

1 Einleitung

Die Vermaschung der elektrischen Verbundnetze und der Energiehandel nehmen im europäischen Binnenmarkt und weltweit immer stärker zu. Der Großteil des europäischen Netzes wird durch die UCTE (Union for the Coordination of Transmission of Electricity) koordiniert. Aufgrund der Globalisierung der Wirtschaftsmärkte und der Ausdehnung der Europäischen Union ist es zum Teil nötig, das Verbundnetz zu erweitern, um eine wirtschaftliche und zuverlässige Energieversorgung sicherstellen zu können. Das CENTREL-Netz (Polen, Tschechische Republik, Slowakei, Ungarn) wird seit 1995 synchron mit dem UCTE-Netz betrieben, welches zusammen mit diesem als TESIS (Trans European Synchronously Interconnected System) bezeichnet wird. Die skandinavischen Länder, welche das NORDEL-Netz bilden, sind über Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungen (HGÜ) mit dem UCTE-Netz verbunden. Auch das russische Elektrizitätsnetz ist über eine HGÜ-Verbindung an das NORDEL-Netz angeschlossen und somit an das UCTE-Netz. Durch die Erweiterung der Europäischen Union werden noch weitere Verbindungen folgen. Ein solch großes Netz stellt für den sicheren und wirtschaftlichen Betrieb sehr hohe Anforderungen an die verwendeten Betriebsmittel. Die Übertragungsfähigkeit von Leitungen über mehrere Hunderte von Kilometern wird entscheidend von den auftretenden Verlusten bestimmt. Da der physikalische Leistungsfluss, bestimmt durch die Netzparameter, zu Überlastungen einzelner Leitungen führen kann, muss dieser gezielt geregelt werden. Dies stellt neue, größere Anforderungen an die Steuerung des Leistungsflusses in Übertragungsnetzen, aber auch in Verteilnetzen. Neben der Vermeidung unerwarteter und unerwünschter stationärer Ringflüsse, die die Wirtschaftlichkeit der Übertragung elektrischer Energie einschränken, kommt es infolge der Ausweitung des Verbundbetriebes zunehmend auch darauf an, die dynamische Stabilität des Netzes stärker zu beachten. Moderne Geräte und Anlagen zur Steuerung des Leistungsflusses in Energieversorgungsnetzen müssen daher mit einer hohen Dynamik auf die Betriebszustände im System reagieren können. Diese Anforderungen können heute mit leistungselektronischen Stellgliedern erfüllt werden. Die Stromtragfähigkeit und Spannungsfestigkeit moderner leistungselektronischer Bauelemente erlauben heute den Einsatz solcher Stellglieder in allen Spannungsebenen ohne praktische Einschränkungen der Übertragungsleistungen.

Moderne Informationstechnik ermöglicht deren intelligente Ansteuerung in Echtzeit. Die Kombination dieser Techniken gestattet die Entwicklung von Betriebsmitteln für Energieversorgungsnetze mit neuen Eigenschaften. Unter dem Schlagwort FACTS (Flexible Alternating Current Transmission System) wird daher weltweit im breiten Umfang Forschung betrieben, um mit moderner Leistungselektronik und Informationstechnik die Anforderungen des Betriebes elektrischer Energieversorgungsnetze erfüllen zu können.

Stromrichteranlagen und FACTS-Systeme großer Leistungen werden schon seit vielen Jahren in Netzen der elektrischen Energieversorgung und industriellen Produktionsanlagen eingesetzt. Im Rahmen der zunehmenden Vermaschung besteht ein gesteigerter Bedarf an Betriebsmitteln zur Steuerung des Leistungsflusses. Der hier vorgestellte dynamische Zwischenphasenregler ermöglicht eine Steuerung der Blind- und Wirkleistungsübertragung zwischen zwei über ihn gekoppelten Netzen.

Die vorliegende Arbeit gliedert sich dabei in neun Kapitel.

In Kapitel 2 wird das Grundprinzip eines Interphase Powerflow Controller (IPFC) am Beispiel der in Plattsburgh (Kanada) installierten Anlage vorgestellt. Anhand dieser werden verschiedene Fehlerfälle im Netz analysiert, insbesondere in Bezug auf die Parametrierung der Kapazitäten und Induktivitäten des IPFC.

