Q<sub>2b</sub>.

- für die zwangskommutierten Vakuumschalter als Öffner (Q<sub>3a</sub> und Q<sub>3b</sub> Schalter in den Systemen 1-5) gibt es Erfahrungswerte am RFX-Projekt in Padua. Bei diesem



Experiment werden sechs OH-Schaltanlagen zu einem elektrischen Kreis zusammengeschaltet.

- die MTBF-Werte für die Gleichstrom-Schnellschalter type UR 236 (Q<sub>3a</sub> und Q<sub>3b</sub> Schalter in den Systemen A-B) liegen bei  $1.5 \cdot 10^6$  Stunden. Diese Werte wurden durch den Einsatz dieser Schalter bei den elektrischen Bahnen gewonnen.

Es war leider nicht möglich die entsprechenden Zahlen von der Firma FERRAZ für die schnellen Trenner (Q<sub>1a</sub> and Q<sub>1b</sub>) und für den PYROBREAKER (Q<sub>4</sub>) zu gewinnen. Die Ursache dafür ist die relativ niedrige Zahl von Anwendungen auf der einen Seite und keine Fehlerfälle auf der anderen.

#### 4. PROBLEME BEI DER PLASMADISRUPTION

Nach einem plötzlichen Zusammenbruch (Disruption) der poloidalen Ströme im Plasma stellt sich immer die Frage, ob dieses Ereignis in den supraleitenden Spulen durch Induktion zu Stromänderung und dadurch zum Quench führen kann. Um dies abzuschätzen, wurde zunächst ein toroidales, durchgehendes Gebilde mit dem Radius  $R_p$  angenommen, bestehend aus folgenden Schichten (in Innen nach Außen):

- Plasma
- Schirm auf der Innenwand der Spulen
- supraleitende Spulen
- Schirm auf der Außenwand der Spulen.

In der Realität sind sowohl die Spulen als auch die Schirme nicht durchgehend, sondern haben Unterbrechungen.

Die o.g. Überlegung ergibt ein einfaches Modell, bestehend aus vier elektrischen Kreisen:

1. Plasma
2. supraleitende Spule
3. Innenschirm
4. Außenschirm.

Die Parameter dieser Kreise (R, L, M) gelten pro lfm am Umfang des Torus. Dieses Modell wurde mit PSpice [2] simuliert (Bild 26). Die Ergebnisse dieser Simulation liegen vor (Bild 27). Die Ströme gelten ebenfalls pro lfm am Torusumfang. Es ist offensichtlich, dass diese kleine Stromänderung, die in den Spulen induziert wird, nicht zum „Quench“ führt.

Als weiteren Schritt muß das grobe Modell verfeinert und nochmals simuliert werden.

## 5. VERSORGUNG DER „SWEEP“-SPULEN

Bei dem W7-X Experiment müssen auch zehn identische normalleitende Spulen („Sweep“-Spulen) mit folgenden Parameter (jeweils):  $R_{20}=4,41\text{m}\Omega$ ,  $L=0,188\text{mH}$  elektrisch versorgt werden.

Der Strom in diesen Spulen soll aus zwei Komponenten bestehen:

- aus einer **einstellbaren Gleichstromkomponente mit dem Wert aus dem Bereich von -2.5 kA bis +2.5 kA.**
- aus einer **sinusoidalen Komponente ( $f=20\text{ Hz}$ ) mit der einstellbaren Amplitude von bis 625 A** wobei die sinusoidale Komponente der Gleichstromkomponente überlagert ist, sodaß u.U. auch 4-Q Betrieb notwendig wird.

Beide Komponenten frei einstellbar, wobei  $I_{\text{DC}} + I_{\text{AC}} \leq 3125\text{A}$ ,  $f_{\text{AC}}=20\text{Hz}$ . Die Genauigkeit der Stromversorgung  $\leq 0.5\%$ .

Um den bei den o.g. Annahmen notwendigen 4-Q Betrieb für alle Geräte bei der Einzellversorgung der Spulen zu vermeiden, könnte man **alternativ** alle zehn Spulen in Reihe schalten und dieses System aus einem zentralen 4-Q Wechselstromgerät (sinusförmig) betreiben und zusätzlich jede einzelne Spule aus einem 2-Q Gleichstromgerät über R,L-Entkopplungselemente parallel versorgen (Bild 28). Dadurch wären elf Stromversorgungssysteme mit folgenden Parameter notwendig:

- zehn Gleichstromgeräte: **2-Q** Betrieb mit regelbarem Strom  $0\div 2.5\text{kA}$ . Die ev. notwendige negative Polarität des Stromes kann mittels Umschalter (Trenner) vor dem "Schuß" eingestellt werden, so daß eine 4-Q Ausführung nicht notwendig ist
- einem **4-Q** Wechselstromgerät mit regelbarem sinusförmigen Stromverlauf: Frequenz von  $f=20\text{Hz}$ , Stromamplitude von  $0\div 625\text{A}$  und Spannung von  $U_{\text{max}}=0.2\text{kV}$ .

Als Wechselstromgerät kommt entweder ein Direktumrichter (Steuerumrichter) oder ein Zwischenkreisumrichter (in der Ausführung als U- oder I-Umrichter), beide als Geräte mit einphasigem Ausgang, in Frage.

Bei der Verwendung von Direktumrichter darf nicht vergessen werden, daß es eine Begrenzung bezüglich des Verhältnisses der Netzfrequenz zur Ausgangsfrequenz gibt. Bei sechspulsigen Schaltungen liegt diese bei einem Wert von etwa 2,5:1, was bei einer Netzfrequenz von 50 Hz einer maximalen Ausgangsfrequenz von ca. 20Hz entspricht. Man liegt also mit der Forderung der „Sweep“-Frequenz von 20Hz an der Spitze der technischen Realisierbarkeit. Andererseits erscheint die Kurveform des Ausgangsstroms der Sinusform um so besser angenähert, je höher das Frequenzverhältnis ist. Kleinere Frequenzverhältnisse lassen sich durch Übergang auf höherpulsigen Stromrichterbetrieb realisieren, was jedoch erst bei wesentlich größerer Leistung wirtschaftlich wäre.

Besondere Aufmerksamkeit erfordern bei Direktumrichtern alle Fragen, die mit dem Leistungsfaktor zusammenhängen. Wird der Anteil  $Q_1$  der Scheinleistung (Steuer-, Kommutierungs- und Magnetisierungsblindleistung) durch eine Kondensatorbatterie kompensiert, so daß keine Blindarbeit registriert wird (der mittlere Verschiebungsfaktor  $\cos\varphi_1=1$ ), so bleiben die Modulationsleistung und die Verzerrungsblindleistung bestehen. Das Vorhandensein von Modulationsleistung bringt zum Ausdruck, daß die Leistung auf der Einspeiseseite des Umrichters zeitlich nicht konstant ist, sondern mit der doppelten Ausgangsfrequenz pulsiert also mit einer Frequenz von 40Hz bei einer Ausgangsfrequenz von 20Hz. In welchem Maße diese Leistungspulsation im Netz zugelassen wird, hängt vom Leistungsverhältnis der Umrichterleistung zur Kurzschlußleistung des Netzes ab. Eine ev. Kompensation der Modulationsleistung wie z.B. bei Kuppeln eines Einphasen-Bahnnetzes mit einem Drehstromnetz ist erst bei der höheren Leistungen rentabel. Die Fourieranalyse ergibt, daß im Netzstrom zusätzlich zu den Netzanteilen der Netzfrequenz  $f$  und deren Vielfachen  $nf$  ( $n=5,7,11,13,\dots$  bei  $p=6$ ) noch weitere Anteile mit Seitenbandfrequenzen entsprechend der doppelten Ausgangsfrequenz  $f_A$  und deren Vielfachen vorhanden sind. Entsprechend aufwendig gestaltet sich die Auslegung der Filterkreise für die Oberschwingungen im Netzstrom.

Der Wirkungsgrad eines Direktumrichters ist im Gegensatz zum Umrichter mit Zwischenkreis wegen der nur einmaligen Energieumformung besonders hoch.

Alle o.g. Quellen müssen als **regelbare Stromquellen** ausgeführt werden, d.h. der Stromverlauf muß dem vom Experiment vorgegeben Sollwert folgen, die dafür

notwendige (u.U. sinusmodulierte für  $f=20\text{Hz}$ ) Spannung muß das Gerät aufbringen können.

Die o.g. Stromquellen sollen die Spulen für Zeitperioden von einigen Minuten versorgen. Diese Zeitperioden ("Schüsse") wechseln sich mit Pausenperioden von ebenfalls einigen Minuten ab.

Die Leistung umfaßt bei dieser Komponente auch die Hochstromverbindungen und die Schaltanlagen zwischen den „Sweep“-Spulen und den Stromversorgungen (3.125kA, 1kV).

## 6. ZUSAMMENFASSUNG

Für die Versorgung und den Schutz der supraleitenden Magnete am W7-X werden folgende Komponenten benötigt:

- 2-Q, 12 p Stromversorgungen mit **20kA, 15V** bzw. **8V**,  $dI/dt_{\max}$  von **5,5A/s** und einer Genauigkeit von  $10^{-4}$  einzeln und im Verbund zueinander. Die Einspeisung erfolgt aus dem 20kV-Netz mit 50Hz. Die Stromumkehr in den Systemen A-B soll mittels Trennern erfolgen.
  - Schutzsysteme („quench protection systems“) für die Systeme 1-5 mit **20kA, 8kV, 300MJ** und für die Systeme A-B mit **20kA, 3kV, 100MJ**.
- Höchstmögliche Zuverlässigkeit !!!**
- Hochstromverbindungen und Schaltanlagen zwischen den Spulensystemen des Experimentes und den Stromversorgungen (**20kA, 15kV**).

Diese Komponenten werden aus Standardmodulen gebaut. Durch den sinnvollen Einsatz von Standardgeräten lassen sich viele Vorteile wie

- langjährige Betriebserfahrung
- hohe Betriebssicherheit und lange Lebensdauer
- niedrigere Anlagenkosten durch kürzere Projektierungs- und Lieferzeiten
- kostengünstige und gesicherte Ersatzteilhaltung
- hoher Wirkungsgrad durch verlustoptimierte Konstruktion
- geringer Platzbedarf durch kompakte Abmessungen bei hoher Leistungsdichte

erzielen.

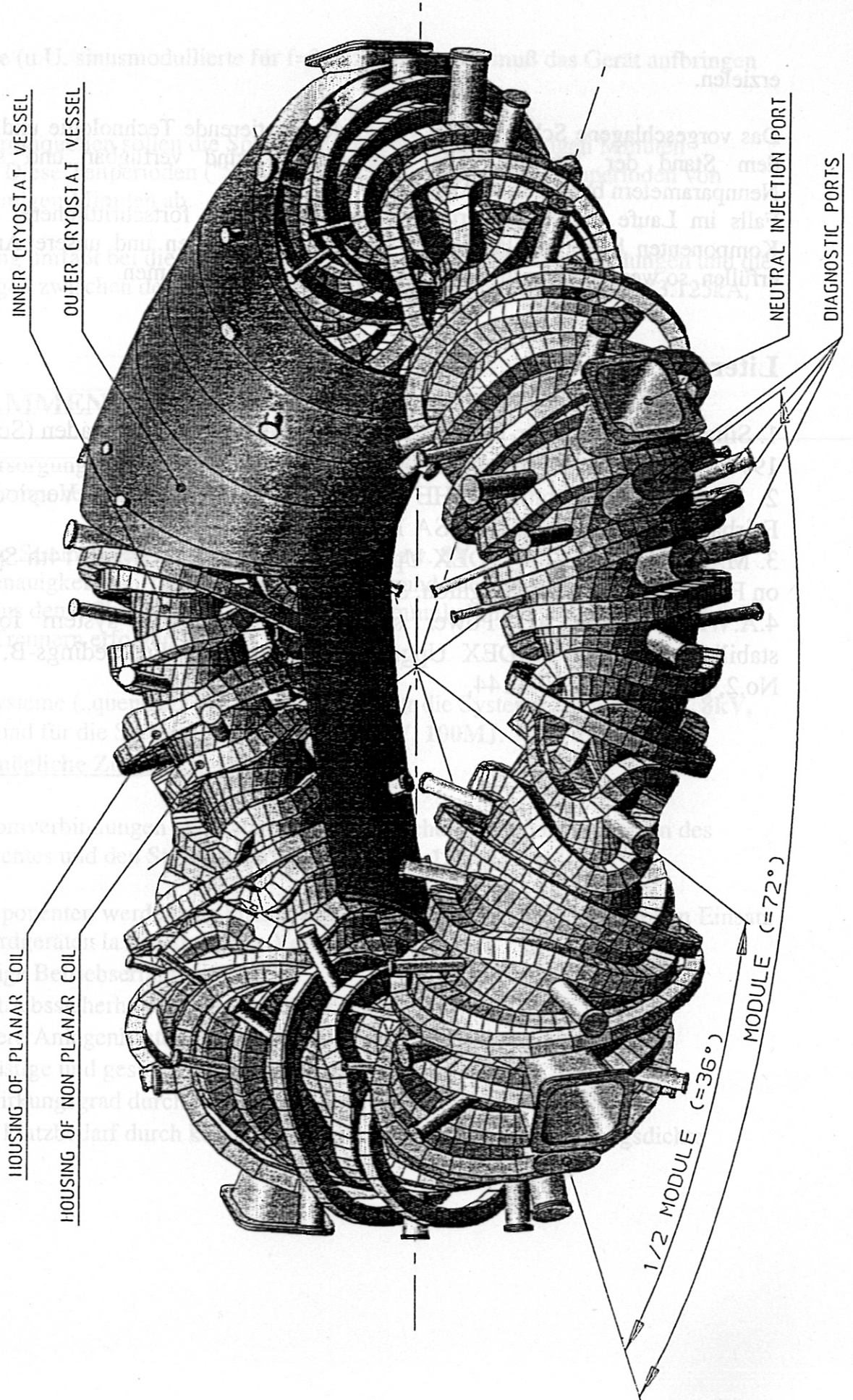
Das vorgeschlagene Schutzsystem verwendet existierende Technologie und entspricht dem Stand der Technik. Alle Komponenten sind verfügbar und sollen bei Nennparametern betrieben werden.

Falls im Laufe der Projektierungs- und Aufbauphase fortschrittlichere, modernere Komponenten bzw. Schaltelemente verfügbar sein sollten und unsere Anforderung erfüllen, so werden diese im Schutzsystem zum Einsatz kommen.

