Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 89 (1998)

Heft: 12

Artikel: Swissmetro : Energieversorgung für ein Hochleistungs-Antriebssystem mit Kurzstator-Linearmotoren

Autor: Rosenmayr, Marc

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-902087

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 15.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Das Swissmetro-Projekt steht für ein ergänzendes, schnelles, sicheres, wirtschaftliches und umweltfreundliches Transportsystem, das unabhängig von oberirdischen Verkehrswegen realisiert werden kann. Swissmetro soll dabei beispielsweise die Strecke Genf–Zürich in 57 Minuten zurücklegen. Das Antriebssystem basiert auf einem speziellen Typ von elektrischem Linearmotor, der stationär im Tunnel befestigt ist und auf dem Fahrzeug lediglich passive reaktive Elemente aufweist. Ein magnetisches Trag- und Führungssystem erlaubt Spitzengeschwindigkeiten von bis zu 500 km/h.

Swissmetro: Energieversorgung für ein Hochleistungs-Antriebssystem mit Kurzstator-Linearmotoren

Dieser Beitrag basiert auf einer wissenschaftlichen Publikation mit dem Originaltitel «Swissmetro – Power Supply for a High-Power Propulsion System with Short Stator Linear Motors», die im Rahmen der internationalen Maglev-Konferenz im April dieses Jahres in Japan präsentiert wurde. Die vorliegende deutsche Übersetzung wurde leicht gekürzt.

Adresse des Autors
Marc Rosenmayr, Dipl. El.-Ing. ETH
Professur für Leistungselektronik und Messtechnik
ETH-Zentrum
8092 Zürich

■ Marc Rosenmayr

Einleitung

Das schweizerische Mittelland ist eine Region mit einer sehr hohen Bevölkerungsdichte. Verglichen mit europäischen Metropolen wirkt es beinahe wie eine grosse Stadt, deren Hauptverkehrswege gesättigt zu sein scheinen. Aufgrund der Topographie, der bereits erwähnten hohen Bevölkerungsdichte sowie einer gesteigerten Sensibilisierung gegenüber den Belangen des Umweltschutzes entstand die Idee eines unterirdischen Transportmittels, genannt Swissmetro. Swissmetro soll ein ergänzendes, schnelles, sicheres, wirtschaftliches und umweltfreundliches Transportsystem darstellen, das unabhängig von oberirdischen Verkehrswegen realisiert werden kann.

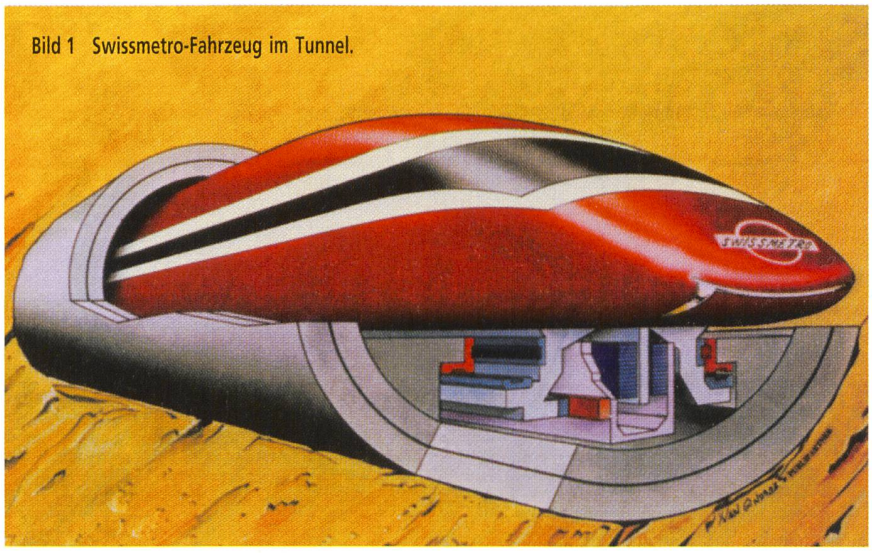

Bild 1 Swissmetro-Fahrzeug im Tunnel.

