

Netzkupplungsumrichter Jübek

Teil 1: Starkstromtechnische Ausrüstung

Peter Gierth, Günter Hohmuth und Ulrich Putz, Berlin
Jian Xie, Frankfurt am Main

Teil 2: Regelung

Jörg Janning, Joachim Böcker, Kay Anbuhl und Marco Boni, Berlin

Dipl.-Ing. Peter Gierth (58), Studium an der Technischen Hochschule Ilmenau; Leiter der Transformatorberechnung in der AEG TRO Transformatoren und Schaltgeräte GmbH in D-12459 Berlin.

Dipl.-Ing. Günter Hohmuth (53), Studium an der Technischen Universität Berlin; Entwicklung Großstromrichter in der AEG Anlagen und Antriebssysteme GmbH in D-12277 Berlin.

Dr.-Ing. Ulrich Putz (59), Studium an der Technischen Universität Berlin; Leiter der Entwicklung Großstromrichter in der AEG Anlagen und Antriebssysteme GmbH in D-12277 Berlin.

Dr.-Ing. Jian Xie (33), Studium an der Technischen Hochschule Darmstadt; Projektingenieur Bahnstromversorgung in der AEG Bahnfahrwegsysteme GmbH in D-60326 Frankfurt am Main.

Dipl.-Ing. Jörg Janning (30), Studium an der Universität Dortmund; Wissenschaftlicher Mitarbeiter auf dem Gebiet der Regelung in der Antriebstechnik bei der Daimler Benz AG, Forschung und Technik in D-12277 Berlin.

Dr.-Ing. Joachim Böcker (38), Studium und Promotion an der Technischen Universität Berlin; Gruppenleiter auf dem Gebiet der Regelung in der Antriebstechnik bei der Daimler Benz AG, Forschung und Technik in D-12277 Berlin.

Dipl.-Ing. Kay Anbuhl (31), Studium an der Technischen Universität Braunschweig; Wissenschaftlicher Mitarbeiter auf dem Gebiet der Softwareentwicklung in der Antriebstechnik bei der Daimler-Benz AG, Forschung und Technik in D-12277 Berlin.

Ing. (grad.) Marco Boni (34), Studium an der Technischen Fachhochschule Berlin; Entwicklung von Großstromrichtern bei AEG Anlagen und Antriebssysteme GmbH in D-12277 Berlin.

Für die neu elektrifizierte Eisenbahnstrecke zwischen Neumünster und Flensburg wird zur Zeit in Jübek ein Umrichterwerk mit einem statischen, mit GTO-Thyristoren bestückten Umrichter errichtet. Der Umrichter formt die Spannung des 50-Hz-Drehstromnetzes in Einphasenwechselspannung der Bahnfre-

quenz $16\frac{2}{3}$ Hz um. Der Aufsatz beschreibt in Teil 1 die starkstromtechnische Ausrüstung der Umrichteranlage und in Teil 2 deren Regelung.

Grid coupling converter of Jübek Part 1: Power equipment Part 2: Control system

Neumünster – Flensburg railway line, which is just going to be electrified will be supplied by a static converter station at Jübek which is equipped with GTO thyristors, converting 50 Hz three-phase voltage to $16\frac{2}{3}$ Hz single-phase voltage of railway network. Power equipment will be described in the first part of this paper and control system in the second.

Convertisseur d'interconnexion de Jübek

1e partie: Equipement de puissance 2e partie: Régulation

Une sous-station équipée d'un convertisseur statique avec thyristors interruptibles est actuellement érigée à Jübek pour la ligne ferroviaire récemment électrifiée entre Neumünster et Flensburg. Ce convertisseur convertit la tension du réseau triphasé 50 Hz en tension alternative monophasée avec la fréquence ferroviaire $16\frac{2}{3}$ Hz. Cet article décrit l'équipement de puissance de l'installation de convertisseur en la partie et sa régulation en 2e partie.

DK 621.33(430.1-43.23):621.311.4
(430.1-43.23):621.314.2:621.382.233

Einführung

Die Eisenbahnstrecke zwischen Neumünster und Flensburg in Schleswig-Holstein wird zur Zeit elektrifiziert. Die elektrische Energie für diese Strecke wird aus dem 110-kV-Drehstromnetz der PreussenElektra bezogen. Zur Umformung auf die Oberleitungsspannung $16\frac{2}{3}$ Hz 15 kV wird in Jübek in der Nähe der Stadt Schleswig ein Umrichterwerk mit der Leistung 12 MW/15 MVA errichtet. Während früher für diesen Zweck rotierende Maschinenumformer verwendet wurden, werden in dem neuen Umrichterwerk statische Stromrichter eingesetzt. Stromrichter haben gegenüber Maschinenumformern den Vorteil geringeren Wartungsaufwandes und höherer Verfügbarkeit und erfordern geringere Investitionen für die Gebäude.

Teil 1: Starkstromtechnische Ausrüstung

1.1 Konzeption und Auslegung der Umrichteranlage

Es sind eine Reihe von Stromrichterschaltungen bekannt, mit denen elektrische Energie von einer Frequenz in eine andere umgerichtet werden kann. Für den hier vorliegenden Einsatzzweck ist jedoch ein Pulsstromrichter mit Gleichspannungszwischenkreis besonders geeignet. Ein solcher Umrichter entkoppelt das 50-Hz-Dreh-

stromnetz und das 16 2/3-Hz-Bahnnetz voneinander und erlaubt es, durch geeignete Pulsung die Frequenzen, die Spannungs- und Stromkurvenformen und die Leistungsfaktoren unabhängig voneinander einzustellen. Insbesondere kann der Umrichter so gesteuert werden, daß im Drehstromnetz sinusförmige, mit den Spannungen phasengleiche Ströme fließen. Das Drehstromnetz gibt also nur Wirkleistung ab oder nimmt bei Rückspeisung nur Wirkleistung auf. Der Übersichtsplan (Bild 1) zeigt die wesentlichen Komponenten einer derartigen Umrichteranlage [1]. Bei der in Netzkupplungsumrichtern geforderten Leistung setzt man vorteilhafterweise Pulsstromrichter in Dreipunktschaltung ein, wie in Bild 2 dargestellt, was die Konstruktion der Stromrichtertransformatoren vereinfacht.

Als Schaltelemente werden in modernen selbstgeführten Stromrichtern abschaltbare Thyristoren, sogenannte Gate-Turn-Off-Thyristoren (GTO-Thyristoren) verwendet. Um die am Markt verfügbaren Hochleistungs-GTO-Thyristoren strom- und spannungsmäßig gut auszunutzen, wurde als Zwischenkreisspannung ± 2300 V gewählt. Der Mittelpunkt der Zwischenkreisspannung ist geerdet.

