

2969

Dr.-Ing. Adolf Müller-Hellmann, Köln

Drehstromantriebe auf Fahrzeugen des Schienen-Nahverkehrs

Zahlreiche Prototypfahrzeuge und Serien
in unterschiedlicher Ausstattung im Einsatz



Dr.-Ing. Adolf Müller-Hellmann, Köln

Drehstromantriebe auf Fahrzeugen des Schienen-Nahverkehrs

Zahlreiche Prototypfahrzeuge und Serien in unterschiedlicher Ausstattung im Einsatz

Damit ein elektrischer Bahnantrieb den ihm gestellten Anforderungen gerecht werden kann, muß er mehrere Aufgaben erfüllen. Der im Antrieb enthaltene elektromechanische Energiewandler muß die nach dem Zugkraft(F)-Geschwindigkeits-(v)-Diagramm gewünschte mechanische Leistung bereitstellen. Darüber hinaus ist im Antrieb ein Frequenzwandler erforderlich, da die Fahrzeuggeschwindigkeit in weiten Bereichen verstellbar sein muß.

Zusätzlich zum elektromechanischen und zum Frequenzwandler wird ein Leistungsstellglied benötigt, weil innerhalb des F-v-Diagramms alle Betriebspunkte einstellbar sein müssen, die Fahrdrachtspannung aber – abgesehen von den zulässigen Toleranzen – konstant ist (Abbildung 1) [1].

Hinsichtlich der Realisierung der elektromechanischen Energiewandlung, der Frequenzwandlung und der Leistungsverstellung sind die folgenden Optima anzustreben.

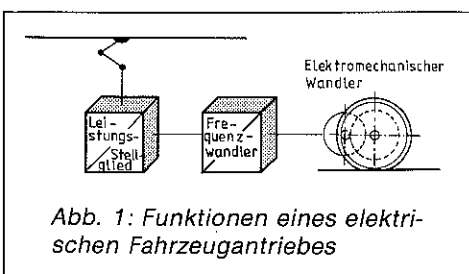


Abb. 1: Funktionen eines elektrischen Fahrzeugantriebes

- Der elektromechanische Wandler soll klein, leicht und möglichst wartungsfrei sein.
- Die Frequenzwandlung und die Leistungsverstellung sollen kontinuierlich und verschleißfrei sowie möglichst aufwandsarm und wartungsfrei durchgeführt werden. Um Gleit- und Schleudervorgänge beherrschen zu können, ist eine hohe Dynamik im gesamten Geschwindigkeitsbereich wünschenswert.
- Für die Leistungsverstellung sollen solche Verfahren verwendet werden, die die bei Bremsvorgängen freiwerdende Energie nutzen können.

Mit Hilfe von Leistungshalbleitern aufgebaute umrichter gespeiste Drehstromantriebe können diese Zielvorstellungen bereits weitgehend realisieren. Die in [2-7] dargestellte Einführung dieser Antriebe hat sich weiter beschleunigt. Im folgenden wird über den weltweiten Stand der Entwicklung und Einführung dieser Technik berichtet.

Die verwendeten Umrichter

Bei Drehstrom-Fahrmotoren müssen die Ständerwicklungen mit kontinuierlich verstellbaren Strömen variabler Amplitude und Frequenz gespeist werden können. Dieses läßt sich mit zwei verschiedenen Verfahren realisieren.

Beim Zwischenkreisumrichter mit eingepprägter Zwischenkreisspannung wird ein Drehspannungssystem erzeugt, welches in Amplitude und Frequenz so variiert werden kann, daß sich die entsprechend der Drehzahl- (Frequenzwandlung) und der Zugkraftanforderung (Leistungsverstellung) benötigten Motorströme einstellen können[8]. Da die sich ergebenden Motorströme mit den vom Wechselrichter gelieferten Spannungen nicht in Phase

sind, müssen die Schaltelemente des Wechselrichters Ströme in beiden Richtungen führen können. Deshalb werden sie entweder aus der Antiparallelschaltung eines Thyristors und einer Diode oder als rückwärtsleitender Thyristor realisiert.

Abbildung 2 verdeutlicht das Prinzipschaltbild des Wechselrichters, eine ausgeführte Löscheinrichtung und das im folgenden verwendete Symbol. Zusätzlich sind der zeitliche Verlauf der Motorspannungen und Motorströme dargestellt.



DER AUTOR

Adolf Müller-Hellmann (40) studierte Elektrotechnik an der Staatlichen Ingenieurschule Osnabrück und an der RWTH Aachen. Nach Industrie- und Assistententätigkeit Promotion 1979. Er ist heute Fachbereichsleiter für Schienenfahrzeuge, elektrische Bahnanlagen, Betriebsfunk, Zugsicherungs- und -informationstechnik im Verband öffentlicher Verkehrsbetriebe (VÖV) in Köln.

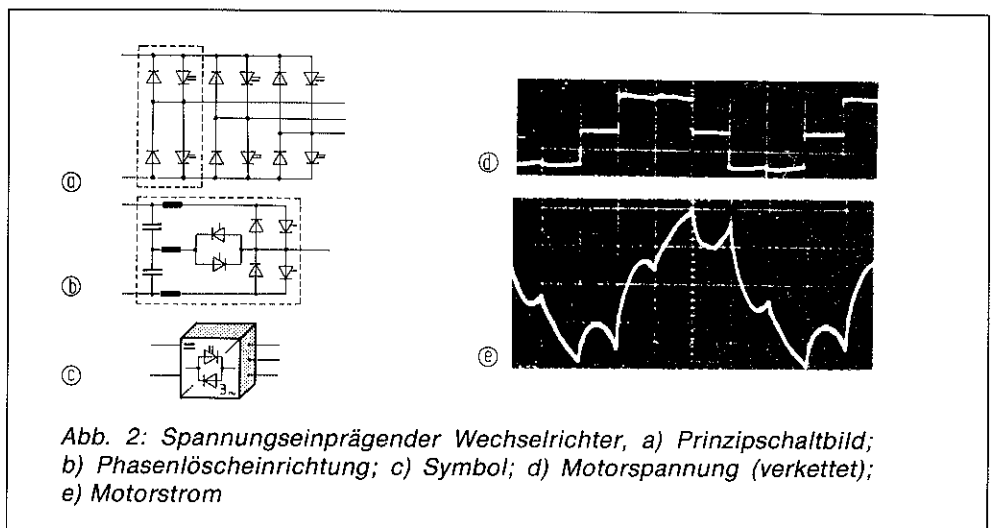


Abb. 2: Spannungseinprägender Wechselrichter, a) Prinzipschaltbild; b) Phasenlöscheinrichtung; c) Symbol; d) Motorspannung (verkettet); e) Motorstrom

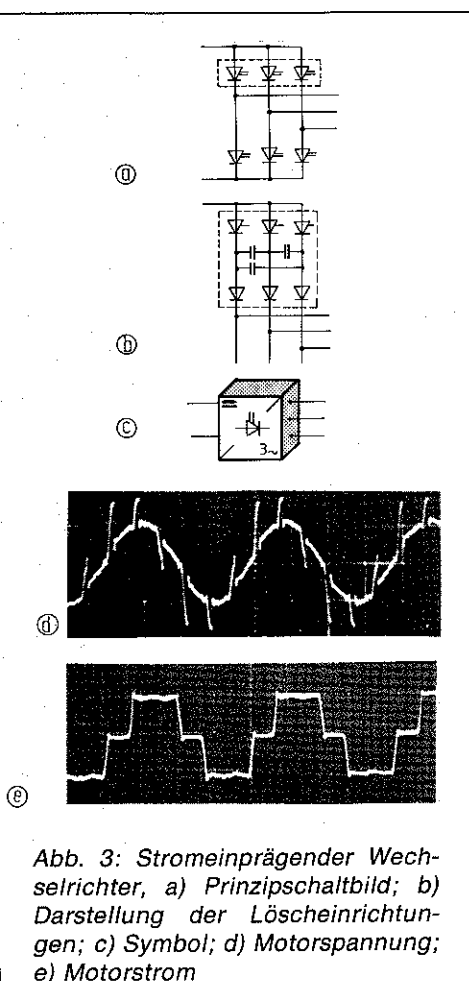


Abb. 3: Stromeinprägender Wechselrichter, a) Prinzipschaltbild; b) Darstellung der Löscheinrichtungen; c) Symbol; d) Motorspannung; e) Motorstrom

Beim Zwischenkreisumrichter mit eingepprägtem Zwischenkreisstrom wird der Drehstrommotor direkt mit dem entsprechenden dem Betriebspunkt gewünschten Drehstromsystem versorgt. Die Schaltelemente des Wechselrichters brauchen daher nur für eine Stromrichtung ausgelegt zu werden. Da jedoch die sich einstellende Maschinenspannung wiederum nicht mit den Motorströmen in Phase ist, müssen die Elemente dieses Wechselrichters Spannungen in beiden Richtungen aufnehmen können.