Das Konzept von Swissmetro

Die Resultate einer Vorstudie [1]–[3] beschreiben ein Gesamtsystem (Bild 1), das auf mehreren komplementären Technologien basiert:

- Die vollständig unterirdische Infrastruktur besteht aus zwei Tunneln von je 5 m Durchmesser für beide Richtungen und den an das übrige öffentliche Verkehrsnetz angebundenen Stationen. Die Reisezeit zwischen zwei Stationen beträgt jeweils zwölf Minuten, die Aufenthaltsdauer drei Minuten. Swissmetro legt somit beispielsweise die Strecke Genf–Zürich in 57 Minuten zurück, wofür heute noch 3 Stunden mit der Eisenbahn benötigt werden.
- Ein Teilvakuum in den Tunneln von ungefähr 10 000 Pa (entspricht 0,1 atm) reduziert den Luftwiderstand und demzufolge auch den Energieverbrauch zum Antrieb des Fahrzeugs. Die Erzeugung und Erhaltung des Teilvakuums kann mit heute bereits erhältlichen Pumpen bewerkstelligt werden.

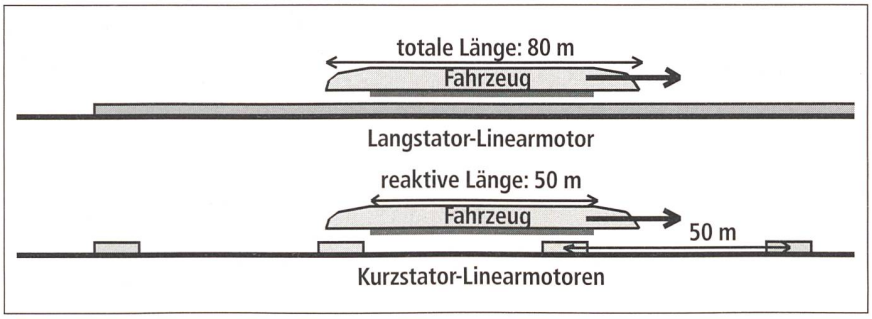

Bild 2 Zwei verschiedene Konfigurationen des Linearmotors.

- Das Fahrzeug besteht aus einer mit einem Flugzeugrumpf vergleichbaren Konstruktion mit 3,2 m Durchmesser und 80 m Gesamtlänge. Mehrere starre Teilstücke werden mittels aktiver, dehnbarer Zwischenstücke miteinander verbunden. Der unter Normaldruck stehende Innenraum bietet 200 Passagieren Platz. Luftschleusen und ein automatisches Türsystem erlauben das bequeme Ein- und Aussteigen ins Fahrzeug.
- Das Antriebssystem basiert auf einem speziellen Typ von elektrischem Linearmotor, der stationär im Tunnel befestigt ist und auf dem Fahrzeug lediglich passive reaktive Elemente aufweist. Da sich alle aktiven Wicklungssysteme des Motors auf dem stillstehenden Stator befinden, muss keinerlei Antriebsenergie auf das Fahrzeug übertragen werden.
- Ein Energiesystem versorgt die Antriebsstromrichter direkt über einen unterirdischen Gleichspannungsbus im Tunnel mit der benötigten Leistung von 8,5 MVA.
- Ein magnetisches Trag- und Führungssystem für das Fahrzeug erlaubt Spitzengeschwindigkeiten von bis zu 500 km/h zwischen den einzelnen Siedlungsgebieten. Ein Ausfall des Antriebs hätte keine Auswirkungen auf das Trag- und Führungssystem, da deren Funktionen vollständig unabhängig voneinander sind.
- Ein Lineartransformator versorgt das Fahrzeug berührungslos mit elektrischer Leistung von maximal 500 kW für das Trag- und Führungssystem sowie verschiedene Hilfsbetriebe wie Lüftung, Licht und Überwachungseinrichtungen.