Die Elemente des statischen IPFC werden in Kapitel 3 durch Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC)-Module ersetzt, wodurch man zum Dynamic Interphase Powerflow Controller (DIPFC) gelangt. Zusätzlich wird ein weiterer Modulzweig ergänzt. Die sich daraus ergebende Regelfähigkeit der Impedanz- bzw. Suszeptanzwerte erlaubt einen unabhängigen Wirk- und Blindleistungsaustausch zwischen zwei gekoppelten Netzen. Die Übertragungsfähigkeit wird dabei mit Hilfe von Grundswingungsmodellen berechnet. Anschließend wird wieder auf eine reduzierte Form mit zwei Modulen übergegangen und hierfür optimale Betriebsparameter bestimmt.

In Kapitel 4 wird der stationäre Betrieb des DIPFC mit nur einem Modul im Zustandsraum berechnet. Dabei werden die Systemgrößen in den modalen Bereich der Raumzeiger und Nullgrößen transformiert. Aufgrund der Schalthandlungen und Zwischenphasenschaltungen ergeben sich zum Teil gekoppelte Komponenten-Ersatznetzwerke, welche abgeleitet werden. Es zeigt sich, dass sich das Gesamtsystem aus netzwerktheoretischer Sicht auf lediglich vier unterschiedliche Schaltzustände reduzieren lässt. Der stationäre Betrieb wird durch einen zyklischen Wechsel von jeweils zwei dieser unterschiedlichen Schaltzustände geprägt. Die Schaltzustände werden in ein lineares, inhomogenes Anfangswertproblem gekoppelt, welches vollständig analytisch gelöst werden kann.

Da es aufgrund der periodischen Schalthandlungen der Module zur Anregung von Re-

sonanzerscheinungen kommen kann, werden in Kapitel 5 die Eigenwerte eines mit zwei Modulen ausgerüsteten DIPFC untersucht. Die Anzahl der zu untersuchenden Schaltzustände der Thyristoren kann durch die Ausnutzung von Symmetrien von 64 auf 24 reduziert werden. Diese Schaltzustände lassen sich mit Hilfe von idealen Übertragern mit Komponenten-Ersatznetzwerken im Bereich von Raumzeiger und Nullgrößen darstellen. Die Lage der sich aus den Ersatznetzwerken ergebenden Eigenwerte lässt einen Rückschluss auf Resonanzerscheinungen zu.

In Kapitel 6 wird die analytische Berechnung des DIPFC im Zustandsraum auf zwei aktive Module erweitert. Dazu werden die im stationären Betrieb aufeinander folgenden Schaltzustände mit einem Grundswingungsmodell ermittelt. Diese Zustände werden in einem Anfangswertproblem gekoppelt und anschließend gelöst. Da die einzelnen Schaltzeitpunkte aus dem Grundswingungsmodell nur näherungsweise bekannt sind, werden sie durch eine Iteration numerisch ermittelt.

Nachdem das stationäre Verhalten des DIPFC mit zwei aktiven Modulen eingehend analysiert wurde, wird in Kapitel 7 eine Regelung entworfen. Zuerst wird das dynamische Verhalten der Module untersucht und mit einem PT_2 -Glied beschrieben. Danach werden die Parameter für die einzelnen PI-Regler des Entkopplungsreglers bestimmt. Das dynamische Systemverhalten wird anhand von Sollwertsprüngen beurteilt. Zum Abschluss des Kapitels wird das System um eine Kurzschluss- und Leiterunterbrechungs-Erkennung erweitert und das Systemverhalten bei diesen Fehlerfällen betrachtet.

Kapitel 8 stellt die Realisierung des DIPFC am Drehstrom-Demonstrationsmodell vor. Dabei handelt es sich um eine analoge Nachbildung eines 220-kV-Netzes. Die Messung der Systemgrößen und die Regelung werden mit einem Echtzeit-System für Mess- und Regelaufgaben realisiert.

Das letzte Kapitel fasst die Ergebnisse zusammen und gibt einen kleinen Ausblick.