Die Gesamtleistung der Umrichteranlage wird auf drei Vier-

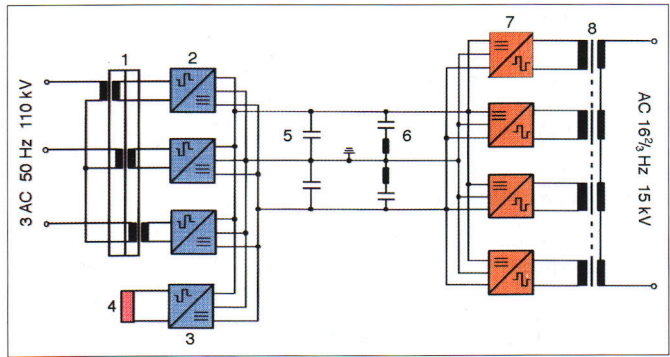


Bild 1: Prinzipschaltbild der Umrichteranlage Jübek.
 1 = Drehstromtransformator
 2 = Vierquadrantensteller 50 Hz
 3 = Widerstandsstromrichter
 4 = Bremswiderstand
 5 = Zwischenkreiskondensator
 6 = 33 1/3-Hz-Filter
 7 = Vierquadrantensteller 16 2/3 Hz
 8 = 16 2/3-Hz-Transformator

Bild 2: Hauptkomponenten einer Pulsstromrichterphase.
 1 = GTO-Thyristoren
 2 = Rücklaufdioden
 3 = Koppeldioden
 4 = Schutzdrossel
 5 = GTO-Thyristoransteuerung
 6 = Sicherungen
 7 = Kurzschließthyristoren
 8 = Netzgerät zur Speisung der GTO-Thyristor-Ansteuerungen
 LWL = Lichtwellenleiter
 M = Mittelpunktsanschluß
 AK = Wechselspannungsanschluß

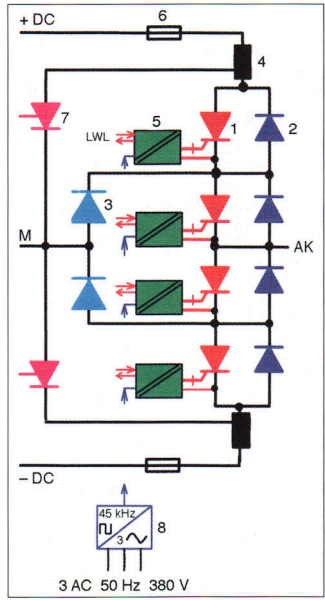


Tabelle 1: Hauptdaten der Umrichteranlage.
 Speisung: Energieübertragung vom Drehstromnetz in das Bahnnetz
 Rückspeisung: Energieabgabe bremsender Triebfahrzeuge über den Umrichter an das Drehstromnetz

	Drehstromnetz	Zwischenkreis	Bahnnetz
Nennspannung	kV	110	15
Toleranzband Speisung	kV	98 bis 120	14 bis 17,25
Toleranzband Rückspeisung	kV	98 bis 120	14 bis 18,5
Scheinleistung	MVA	12	15
Leistung Speisung	MW	12	12
Leistung Rückspeisung	MW	8	8
Leistungsfaktor		nahe 1,00	beliebig
Frequenz	Hz	50 ± 0,25	16,15 bis 17,0
Spannung	V		± 2300
mittlere Schaltfrequenz der Thyristoren	Hz		150
Pulsfrequenz einer Stromrichterphase	Hz		300
Pulsfrequenz eines Vierquadrantenstellers	Hz		600
Oberschwingungsfrequenz	Hz	1800	2400

quadrantensteller (4QS) auf der 50-Hz-Drehstromseite und vier 4QS auf der 16 2/3-Hz-Bahnseite aufgeteilt (Bild 1). Mit dem Ziel, die Oberschwingungen und die Netzurückwirkungen zu minimieren, werden die Stromrichter jeder Gruppe mit versetzten Pulsmustern getaktet [2]. Tabelle 1 enthält die Hauptdaten der Anlage.

1.2 Komponenten der Umrichteranlage

1.2.1 Drehstromtransformator
 Zur Anpassung der Spannung des Drehstromnetzes an die Zwi-



schenschleisspannung ist ein Transformator erforderlich. Sein Übersetzungsverhältnis ist so gewählt, daß bei der höchsten Eingangsspannung, das ist im Leerlauf und bei gesperrten GTO-Thyristoren, wenn die Stromrichter wie Di-odengleichrichter wirken, die festgelegte Zwischenkreisspannung nicht überschritten wird. Außerdem muß der Transformator die Differenz zwischen der sinusförmigen Netzspannung und der pulsierenden Spannung an den Stromrichtern, ähnlich der Spannung in Bild 3, aufnehmen und mit seiner Streuinduktivität die dadurch erzeugte Stromwelligkeit begrenzen. Der Transformator weist deshalb eine erheblich höhere Streuung auf als gewöhnliche Netztransformatoren. In Tabelle 2 sind die technischen Daten der Transformatoren angegeben. Sie sind so dimensioniert, daß sie bei den Minimalspannungen nach Tabelle 1 noch die volle Nennleistung der Umrichteranlage übertragen können.

Da jede Transformatorphase einen separaten Stromrichter speist, kann sich prinzipiell in der Spannung ein Nullsystem ausbilden. Zumindest bei Regelvorgängen wird es vorübergehend auch tatsächlich auftreten. Deshalb wurde der Transformator mit zwei unbewickelten Zusatzschenkeln versehen, die die Nullkomponenten der magnetischen Flüsse führen können. Dadurch wird eine Magnetisierung des Transformator-kessels vermieden. Als Kernmaterial wird Blech aus nichtkornorientiertem Eisen eingesetzt. Die flache Magnetisierungskennlinie dieser Blechsorte gewährleistet, daß der Kern nicht nennenswert einseitig magnetisiert wird, wenn beim Stromrichterbetrieb vorübergehend Gleichspannungsglieder auftreten. Dadurch wird die Ausregelung des Gleichspannungsgliedes erleichtert.