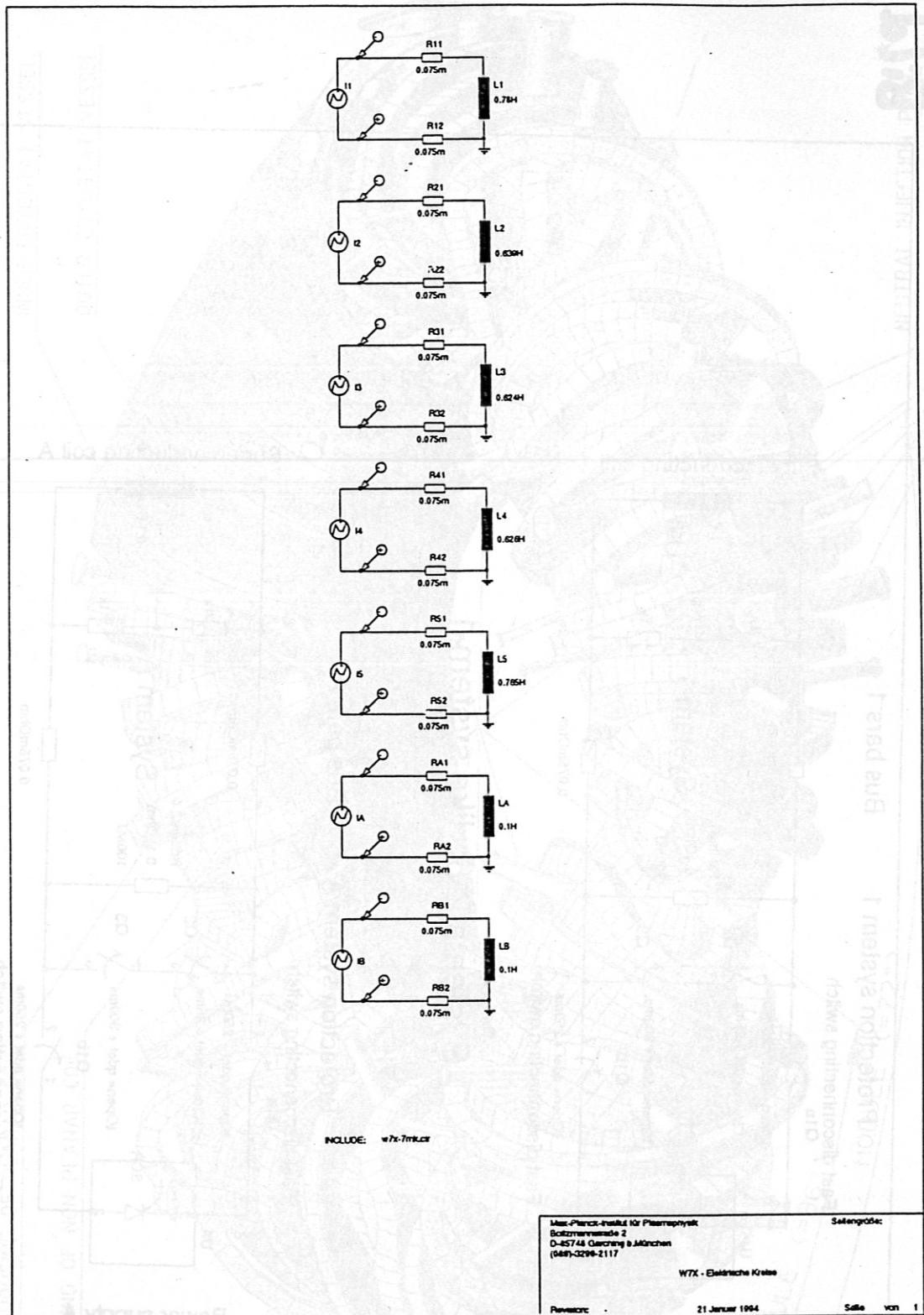
## Literatur

1. Silizium-Stromrichter-Handbuch. BBC Aktiengesellschaft, Baden (Schweiz) 1971.
2. Microsim Corporation: THE DESIGN CENTER, Pspice-Version 5.4, 20 Fairbanks Irvine, CA 92718 USA 1993.
3. M.Blaumoser et al., ASDEX Upgrade ohmic heating circuit, 14th Symposium on Fusion Technology, Avignon, September 1986.
4. A. Wiczorek et al., Power supply and protection system for plasma stabilisation in the ASDEX Upgrade tokamak, IEE Proceedings-B, Vol.139, No.2, March 1992, 131-144.

# Bild 1. Wendelstein 7-X Stellarator







**Bild 3.**



Date/Time run: 05/05/95 14:24:12

(A) Strom- und Spannungsverläufe an den Spulensystemen von WENDELSTEIN 7-X

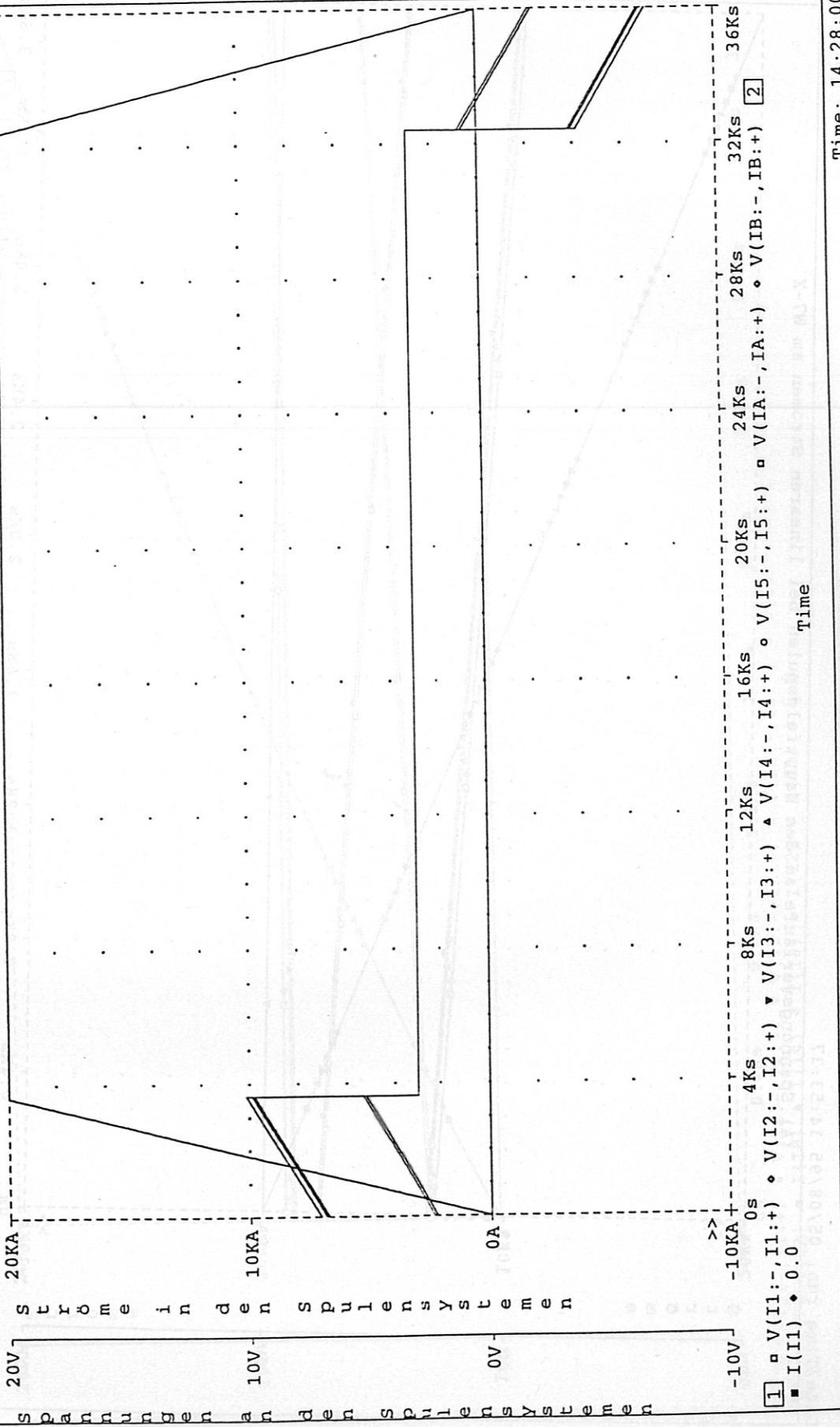


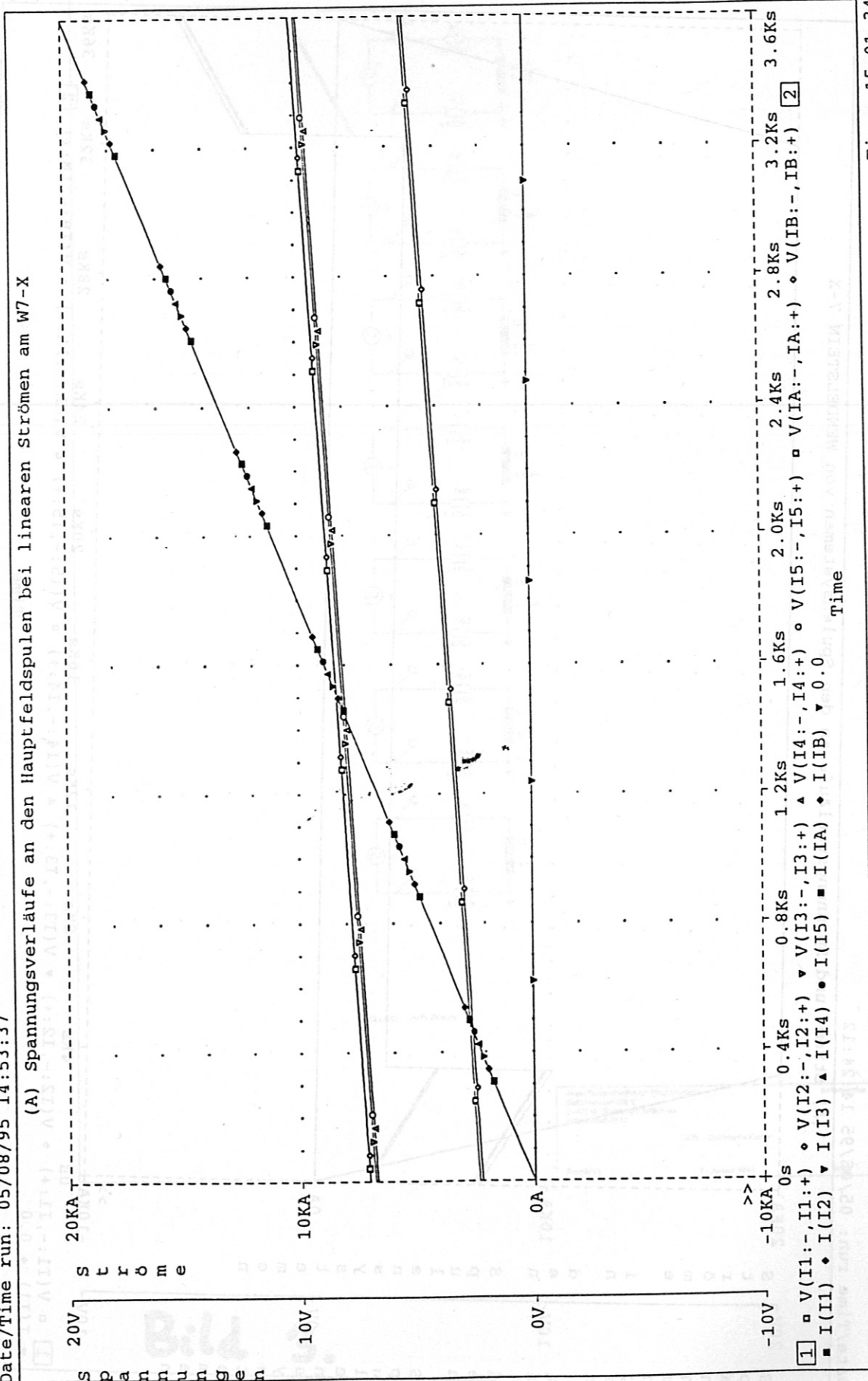
Bild 4.