2 Der statische Zwischenphasenregler

Der Leistungsfluss in einem elektrischen Energieversorgungsnetz wird durch die Netzimpedanzen und die komplexen Knotenspannungen bestimmt. Zur Leistungsübertragung zwischen zwei Netzen wirken neben konventionellen energietechnischen Anlagen wie zum Beispiel statische Schrägtransformatoren, welche die Anforderungen des modernen Verbundbetriebes an die Dynamik nicht erfüllen, erste leistungselektronische FACTS-Geräte zur Parallel- und Serienkompensation sowie HGÜ-Anlagen auf die Netzparameter ein [42]. Diese Steuerung muss dynamisch sein, um die Stabilität des Verbundbetriebes garantieren und Leistungspendelungen wirksam dämpfen zu können. Das Schrägtransformatorprinzip beruht auf der seriellen Einprägung einer Zusatzspannung in die Übertragungsleitung. Die Energie der Einprägung wird aus einem parallelen Netzzweig bezogen und seriell wieder eingespeist. Mit Hilfe eines vollständigen Stromrichterzwischenkreises besteht die Möglichkeit zur dynamischen Lastflusssteuerung [31]-[32]. Die ohnehin kostenintensive praktische Ausführung mit zwei Transformatoren wird hierdurch noch aufwendiger. Ebenso bekannt ist das Prinzip des Zwischenphasenreglers, bei dem der Leistungsaustausch zwischen zwei Teilnetzen über Reaktanzen erfolgt, die jeweils einen Außenleiter des einen Teilnetzes mit den jeweils beiden anderen Außenleitern des zweiten Teilnetzes verbinden. Die erste unregelte Anlage, die lediglich eine Umschaltung mit konventionellen Schaltgeräten erlaubt, wurde in Plattsburgh (Kanada) Ende Juni 1998 in Betrieb genommen [37]. Eine dynamische Regelung des Leistungsflusses ist mit ihr nicht möglich. Aus der Kombination des Prinzipes des TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor) mit dem des Zwischenphasenreglers lässt sich ein Betriebsmittel zur dynamischen Leistungsflusssteuerung ableiten, das ohne – oder mit nur einem Eisenkern auskommt.

Eine neue Methode zur Leistungsflusssteuerung und Kopplung von Verbundnetzen, basierend auf dem Zwischenphasenregler, dessen Prinzipschaltung in Abbildung 2.1 dargestellt ist, wird in den folgenden Kapiteln vorgestellt. Dabei werden die beiden Admittanzen Y_1 und Y_2 als regelbare Admittanzen nach dem Prinzip des TCSC ausgeführt, wodurch man