Zwischen den Ober- und den Unterspannungswicklungen des Transformators sind geerdete Schirme angeordnet. Die Schirme verhindern die kapazitive Übertragung von Überspannungen von der Hochspannungs- auf die Niederspannungsseite und verringern da-

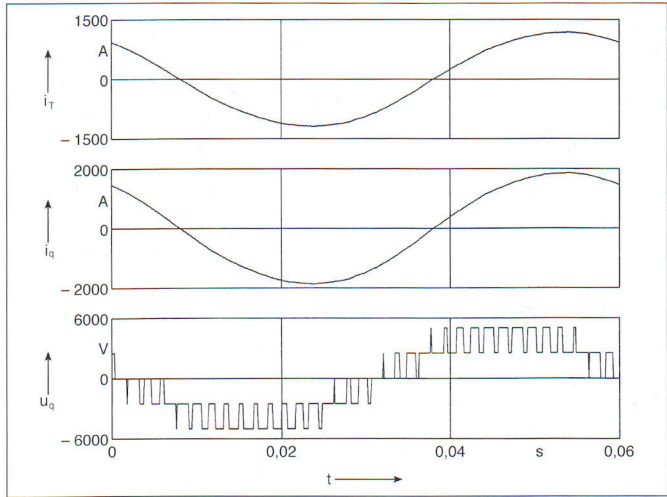


Bild 3: Ausgangsspannung und Ausgangsstrom eines Vierquadrantenstellers auf der 16 2/3-Hz-Seite.
 i_T = Strom auf der Oberspannungsseite des Transformators
 i_q = Wechselstrom eines Vierquadrantenstellers
 u_q = Pulsierende Spannung an den Wechselspannungsanschlüssen eines Vierquadrantenstellers

Tabelle 2: Technische Daten der Transformatoren.

		Drehstromtransformator	Bahnnetztransformator
Nennleistung	MVA	15	20
Oberspannung Nennwert	kV	120	18,55
Unterspannung Nennwert	V	3250	4 × 3090
Unterspannung umklemmbar unter dem Deckel auf	V	3410	4 × 3245
Nennstrom Oberspannung	A	72	1078
Nennstrom Unterspannung	A	1538	4 × 1618
Schaltgruppe		Y i i i 0	I i 0 i 0 i 0
relative Kurzschlußspannung	%	17,5	13

durch die Beanspruchung der Stromrichter.

1.2.2 Zwischenkreis

Der Zwischenkreis hat drei Aufgaben:

- Er muß die mit der Arbeitsfrequenz der Stromrichter pulsierenden Ströme aufnehmen und abgeben können.
- Er soll die Zwischenkreisspannung konstant und ihre Welligkeit in Grenzen halten.
- Er muß abwechselnd die Differenz zwischen der konstanten Leistung des Drehstromnetzes und der mit der doppelten

Bahnfrequenz pulsierenden Leistung des Oberleitungsnetzes aufnehmen und abgeben.

Diese Aufgaben werden auf zwei Gleichspannungskondensatorbatterien und zwei auf 33 1/3 Hz abgestimmte Reihenresonanzkreise aufgeteilt (Bild 1 und Tabelle 3). Um eine ausreichende Spannungs-konstanz zu erzielen, wurde als Gesamtkapazität der Gleichspannungskondensatoren zweimal 20 mF gewählt. Durch Simulationsrechnung wurde die Strombelastung bei Vollast zu 1300 A effektiv ermittelt. Jede Kondensator-

Tabelle 3: Technische Daten des Zwischenkreises.

	Gleichspannungs-kondensatoren	33 1/3-Hz-Filterkreis	
		Kondensatoren	Drosseln
Gesamtkapazität	mF	2 × 20	19,07
Einzelkondensator	µF	1 618	857
Nenngleichspannung	V	2 600	3 270
Dielektrikum		Polyester	Polypropylen
Kühlung		Konvektion	Konvektion
Induktivität	mH		1,2
Nennstrom	A		2 300
magnetischer Kreis			eisenlos
Wicklung			Aluminium
Tränkung			Epoxydharz
Isolationsspannung	kV		6,4
Verlustleistung	kW		19

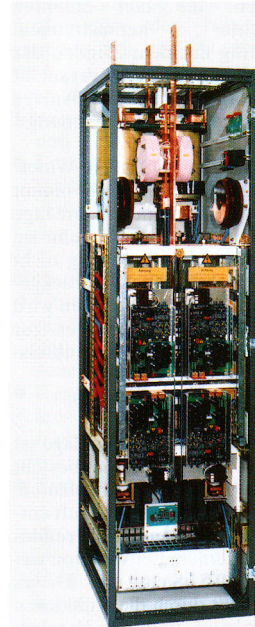
batterie besteht aus elf Einzelkondensatoren, die mit induktivitätsarmen Schienen parallelgeschaltet sind. Sie sind in offenen Gerüsten montiert, die zwischen den Stromrichterreihen aufgestellt sind. Die Belastung der beiden 33 1/3-Hz-Reihenresonanzkreise bei Vollast der Umrichteranlage errechnet sich zu je 2 300 A. Die Kondensatoren sind ebenfalls in offenen Gerüsten im Stromrichterraum eingebaut. Die Drosseln werden wegen ihrer Verlustleistung im Freien aufgestellt.

1.2.3 Stromrichterphasen

Wie aus dem Übersichtsbild in Bild 1 zu entnehmen ist, besteht die Umrichteranlage aus drei gleichartigen 4QS, die am Drehstromtransformator angeschlossen sind, vier 4QS am 16 2/3-Hz-Transformator und einem 4QS, an dem ein Widerstand angeschlossen ist. Jeder 4QS besteht aus zwei Pulsstromrichterphasen in Dreipunktschaltung (Bild 2). Bild 4 zeigt einen Stromrichterschrank. Alle sechzehn Stromrichterphasen sind identisch ausgelegt und aufgebaut, so daß die Ersatzteilhaltung vereinfacht ist. In Tabelle 4 sind die technischen Daten der Pulsstromrichterphasen angegeben. Die Halbleiter sind in zwei Säulen zwischen Kühlrohren gespannt, die direkt von entionisiertem Kühlwasser durchflossen werden. Eine solche Konstruktion erlaubt einen induktivitätsarmen Aufbau, der Voraussetzung für das einwandfreie Abschalten der GTO-Thyristoren ist.