Temperature: 27.0

\* C:\PSP54\w7x7spte.sch

Date/Time run: 05/08/95 14:53:37

(A) Spannungsverläufe an den Hauptfeldspulen bei linearen Strömen am W7-X



Date: May 08, 1995

Page 1

Time: 15:01:34

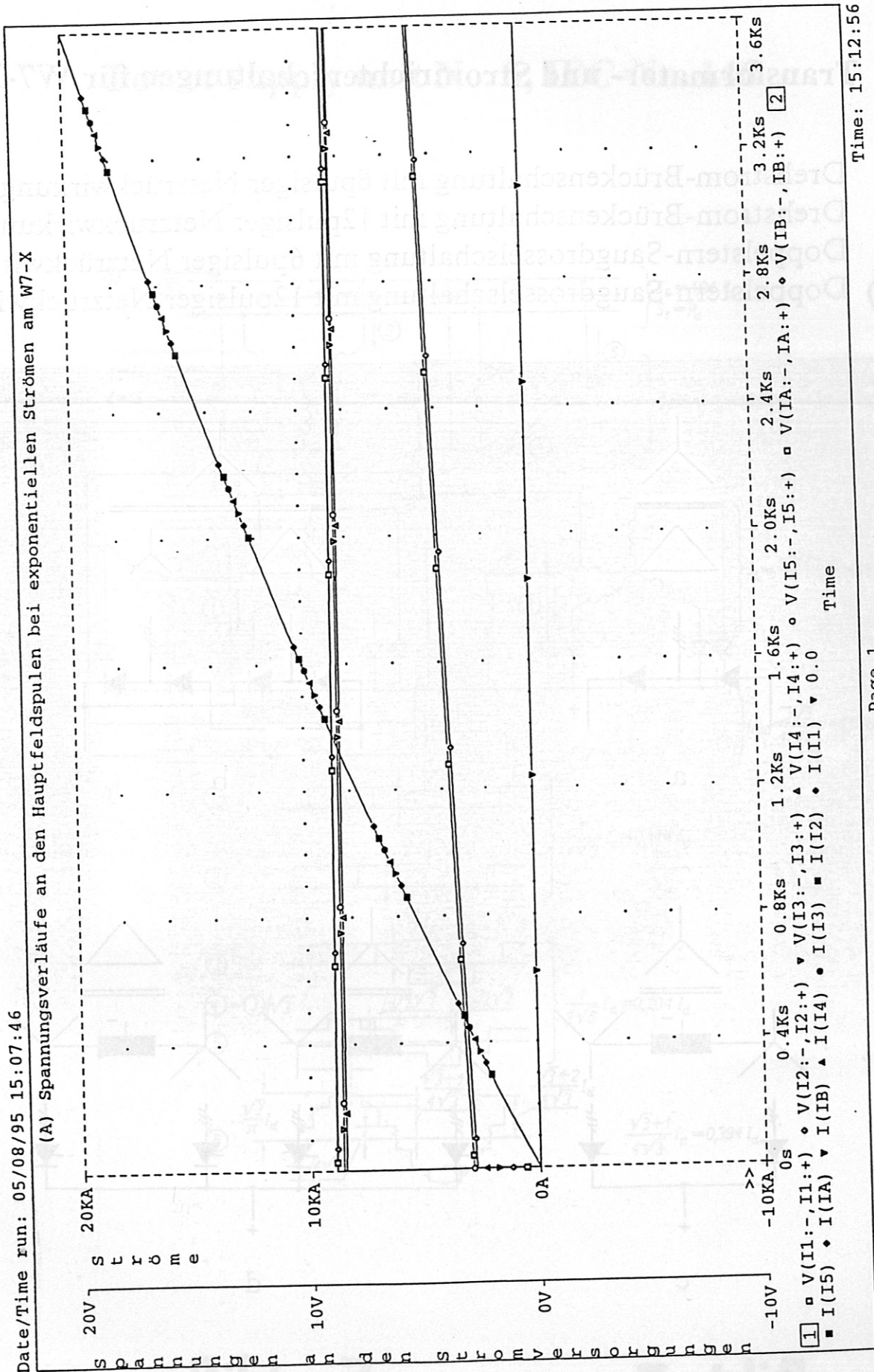
Bild 5

Temperature: 27.0

\* C:\PSP54\w7x7sexp.sch

Date/Time run: 05/08/95 15:07:46

(A) Spannungsverläufe an den Hauptfeldspulen bei exponentiellen Strömen am W7-X

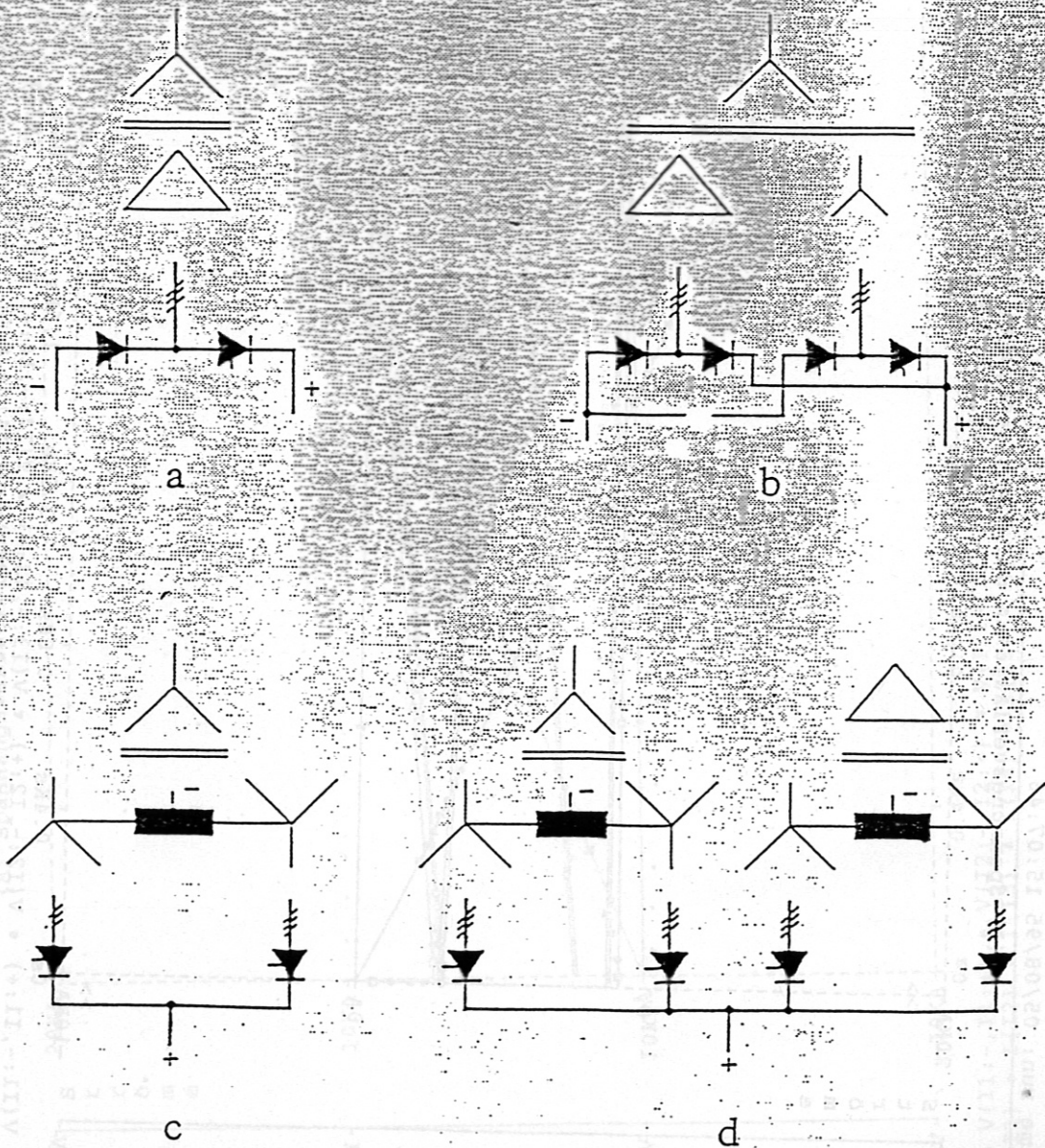


Time: 15:12:56

Bild. 6.

## Transformator- und Stromrichterschaltungen für W7-X

- a: Drehstrom-Brückenschaltung mit 6pulsiger Netzurückwirkung
- b: Drehstrom-Brückenschaltung mit 12pulsiger Netzurückwirkung
- c: Doppelstern-Saugdrosselschaltung mit 6pulsiger Netzurückwirkung
- d**: Doppelstern-Saugdrosselschaltung mit 12pulsiger Netzurückwirkung



**Bild 7.**

# Power supply unit No. 5, IEC-No. 146

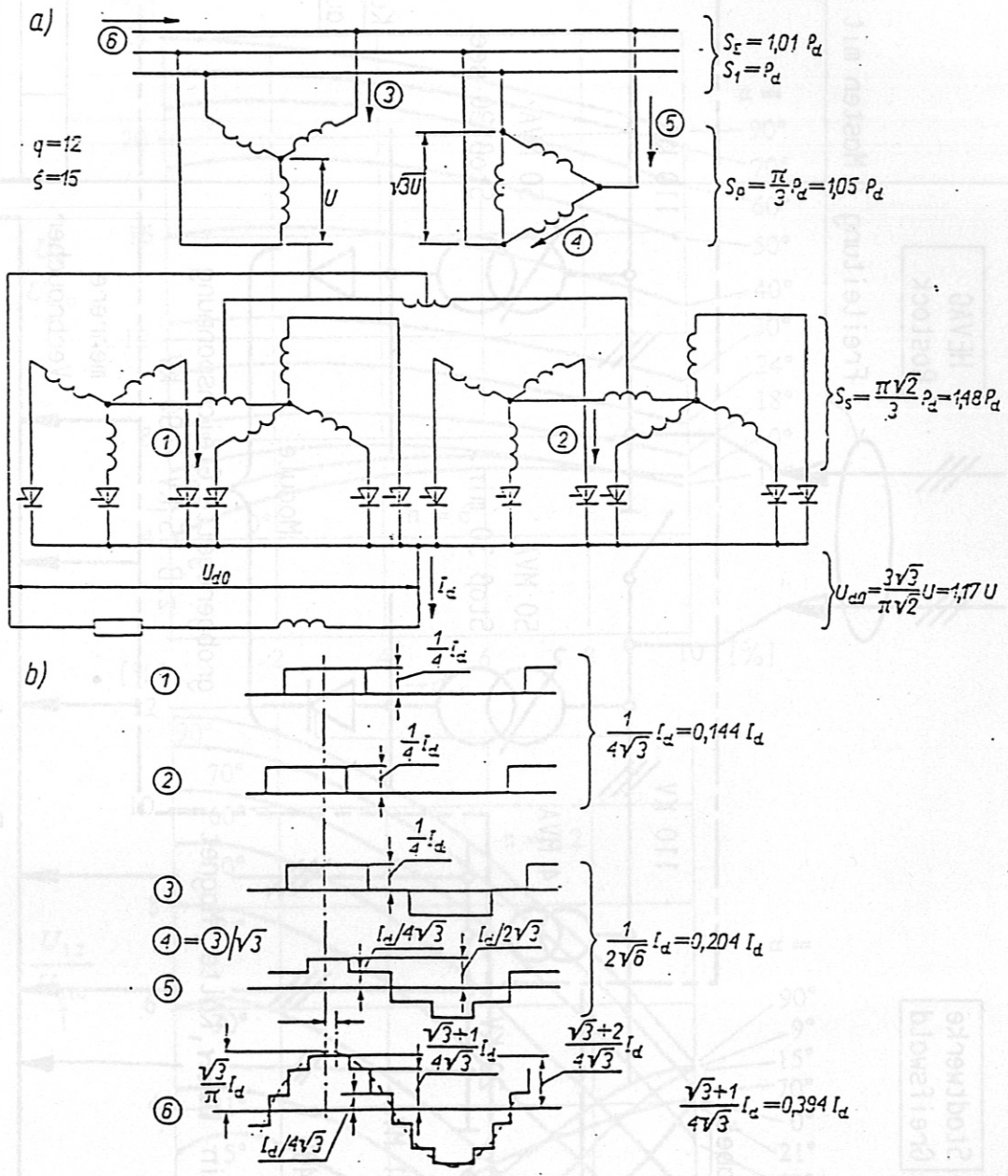
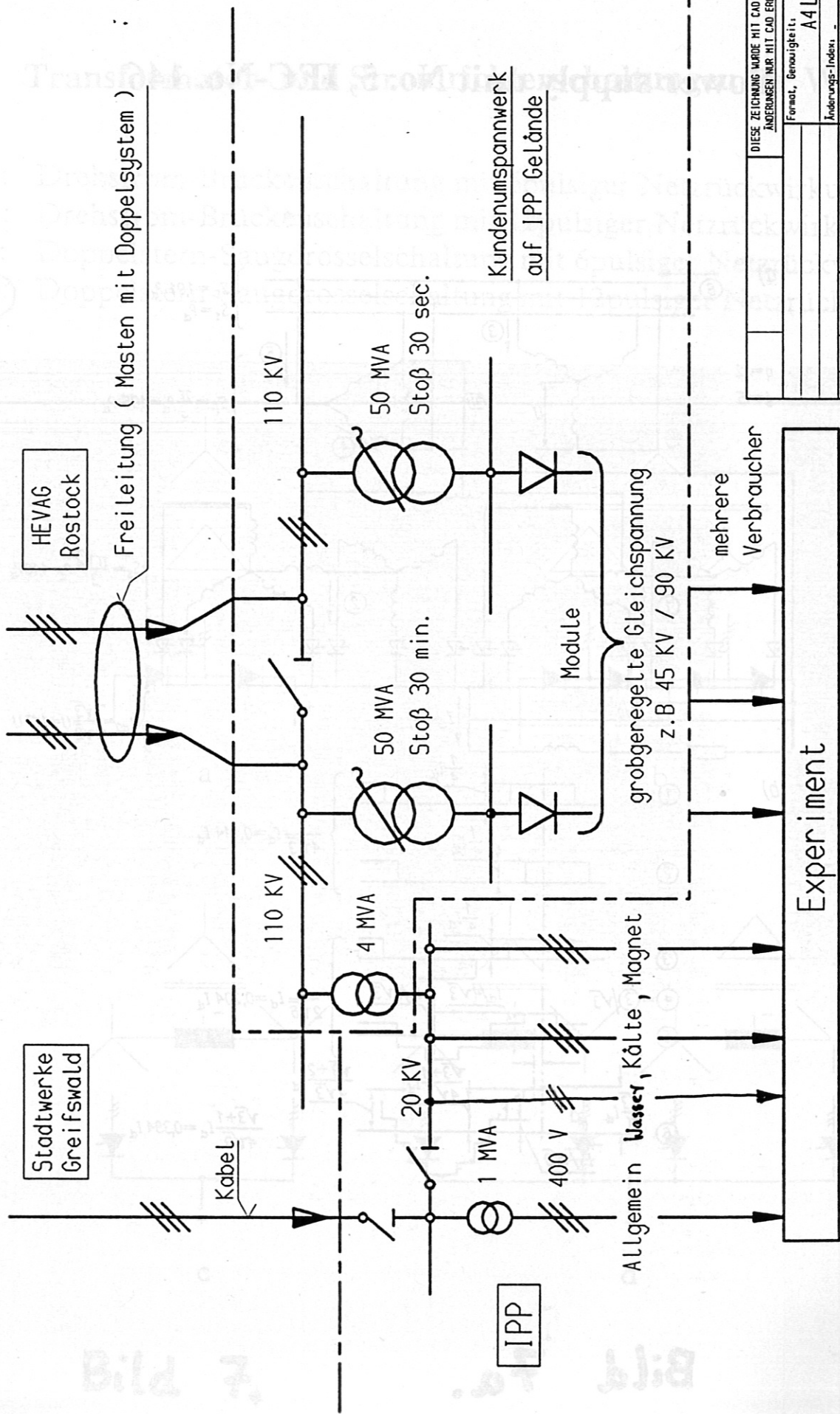


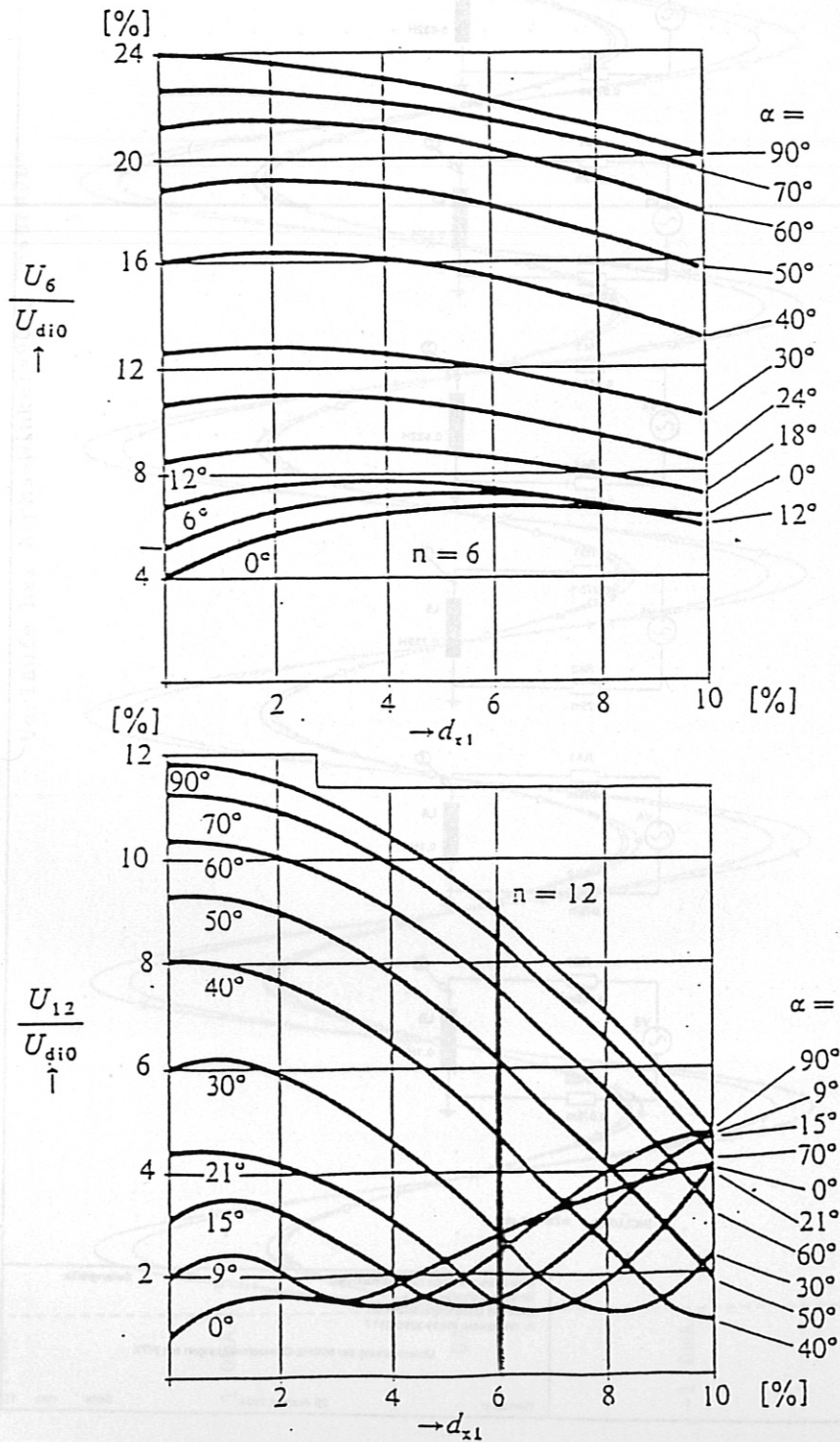
Bild 7a.