Das Prinzipschaltbild dieses Wechselrichters sowie die zugehörigen Löscheinrichtungen und das im folgenden verwendete Symbol verdeutlicht Abbildung 3. Außerdem sind der zeitliche Verlauf der Motorspannungen und der Motorströme dargestellt [9].

Prinzipiell sind auch maschinengeführte Umrichter mit Synchronfahrmotoren denkbar. Sie sind jedoch bisher für Nahverkehrsanwendungen nicht ausgeführt worden.

Prinzipielle Ausführungsformen

Wie Abbildung 4 verdeutlicht, kann man drei prinzipielle Ausführungsformen der elektrischen Ausrüstung der Antriebe mit Drehstromfahrmotoren unterscheiden.

Die Lösung a) zeichnet sich dadurch aus, daß die Leistungsverstellung und die Frequenzwandlung im Umrichter aufgeteilt werden. Die Amplitude des Stromes wird dem Wechselrichter vom Gleichstromsteller über eine Zwischenkreisdrossel eingepprägt. Dazu muß der Steller mit variabler Ausgangsspannung \bar{U}_d betrieben werden können. Diese Gleichstromsteller, auch *Step down Chopper* genannt, werden heute weltweit [10] zur Speisung von Gleichstromantrieben eingesetzt. Ihr prinzipieller für den Fahr- und Bremsbetrieb geeigneter Aufbau sowie das im folgenden verwendete Symbol zeigt Abbildung 5 a. Der untere der beiden Thyristoren kann durch ein Schütz ersetzt werden, da er im Fahrbetrieb dauernd durchgeschaltet betrieben wird und im Bremsbetrieb dauernd sperren muß.

Der Wechselrichter übernimmt die Frequenzverstellung, da er prinzipiell nur den ihm eingepprägten Strom auf die einzelnen Phasen des Drehstrommotors verteilen kann.

Bei den unter b) angeordneten Lösungen werden sowohl die Leistungsverstellung als auch die Frequenzwandlung mit Hilfe eines Puls-Weiten-Modulationsverfahrens vom Wechselrichter durchgeführt. Die

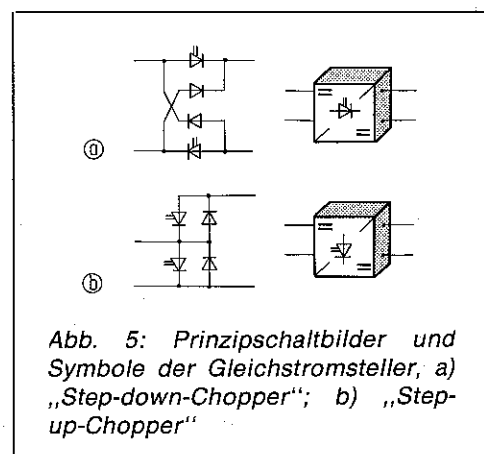


Abb. 5: Prinzipschaltbilder und Symbole der Gleichstromsteller, a) „Step-down-Chopper“; b) „Step-up-Chopper“

einzelnen Varianten unterscheiden sich hauptsächlich hinsichtlich des verwendeten elektromechanischen Energiewandlers. Neben der rotierenden Asynchronmaschine sind ein Kurzstator- sowie ein Langstator-Antrieb [11] dargestellt. Bei den ersten beiden Lösungen wird der Zwischenkreiskondensator C_d direkt aus dem Gleichspannungsnetz gespeist. Bei der letztgenannten Lösung, bei der die Statorwicklung in die Trasse eingelegt wird, werden die Zwischenkreiskondensatoren der stationär aufgestellten Umrichter über Gleichrichter aus einem Drei-Phasen-Netz versorgt.

Die Lösung c) ist dadurch gekennzeichnet, daß zusätzlich zum Wechselrichter der unter b) dargestellten Lösungen ein

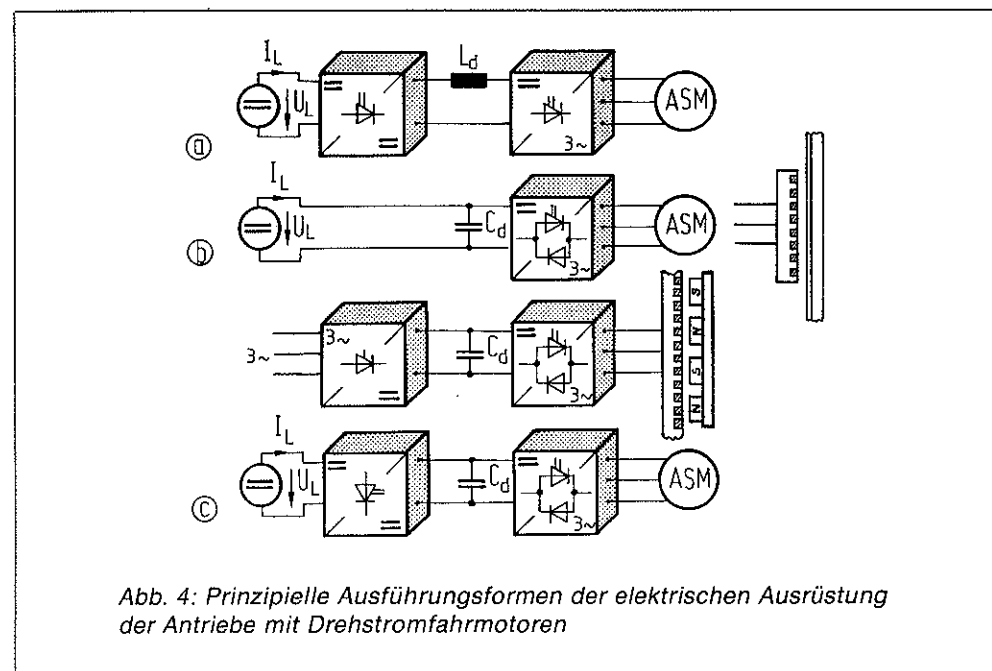


Abb. 4: Prinzipielle Ausführungsformen der elektrischen Ausrüstung der Antriebe mit Drehstromfahrmotoren



Tabelle 1: Prinzipschaltbilder der Prototypfahrzeuge mit stromeinprägenden Umrichtern

Gleichstromsteller eingesetzt wird, der die Zwischenkreisspannung konstant hält. Um die Spannungsfestigkeit der zur Verfügung stehenden Halbleiter besser auszunutzen und die stromabhängigen Verluste verringern zu können, transformiert er die Zwischenkreisspannung auf ein deutlich höheres Niveau als das der Netzspannung. Er wird deshalb auch Hochsetzsteller oder „Step-up-Chopper“ genannt. Sein prinzipieller Aufbau sowie das im folgenden verwendete Symbol verdeutlicht Abbildung 5 b.

Beschreibung ausgeführter Anlagen

Entsprechend den in Abbildung 4 verdeutlichten Lösungen werden in diesem Abschnitt Prototypen sowie Serienfahrzeuge beschrieben. Um deren Prinzipschaltbilder übersichtlich zu halten, wurden keine Widerstandsbremseinrichtungen und Schalter mitgezeichnet.

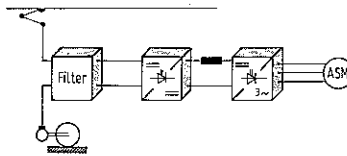
Prototypfahrzeuge mit stromeinprägenden Umrichtern

Prototypuntersuchungen an stromeinprägenden Umrichtern auf Nahverkehrsfahrzeugen wurden bzw. werden z. Z. in Nürnberg, Wien, Mülheim, Essen, Hamburg, Zürich und Paris durchgeführt. Die Tabelle 1 zeigt die Zusammenstellung der Prinzipschaltbilder der realisierten Antriebe. In der Tabelle 2 sind die zugehörigen technischen Daten angegeben.