Für das Zünden und Löschen benötigt jeder GTO-Thyristor eine Ansteuerereinheit. Die Ansteuerungen sind im Stromrichterschrank vor den GTO-Thyristoren angebracht. Sie liefern 50 A Zündstrom und etwa 5 A während der gesamten Stromführungszeit des Thyristors. Zum Abschalten des Thyristors können sie bis zu 1 000 A negativen Spitzenstrom bereitstellen. Den Ein- und Ausschaltbefehl erhält die Ansteuerung über einen Lichtwellenleiter. Über einen weiteren Lichtwellenleiter meldet die Ansteuerung den Schaltzustand des Thyristors an das Stromrichtersteuergerät zurück. Ihre Energie erhalten die Ansteuerungen über hochisolierende Transformatoren aus einem Netzgerät, das die Dreiphasenspannung einer gesicherten Stromversorgung in eine 45-kHz-Einphasenspannung umformt.

Überströme werden durch Sperren der GTO-Thyristoren abge-

**Bild 4:** Stromrichterschrank.

schaltet, solange sie deren Schaltvermögen nicht überfordern. Bei höheren Überströmen, das sind Momentanwerte über 3 500 A, werden die KurzschlieBthyristoren gezündet. Die höher belastbaren KurzschlieBthyristoren schützen die GTO-Thyristoren, indem sie den Überstrom ableiten. Der Kurzschlußstrom, der sich nach dem Zünden der KurzschlieBthyristoren ausbildet, läßt Sicherungen ab-

Tabelle 4: Technische Daten der Pulsstromrichterphasen.

Leistungsdaten	Nenngleichspannung	± 2 300 V
	Wechselspannungs-Effektivwert eines Vierquadrantensteller	0 bis 3 090 V
	Maximalstrom-Effektivwert	1 618 A
GTO-Thyristoren	Nennsperrspannung	4 500 V
	löscharer Strom	4 000 A
Dioden	Nennsperrspannung	4 500 V
Kühlung	Kühlmittel	Reinwasser
	Menge	2,4 m ³ /h
	Eintrittstemperatur	≤ 54 °C
Hilfsenergie	Spannung	3AC 380 V
	Frequenz	50 Hz
	Leistung	≈ 300 VA

schmelzen, die den defekten Stromrichter heraustrennen. Gleichzeitig mit dem Zünden der Kurzschließthyristoren veranlaßt das Steuergerät, daß die Anlage über Leistungsschalter spannungsfrei geschaltet wird.

An einen der 4QS ist ein Widerstand angeschlossen. Dieser nimmt die Energie bremsender Fahrzeuge im Fahrleitungsnetz auf, wenn sie wegen einer Unterbrechung nicht an das Drehstromnetz zurückgespeist werden kann. Daneben wird der Widerstandsstromrichter zur Stabilisierung der Zwischenkreisspannung herangezogen.

1.2.4 Kühlanlage

Das Schema der Kühlanlage ist in Bild 5 dargestellt. Sie besteht aus zwei getrennten Kreisläufen. Im inneren Kühlkreislauf läuft entionisiertes Wasser mit einem Leitwert von weniger als 0,5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ um. Dieses Wasser fließt durch die Kühldosen der Halbleiter und der Beschaltungswiderstände in den Stromrichterschranken und überträgt die dort aufgenommene Wärme über einen Wärmetauscher an den äußeren Kühlkreislauf. Im äußeren Kühlkreis wird die Wärme zu im Freien aufgestellten Wasser-Luft-Kühlern weitergeleitet. Im äußeren Kühlkreislauf zirkuliert ein Wasser-Glykol-Gemisch, das auch bei niedrigen Außentemperaturen nicht gefriert. Die Anlage ist so dimensioniert, daß bei höchster Verlustleistung und 40°C Luftaußentemperatur die Wassereintrittstemperatur in den Kühldosen der Stromrichter 54°C nicht überschreitet.

Um ein Betauen der Kühldosen in den Stromrichtern zu verhindern, muß die Reinwassertemperatur stets über der Raumtemperatur liegen. Über ein Dreiwegeventil wird die Rückkühlung im Wärmetauscher so gesteuert, daß diese Grenze auch bei extrem niedriger Außentemperatur nicht unterschritten wird.

Beide Kühlkreisläufe sind mit zwei Pumpen ausgerüstet. Die beiden Pumpen werden im Wochenrhythmus umgeschaltet. Wird ein zu niedriger Druck oder ein zu geringer Kühlwasserstrom festge-

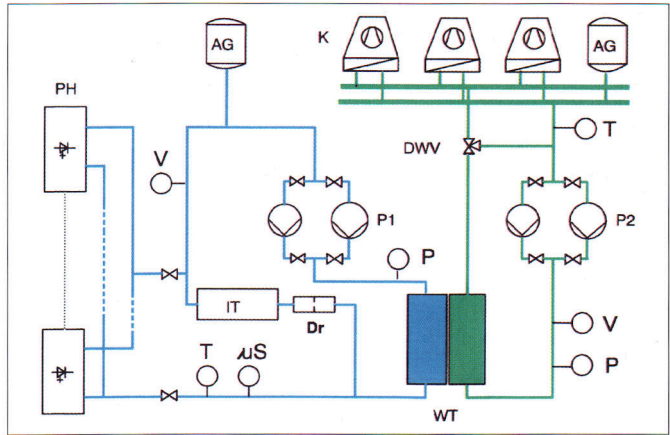


Bild 5: Schema der Kühlanlage.

- PH = Stromrichterschranke
- V = Durchflußüberwachung
- AG = Ausgleichsgefäße
- T = Temperaturüberwachung
- μS = Leitwertmessung
- P = Drucküberwachung
- P1, P2 = Pumpen
- IT = Ionenaustauscher
- Dr = Drosselklappe
- WT = Wärmetauscher
- K = Wasser-Luft-Kühler
- DWW = Dreiwegeventil

stellt, wird auch die jeweils stillstehende Pumpe zugeschaltet. Bleibt der Fehler auch danach noch bestehen, wird die Anlage abgeschaltet.

Um im Reinwasserkreislauf den erforderlichen hohen elektrischen Widerstand einzuhalten, wird ein kleiner Teil des umlaufenden Wassers über einen Ionenaustauscher geleitet. Der Leitwert des Wassers wird ständig überwacht. Bei einem Leitwert über 1,5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ erhält die Leitstelle des Umrichterwerks eine Wartungsaufforderung, bei mehr als 3 $\mu\text{S}/\text{cm}$ wird die Anlage zwangsabgeschaltet.

1.2.5 Bahnnetztransformator

Die Gesamtleistung auf der Bahnnetzseite von 15 MVA wird von vier parallelarbeitenden 4QS erbracht. Bei der gewählten Zwischenkreisspannung können sie 3090 V maximale Wechselspannung erzeugen. Mit einem zweiten Transformator (Tabelle 2) wird diese Spannung auf die Oberleitungs-spannung hochgespannt. Auch dieser Transformator muß mit seiner Streuinduktivität die Differenz zwischen den pulsierenden Spannungen an den Stromrichtern (Bild 3) und der sinusför-

migen Oberleitungs-spannung aufnehmen.