Die Linearmotoren

Spezifikation

Die Spezifikation der untersuchten Antriebsvariante lautet:

- Gesamtmasse des Fahrzeugs: 50 t
- Länge des reaktiven Motorteils auf dem Fahrzeug: 50 m
- Anfangsbeschleunigung: 1,3 m/s² vom Stillstand bis zu einer Geschwindigkeit von 290 km/h
- Konstante Leistung: 6 MW mit einem Wirkungsgrad von mindestens 85% ab einer Geschwindigkeit von 290 km/h bis zur Maximalgeschwindigkeit von 500 km/h
- Als Antriebssystem werden frequenzumrichtergespeiste Linearmotoren eingesetzt, die beim Abbremsen eine Rückführung der Beschleunigungsenergie ermöglichen.
- Der Luftspalt zwischen dem Stator und dem Fahrzeug beträgt entsprechend den Anforderungen des Trag- und Führungssystems 20 mm.

Vorzugslösung

Zwei verschiedene Konfigurationen des Linearantriebs wurden im Rahmen der Vorstudie genauer analysiert [4]. Da das Trag- und Führungssystem unabhängig von dem Antriebssystem ist, erwies sich ein Linearmotor mit doppelseitigem vertikalem Luftspalt als der am besten geeignete Typ. Diese Lösung erlaubt eine erhöhte aktive Oberfläche und kompensiert die gegenseitigen Anziehungskräfte zwischen dem Stator und den Rotorpolen. Eine asynchrone Variante schied hingegen aufgrund des geringeren Wirkungsgrads aus.

Die beiden aus der Evaluation hervorgegangenen synchronen Linearmotorvarianten sind wie folgt charakterisiert (Bild 2):

- Klassischer Langstator-Linearmotor:
  - der Motor ist länger als das Fahrzeug
  - die sich paarweise gegenüberliegenden Statoren mit je einer identischen Dreiphasenwicklung sind im Tunnel befestigt
  - das Erregersystem ist auf dem Fahrzeug plaziert
  - das Antriebssystem benötigt deshalb eine Energieübertragung auf das Fahrzeug
- Homopolarer Kurzstator-Linearmotor:
  - der Motor ist kürzer als das Fahrzeug
  - die sich paarweise gegenüberliegenden Statoren mit je einer identischen Dreiphasenwicklung sind im Tunnel befestigt
  - die aktiven Teile des Erregersystems sind wie der Stator ebenfalls im Tunnel befestigt
  - lediglich passive Eisenpole befinden sich auf dem Fahrzeug
  - das Antriebssystem benötigt folglich keine Energieübertragung auf das Fahrzeug

Die Entscheidung zugunsten des homopolaren, synchronen Kurzstator-Linearmotors (siehe Bild 3) beruht im wesentlichen auf dessen Vorteil, dass keine Antriebsenergie auf das Fahrzeug übertragen werden muss, denn alle aktiven Wicklungssysteme befinden sich stationär im Tunnel. Als Nachteil muss dennoch erwähnt werden, dass der Stator des homopolaren Linearmotors gegenüber der klassischen Variante magnetisch überdimensioniert werden muss, was einen grösseren und schwereren Aufbau zur Folge hat.