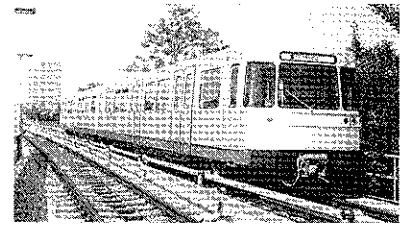
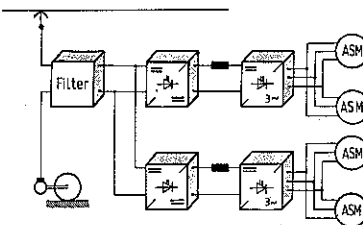
Als erstes Fahrzeug wurde 1975 ein Drehgestell eines vierachsigen Straßenbahnwagens der VAG Nürnberg mit einem Drehstromantrieb mit stromeinprägendem Umrichter ausgestattet [12].

1977/78 folgte die Ausrüstung eines kompletten Doppeltriebwagens der Achsfolge B'B' + B'B' für die Wiener Verkehrsbetriebe [13], an die sich die Ausrüstung eines sechsachsigen Stadtbahnwagens vom Typ M der Verkehrsbetriebe Mülheim/Ruhr angeschlossen [14]. Beim letztgenannten Fahrzeug wurden zwei integrierte SIMOTRAC-Antriebe (siehe Abbildung 6) eingesetzt. Bei diesem Konstruktionsprinzip können die Motorlagerschilde entfallen, da die Lagerung des Motors von den Getrieberitzellagerungen mit übernommen wird.

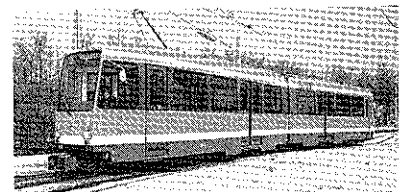
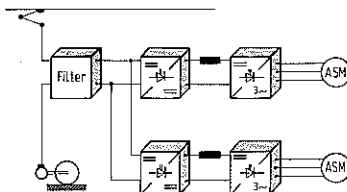
Verkehrs-Aktiengesellschaft (VAG) Nürnberg



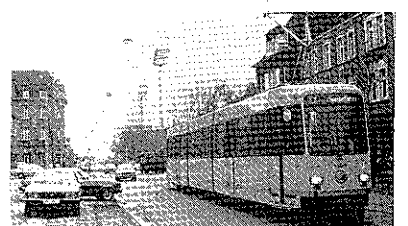
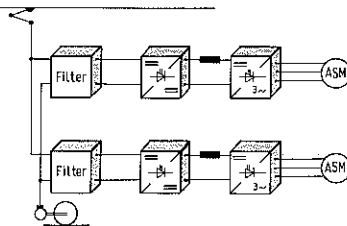
Wiener Verkehrsbetriebe



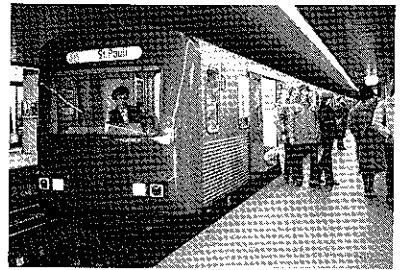
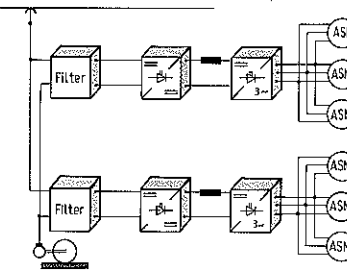
Betriebe der Stadt Mülheim a. d. Ruhr



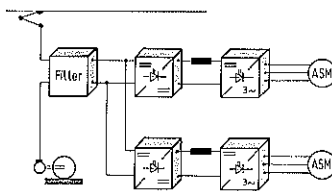
Essener Verkehrs-Aktiengesellschaft (EVAG)



Hamburger Hochbahn AG



Verkehrsbetriebe der Stadt Zürich (VBZ)



U-Bahn Paris (R.A.T.P.)

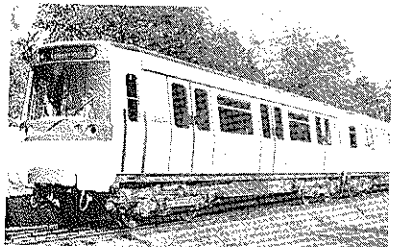
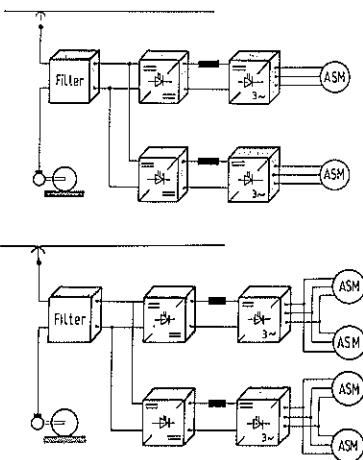


Tabelle 2: Technische Daten der Prototypfahrzeuge mit stromeinprägenden Umrichtern

Stadt	Nürnberg	Wien	Mülheim/Ruhr	Essen	Hamburg	Zürich	Paris	Paris
Verkehrssystem	Straßenbahn	U-Bahn	Stadtbahn	Stadtbahn	U-Bahn	Straßenbahn	U-Bahn	U-Bahn
Netzspannung	600 V	750 V	600 V	600/750 V	750 V	600 V	750 V	750 V
Fahrleitungsanlage	Oberleitung	3. Schiene	Oberleitung	Oberleitung	3. Schiene	Oberleitung	3. Schiene	3. Schiene
Fahrzeugtyp	Beiwagen	2000	M6	M6	DT-3	Tram 2000	MF77	MF77
Achsfolge	B'2'	B'B'+B'B'	B'2'B'	B'2'2'B'	Bo'Bo'2'Bo'	B'2'B'	B'B'	Bo'Bo'
Getriebeübersetzung	1:5,857	1:5,38	1:5,667	1:5,667	1:11,025	1:6,555	1:5,15	1:8,17
Antriebstyp	Zweiachs-Längsantrieb	Zweiachs-Längsantrieb	Integr. Zweiachs-Längsantrieb	Zweiachs-Längsantrieb	Einzelachs-antrieb querliegend	Zweiachs-Längsantrieb	Monomoteur querliegend	Einzelachs-antrieb querliegend
Anzahl der Umrichter	1	2	2	2	2	2	2	2
Anzahl der Fahrmotoren	1	4	2	2	6	2	2	4
Höchstgeschwindigkeit		80 km/h	70 km/h	70 km/h	80 km/h	67 km/h	100 km/h	100 km/h
Motorpolzahl	6	6	6	4	4	6	4	4
Höchstzahl min ⁻¹	3000 min ⁻¹	2800 min ⁻¹	3600 min ⁻¹	3600 min ⁻¹	5860 min ⁻¹	3600 min ⁻¹	3310 min ⁻¹	5250 min ⁻¹
Dauerleistung + zugehörige Drehzahl	250 kW	200 kW ¹⁾	190 kW	225 kW ¹⁾	125 kW	225 kW	280 kW	125 kW
Gewicht		1290 kg		850 kg	540 kg	840 kg	900 kg	500 kg
max. Wechselrichterfrequenz	100 Hz	140 Hz	180 Hz	120 Hz	195 Hz	190 Hz	115 Hz	180 Hz
Kühlung	Luft	Luft	Luft	Luft	Freon	Luft	Freon	Luft
Betriebseinsatz	1975	1978	1978	1981	1982	1983	1984	1984
Hersteller der elektrischen Ausrüstung	Siemens	Siemens	Siemens	Kiepe	BBC	BBC	Traction-CEM-OERLIKON (T.C.O.)	Jeumont-Schneider