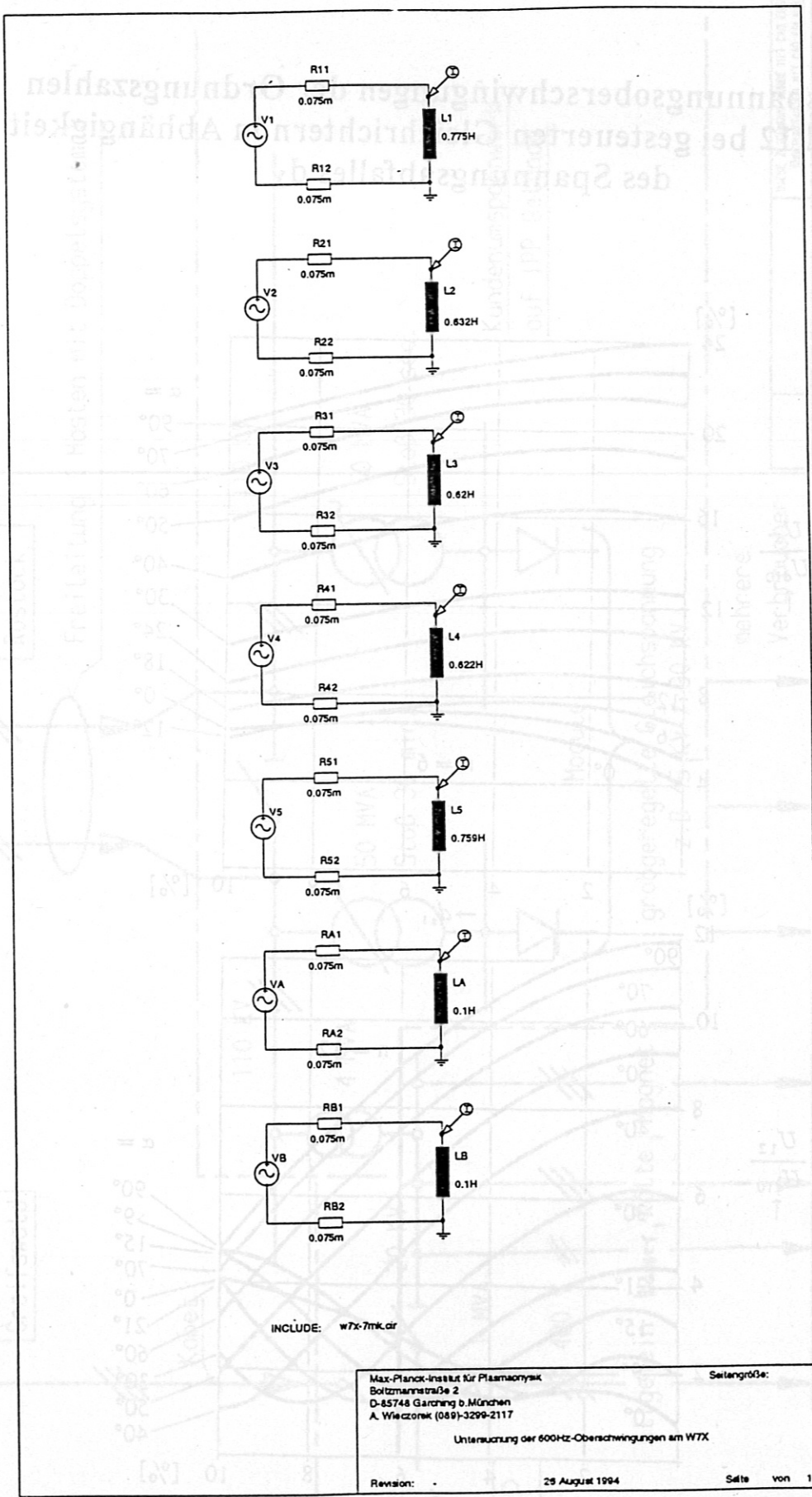
DIESE ZEICHNUNG WURDE MIT CAD ERSTELLT ÄNDERUNGEN NUR MIT CAD ERLAUBT		Blatt
Format, Genauigkeit:	A4 L	1
Änderungs-Index:		1 BL.
Projekt:	W7X	
Bearb.:	Tel.:	
Modstüb	Energieversorgung IPP-Greifswald	
Max-Planck-Institut für Plasmaphysik 8046 Garching bei München		
7x-0215-00008-s4		
Ersatz für:		
Ersetzt durch:		
Erstellt von:		

**Bild 8.** Energieversorgung IPP-Greifswald  
 Status: 5/94 nach Gespräch mit HEVAG

# Gleichspannungsüberschwingungen der Ordnungszahlen n=6 und 12 bei gesteuerten Gleichrichtern in Abhängigkeit des Spannungsabfalles $d_x$



**Bild 9.**



**Bild 10.**

Experiment  
 Energieversorgung IFF-Greifswald  
 Status: 5/94 noch Gespräch mit HEVAG  
 Max-Planck-Institut für Plasmaphysik  
 Boltzmannstraße 2  
 D-85748 Garching b. München  
 A. Wietczorek (089)-3299-2117  
 Seite 1 von 1  
 7x-0215-01008-64



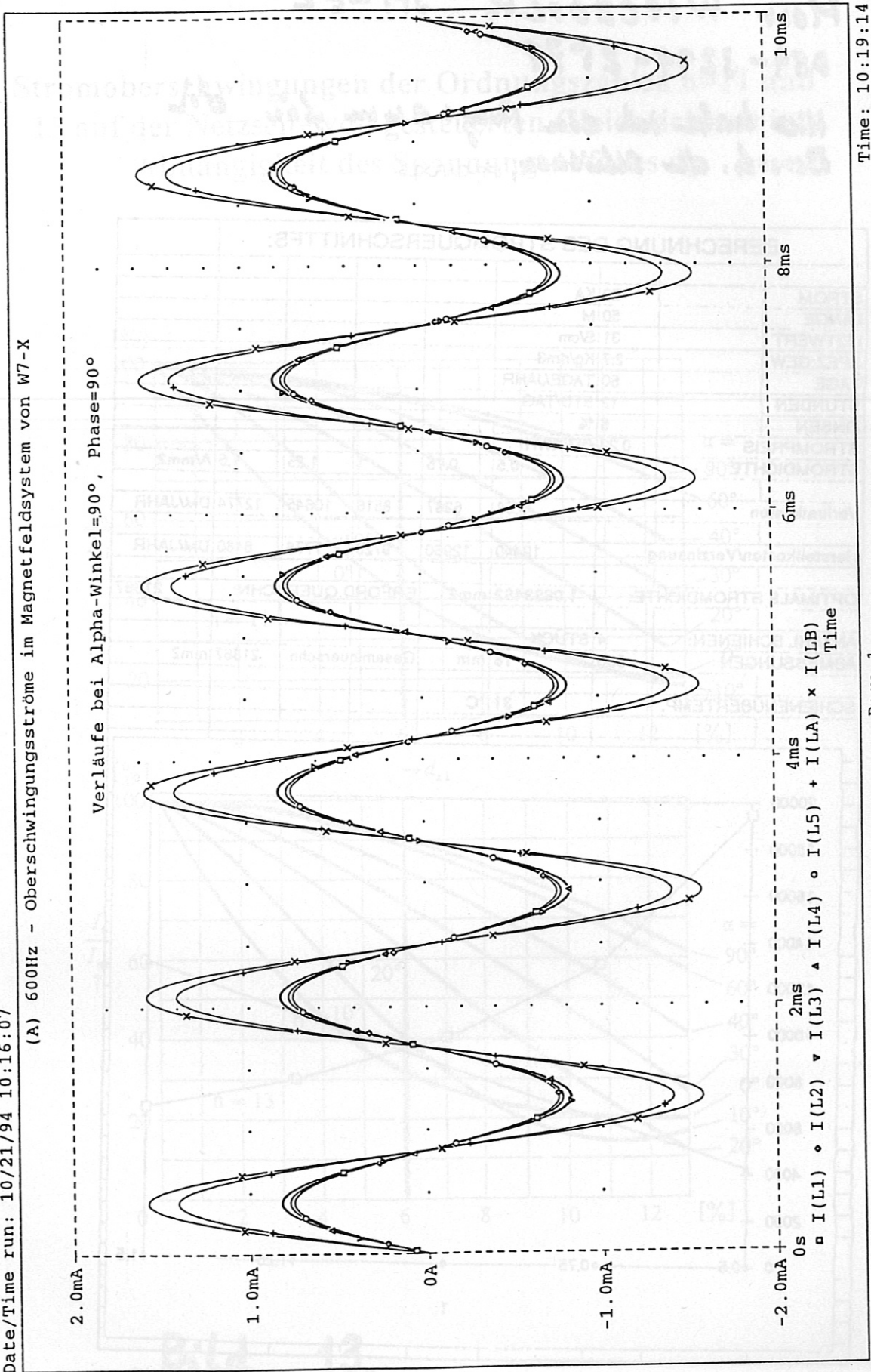
Temperature: 27.0

\* C:\PSP54\w7xoberw.sch

Date/Time run: 10/21/94 10:16:07

(A) 600Hz - Oberschwingungsströme im Magnetfeldsystem von W7-X

Verläufe bei Alpha-Winkel=90°, Phase=90°



Time: 10:19:14

Page 1

Date: October 21, 1994

**Bild 11.**

Herr Wiczorek JPP-E2  
089-3299-2579

Hier habe ich ein Programm für die  
Berechnung der Schienen, IPP-GARXLS

BERECHNUNG DES STROMQUERSCHNITTFS:							
STROM		201KA					
LÄNGE		501M					
LEITWERT		311S/cm					
SPEZ.GEW		2.71Kg/dm3					
TAGE		50 TAGE/JAHR					
STUNDEN		12 STD/TAG					
ZINSEN		6%					
STROMPREIS		0,22 DM/KWH					
STROMDICHTE			0,5	0,75	1	1,25	1,5 A/mm2
Verlusikosten			4258	6387	8516	10645	12774 DM/JAHR
Herstellkosten/Verzinsung			19440	12960	9720	7776	6480 DM/JAHR
OPTIMALE STROMDICHTE:		1,0683462 mm2	ERFORD. QUERSCHN:			21367	
ANZAHL SCHIENEN:		4 STÜCK					
ABMESSUNGEN		300	18 mm	Gesamtquerschn		21367 mm2	
SCHIENENÜBERTEMP.			31 °C				

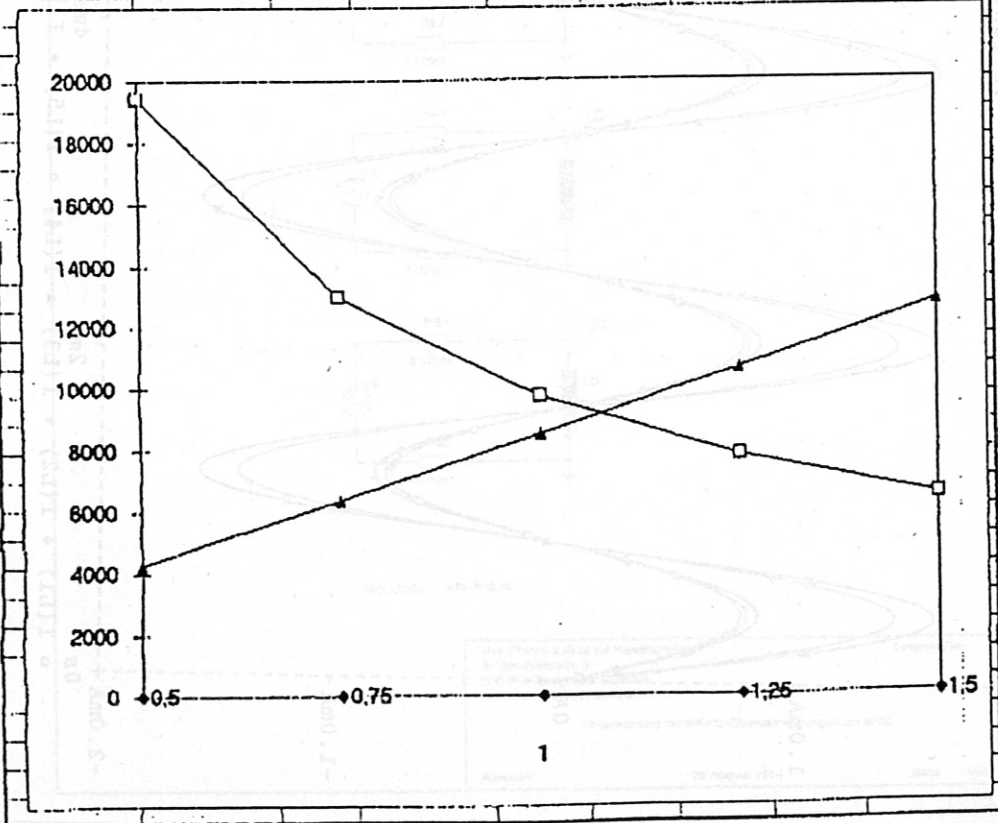


Bild 12.

mit fol. Glt. L. n. n.