Zusätzlich erlaubt der reduzierte Luftwiderstand in dem teilevakuierten Tunnel eine Konzentration des Antriebssystems auf kurze Abschnitte entlang der Fahrstrecke. Nahe den Stationen muss das Beschleunigen und Abbremsen kontinuierlich erfolgen, so dass die einzelnen Kurzstatormotoren in kurzen Abständen zueinander plaziert sind. Zwischen den Stationen hingegen genügt eine weitaus

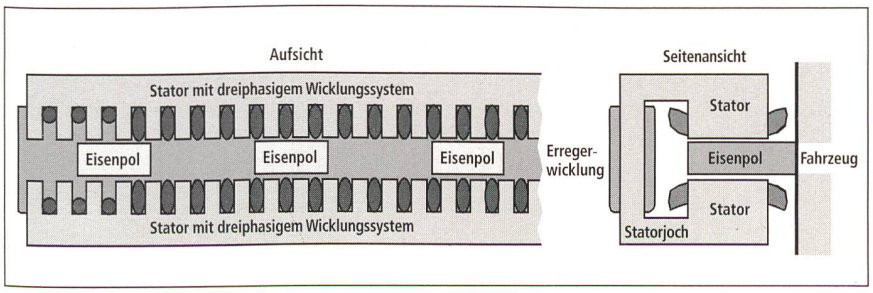

Bild 3 Aufbau des homopolaren synchronen Linearmotors (Auf- und Seitenansicht).

lockerere Verteilung derartiger Antriebsabschnitte, um das Fahrzeug auf einer konstanten Geschwindigkeit zu halten. Demzufolge wechseln sich Antriebsabschnitte mit reinen Gleitstrecken ab, wobei sich ein ungefährer Anteil der Antriebsabschnitte bezogen auf die Gesamtstrecke von 75% ergibt. Wird weiter die eigentliche Länge des Kurzstatormotors von ungefähr 10 m berücksichtigt, so resultiert eine Gesamtlänge aller Motorabschnitte von lediglich 15%, verglichen mit 100% bei der Langstatorvariante.

Die Leistungselektronik

Spezifikation

Die Leistungselektronik stellt das Schlüsselelement des Antriebskonzepts dar, welches aus Energieversorgungsnetz, Transformator, Umrichter und Linearmotoren besteht. Somit müssen die Umrichter folgende strenge Anforderungen erfüllen:

- maximale Leistung von 8,5 MVA bei einem Leistungsfaktor von 0,85
- maximale Ausgangsfrequenz von 215 Hz
- Betrieb sowohl zum Beschleunigen wie auch zum energierückspeisenden Abbremsen mit beliebigem Leistungsfaktor auf der Motorseite
- Leistungsfaktor von eins auf der Netzseite
- ein «state of the art»-Industrieprodukt

Vorzugslösung

Topologie des Umrichters

Diese Anforderungen führen zu einem Gleichspannungs-Frequenzumrichter, der aus zwei dreiphasigen Dreipunkt-Gleichspannungs-Wechselrichtern (3-Pkt-WR) besteht, die über einen Gleichspannungs-Zwischenkreis Rücken an Rücken miteinander verbunden sind. Die Netzseite ist über einen Transformator direkt an das Hochspannungsversorgungsnetz angebunden, wogegen die Motorseite die Linearmotoren speist [5]. Diese Topologie ist in Bild 4 dargestellt.

Halbleiter

Die Gesamtverluste des betrachteten Versorgungssystems werden zu einem grossen Teil von den ohmschen Verlusten bestimmt. Demzufolge sollten die Leitungsströme auf der Netz- und Motorseite möglichst klein sein, um einen guten Wirkungsgrad zu erreichen. Dies bedeutet aber bei einer gegebenen Leistung gleichzeitig höhere Leitungsspannungen. Mit 3-Pkt-WR ohne Serieschaltung der Halbleiter kann mit heutigen Abschalttyristoren (GTOs) jedoch lediglich eine