¹⁾ Stundenleistung

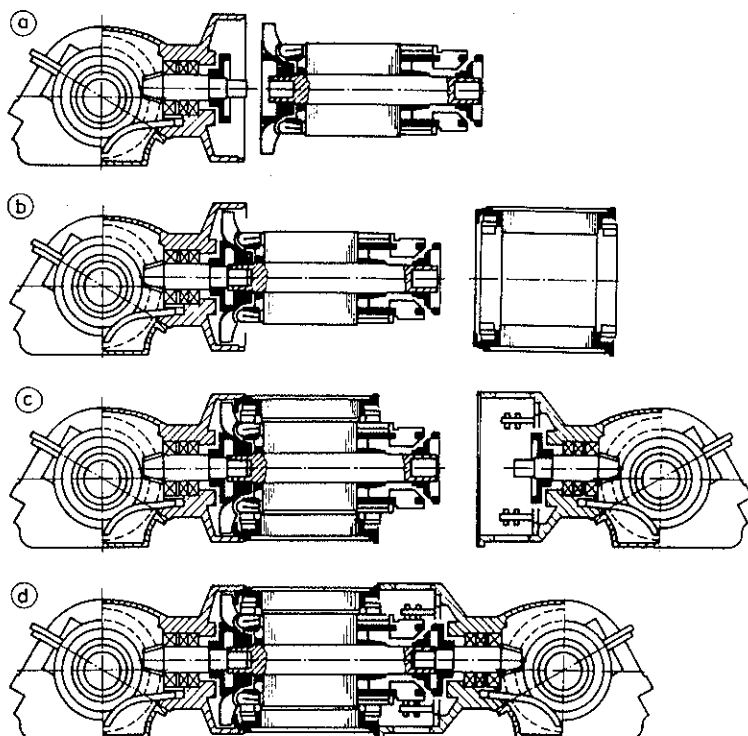


Abb. 6: Montage eines „SIMOTRAC“-Antriebs [15]

a) Montieren der Baugruppe Läufer; b) Montieren der Baugruppe Ständer; c) Montieren der Baugruppe Getriebe; d) Montieren der kompletten Fahreinheit

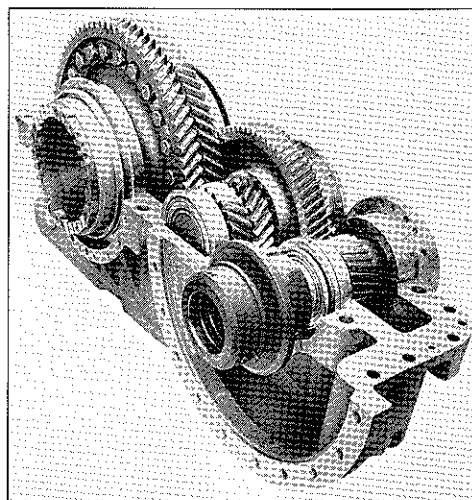


Abb. 7: Zweistufiges Getriebe des Kardanhohlwellenantriebs für den Prototyp DT3-DAT2 der HHA

Auffälligstes Unterscheidungsmerkmal der Ausrüstung für den Essener Stadtbahnwagen M8D ist die Erweiterung der Redundanz der beiden Antriebe. Jedem Antrieb wurde ein eigenes Filter zugeordnet [16].

Bei dem Prototyp der Hamburger Hochbahn ist besonders der gewählte elektromechanische Energiewandler in Verbindung mit dem zugehörigen Getriebe zu beachten. Für den querliegenden Einzelradantrieb wurde ein wassergekühlter

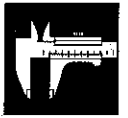


Tabelle 3: Prinzipschaltbilder der Serienfahrzeuge mit stromeinprägenden Umrichtern

Drehstrommotor eingesetzt, dessen Maximaldrehzahl 6000 min^{-1} beträgt. Das zugehörige Getriebe ist als zweistufiges Parallelwellengetriebe (s. Abb. 7) mit der Übersetzung 1:11,025 ausgeführt [17]. Außerdem wurde bei diesem Prototyp die Siedekühlung des Umrichters in der Ausführung als Dosenkühlung eingesetzt.

Der prinzipielle Aufbau und die realisierten Daten der Ausrüstung des Züricher Fahrzeugs vom Typ *TRAM 2000* [18] entsprechen in etwa denen des Mülheimer Stadtbahnwagens.

Die RATP, Paris, untersucht zwei unterschiedliche mit stromeinprägenden Umrichtern ausgerüstete Motorwagen des Typs MF 77 [19]. Das eine Fahrzeug dient primär zur Untersuchung des Umrichters, der mit einer Freon-Siedekühlung ausgeführt ist und dessen Wechselrichter im Startbereich gepulst [20] betrieben wird. Anstelle des Monomoteur-Gleichstrommotors wurde ein Drehstrommotor eingebaut. Das zweite Fahrzeug dient vornehmlich zur Untersuchung des mechanischen Energiewandlers. Dazu hat es neuentwickelte Drehgestelle erhalten, deren Radsätze durch querliegende Einzelmotoren angetrieben werden. Die Übersetzung des zugehörigen zweistufigen Getriebes beträgt 1:8,17. Der Umrichter ist luftgekühlt ausgeführt, und auf den gepulsten Betrieb des Wechselrichters wird verzichtet [21].

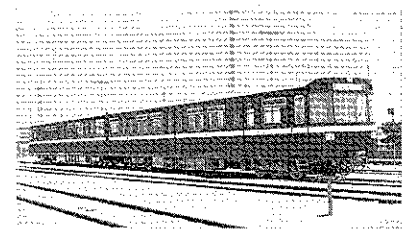
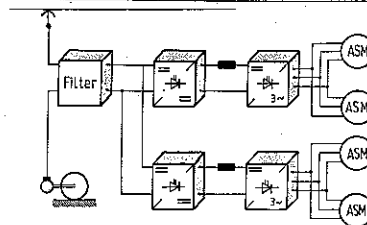
Serienfahrzeuge mit stromeinprägenden Umrichtern

Im Zeitraum April 1981 bis Dezember 1982 nahm die VAG Nürnberg 22 DTW in Betrieb. Die restlichen zehn Fahrzeuge werden in diesem Jahr ausgeliefert [22]. Integrierte Zweiachslängsantriebe der Bauart *SIMOTRAC* mit einem Achsstand von 2100 mm werden eingesetzt.

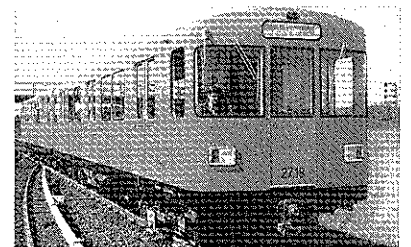
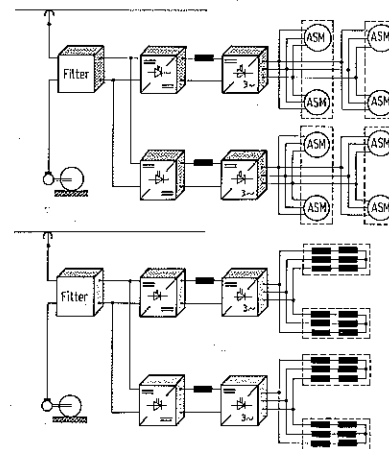
Bei den sechs DTW der Serie F 79.3 der BVG wurden Zweiachsantriebe mit Doppeläußermotoren verwendet (s. Abb. 8).

Drei sind als *SIMOTRAC*-Antriebe mit gemeinsamer Ständerwicklung und drei mit vollständig entkoppelten Motoren ausgeführt. Der Achsstand im Drehgestell beträgt 1800 mm. 39 DTW der Serie F84 mit *SIMOTRAC*-Antrieben werden bis Anfang 1985 geliefert [23, 24].

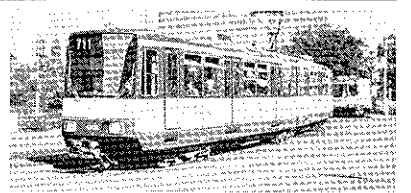
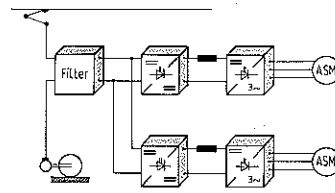
Verkehrs-Aktiengesellschaft (VAG) Nürnberg



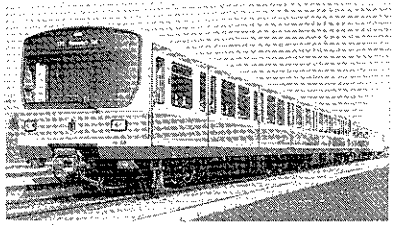
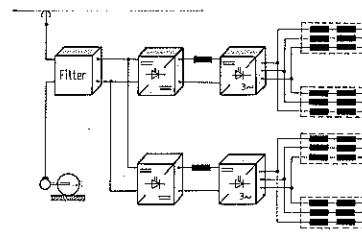
U-Bahn Berlin (BVG)