Stromüberschwingungen der Ordnungszahlen  $n=11$  und  $13$  auf der Netzseite von gesteuerten Gleichrichtern in Abhängigkeit des Spannungsabfalles  $d_x$

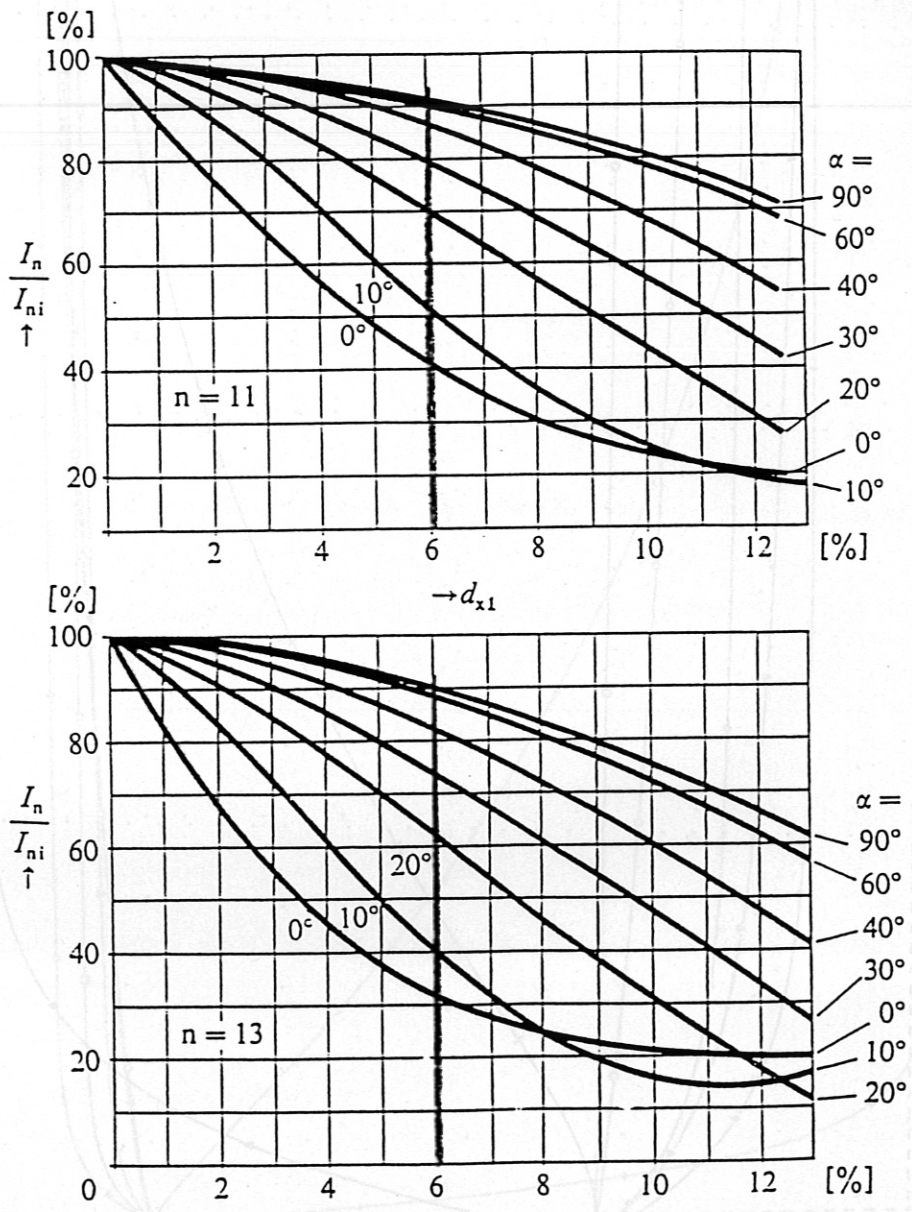


Bild 13.

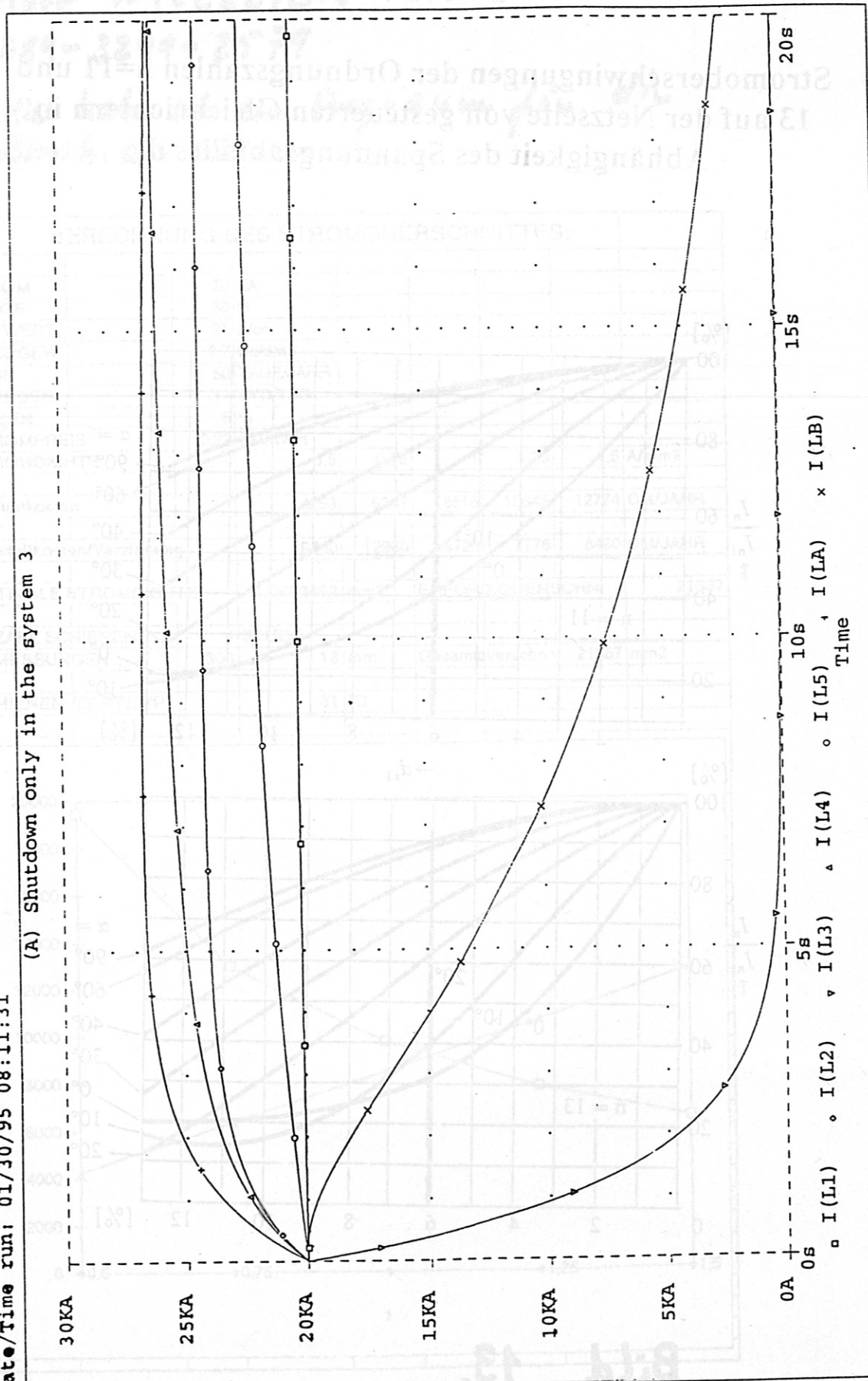
Bild 45.