Die vier Stromrichter geben zwar phasengleiche Spannungsgrundschwingungen ab, ihre Puls-muster und damit auch ihre Spannungsüberschwingungen sind jedoch gegeneinander phasenverschoben. Die infolgedessen zusätzlich auftretenden Stromüberschwingungen werden durch eine besondere Gestaltung des Bahnnetztransformators auf ein Maß reduziert, das weder nennenswert erhöhte Verluste noch Beanspruchungen mit sich bringt. Die Besonderheit des Transformators besteht darin, daß die vier galvanisch getrennten Unterspannungswicklungen auf vier in Reihe geschaltete Oberspannungswicklungen von je einem Viertel der Gesamt-oberspannung arbeiten. Auf dem zweischenklig ausgeführten Kern sind je Schenkel zwei Ober- und Unterspannungswicklungen konzentrisch angeordnet.

Zur Führung des durch die Oberschwingungen auf der Unterspannungsseite erzeugten magnetischen Flusses ist ein magnetischer Nebenschluß erforderlich. Dieser ist als Kreuzjoch zwischen den beiden Schenkeln und den beiden Jo-



Bild 6: Aktivteil des einphasigen 20-MVA-Bahntransformators.

chen mit einem wirksamen Querschnitt von circa 15 Prozent des Querschnitts der Hauptschenkel ausgeführt. Bild 6 zeigt den Aktivteil des einphasigen $16\frac{2}{3}$ -Hz-Transformators. Die Teile des Kreuzjochs sind weder untereinander noch mit dem Kern verzapft. Es sind Luftspalte eingefügt, so daß auch hier die magnetische Charakteristik gesichert ist. Dadurch wird eine übermäßige einseitige Magnetisierung beim Auftreten von Gleichspannungskomponenten vermieden.

Durch diese besondere Anordnung der vier Systeme, nämlich axial nebeneinander und verteilt auf zwei Schenkel, sowie durch das Kreuzjoch sind die vier Systeme weitgehend magnetisch entkoppelt und wirken daher wie vier einzelne Transformatoren. Diese Anordnung in einer Baueinheit stellt deshalb eine besonders vorteilhafte Lösung dar. Sie ist nur wenig schwerer und größer als ein normaler Transformator gleicher Leistung.

Auch bei diesem Transformator wurde nichtkornorientiertes Transformatorblech eingesetzt, um die Empfindlichkeit gegenüber Gleichspannungsgliedern zu verringern. Zwischen den Ober- und

Unterspannungswicklungen sind geerdete Schirme angeordnet.

Teil 2: Regelung

2.1 Anforderungen an die Regelung

Da der Umrichter sowohl an das Landes- als auch an das Bahnnetz angeschlossen wird, müssen seine

Teilumrichter den jeweiligen Anforderungen der Netzbetreiber genügen. Für den Standort Jübek sind die wichtigsten Anforderungen an der Drehstromseite:

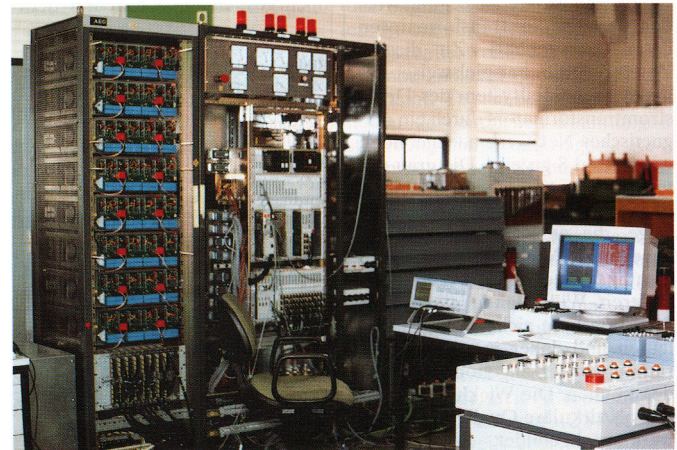
- reine Wirkleistungsaufnahme und -abgabe,
- Einhaltung eines vorgegebenen Spektrums von maximal zulässigen Oberschwingungsamplituden,

und auf der Bahnnetzseite:

- Unterbrechungsfreier Betrieb bei Störfällen wie Kurzschlüssen und Überlast im Bahnnetz oder Ausfall des Drehstromnetzes,
- Regelung nach den Betriebsarten Inselbetrieb, Verbundbetrieb und Phasenschieberbetrieb,
- Einhaltung des maximal zulässigen psophometrischen Störstroms und Eliminierung des 100-Hz-Störstromanteils, der Frequenz der Gleisfreimeldeanlagen.

Für die Erprobung der Regelung des Netzkupplungsumrichters wurde eine Modellanlage mit 20 kW Leistung errichtet (Bild 7). Bei den später gezeigten Meßergebnissen wurden die Meßgrößen auf die Originalanlage umgerechnet.

Bild 7: Modellanlage im Leistungsmaßstab 1:750.





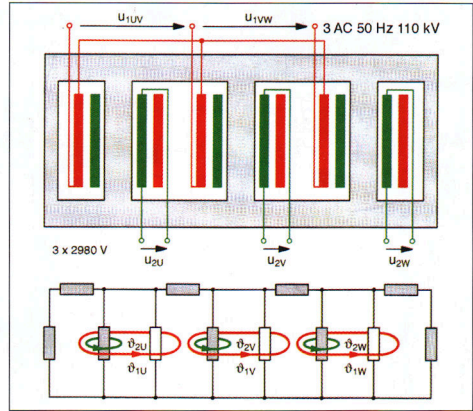
2.2 Simulationsuntersuchungen des Systems am Beispiel der Transformatoren

Die Eigenschaften der Transformatoren tragen maßgeblich zum Gesamtverhalten des Systems bei. Sie müssen deshalb bei der Auslegung der Regelung berücksichtigt werden. So wirkt sich die Streuung der Transformatoren unter anderem auf das dynamische Verhalten der Stromregelung aus. Die Ströme der drehstromseitigen 4QS-Module werden darüber hinaus über die Nullsystemimpedanz gekoppelt, diejenigen der bahnnetzseitigen Module durch eine Gegentaktimpedanz. Um die Vorteile der versetzten Pulsung der einzelnen 4QS-Module auszunutzen, sollten diese Impedanzen in beiden Transformatoren durch zusätzliche wicklungsfreie Eisenwege möglichst auf hohe Werte eingestellt werden.