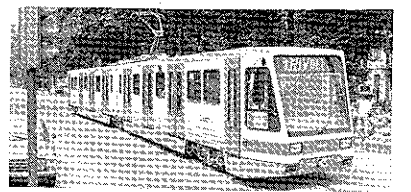
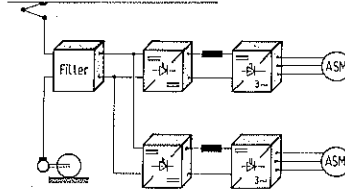
Rheinische Bahngesellschaft AG Düsseldorf



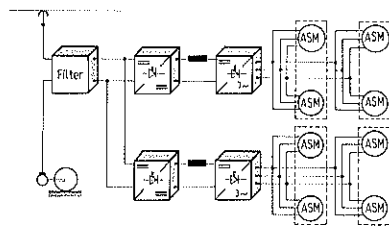
U-Bahn München



Verkehrsbetriebe von Turin



U-Bahn Madrid



Betriebe der Stadt Mülheim a. d. Ruhr

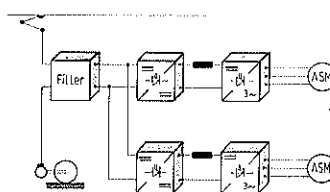




Tabelle 4: Technische Daten der Serienfahrzeuge mit stromeinprägenden Umrichtern

Stadt	Nürnberg	Berlin	Düsseldorf	München	Turin	Madrid	Mülheim	Wien
Verkehrssystem	U-Bahn	U-Bahn	Stadtbahn	U-Bahn	Stadtbahn	U-Bahn	Stadtbahn	U-Bahn
Netzspannung	750 V	750 V	600/750 V	750 V	600 V	600 V	600 V	750 V
Fahrleitungsanlage	3. Schiene	3. Schiene	Oberleitung	3. Schiene	Oberleitung	3. Schiene	Oberleitung	3. Schiene
Fahrzeugtyp	Doppeltriebwagen	Doppeltriebwagen	Gelenktriebwagen B80D	Doppeltriebwagen Typ B 1.4	Gelenktriebwagen Serie 4000	Doppeltriebwagen Serie 2000	Gelenktriebwagen Serie M6D	Doppeltriebwagen
Anzahl der Fahrzeuge	32	6+39 ²⁾	12+24+(31) ⁶⁾	6	40	6+25 ¹⁾	4	9 ⁷⁾
Achsfolge	B'B'+B'B'	Bo'Bo'+Bo'Bo'	B'2'B'	Bo'Bo'+Bo'Bo'	B'2'B'	Bo'Bo'+Bo'Bo'	B'2'B'	Bo'Bo'+Bo'Bo'
Getriebeübersetzung	1:7,125	1:6,625	1:5,625	1:6,625	1:5,66	1:6,889	1:5,667	1:7,8
Antriebstyp	Integr. Zweiachs-Längsantrieb	Zweiachs-Längsantrieb ⁴⁾	Integr. Zweiachs-Längsantrieb	Zweiachs-Längsantrieb ³⁾	Zweiachs-Längsantrieb	Zweiachs-Längsantrieb ³⁾	Integr. Zweiachs-Längsantrieb	Einzelachs-antrieb querliegend
Anzahl der Umrichter	2	2	2	2	2	2	2	2
Anzahl der Fahrmotoren	4	8	2	8	2	8	2	8
Höchstgeschwindigkeit	80 km/h	80 km/h	90 km/h	80 km/h	75 km/h	70 km/h	70 km/h	80 km/h
Motorpolzahl	6	6	6	6	6	6	6	6
Höchst-drehzahl	3600 min ⁻¹	3600 min ⁻¹	3600 min ⁻¹	3600 min ⁻¹	3600 min ⁻¹	3300 min ⁻¹	3600 min ⁻¹	3900 min ⁻¹
Dauerleistung + zugehörige Drehzahl	195 kW 982 min ⁻¹	178 kW ⁵⁾	220 kW 1250 min ⁻¹	185 kW 1000 min ⁻¹	210 kW 1241 min ⁻¹	120 kW	190 kW 1250 min ⁻¹	120 kW 1240 min ⁻¹
Gewicht	800 kg	970 kg						670 kg
max. Wechselrichterfrequenz	180 Hz	180 Hz	180 Hz	180 Hz	180 Hz	160 Hz	180 Hz	
Kühlung	Luft	Luft	Luft	Luft	Luft	Luft	Luft	Freon
Betriebseinsatz ab	1981	1981	1981	1981	1984	1984	1984	1985
Hersteller der elektr. Ausrüstung	Siemens	AEG/Siemens	BBC/Siemens	BBC/Siemens	AEG	AEG	Siemens	AEG/BBC/Elin/Kiepe/Siemens

¹⁾ Fahrzeuge der Achsfolge Bo'Bo'+2'2' ²⁾ 39 DTW mit SIMOTRAC-Antrieben mit Doppelläufern und gemeinsamer Ständerwicklung ³⁾ mit Doppelläufern
⁴⁾ 3 SIMOTRAC-Antriebe mit Doppelläufern und gemeinsamer Ständerwicklung sowie 3 Antriebe mit vollständig entkoppelten Motoren per Drehgestell
⁵⁾ Leistung pro Doppelmotor ⁶⁾ Die Beschaffung von weiteren 31 Fahrzeugen ist geplant
⁷⁾ 6 DTW erhalten eine Ausrüstung entsprechend dem Prototyp der HHA (siehe Tabelle 2)

Bei den 1981 gelieferten 12 Fahrzeugen der Serie B 80 für die Rheinische Bahngesellschaft Düsseldorf handelte es sich um die erste Stadtbahnwagenserie, die mit Drehstromantrieben ausgerüstet wurde [25]. Die Unterbringung der Ausrüstung ist bei diesen Fahrzeugen schwieriger als bei

U-Bahn-Wagen, da Einbauraum durch die benötigten ausklappbaren Trittstufen verlorengeht. Die nächste Fahrzeugserie, deren Auslieferung Ende 1984 beginnen soll, wird aus Aluminiumprofilen in Integralbauweise hergestellt [26]. Die Beschaffung weiterer 31 Fahrzeuge ist geplant.

Die sechs Doppeltriebwagen des Typs B 1.4 der Verkehrsbetriebe München sind ebenfalls mit Doppelläufermotoren ausgerüstet [27].

Abb. 8: Längsliegende Drehstromasynchronfahrmotoren mit Doppelläufer

a) Doppelfahrmotor BAS 5638/6D (AEG); b) Doppelrotorfahrmotor 1TB 2022-2JB (Siemens)