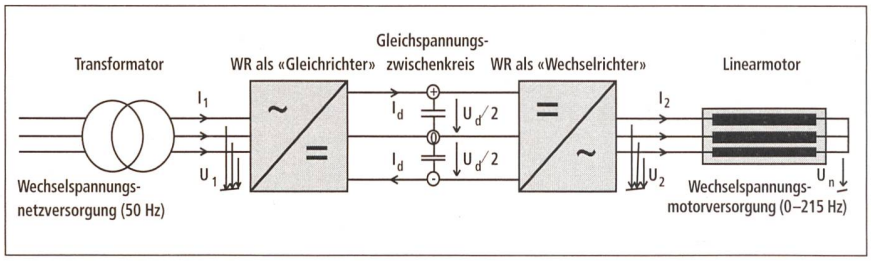

Bild 4 Topologie des Gleichspannungs-Frequenzumrichters.

maximale Zwischenkreisspannung von $U_d = 6$ kV erreicht werden.

Neueste Fortschritte bei der Entwicklung von direkt angesteuerten GTOs haben es ermöglicht, die individuellen Abschaltzeiten der einzelnen Elemente dermassen zu verkürzen und aneinander anzugleichen, dass die Serieschaltung mehrerer einzelner Halbleiter einfach zu realisieren ist. Lediglich ein kleines zusätzliches Entlastungsnetzwerk bleibt notwendig, um einen zuverlässigen Betrieb sicherzustellen. Die Serieschaltung von n Halbleitern hat dabei zwei wesentliche Vorteile: Sie erlaubt einerseits die gewünschte Erhöhung der Zwischenkreisspannung und andererseits die Realisierung eines fehlertoleranten Schaltungsentwurfs, indem ein Halbleiter mehr als eigentlich benötigt in Serie geschaltet wird (sogenanntes $n + 1$ Prinzip).

Ein fehlertoleranter Schaltungsentwurf macht sich die Tatsache zunutze, dass ein defekter GTO stets einen Kurzschluss darstellt. Demzufolge stört ein fehlerhafter GTO seine in Serie geschalteten Nachbarelemente nicht, sondern lässt den Strom einfach ungehindert durchfliessen.

Tabelle I zeigt, dass sich mit einem fehlertoleranten Entwurf von $n + 1 = 3$ GTOs in Serie eine Zwischenkreisspannung von $U_d = 10$ kV erreichen lässt. Dies stellt für die spezifizierte Leistung von 7 MW einen vernünftigen Wert dar.

Modulationsverfahren

Generell erlaubt ein 3-Pkt-WR zwei unterschiedliche Modulationsverfahren: sinusförmige Pulsbreitenmodulation und rechteckförmige Blockmodulation mit Grundfrequenztaktung. In beiden Fällen ermöglicht die 3-Pkt-Topologie die Variation der Ausgangsspannung sowie die Reduktion der Oberschwingungen auch bei geringen Taktfrequenzen.

Üblicherweise wird Pulsbreitenmodulation zur Erzeugung einer möglichst sinusförmigen Netzspannung mit der Amplitude U_1 von null bis maximal

$$U_1 = \frac{1}{2} U_d \qquad (1)$$

eingesetzt. Deshalb wird der netzseitige Wechselrichter mit Pulsbreitenmodulation betrieben, um die Stromoberschwingungen so gering wie möglich zu halten. Die resultierende Amplitude I_1 des Phasenstroms ergibt sich durch

$$I_1 = \frac{2P}{3U_1 \cos \varphi_1} = \frac{4P}{3U_d \cos \varphi_1} \qquad (2)$$

Die Ausgangsspannung des Wechselrichters auf der Motorseite hingegen ist abhängig von der Geschwindigkeit des Fahrzeugs. Bis zu der Ausgangsfrequenz von 125 Hz (entspricht 290 km/h) wird mit einer konstanten Kraft beschleunigt. Oberhalb dieses Punktes bis zur maximalen Frequenz von 215 Hz (entspricht 500 km/h) wird hingegen mit konstanter Leistung angetrieben. Bei kleiner Geschwindigkeit ist die Spannung demzufolge frequenzproportional, und der Wechselrichter auf der Motorseite wird ebenfalls mit Pulsbreitenmodulation betrieben. Im oberen Geschwindigkeitsbereich wird der motorseitige Wechselrichter dagegen mit Blockmodulation betrieben, um eine konstante Ausgangsspannung bis zu einer maximalen Amplitude U_2 von

$$U_2 = \frac{2}{\pi} U_d \qquad (3)$$

zu erreichen. Daraus folgt die Amplitude I_2 des Ausgangsstroms

$$I_1 = \frac{2P}{3U_2 \cos \varphi_2} = \frac{\pi P}{3U_d \cos \varphi_2} \qquad (4)$$