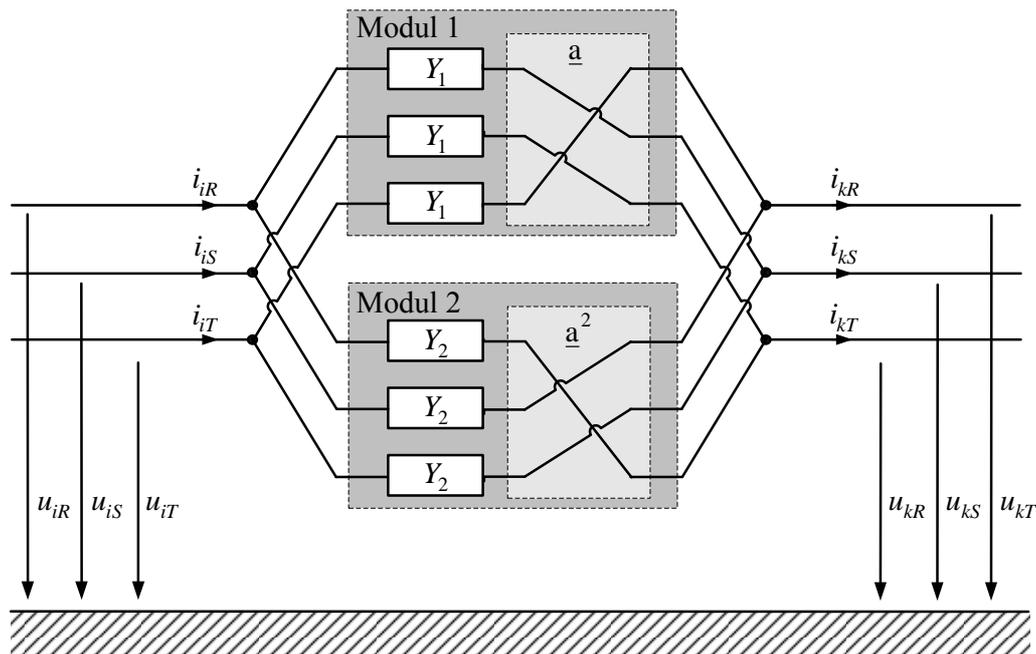


Abbildung 2.1: Prinzipschaltbild des IPFC

zu dem Dynamic Interphase Powerflow Controller (DIPFC) gelangt.

Zunächst soll jedoch der statische IPFC, oft auch nur als IPC (Interphase Power Controller) bezeichnet, an der in Plattsburgh installierten Anlage, Abbildung 2.2, betrachtet werden. Bei ihm ist die Admittanz Y_1 als Induktivität und Y_2 als Kapazität ausgeführt. Durch den im Transformator-kessel untergebrachten Umschalter können die Admittanzen Y_1 und Y_2 auf die in Abbildung 2.1 eingezeichneten Drehoperatoren \underline{a} und \underline{a}^2 – die Zwi-

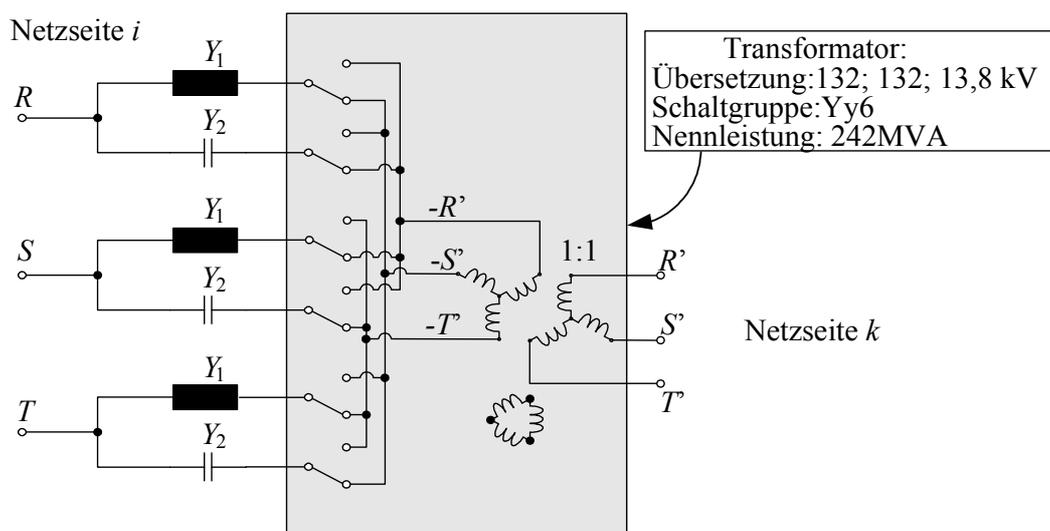


Abbildung 2.2: IPFC Plattsburgh

schenphasenverschaltungen – umgeschaltet und somit der Wirkleistungsfluss umgekehrt werden.

Der Zwischenphasenregler wirkt daher nur auf den stationären Betrieb [1]-[7]. Die Grundprinzipien des IPFC werden in [1] und [2] eingehend untersucht. Bei der Anlage in Plattsburgh war der vorhandene Schrägtransformator (Phase Shift Transformer (PST)) an der Grenze seiner Übertragungsfähigkeit angelangt. Durch den Einbau des IPC konnte die Übertragungsleistung um 33 % von 105 MW auf 140 MW erhöht werden.