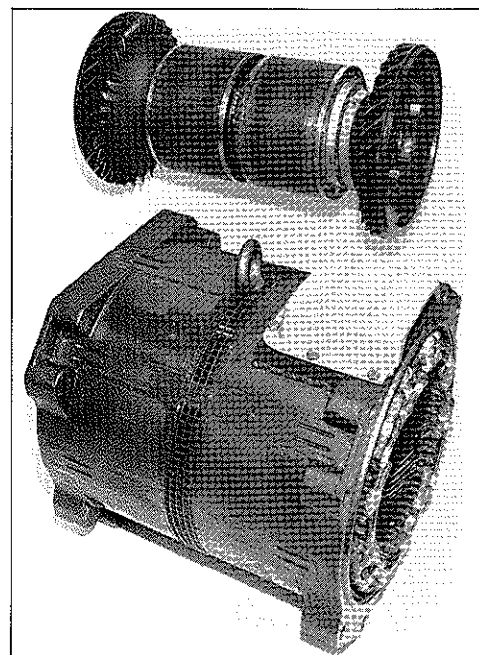
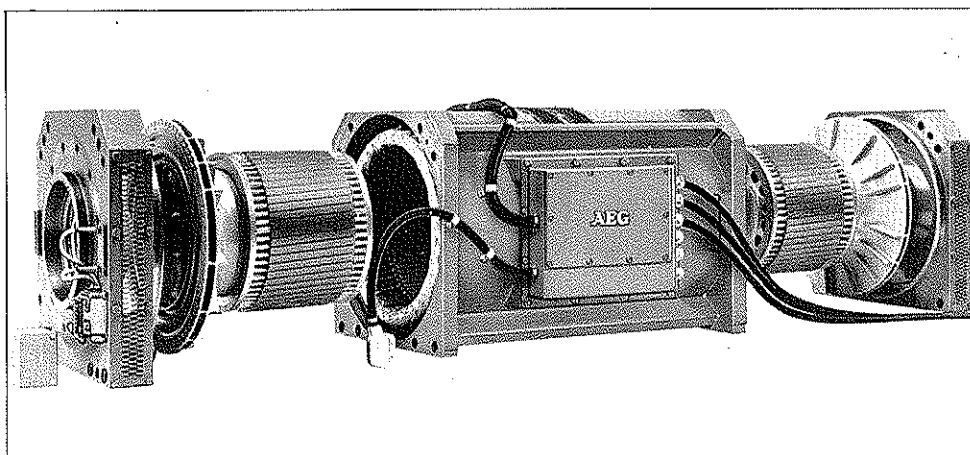
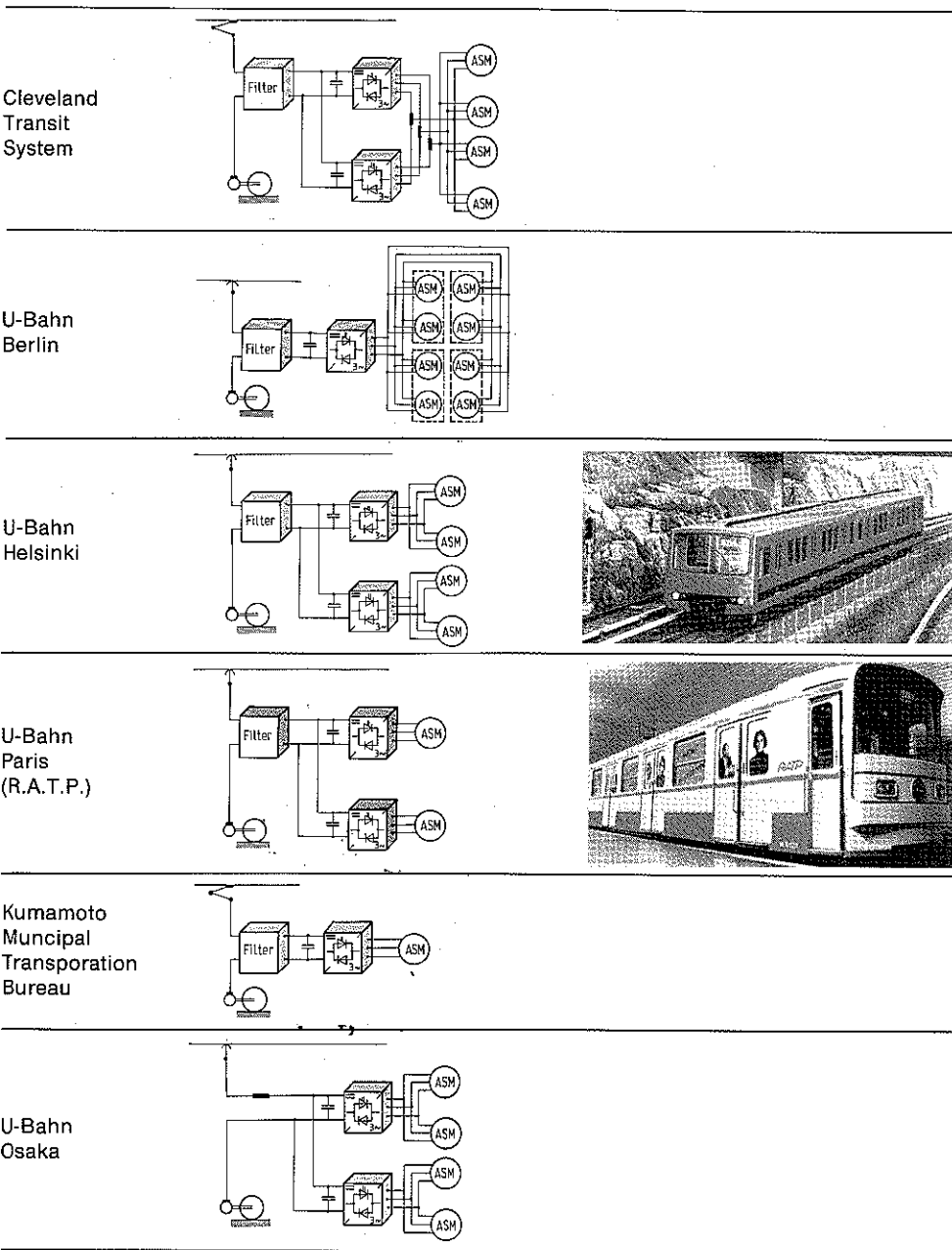




Tabelle 5: Prinzipschaltbilder von Fahrzeugen mit spannungseinprägenden Wechselrichtern



¹⁾ Schaltbild eines Triebwagens

40 der 100 neuen sechssachsigen Gelenktriebwagen der Verkehrsbetriebe Turin erhalten Drehstromantriebe mit stromeinprägenden Umrichtern und einem Motor pro Drehgestell in der bewährten Zweiachs-längsbauweise [28].

Für die U-Bahn Madrid werden sechs DTW ausgerüstet. Eine Bestellung über weitere 25 Fahrzeuge der Achsfolge Bo'Bo' + 2'2' liegt vor.

Wie weitere Fahrzeuge der Baureihe M6D wurden für Mülheim/Ruhr ausgeliefert.

Die Wiener Verkehrsbetriebe werden, abweichend vom Prototyp, bei neun DTW Einzelachs-antriebe mit wassergekühlten Motoren einsetzen. Sechs Fahrzeuge sollen Antriebe mit zweistufigem Getriebe, entsprechend dem Prototyp der Hamburger Hochbahn [17], erhalten, während die anderen mit einstufigem Getriebe ausgeführt werden.

Die Prinzipschaltbilder der Antriebe sowie die zugehörigen technischen Daten sind in den Tabellen 3 und 4 zusammengestellt.

Fahrzeuge mit spannungseinprägenden Wechselrichtern

In Tabelle 5 sind die Prinzipschaltbilder und in Tabelle 6 die technischen Daten der Antriebe mit spannungseinprägenden Wechselrichtern angegeben.

Ab 1969 wurden in Cleveland Nahverkehrstriebwagen mit spannungseinprägenden Wechselrichtern untersucht. Zwei parallelgeschaltete Wechselrichter speisten eine Drehstromsammelschiene, an der vier Fahrmotoren betrieben wurden [2].

Als erstes U-Bahn-Fahrzeug mit Drehstromfahrmotoren wurde 1977 ein umgebauter DTW der Baureihe F76 bei der BVG im Fahrgastbetrieb eingesetzt. Alle acht Fahrmotoren wurden von einem Wechselrichter gespeist. Bemerkenswert war besonders die Einführung eines Zweiachs-längsantriebes mit mechanisch entkoppelten Achsen [29].

Ab 1977 wurden DTW mit spannungseinprägenden Drehstromfahrmotoren bei der U-Bahn in Helsinki getestet [30]. 1982 wurde der Betrieb der U-Bahn mit Fahrgästen aufgenommen. Wegen der langen Erprobungszeit zeichnen sich diese Fahrzeuge durch eine sehr hohe Verfügbarkeit aus [31]. Wegen der überwiegend kalten Witterung wurde keine Netzurückspeisung vorgesehen. Die beim Bremsen rückgespeiste Energie wird zur Wagenheizung verwendet.

Seit 1982 untersucht die RATP, Paris, Drehstromantriebe mit spannungseinprägenden Wechselrichtern, die in einen Motorwagen der Serie MF67 eingebaut wurden. Die Wechselrichter sind in Freonkühlung ausgeführt [32].

In Japan werden spannungseinprägende Wechselrichter für Drehstromantriebe in Kumamoto [33] und Osaka [34] eingesetzt. Besonders bemerkenswert ist die Ausrüstung der U-Bahn-Motorwagen für Osaka, da dort erstmals GTO-Wechselrichter verwendet werden, die ohne Parallel- und Reihenschaltung von Leistungshalbleitern aufgebaut sind.

Es werden abschaltbare Thyristoren mit 2500 V Sperrspannung, 2000 A abschaltbarem Strom und 800 A Dauergrenzstrom eingesetzt.