Eine Eigenschaft von Transformatoren beim Betrieb an Umrichtern ist, daß sie durch unbeabsichtigt erzeugte Gleichspannungen in eine asymmetrische magnetische Sättigung getrieben werden. Zur Kontrolle und Kompensation dieses Vorgangs werden Regler eingesetzt, die die Gleichströme überwachen. Da es sich hierbei um kleinste Ströme bezogen auf den Nennstrom handelt, muß durch entsprechende Auslegung der Meßwerterfassung, aber auch des Transformatoren selbst sichergestellt werden, daß diese Regelung überhaupt der Aufgabe gerecht werden kann.

Für eine exakte Auslegung wurden deshalb die Transformatoren detailliert simuliert. Zu diesem Zweck wurde beispielsweise das magnetische Teilsystem des Drehstromtransformators durch ein magnetisches Netzwerk nachgebildet, wie in Bild 8 gezeigt. Die grau unterlegten magnetischen Widerstände in diesem Netzwerk sind Eisenwege, die entsprechend den gegebenen Materialeigenschaften nichtlinear modelliert werden. Die anderen Widerstände stehen für Streuwege, die nicht im Eisen verlaufen und daher in guter Näherung als linear angenommen werden können. Die Wicklungen werden als zirkuläre Quellen im Netzwerk nachgebildet. Auf gleiche

Bild 8: Modellierung des Drehstromtransformators.
oben: Schnittskizze Drehstromtransformator
unten: Modellierung des Transformators als magnetisches Netzwerk



Weise wurde auch der Bahnnetztransformator modelliert, simuliert und nach den regelungs- und systemtechnischen Anforderungen ausgelegt.

Beispielsweise war mit Hilfe der Simulation zu klären, ob durch die besondere Schaltungsart des Drehstromtransformator mit den umrichterseitig offenen Einzelwicklungen dort während der Einschaltprozedur bei noch gesperrtem Umrichter auf der Primärseite Überspannungen auftreten können. Derartige Überspannungen würden zu einem unkontrollierten Aufladen des Zwischenkreises über die Freilaufdioden führen. Bei den Rechnerimulationen zeigte sich, daß auch nach Abklingen des Rusheffekts die umrichterseitigen Transformatorspannungen bei noch gesperrtem Umrichter deut-

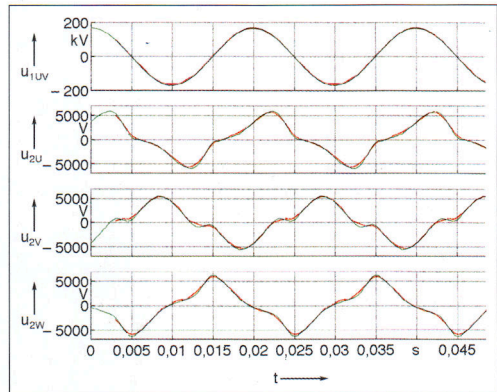
lich von der Sinusform abweichen und insbesondere deutlich höhere Maximalwerte aufweisen, obwohl die Netzspannung ideal sinusförmig angenommen wurde. In Bild 9 sind die Simulations- und Meßergebnisse dargestellt. Es zeigt sich eine hohe Übereinstimmung. Aufgrund dieses Ergebnisses wurden vorab Abhilfemaßnahmen getroffen.

2.3 Regelung des Umrichters

2.3.1 Drehstromseitiger Teilumrichter

Die prinzipielle Regelungsstruktur des drehstromseitigen Teilumrichters ist in Bild 10 dargestellt. Die wesentliche Aufgabe dieses Teilumrichters ist die Einstellung der Zwischenkreisspannungen. Hierfür ist ein Zwischenkreisspan-

Bild 9: Vergleich von Simulationsergebnissen mit Messungen am Modelltransformator.
 u_{1UV} = verkettete Spannung 110-kV-Drehstromnetz
 u_{2U}, u_{2V}, u_{2W} = Strangspannungen
grün: Simulation
rot: Meßergebnis am Modelltransformator



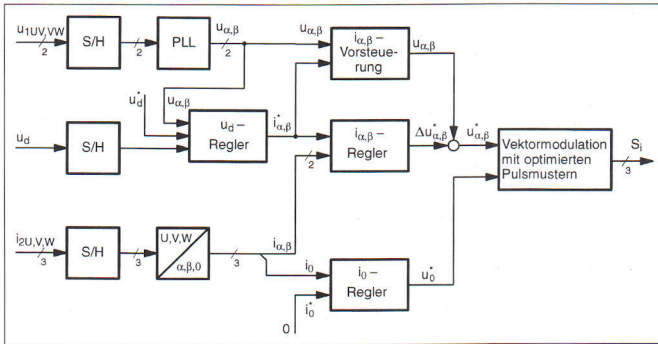


Bild 10: Regulationsstruktur des drehstromseitigen Teilumrichters.

nungsregler vorgesehen, dem eine Stromregelung unterlagert ist. Aus den überspannungsseitigen Leiterspannungen des Netzes u_{1UV} und u_{1VW} , wie auch in Bild 10 zu sehen, ermittelt eine Phase-Locked-Loop (PLL) den umlaufenden Spannungszeiger des Netzes in Form des Vektors $[u_\alpha, u_\beta]$. Entsprechend dem Regelfehler der abgetasteten Zwischenkreisspannungen u_{d1} und u_{d2} gibt der Zwischenkreisspannungsregler einen Sollstromvektor $[i_\alpha^*, i_\beta^*]$ in Richtung des Netzspannungszeigers vor. Alle drei unabhängigen Strangströme i_{2U} , i_{2V} und i_{2W} werden abgetastet und aus diesen die beiden Zeigerkomponenten i_α , i_β und die Nullsystemkomponente i_0 , der Mittelwert aller drei Ströme, berechnet. Die unterlagerte Stromregelung unterteilt sich nun in den α, β -Stromregler und in den Nullsystemstromregler.