Temperature: 27.0

\* C:\PSP54\w7xdelay.sch

Date/Time run: 01/30/95 08:11:31

(A) Shutdown only in the system 3



Time: 08:15:59

Page 1

Date: January 30, 1995

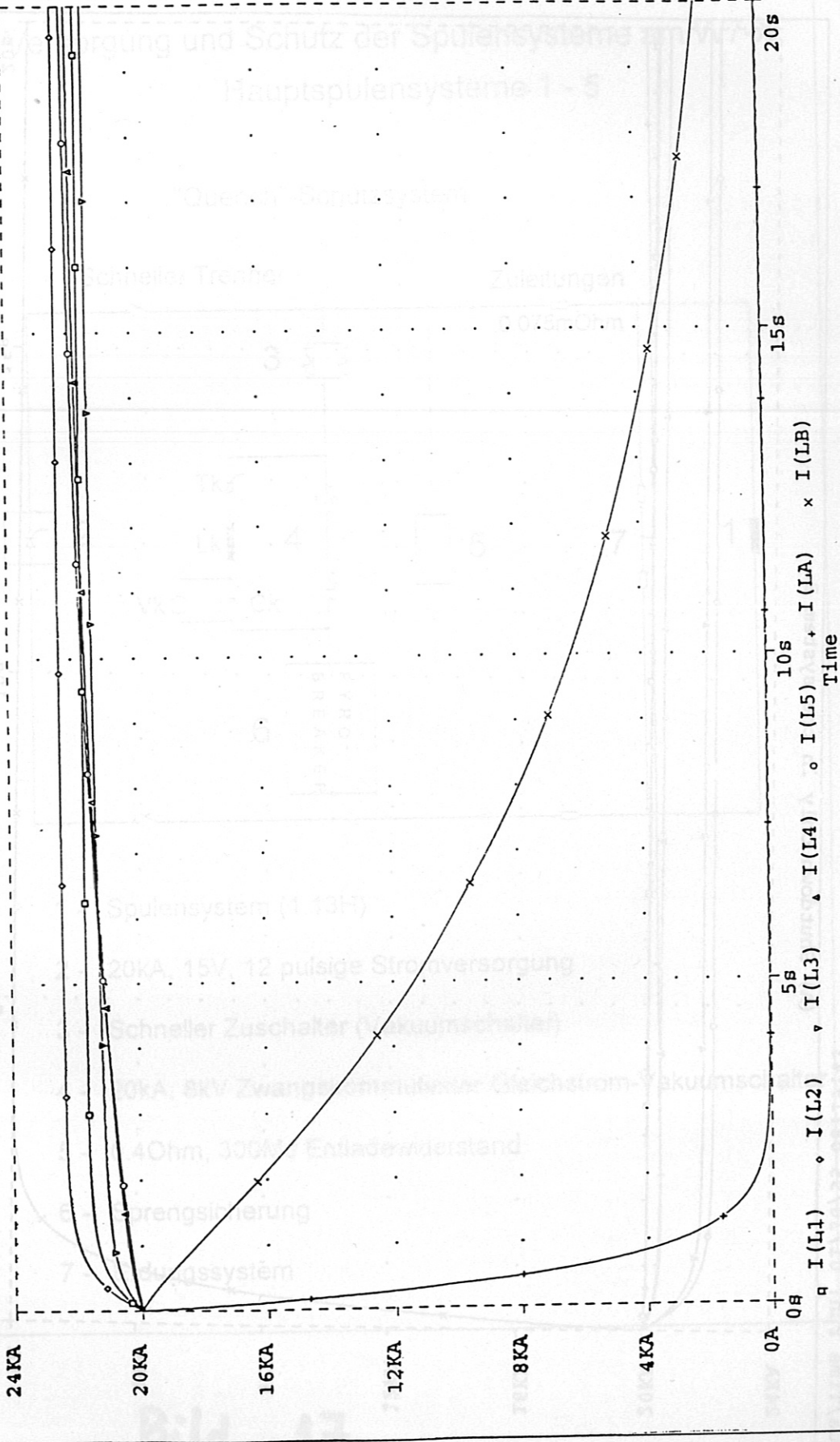
**B:14 46**

Temperature: 27.0

\* C:\PSP54\w7xdelay.sch

Date/Time run: 01/30/95 08:25:13

(A) Shutdown only in the system A



Time: 08:28:04

Page 1

Date: January 30, 1995

**Bild 15.**

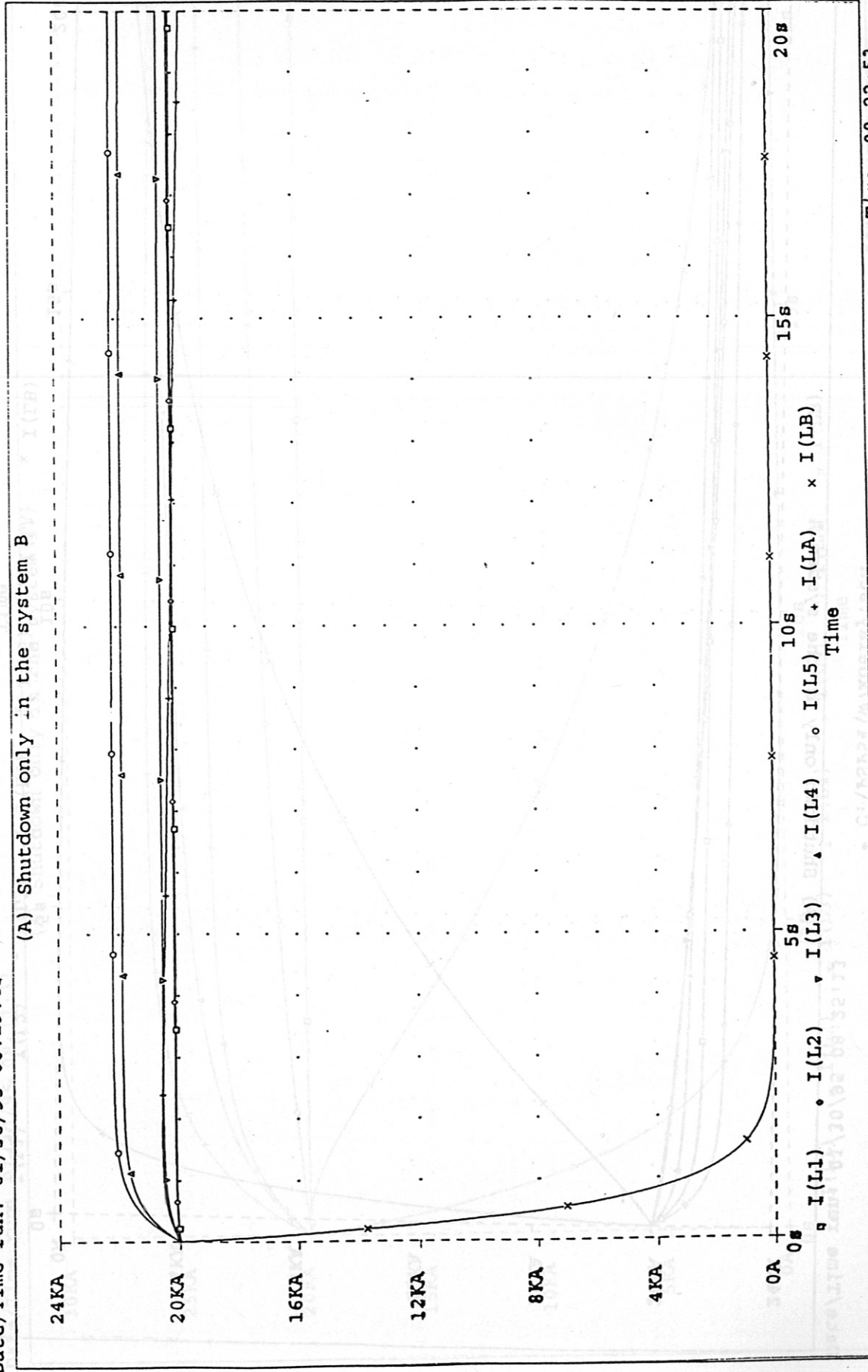
B:19 12

Temperature: 27.0

\* C:\PSP54\w7xdelay.sch

Date/Time run: 01/30/95 08:19:43

(A) Shutdown only in the system B



Time: 08:22:53

Page 1

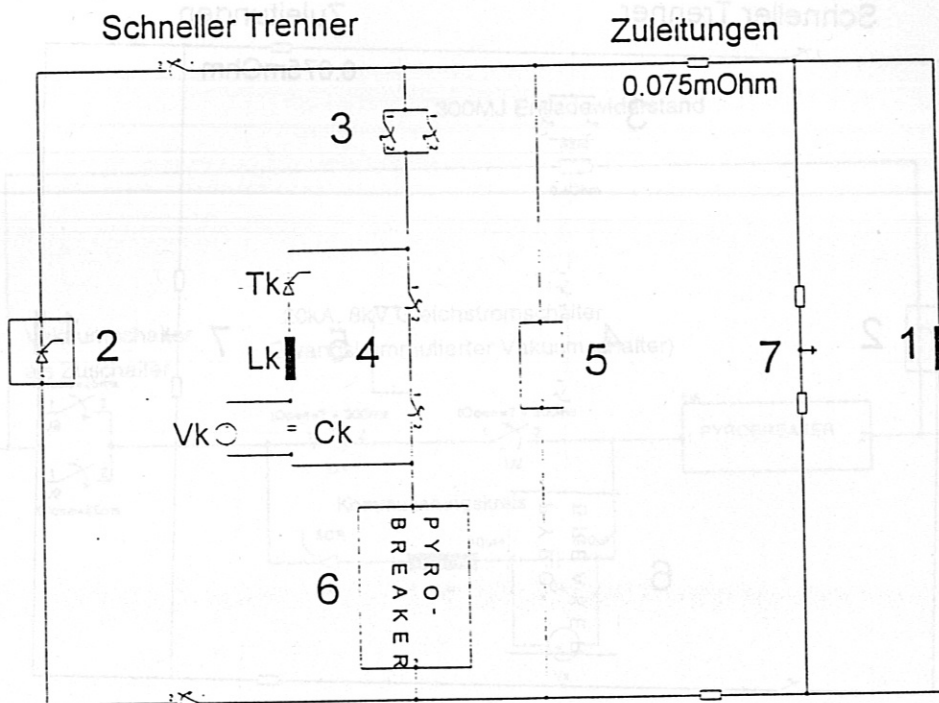
Date: January 30, 1995

Bild 46

# Versorgung und Schutz der Spulensysteme am W7-X

## Hauptspulensysteme 1 - 5

### "Quench"-Schutzsystem

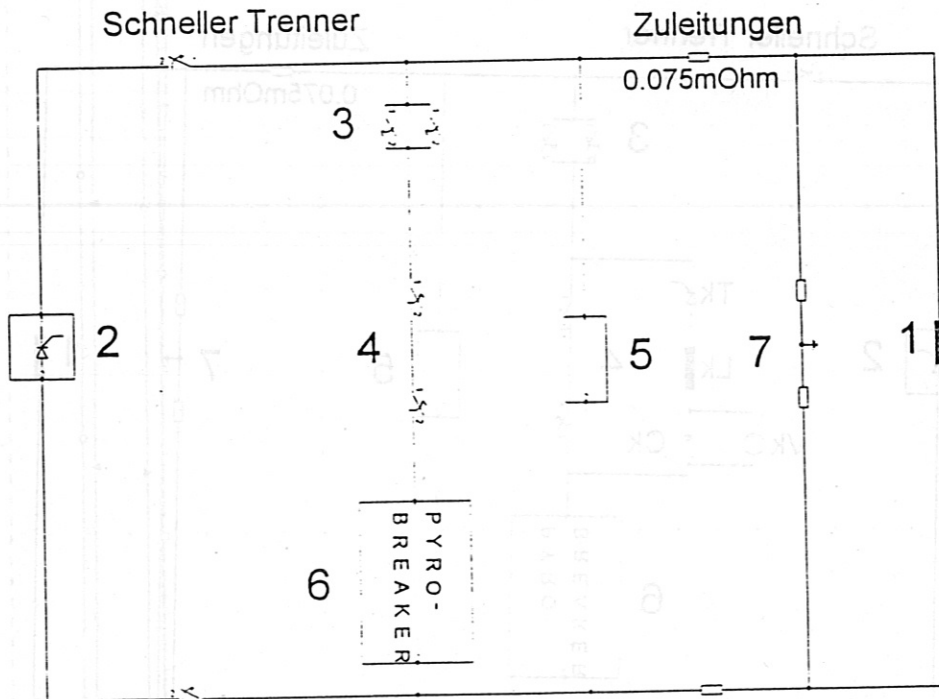


- 1 - Spulensystem (1.13H)
- 2 - 20kA, 15V, 12 pulsige Stromversorgung
- 3 - Schneller Zuschalter (Vakuumschalter)
- 4 - 20kA, 8kV Zwangskommutierter Gleichstrom-Vakuumschalter
- 5 - 0.4Ohm, 300MJ Entladewiderstand
- 6 - Sprengsicherung
- 7 - Erdungssystem

Bild 17.

# Versorgung und Schutz der Spulensysteme am W7-X Zusatzspulensysteme A - B

"Quench"-Schutzsystem

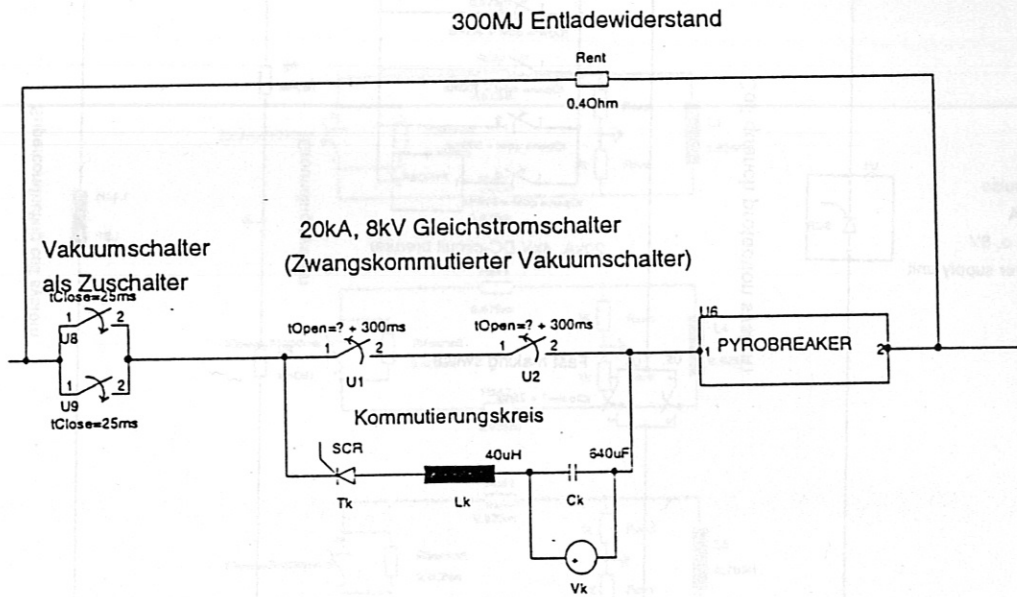


- 1 - Spulensystem (0.1H)
- 2 - 20kA, 10V, 12 pulsige Stromversorgung
- 3 - Schneller Zuschalter (Vakuumschalter)
- 4 - 20kA, 3kV Gleichstrom-Schnellschalter
- 5 - 0.15Ohm, 100MJ Entladewiderstand
- 6 - Sprengsicherung
- 7 - Erdungssystem

**Bild 18.**



# Das Quench-Schutzsystem für W7-X Gleichstromschalter und Entladewiderstand



Max-Planck-Institut für Plasma Physik (IPP)  
Boltzmannstraße 2  
D-85748 Garching b.München, BR Deutschland  
A. Wietzorek (089)32992117

Page Size:

Schutzsystem für die supraleitenden Spulen von W7-X

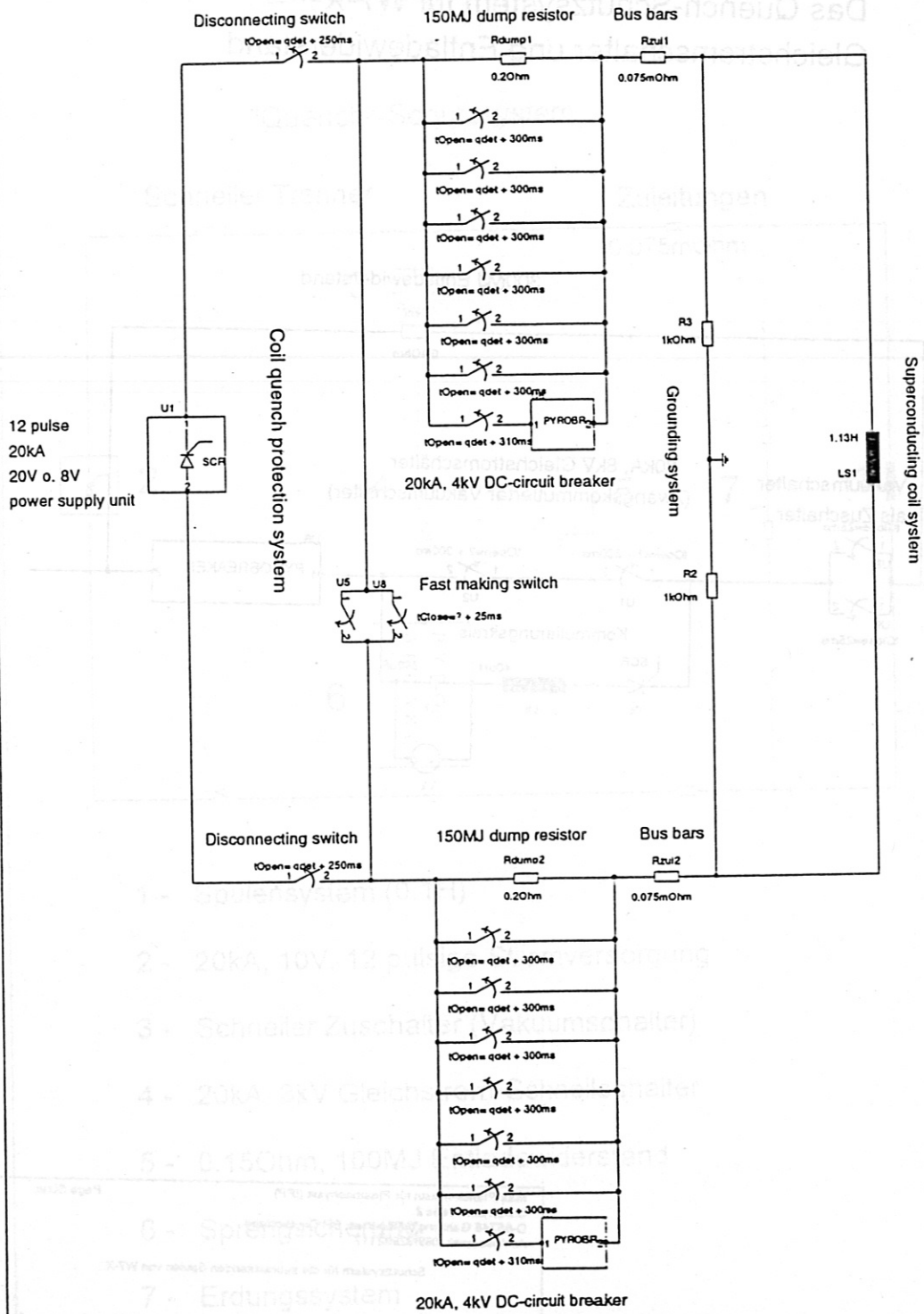
Revision: -

17 März 1994

Seite 1 von 1

**Bild 19.**

# Power supply and protection system for one coil-system of W7-X - Stellarator



Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP)  
Boltzmannstraße 2  
D-85748 Garching b. München  
A.Wieczorek (589)32992117

Seitengröße

Ein Spulensystem von W 7-X mit Schutz

10 April 1994 Seite 1 von 1

Bild 20.