Spannungseinprägende Wechselrichter finden auch Anwendung bei automatisch betriebenen Nahverkehrsbahnen. Als Beispiel für die Speisung eines Kurzstator-Liniarmotors sei auf die Magnetbahn in Birmingham hingewiesen [35], die den neu-



Tabelle 6: Fahrzeuge mit spannungseinprägenden Wechselrichtern

Stadt	Cleveland	Berlin	Helsinki	Paris	Kumamoto	Osaka
Verkehrssystem	Stadtbahn	U-Bahn	U-Bahn	U-Bahn	Straßenbahn	U-Bahn
Netzspannung	600 V	750 V	750 V	750 V	600 V	750 V
Fahrleitungsanlage	Oberleitung	3. Schiene	3. Schiene	3. Schiene	Oberleitung	3. Schiene
Fahrzeugtyp	Airporter	Doppeltriebwagen F76	Doppeltriebwagen M100	Motorwagen MF67	4achs. Wagen Serie 8200	Motorwagen
Anzahl der Fahrzeuge	3	1	42	1	2	6
Achsfolge	Bo'+Bo'	Bo'Bo'+Bo'Bo'	Bo'Bo'+Bo'Bo'	B'B'		Bo'Bo'
Getriebeübersetzung	1:6,23	1:6,14	1:7,12	1:5,15		
Antriebstyp	Einzelachsantrieb	Zweiachs-Längsantrieb ¹⁾	Einzelachs-antrieb querliegend	Monomotor querliegend		Einzelachs-antrieb
Anzahl der Wechselrichter	2	1	4	2	1	2
Anzahl der Fahrmotoren	4	8	8	2	1	4
Höchstgeschwindigkeit		70 km/h	80 km/h	80 km/h	40 km/h	70 km/h
Motorpolzahl	4	6	4	6	4	
Höchstzahl	4500 min ⁻¹	3000 min ⁻¹	4500 min ⁻¹	2670 min ⁻¹		3600 min ⁻¹
Dauerleistung + zugehörige Drehzahl	110 kW	70 kW	125 kW	250 kW	120 kW	140 kW
Gewicht	340 kg	518 kg	490 kg	1200 kg		1600 min ⁻¹
max. Wechselrichterfrequenz	150 Hz	150 Hz	150 Hz	135 Hz	75 Hz	130 Hz
Kühlung	Luft	Luft	Luft	Freon	Freon	Freon
Betriebseinsatz	1972	1977	1982	1982	1982	1984
Hersteller der elektr. Ausrüstung	WABCO	AEG	Strömberg	Alsthom-Atlantique	Mitsubishi	Hitachi Toshiba Mitsubishi

¹⁾ mit Doppelmotoren

en Flughafen mit der 650 m entfernt liegenden Bahnstation verbinden soll.

Die M-Bahn repräsentiert die andere in Abbildung 4 dargestellte Betriebsform. Der Wechselrichter speist in diesem Fall Abschnitte der in die Trasse eingelegten Statorwicklung eines synchronen Langstator-Linearmotors [36].

Fahrzeuge mit spannungseinprägenden Umrichtern

Die Prinzipschaltbilder und die technischen Daten dieser Fahrzeuge zeigt Tabelle 7. Bemerkenswert ist der Einsatz vollständig geschlossener gegen Umwelteinflüsse unempfindlicher Fahrmotoren bei den Rotterdamer Fahrzeugen. Fahrmotoren dieser Bauart werden auch bei den Fahrzeugen der U-Bahn Helsinki eingesetzt. Diese Technik wird ebenfalls von der Firma Garrett favorisiert, die im Rah-

men eines vom Department of Transportation der USA geförderten Programms zur Einführung von Drehstromantrieben für den Nahverkehr einen Zwei-Wagen-Zug der New Yorker U-Bahn ausrüstet [37].

Folgerungen

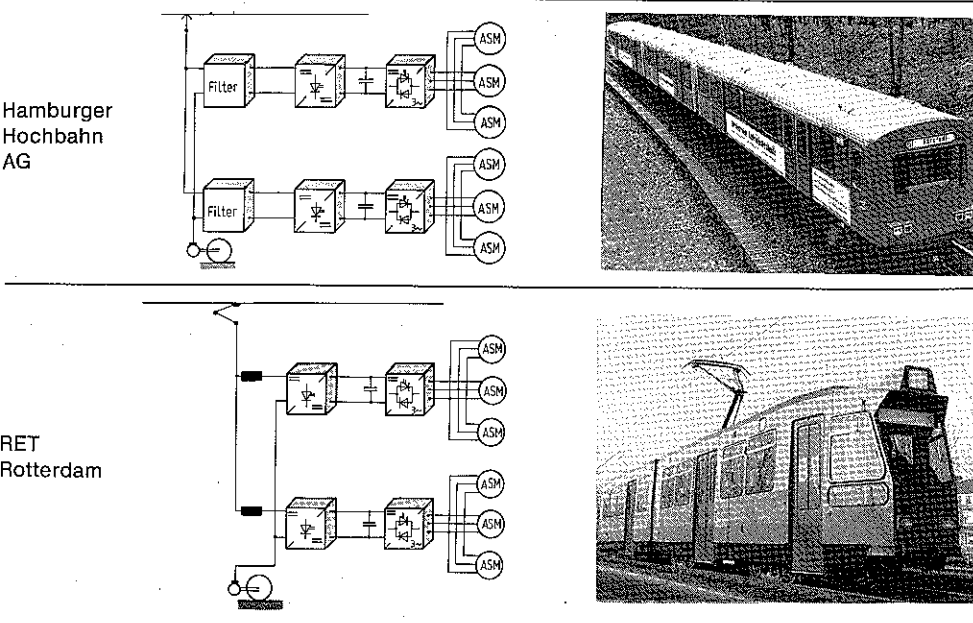
Anhand der aufgeführten Beispiele wird deutlich, daß Drehstromantriebe bereits auf allen Gebieten des spurgeführten Nahverkehrs eingesetzt werden, sowohl bei U-Bahnen, Stadtbahnen als auch bei Straßenbahnen und automatisch betriebenen Systemen. Die Weiterentwicklungen sowohl der Leistungshalbleiter als besonders auch der Mikrorechneranwendungen [40–42] werden den Einsatz dieser Technik beschleunigen, da sie vor allem die Verfügbarkeit der Antriebe weiter verbessern.

Literatur

- [1] A. Müller-Hellmann, H.-Ch. Skudelny: „Weltweite Entwicklung von Thyristorstromrichtern auf Triebfahrzeugen am Wechselspannungsfahrdraht“. ZEV-Glas. Ann. 104 (1980) S. 266–274.
- [2] W. Teich: „Drehstromantriebstechnik in Schienenfahrzeugen – Versuchseinheiten, Prototypen, Serien –“. ZEV-Glas. Ann. 101 (1977) S. 371–382.
- [3] K. Dreimann: „Drehstromantriebstechnik für Nahverkehrsfahrzeuge“. ZEV-Glas. Ann. 101 (1977) S. 363–370.
- [4] G. Scholtis: „Nahverkehr und Drehstromantriebe – Aufgaben, Wünsche, Möglichkeiten“. Elektrische Bahnen 77 (1979) S. 159–166.
- [5] H. Gathmann: „Drehstromantriebstechnik im Nahverkehr“. nahverkehrs-praxis 27 (1979) S. 56–59.
- [6] R. Wagner: „Drehstromantriebstechnik für Nahverkehrsbahnen“. Elektrische Bahnen 78 (1980) S. 151–157.
- [7] A. Müller-Hellmann, H.-Ch. Skudelny: „Übersicht über den Stand der Drehstromantriebstechnik bei Bahnverwaltungen in der Bundesrepublik Deutschland und weltweit“. Elektrische Bahnen 79 (1981) S. 374–380 und 418–422.
- [8] A. Schöning, H. Sternmler: „Geregelter Drehstromumkehrantrieb mit gesteuertem Umrichter nach dem Unterschwingungsverfahren“. BBC-Nachrichten 46 (1964) S. 699–721.
- [9] W. Lienau: „Untersuchung eines stromeinprägenden Wechselrichters, der zur Speisung einer frequenzgesteuerten Asynchronmaschine in einem Bahnantrieb geeignet ist“. Dissertation RWTH Aachen 1979.
- [10] A. Müller-Hellmann: „Gleichstromsteller-Typen auf Fahrzeugen des schienengebundenen Nahverkehrs“. DER NAHVERKEHR 1 (1983) Heft 3, S. 2–15.
- [11] H. Weh: Elektrische Linearantriebe für die Transporttechnik. E und M 98 (1981) S. 458–465.
- [12] W. Rüdiger, U. Brunnecker: Drehstromtechnik für Antriebe im Nahverkehr? Der Stadtverkehr 21 (1976) S. 38 und 39.
- [13] R. Wagner: Der Wiener U-Bahnwagen mit Drehstromfahrmotoren. ZEV Glas. Ann. 103 (1979) S. 69–76.
- [14] U. Brunnecker: Drehstromtechnik für Stadt- und Straßenbahntriebwagen am Beispiel des Stadtbahnwagens M der Verkehrsbetriebe Mülheim/Ruhr. DER STADTVERKEHR 24 (1979) S. 80–83.
- [15] H. Baldes, G. Bille: Der neuzeitliche Zweiachs-längsantrieb SIMOTRAC für Schienenfahrzeuge. Elektrische Bahnen 79 (1981) S. 218–224.
- [16] H. Ahlbrecht, G. Balsliemke: Stadtbahnwagen M8 mit Drehstromantrieb bei der Essener Verkehrs-AG. DER NAHVERKEHR 2 (1984).
- [17] J. Eichinger, P. Wegener: Der Antrieb des U-Bahnfahrzeuges DT3-DAT2 der Hamburger Hochbahn AG. nahverkehrs-praxis 31 (1983) S. 39–43.
- [18] R. Schaer, A. Schmid, Th. Seger: Straßenbahn-Gelenktriebwagen Typ „TRAM 2000“ der Verkehrsbetriebe der Stadt Zürich mit Drehstromantrieb. Brown Boveri Mitt. 70 (1983) S. 531–537.
- [19] P. Griffe: Asynchronous Traction Experiments on the Paris Metro. Proceedings of the Second International Symposium on Advanced Propulsion and Control for Urban Transit, Baltimore 1984, S. 7–13.