Der α, β -Stromregler ist zusätzlich mit einer Spannungsvorsteuerung ausgestattet und stellt durch Vorgabe eines entsprechenden Sollspannungszeigers $[u_\alpha^*, u_\beta^*]$ den vorgegebenen Sollstromvektor $[i_\alpha^*, i_\beta^*]$ ein. Der Nullsystemstromregler unterdrückt durch Vorgabe einer Nullsystemspannung u_0^* den Nullsystemfluß. Die Sollspannungen werden nun von einem Pulsmustergenerator umgesetzt. Um die Zwischenkreisspannung auch bei sprunghaften Laständerungen weitgehend auf einen konstanten Wert regeln zu können, ist für die unterlagerte Stromregelung eine möglichst hohe Dynamik anzustreben. Diese Dynamik ist nur erreichbar, wenn der vom Stromregler berechnete Sollspannungszeiger mit einem Vektormodulationsverfahren exakt realisiert wird. Gleichzeitig sollten jedoch auch

optimierte Pulsmuster eingesetzt werden, um die im stationären Betrieb erzeugten Oberschwingungen trotz der im Verhältnis zur Netzfrequenz recht niedrigen Pulsfrequenz 150 Hz möglichst gering zu halten und an die lokalen Netzbedingungen anpassen zu können. Es war somit ein Vektormodulationsverfahren für optimierte Pulsmuster zu entwickeln, das unabhängig von der Art des für den stationären Betrieb optimierten Pulsmusters ist. So kann nun eine rechnergestützte Pulsmusteroptimierung zur Minimierung der Netzberechnungen entsprechend vorgegebener zulässiger Oberschwingungsspektren durchgeführt werden und das Ergebnis problemlos in den Pulsmustergenerator eingespeist werden.

Bild 11 zeigt eine Stromanregelung bei einem bahnnetzseitigen Lastsprung von Leerlauf auf etwa 13 MW, also 10% Überlast. Die Summe der Zwischenkreisspannungen u_d bricht zunächst ein, während der Zwischenkreisspannungsregler durch die Stromgrenze des Umrichters begrenzt wird und den maximal möglichen Wirkstromsollwert i_{2d}^* vorgibt. Der hochdynamische zeitdiskrete Stromregler folgt dem Sollwert mit einer Anregelzeit von etwa zwei Abtastschritten, womit auch der Strangstrom i_{2U} ansteigt.

2.3.2 Bahnnetzseitiger Teilumrichter

Die idealisierte Wirkungsweise des bahnnetzseitigen Teilumrichters ist die einer gesteuerten Spannungsquelle, womit die Regelungsaufgabe zunächst denkbar einfach erscheint. Tatsächlich sind jedoch neben der einfachen Spannungssteuerung einige unterlagerte Regelungsaufgaben zu berücksichtigen, die im wesentlichen umrichter- und strukturspezifisch sind:

- Bei einer Spannungssteuerung kann sich der Ausgangsstrom zunächst lastbedingt einstellen. Wird jedoch der maximal zulässige Umrichterstrom überschritten, so muß der Ausgangsstrom entsprechend begrenzt werden.
- Der bahnnetzseitige Teilumrichter besteht aus vier QJS-Modulen, die jeweils über vier offene

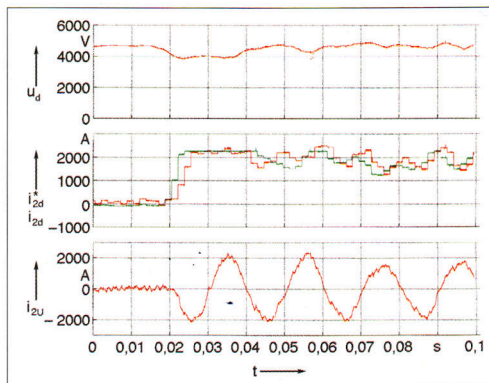
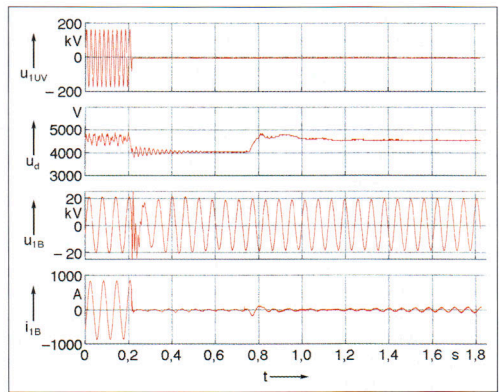


Bild 11: Stromanregelung bei Sprung auf 110% Last. u_d = Summe der Zwischenkreisspannungen i_{2d}^* (grün) = Wirkstromsollwert i_{2d} (rot) = Wirkstromwert i_{2U} = Strangstrom

Wirkleistung damit unterbrochen, um die Zwischenkreisspannung aufrecht zu erhalten. Nachdem die PLL der überlagerten Regelung erneut auf die Bahnnetzspannung u_{1B} synchronisiert hat, wird der Schalter für die Auswahl des zu verwendenden Phasenwinkels auf φ_{PS} gestellt und der bahnnetzseitige Umrichter wieder freigegeben. Nun übernimmt der bahnnetzseitige Zwischenkreisspannungsregler die Regelung der Summe der Zwischenkreisspannungen u_d über den Differenzwinkel $\Delta\varphi$. Die Spannungsamplitude kann nun wieder entsprechend der Blindleistungs-Spannungskennlinie eingestellt werden. Bild 14 zeigt den Verlauf der Summe der Zwischenkreisspannungen u_d , der bahnnetzseitigen Ausgangsspannung u_{1B} und des Ausgangsstroms i_{1B} bei Ausfall des Drehstromnetzes.

Bild 14: Phasenschieberbetrieb bei Ausfall des Drehstromnetzes. u_{1UV} wie Bild 9 u_d, u_{1B}, i_{1B} wie Bild 13



2.5 Konzeption der Prozessorhardware und Implementation der Regelung

Großstromrichteranlagen wie der Netzkupplungsumrichter stellen aufgrund der von Anlage zu Anlage sehr individuellen Spezifikationen extrem unterschiedliche Anforderungen an die Prozessorhardware. Das Produktspektrum der AEG sieht für derartige Anlagen hochflexible leistungsfähige Standardkomponenten vor, die je nach Leistungsanforderungen zu problemangepaßten Multiprozessorsystemen konfiguriert werden können. Für den Netzkupplungsumrichter wird ein aus fünf Transputerkarten bestehendes Multiprozessornetzwerk eingesetzt. Jede der Karten verfügt über eine vielseitig verwendbare On-Board-Peripherie. Dieses Netzwerk stellt sowohl ausreichende Rechenleistung als auch genügend Kommunikationswege und Peripherie inklusive eines on-line Diagnosesystems zur Verfügung.