2.1 Raumzeiger- und Nullgrößen-Ersatznetzwerk

Die Funktionsweise des IPFC lässt sich mit den Definitionen für die Nullgrößen und die Raumzeiger eines dreiphasigen Systems [25] leicht beschreiben

$$\begin{pmatrix} v_0 \\ \underline{v} \\ \underline{v}^* \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & 2\underline{a} & 2\underline{a}^2 \\ 2 & 2\underline{a}^2 & 2\underline{a} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_R \\ v_S \\ v_T \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

mit $\underline{a} = e^{j\frac{2\pi}{3}}$

Für die Rücktransformation in die natürlichen Koordinaten R , S , und T gilt

$$\begin{pmatrix} v_R \\ v_S \\ v_T \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 2 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 2 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_0 \\ \underline{v} \\ \underline{v}^* \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

Zur Darstellung des IPFC in den entsprechenden Raumzeiger- und Nullgrößen-Ersatznetzwerken wird im Folgenden die Zwischenphasenverschaltung der Admittanzen Y_1 und Y_2 aus Abbildung 2.1 näher untersucht. Mittels der in Abbildung 2.3 gezeigten Verschaltung ergibt sich aus einem Drehstromsystem μ ein um \underline{a} gedrehtes System v . Somit eilt das System μ dem rechten Drehstromsystem v um \underline{a} nach. Die entsprechenden Strom- und Spannungsbeziehungen sind in Abbildung 2.3 eingezeichnet.

Mit den Definitionen aus Gleichung (2.1) ergeben sich folgende Strom- und Spannungsbeziehungen für die Zwischenphasenverschaltung in Modul 1

$$\begin{aligned} \underline{i}_v &= \frac{2}{3} (i_{Rv} + \underline{a} i_{Sv} + \underline{a}^2 i_{Tv}) = \\ &= \frac{2}{3} (\underline{a} i_{R\mu} + \underline{a}^2 i_{S\mu} + i_{T\mu}) = \underline{a} \underline{i}_\mu \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned}\underline{u}_v &= \frac{2}{3} (u_{Rv} + \underline{a} u_{Sv} + \underline{a}^2 u_{Tv}) = \\ &= \frac{2}{3} (\underline{a} u_{R\mu} + \underline{a}^2 u_{S\mu} + u_{T\mu}) = \underline{a} \underline{u}_\mu\end{aligned}\quad (2.4)$$

$$\begin{aligned}i_{v0} &= \frac{1}{3} (i_{Rv} + i_{Sv} + i_{Tv}) = \\ &= \frac{1}{3} (i_{R\mu} + i_{S\mu} + i_{T\mu}) = i_{\mu 0}\end{aligned}\quad (2.5)$$

$$\begin{aligned}u_{v0} &= \frac{1}{3} (u_{Rv} + i_{Sv} + u_{Tv}) = \\ &= \frac{1}{3} (u_{R\mu} + i_{S\mu} + u_{T\mu}) = u_{\mu 0}\end{aligned}\quad (2.6)$$

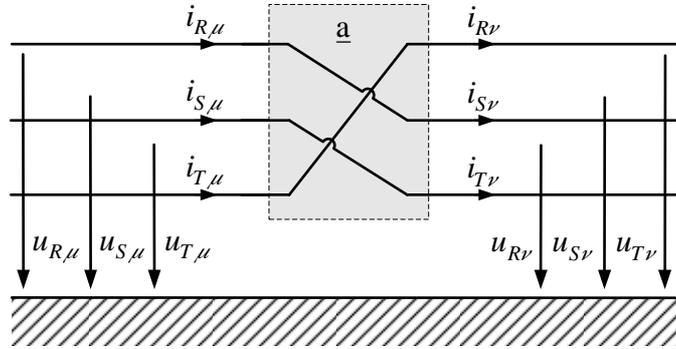


Abbildung 2.3: Drehoperator des Moduls 1

Auf entsprechende Weise lassen sich die Raumzeiger und Nullgrößen für die im Modul 2 gedrehte Admittanzgruppe Y_2 ableiten

$$\begin{aligned}i_v &= \underline{a}^2 i_\mu \\ i_{v0} &= i_{\mu 0} \\ \underline{u}_v &= \underline{a}^2 \underline{u}_\mu \\ u_{v0} &= u_{\mu 0}\end{aligned}\quad (2.7)$$

Abbildungen 2.4 und 2.5 zeigen die in Raumzeiger- und Nullgrößen-Ersatznetzwerke transformierten Darstellungen des dreiphasigen Systems. Dabei werden insbesondere die an den IPFC angeschlossenen Netze Z_i und Z_k nicht als komplexe Größen, sondern als Operatoren gemäß Gleichung (2.8) aufgefasst [25].

$$Zi = \left(R + \omega L \frac{d}{d\omega t} \right) i = \left(R + X \frac{d}{d\omega t} \right) i \quad (2.8)$$

Dies erleichtert die Verallgemeinerung auf komplexere verzweigte Netzstrukturen.