Für die spezifizierte elektrische Leistung von $P = 7$ MW und den angenommenen Leistungsfaktoren von $\cos \varphi_1 = 1$ auf der Netzseite (Index 1) und $\cos \varphi_2 = 0{,}85$ auf der Motorseite (Index 2) ergeben sich die in Tabelle I aufgeführten Phasenspannungen und Phasenströme.

Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad des Gesamtsystems sollte so hoch wie möglich sein. Deshalb wurden die einzelnen Verlustquellen eines 3-Pkt-WR genauer betrachtet:

- Die ohmschen Verluste des Leistungskreises sind proportional zu den Phasenströmen in Quadrat.
- Die Leitverluste der Halbleiter sind proportional zu den Phasenströmen und der Anzahl Halbleiter in Serie.

- Die Schaltverluste der Halbleiter sind proportional zu der Schaltfrequenz und der Anzahl Halbleiter in Serie.
- Die Verluste in den Entlastungsnetzwerken sind proportional zu der Schaltfrequenz.

Schlussfolgerungen

Als Vorzugslösung des Antriebssystems für Swissmetro wird ein Frequenzumrichter vorgeschlagen, bestehend aus zwei dreiphasigen 3-Pkt-WR mit einer Zwischenkreisspannung von $U_d = 10$ kV und je $n + 1 = 3$ in Serie geschalteten GTOs.

Diese Konfiguration stellt ein in der Industrie gebräuchliches, preislich günstiges und hoch zuverlässiges Antriebssystem für die verlangte Leistungsklasse von 8,5 MVA dar. Gleichzeitig bewirkt die relativ hohe Zwischenkreisspannung einen guten Wirkungsgrad des Gesamtsystems von mindestens 95%, ohne die Isolationsfähigkeit der Motorwicklungen zu überlasten.

Die Energieverteilung

Da alle Teilsysteme im Tunnel und auf dem Fahrzeug wesentlich von einer zuverlässigen Energiezufuhr abhängen, muss die Versorgung in dem Sinne redundant konzipiert sein, dass eine Störung zwar zum Ausfall des betroffenen Teilsystems führen kann, weder aber die Energieversorgung des Fahrzeugs noch die Funktion des Antriebssystems als ganzes betroffen ist. Trotzdem kann eine hundertprozentige Verfügbarkeit nicht immer sichergestellt werden, da für die Hauptversorgung auf das öffentliche 125-kV-Hochspannungsnetz entlang des geplanten Tunnelverlaufs zurückgegriffen werden muss.

Senkrechte Schächte nahe der Stationen und auch dazwischen stellen die Verbindung zwischen dem 125-kV-Versorgungsnetz und dem Energiesystem im Tunnel sicher. In diesen Versorgungsschächten sind unter anderem die 125 kV zu 6,1-kV-Transformatoren untergebracht, die wiederum mit der Netzseite der im vorherigen Abschnitt beschriebenen Frequenzumrichtern verbunden sind.

Für das eigentliche Energieversorgungssystem wurden drei unterschiedliche Topologien untersucht:

- Eine Möglichkeit stellt die Versorgung der Linearmotoren durch eine im Tunnel verlaufende Mittelspannungsleitung dar. Dann würde jedoch jeder Linearmotor einen kompletten Frequenzumrichter, bestehend aus je zwei Wechselrichtern, benötigen.