Bei der Erstellung der Software waren eine sehr gute Strukturierung sowie eine hohe Fehlersicherheit und Testbarkeit gefordert. Durch konsequente Anwendung modernen Software-Engineerings konnte die Regelungssoftware den Anforderungen entsprechend in der vorgegebenen kurzen Entwick-

lungszeit implementiert werden. In diesem Zusammenhang steht auch die Entscheidung für die Verwendung von Prozessoren mit mathematischer Gleitkommaeinheit. Dadurch entfällt das Fehlerpotential einer bei Festkommaarithmetik notwendigen Normierung und die Software bleibt testbar. Außerdem würde die prinzipielle Ungenauigkeit der Festkommaarithmetik erhebliche Probleme verursachen.

2.6 Umrichterernahe Steuerung

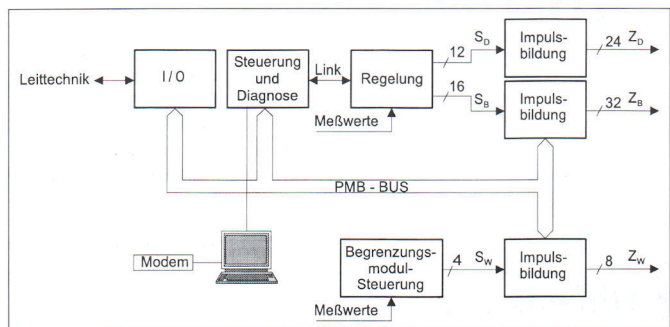
Die Hardwarestruktur der Steuerung und Regelung ist in Bild 15 skizziert. Die Steuerungskomponenten bilden eine Schale, die die Umrichterregelung einbettet. Diese Schale muß verschiedenste Aufgaben wie umrichterernahe Schutzfunktionen, Ablaufsteuerungen, Anbindung an die Leittechnik und Diagnosefunktionen erfüllen. Die Steuerungskompo-

nenten kommunizieren über einen internen parallelen Bus (PMB).

2.6.1 Steuerungs- und Diagnose-system

Das Steuerungs- und Diagnosesystem ist prozessorbasiert und wurde mit dem graphischen Programmierungswerkzeug Logidyn D/LogiCAD realisiert. Die graphische Struktur dient gleichzeitig der Dokumentation. Das Steuerungssystem realisiert Ablaufsteuerungen wie beim Ein- und Ausschalten sowie für Reaktionen auf verschiedenste Störungen. Die übrigen Steuerungskomponenten werden über einen PMB koordiniert. Hierüber werden auch Störungsmeldungen der Komponenten abgefragt, zusammengefaßt und klassifiziert und mit einem Zeitstempel in einem Störungsspeicher abgelegt. Weiterhin kommuniziert das

Bild 15: Hardwarestruktur der Steuerung und Regelung.



Steuerungssystem mit der Leittechnik der Anlage. Von ihr empfängt es Sollwerte und Steuersignale, die es aufbereitet und an die Regelung weiterleitet. Statussignale, Betriebsgrößen und Störungsmeldungen werden von der Steuerung an die Leittechnik gesendet.

Für Inbetriebnahme und Wartung werden Steuerung und Regelung über einen handelsüblichen PC mittels des Visualisierungssystems Logiview und des Störungsanzeigesystems Logirec parametrisiert sowie Betriebsgrößen und Störungen angezeigt. Über ein Modem kann eine Ferndiagnose vorgenommen werden. Zu diesem Zweck kann der PC auch an einen Transientenrekorder angeschlossen werden.

2.6.2 Schutzfunktionen

Die Potentialstellbefehle für die 4QS-Module, das sind zwölf binäre Stellbefehle S_D für die Drehstromseite und sechzehn Stellbefehle S_B für die Bahnnetzseite, werden von der Regelung direkt mit den Transputern on-chip erzeugt. Von den Impulsbildungen werden diese Potentialstellbefehle ausgewertet und unter Berücksichtigung der zulässigen GTO-Mindestzeiten und -Wartezeiten in Zündbefehle Z_D und Z_B der einzelnen GTO umgesetzt, die über Lichtwellenleiter zu den Zündverstärkern störungsfrei übertragen werden. Neben der Strombegrenzungsregelung realisiert die Impulsbildung außerdem eine regelungsunabhängige Strombegrenzung durch sofortige Sper-

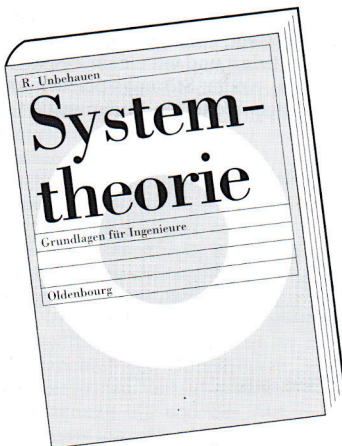
rung einzelner GTO beim Erreichen von Überstrompegeln. Die Steuerung des für die Begrenzung der Zwischenkreisspannung vorgesehenen Begrenzungsmoduls wurde aus Sicherheitsgründen unabhängig von der Regelungshardware aufgebaut.

Literatur

- [1] Zimmert, G.; Koeltzsch, W.; Scheuring, J.; Werth, L.; Niehage, H.; Tadros, Y.: Umrichterwerk Jübek. In: Elektrische Bahnen 93 (1995), H. 3, S. 85-92.
- [2] Werth, L.; Göke, T.: Bewertung von Netzurückwirkungen statischer Umrichter. In: Konferenzdokumentation ETG-Fachtagung, VDE-Kongreß 1994.

Grundlagenwissen für Ingenieure

mit Aufgaben
und Lösungsvorschlägen



Das Werk macht eine Vielzahl von Einzelercheinungen in unterschiedlichen technischen Disziplinen, wie der Informations-, Meß-, Regelungs- und Signalverarbeitungstechnik, als Konsequenz weniger systemtheoretischer Grundkonzepte verständlich. Anhand mathematischer Modelle entwickelt es auf einheitliche Weise Einsichten in technische Zusammenhänge und liefert quantitative Ergebnisse, die durch viele Beispiele sowie zahlreiche Aufgaben mit Lösungsvorschlägen erläutert und erprobt werden.

Rolf Unbehauen
Systemtheorie

Grundlagen für Ingenieure

6., verbesserte Auflage 1993.
746 Seiten, 296 Bilder,
173 Aufgaben samt Lösungen,
DM 108,-/öS 843,-/sFr 108,-
ISBN 3-486-22465-4

R. Oldenbourg Verlag
Rosenheimer Straße 145,
81671 München

Oldenbourg