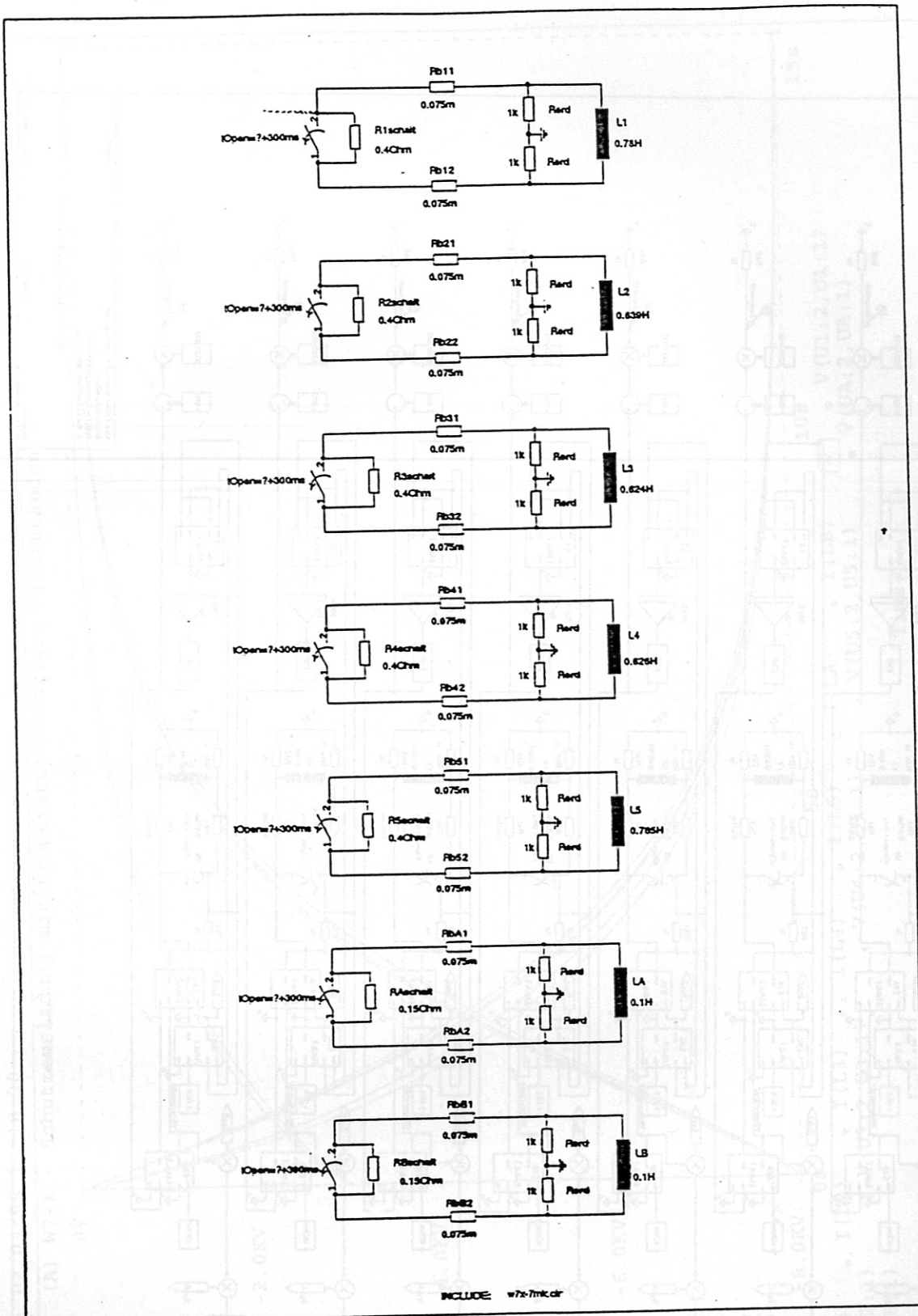
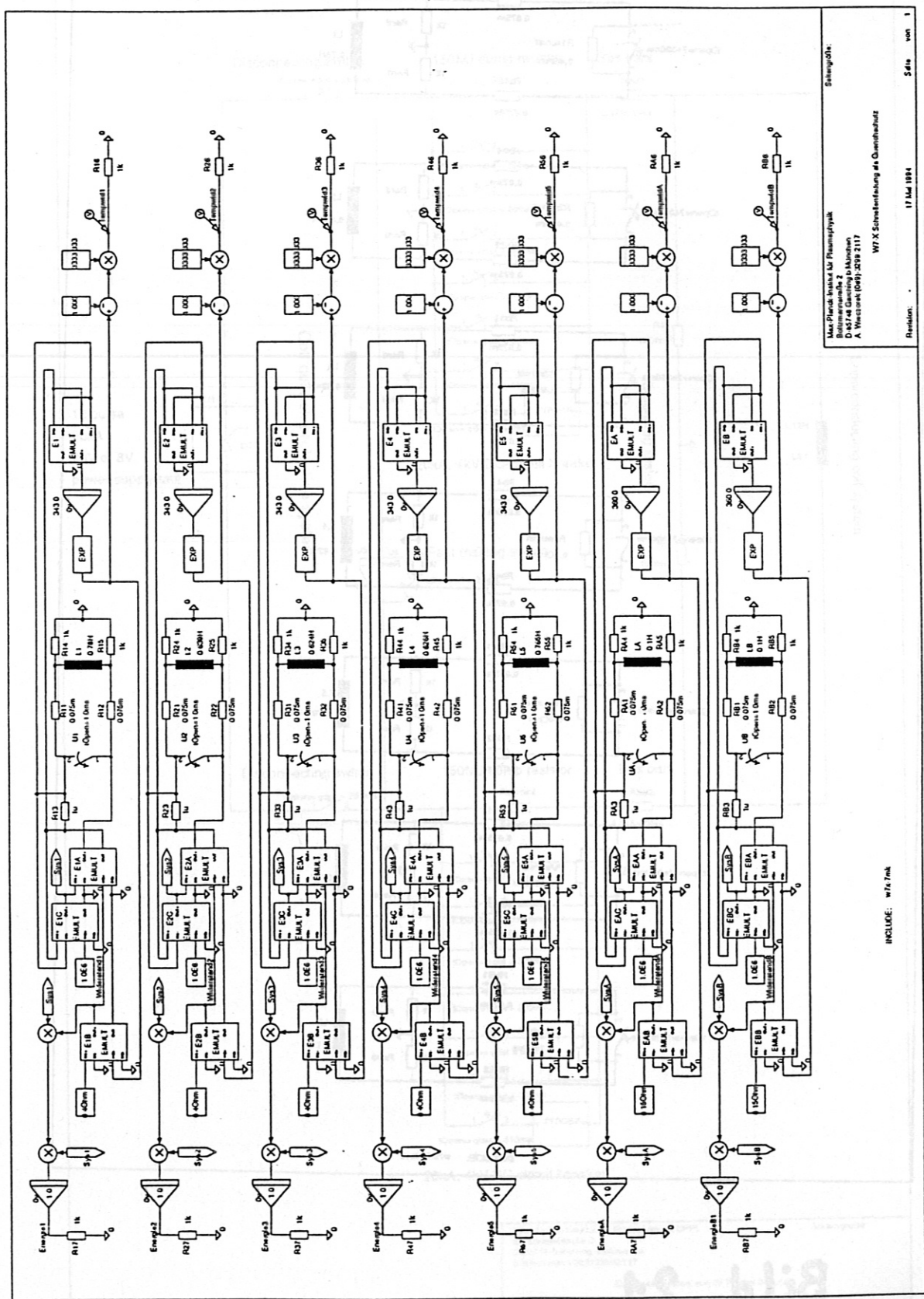


Bild 21,



Max-Planck-Institut für Plasmaphysik  
 D-85748 Garching bei München  
 A. Wuestenroth (089) 2518 2117  
 W7-X Schweißleitung #4 Querschnitt  
 Revision: 17 Mai 1984 Seite von 1

INCLUDE: w7x7mk

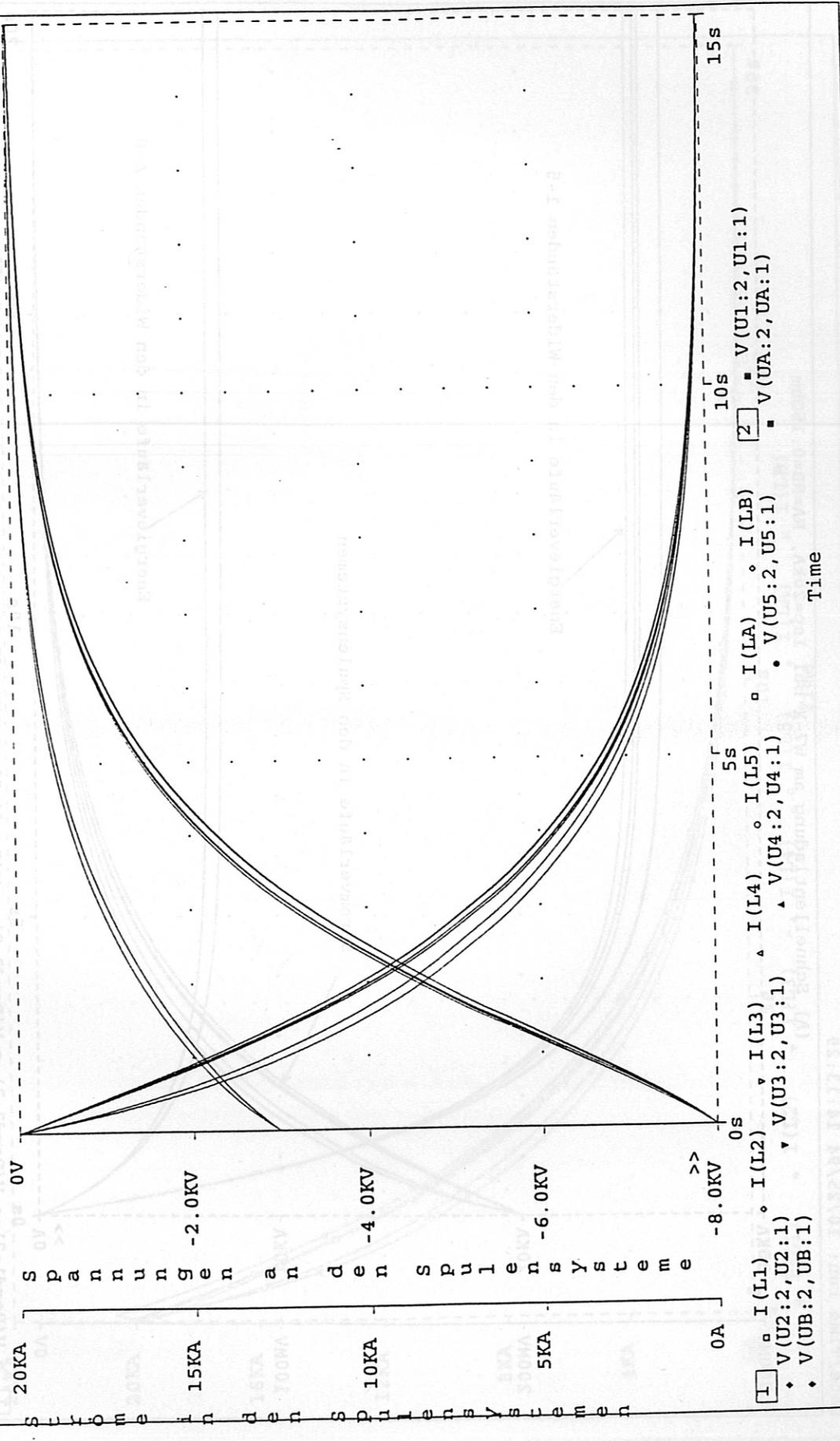
**Bild 22.**

Temperature: 27.0

\* C:\PSP54\w7xononli.sch

Date/Time run: 02/07/95 11:18:30

(A) W7-X - Schutzentladung mit temperaturabhängigen Widerständen



Time: 11:28:21

Page 1

Date: February 07, 1995

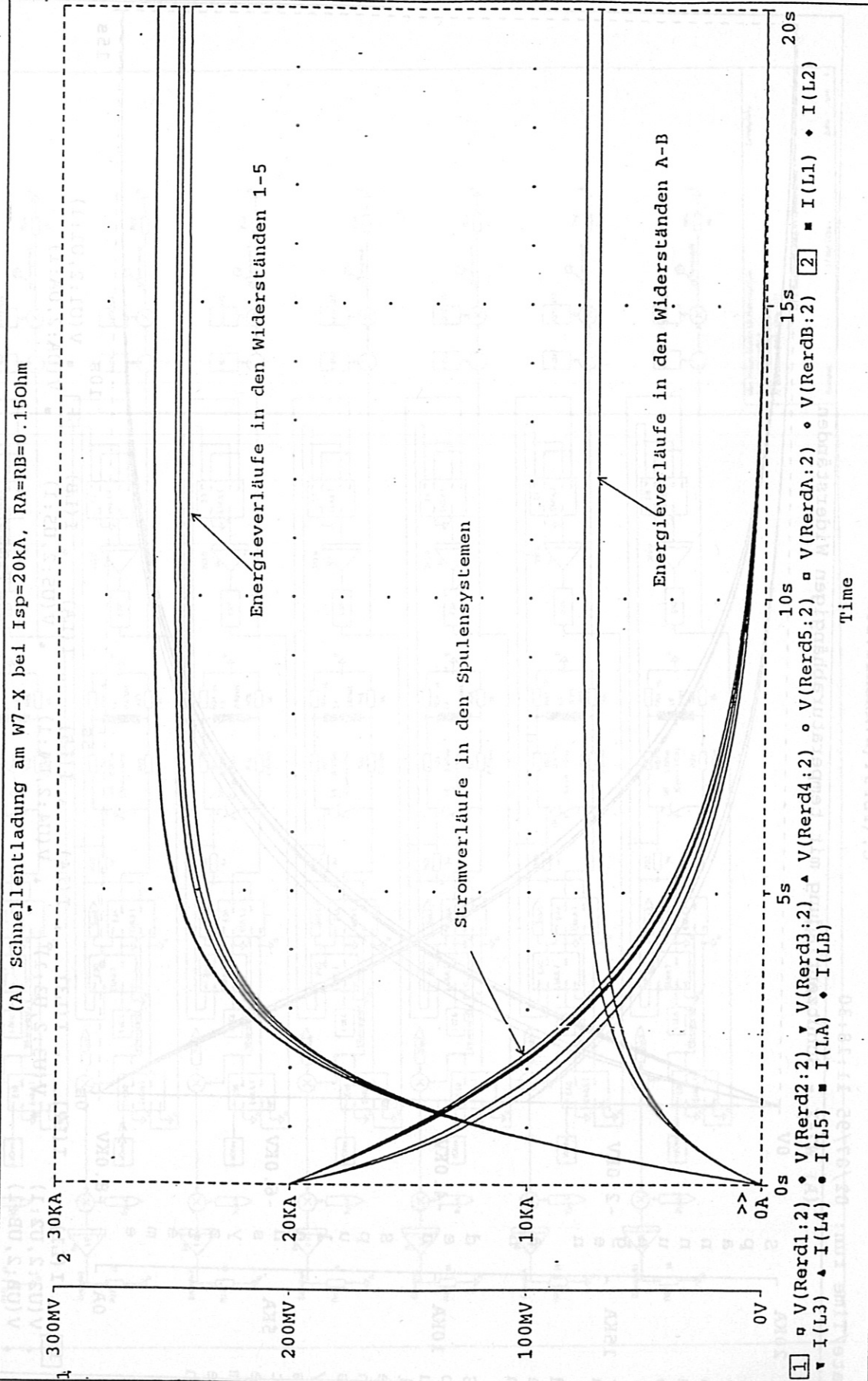
Bild 2.3.