Tabelle 7: Prinzipschaltbilder und technische Daten von Fahrzeugen mit spannungseinprägenden Umrichtern [38, 39]



Stadt	Hamburg	Rotterdam
Verkehrssystem	U-Bahn	Straßenbahn
Netzspannung	750 V	600 V
Fahrleitungsanlage	3. Schiene	Oberleitung
Fahrzeugtyp	Doppeltriebwagen DT-3	Gelenktriebwagen ZGT-6
Anzahl der Fahrzeuge	1	33
Achsfolge	Bo'Bo'+2'Bo'	Bo'Bo'Bo'
Getriebeübersetzung	1:6,875	1:7,167
Antriebstyp	Einzelachsantrieb querliegend	Einzelachsantrieb querliegend
Anzahl der Wechselrichter	2	2
Anzahl der Fahrmotoren	6	6
Höchstgeschwindigkeit	80 km/h	70 km/h
Motorpolzahl	4	4
Höchstzahl	3600 min ⁻¹	4200 min ⁻¹
Dauerleistung + zugehörige Drehzahl	206 kW 1980 min ⁻¹	42 kW 1760 min ⁻¹
Gewicht	620 kg	
max. Wechselrichterfrequenz	120 Hz	142 Hz
Kühlung	Luft	Luft
Betriebseinsatz	1979	1982
Hersteller der elektr. Ausrüstung	BBC	Holec/Strömberg

[20] W. Lienau, A. Müller-Heilmann: Möglichkeiten zum Betrieb von stromeinprägenden Wechselrichtern ohne niederfrequente Oberschwingungen. *et-a* 97 (1976) S. 663-667.

[21] B. Esnol: AC Traction Drive on a Paris Subway Motor Car, Proceedings of the Second International Symposium on Advanced Propulsion and Control for Urban Transit, Baltimore 1984.

[22] J. Amler, R. Wagner: Drehstromantrieb für die neuen Nürnberger U-Bahnwagen. *ETR* 30 (1981) S. 369-377.

[23] K. Dreimann: Drehstrom-Kleinserie der Berliner Verkehrs-Betriebe (BVG) - ein Meilenstein der

Entwicklung der Drehstrom-Antriebstechnik bei AEG-Telefunken. *Elektrische Bahnen* 79 (1981) S. 110-116.

[24] H. J. Heider, K. Dreimann: Operational Experience with AC Drives in the Federal Republic of Germany, Proceedings of the Second International Symposium on Advanced Propulsion and Control for Urban Transit, Baltimore 1984, S. 34-40.

[25] H. Scheucken, G. Scholtis: Triebwagen vom Typ B80D für die Rheinische Bahngesellschaft Düsseldorf. *Verkehr und Technik* 34 (1981) S. 445-452.

[26] G. Püttner, J. Schöber: Leichtbau bei Stadtbahn-Fahrzeugen. *DER NAHVERKEHR* 1 (1983) Heft 5, S. 52-58.

[27] H. Fiedler, G. Scholtis: Neue Triebwagen für die U-Bahn München. Die elektrische Ausrüstung. *Elektrische Bahnen* 79 (1981) S. 381-387.

[28] J. D. Johansen: 100 neue Leichtmetro-Gelenkwagen für Turin. *Der Stadtverkehr* 28 (1983) S. 155.

[29] G. Ciebow, G. Götz, P. Grumbrecht: Drehstromantriebstechnik für U- und Stadtschnellbahnen. *Der Stadtverkehr* 21 (1976) S. 40-43.

[30] A. Halonen, K. Kärhä: AC Induction Motor Drive in Helsinki Metro Cars. Proceedings of the Intern. Conf. on Advanced Propulsion Systems of Urban Rail Vehicles, 1980, Washington, S. 99-118.

[31] H. Holma: Operational Experience of an A. C. Propulsion System in Revenue Service; The Helsinki Metro. Proceedings of the Second International Symposium on Advanced Propulsion and Control for Urban Transit, Baltimore 1984.

[32] J. Soffer, A. Pascal: Rajeunissement d'une vieille idée. La R.A.T.P. et Alstom-Atlantique expérimentent le moteur asynchrone sur une rame de métro. *Revue Générale Des Chemins De Fer* 101 (1982) S. 469-474.

[33] M. Ohta, A. Kaga, M. Muneyuki, R. Akagawa: AC Propulsion System for Kumamoto Municipal Transportation Bureau. International Power Electronics Conference, Tokyo, 1983, Conference record S. 1575-1586.

[34] T. Yamanaka: VVVF Inverter Control System for Electric Cars. Proceedings of the Second International Symposium on Advanced Propulsion and Control for Urban Transit, Baltimore 1984, S. 20-33.

[35] W. Keßler, W. Mayer: MAGLEV Birmingham-Anbinderstrecke zwischen Flughafen und Bahnstation. *ETR* 32 (1983) S. 645-648.

[36] G. Heidelberg: Die M-Bahn. Dauermagnetische Fahrzeugsuspension und Antrieb durch Fahrwegwanderfeld (Teil 1). *ZEV-Glas. Ann.* 107 (1983) S. 401-404.

[37] G. Kalman, R. Rudich, R. Van Eck: AC Traction Motor Propulsion System for the Garrett/U.S. DOT AC Propulsion Program. Proceedings of the Second International Symposium on Advanced Propulsion and Control for Urban Transit, Baltimore 1984, S. 250-256.

[38] K. Gemmeke, E. Müller, W. Runge, A. Schulze, A. Steimel: Drehstromantrieb für einen DT3-Triebwagen der Hamburger Hochbahn AG. *BBC-Nachrichten* 62 (1980) S. 471-483.

[39] W. de Steur: Der Straßenbahnwagen ZGT-6 der Rotterdamse Elektrische Tram. *DER NAHVERKEHR* 1 (1983) Heft 4, S. 56-62.

[40] Ch. Urbanke: Microcomputer control systems for rapid-transit vehicles with a.c. drives. *Mikroelektronik in der Stromrichtertechnik und bei elektrischen Antrieben*, VDE-Tagung, Darmstadt, 1982, VDE-Buchreihe, Band 11, S. 401-408.

[41] P. Mutschler, H. Schulze: Control of current source inverter by single-board computer for squirrel cage motor drive of urban transport systems. *Mikroelektronik in der Stromrichtertechnik und bei elektrischen Antrieben*, VDE-Tagung, Darmstadt, 1982, VDE-Buchreihe Band 11, S. 401-408.

[42] W. D. Weigel: Eine neue Generation von elektronischen Triebfahrzeugsteuerungen mit Mikrocomputer. *ZEV-Glas. Ann.* 107 (1983) S. 305-312.