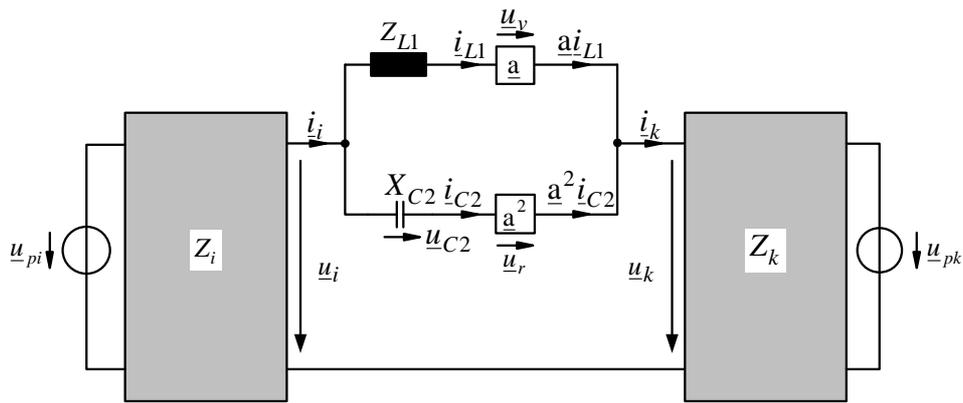


Abbildung 2.4: IPFC Raumzeiger-Ersatznetzwerk

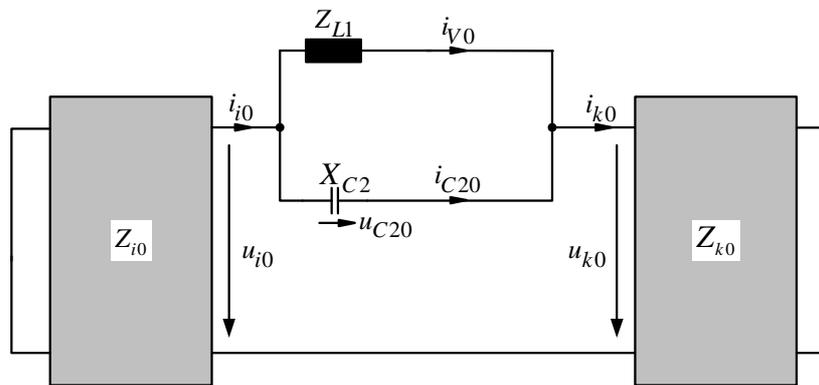


Abbildung 2.5: IPFC Nullgrößen-Ersatznetzwerk

Aus diesen beiden Ersatznetzwerken erhält man die Admittanzgleichungen des IPFC

$$\begin{pmatrix} \dot{i}_i \\ \dot{i}_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_1 + Y_2 & -\underline{a}^2 Y_1 - \underline{a} Y_2 \\ \underline{a} Y_1 + \underline{a}^2 Y_2 & -Y_1 - Y_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{u}_i \\ \underline{u}_k \end{pmatrix} \quad (2.9)$$

$$\begin{pmatrix} i_{i0} \\ i_{k0} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_1 + Y_2 & -Y_1 - Y_2 \\ Y_1 + Y_2 & -Y_1 - Y_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_{i0} \\ u_{k0} \end{pmatrix}$$

Hierbei ist jedoch zu beachten, dass die Stromrichtung auf der Seite k von links nach rechts gerichtet ist. Würde diese Bezugsrichtung umgekehrt, so würden die Matrizen in Gleichung (2.9) den sonst üblichen Admittanzmatrizen entsprechen. Für die spätere Darstellung als Kettenmatrix ist die gewählte Bezugsrichtung jedoch von Vorteil.