Temperature: 27.0

\* C:\PSP54\w7xsch.sch

Date/Time run: 10/25/94 14:13:29

(A) Schnellentladung am W7-X bei  $I_{sp}=20kA$ ,  $R_A=R_B=0.150\Omega m$



Page 1

Date: October 25, 1994

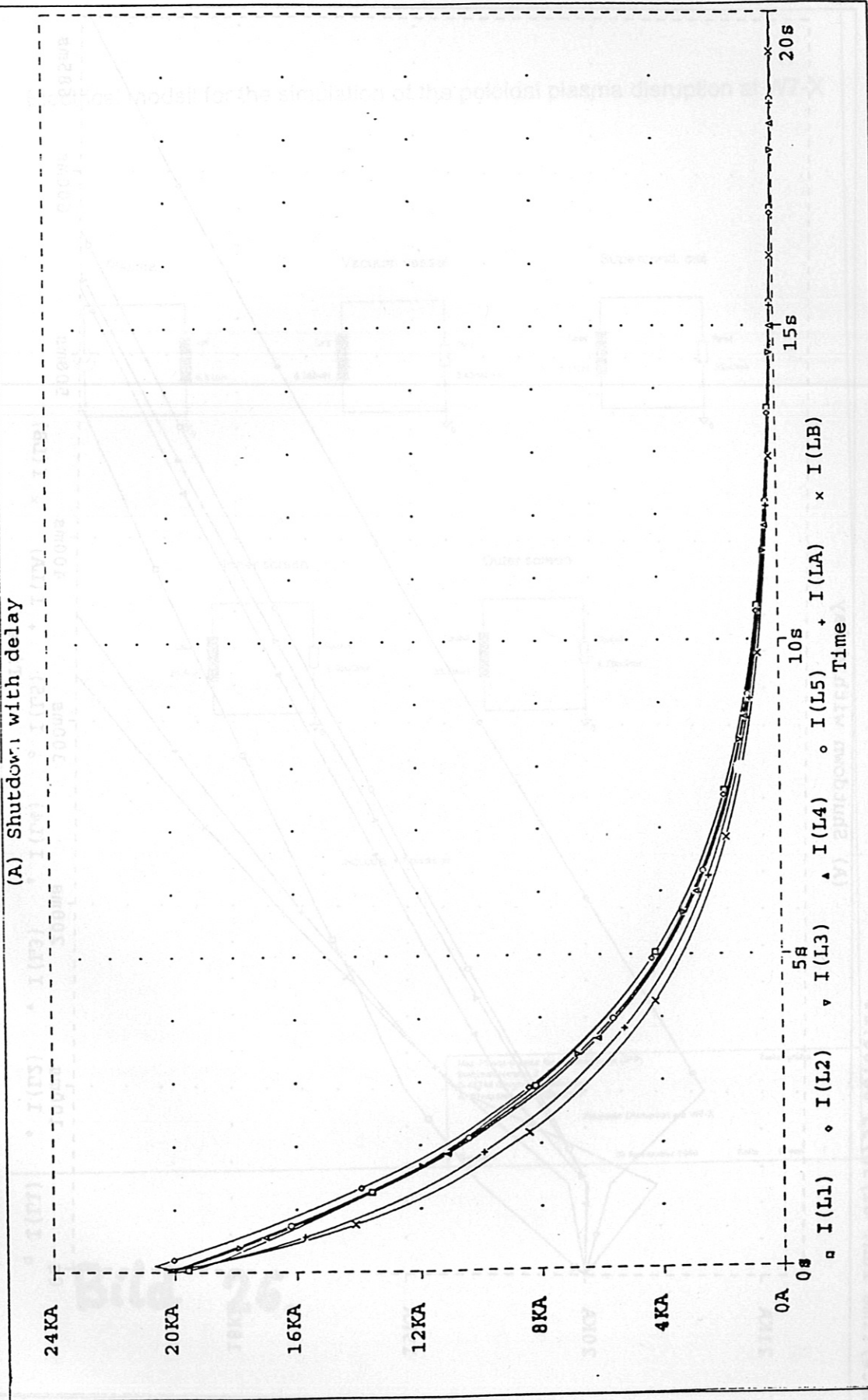
Time: 14:28:54

Bild 24

Temperature: 27.0

\* C:\PSP54\w7xdelay.sch

Date/Time run: 01/30/95 08:00:24



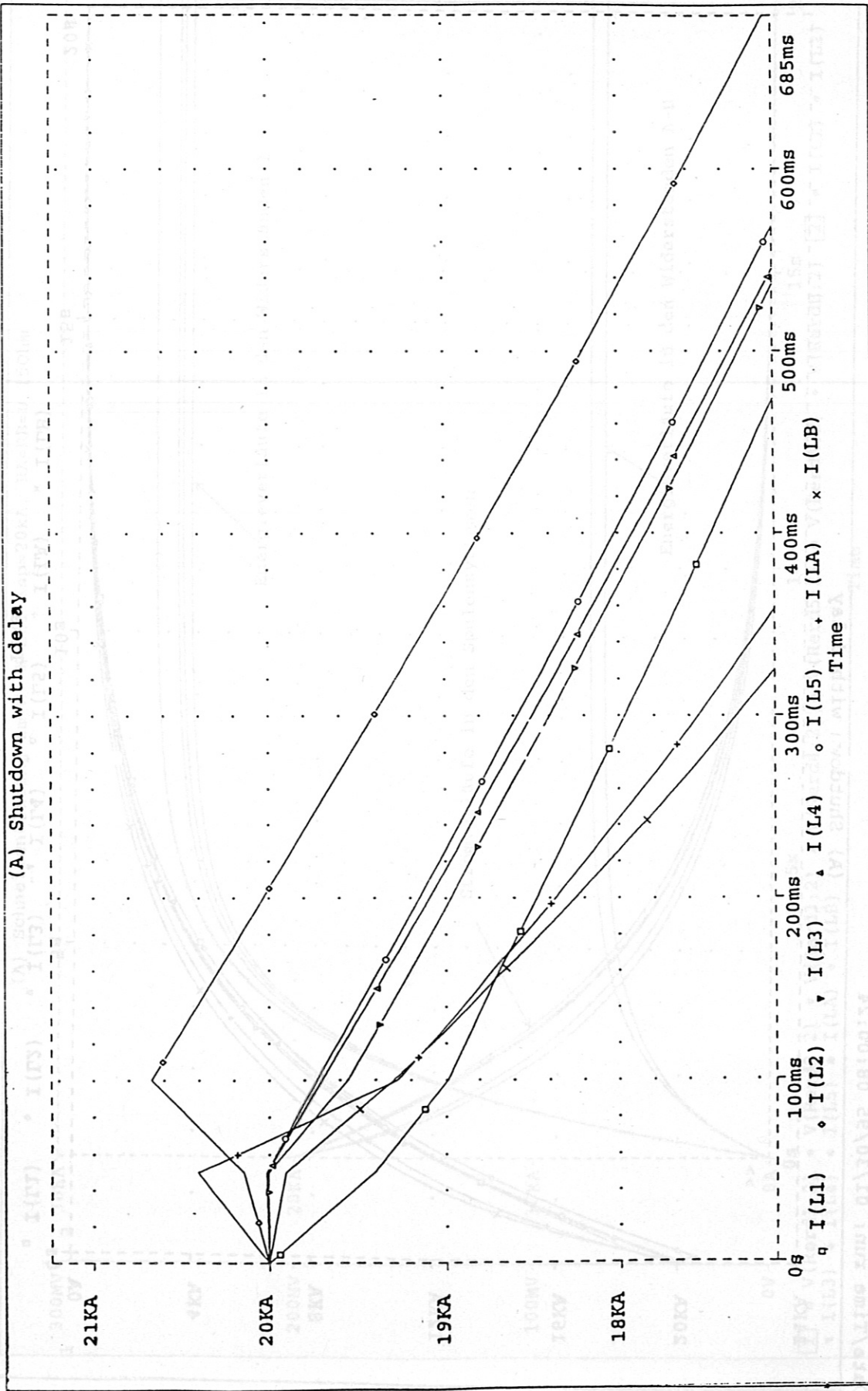
Time: 08:04:46

# Bild 25.

Temperature: 27.0

\* C:\PSP54\w.xdelay.sch

Date/Time run: 01/30/95 08:00:24



Time: 08:08:27

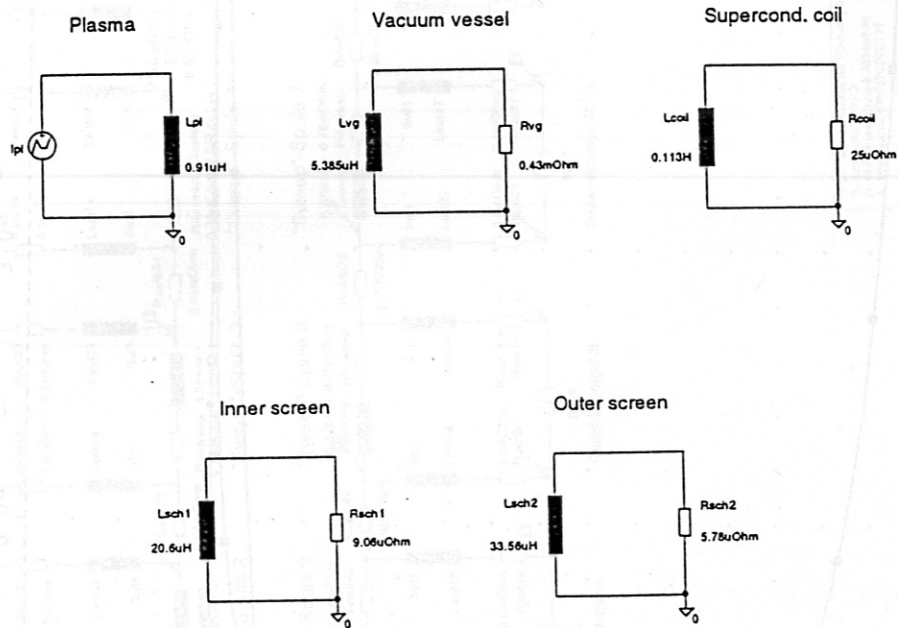
Page 1

Date: January 30, 1995

Bild 25 a.



# Electrical modell for the simulation of the poloidal plasma disruption at W7-X



INCLUDE: w7xplda.ar

Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP)  
 Boltzmannstraße 2  
 D-85748 Garching b. München  
 A. Wietzorek (089)32992117

Seitengröße:

Poloidale Disruption am W7-X

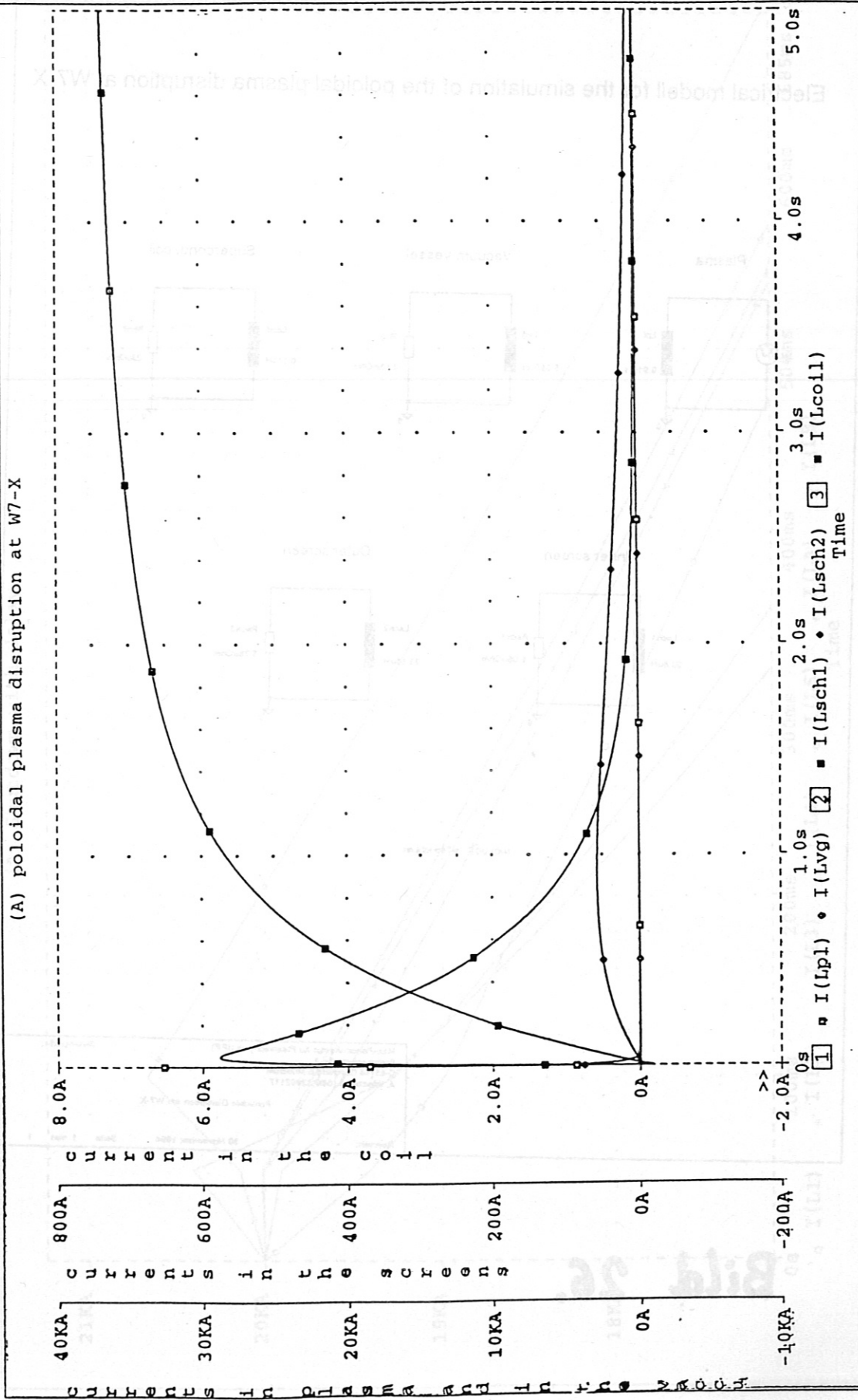
Revision: -      30 November 1994      Seite 1 von 1

**Bild 26.**

Temperature: 27.0

\* C:\PSP54\poldis.sch

Date/Time run: 12/05/94 14:47:06

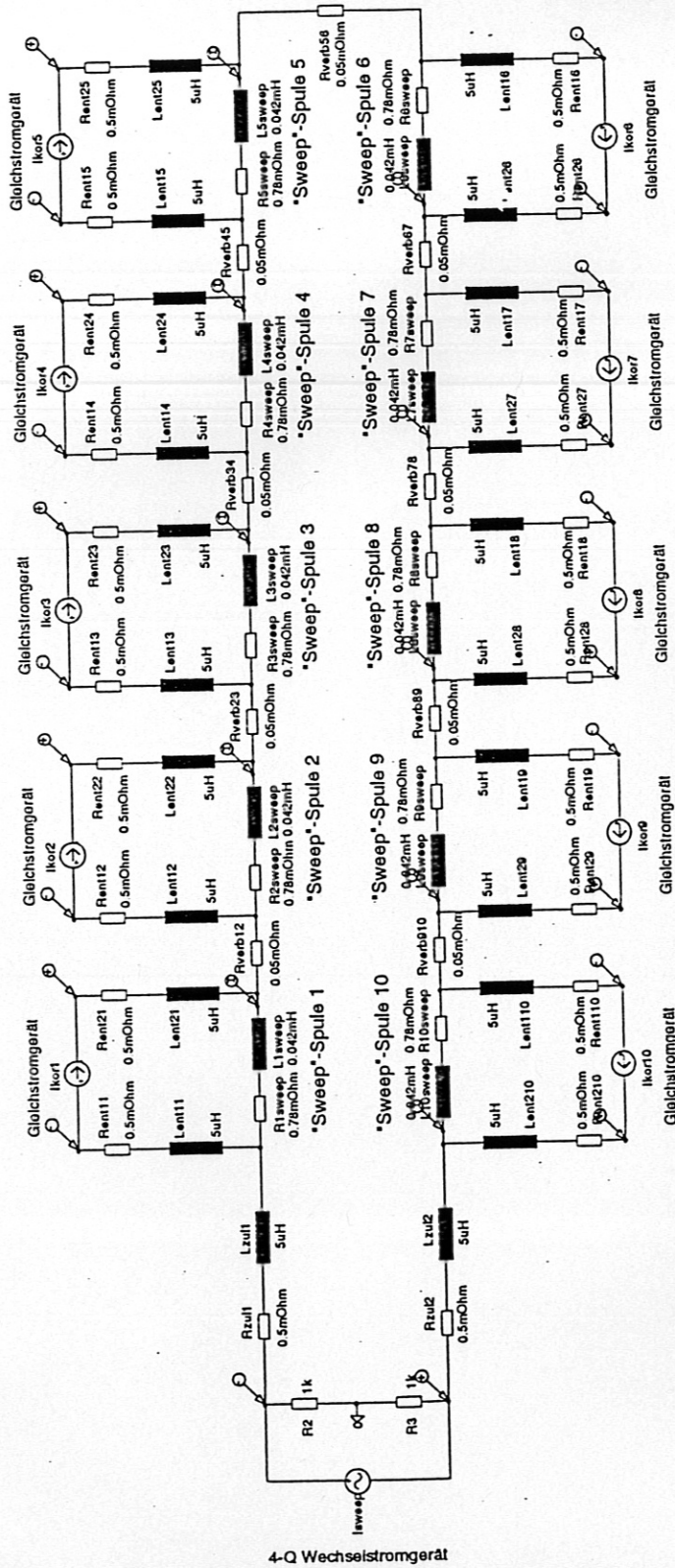


Page 1

Page 1

Date: December 05, 1994

Bild 27



Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP)  
 Boltzmannstraße 2  
 D-85748 Garching b. München  
 A. Wiczepek (089)3202117  
 Stromversorgung für die "Sweep"-Spulen  
 Revision: - 1 August 1994 Seite 1 von 1

Bild 28.