GTOs	Zwischenkreis	Netzseite (Pulsbreitenmodulation)		Motorseite (Blockmodulation)	
$P = 7$ MW	U_d	U_1	I_1	U_2	I_2
$n + 1 = 2$	6 kV	3,0 kV	1,6 kA	3,8 kV	1,4 kA
$n + 1 = 3$	10 kV	5,0 kV	0,9 kA	6,4 kV	0,9 kA

Tabelle I Maximale Zwischenkreisspannung, Ausgangsspannung und Ausgangsstrom für $n + 1$ Halbleiter in Serie.

- Eine andere Lösung sieht die Einführung eines Gleichspannungsbusses im Tunnel vor, von dem die Wechselrichter der einzelnen Linearmotoren gespeist werden.
- Bei der dritten Variante wird eine grosse Anzahl Linearmotoren über lange Kabel direkt von einem einzigen Frequenzumrichter mit den geschalteten Ausgangsspannungen versorgt.

Die erste Variante schied von Anfang an aufgrund der hohen Kosten für die vielen Wechselrichter aus. Die zweite erwies sich nach kleinen Anpassungen als die günstigste Topologie. Die Überlegungen, welche zu der schliesslich gewählten Vorzugslösung führten, berücksichtigen die Gesamtkosten, die Verluste in den einzelnen Teilsystemen, unerwünschte elektrische Schwingungen auf den Wechselspannungsleitungen und dem Gleichspannungsbus sowie das Kurzschlussverhalten im Fehlerfall.

Vorzugslösung

Konfiguration der Energieverteilung

Entsprechend den beschriebenen Voraussetzungen und Bedürfnissen wurde für die Energieversorgung eine Topologie gewählt, die auf dem oberirdischen öffentlichen 125-kV-Versorgungsnetz und einem 3-Pkt-Gleichspannungsbus im Tunnel mit den Spannungsniveaus + 5 kV, 0 kV, und – 5 kV basiert. Der Gleichspannungsbus stellt so den Zwischenkreis aller damit verbundenen Wechselrichter dar, die wiederum mehrere in Serie geschaltete Linearmotoren versorgen. Die örtliche Plazierung der einzelnen Wechselrichter wird durch das Beschleunigungs- und Steigungsprofil der Tunnelfahrbahn bestimmt. Eine schematische Darstellung dieser Variante ist in Bild 5 gezeigt.

Der 3-Pkt-Gleichspannungsbus im Tunnel wird in 20–30 km lange Abschnitte unterteilt, deren Enden bei je einem Versorgungsschacht mit einem Transformator zu liegen kommen. Falls die Einspeisung an einem Ende eines solchen Abschnitts ausfallen sollte, muss das verbleibende Versorgungssystem die Energie auch für den Extremfall liefern können, bei dem sich das Fahrzeug am anderen Ende des betroffenen Abschnitts befindet. Vorgesehen ist ein unabhängiger Gleichspannungsbus für jede Tunnelrichtung. Die Wechselrichter werden entlang des Gleichspannungsbusses so verteilt, dass ein einzelner Wechselrichter maximal sechs in Serie geschaltete Linearmotoren speisen muss. Für diese Variante wurden folglich mehrere weitergehende Untersuchungen bezüglich des Systemverhaltens durchgeführt [6].

Verhalten des Gleichspannungssystems

Ein wesentliches Merkmal des Gleichspannungsbusses sind die zwei Glättungskapazitäten bei jedem Wechselrichter im Bereich einiger Millifarad zur Entkopplung der hochfrequenten Schaltstörungen. Dies hat zwei Auswirkungen: Vorteilhaft ist der spannungsstabilisierende Effekt; nachteilig ist, dass sich der Entladestrom im Falle eines Kurzschlusses entsprechend erhöht.

Zuerst wurde dieser Kurzschlussfall für den Gleichspannungsbus untersucht.

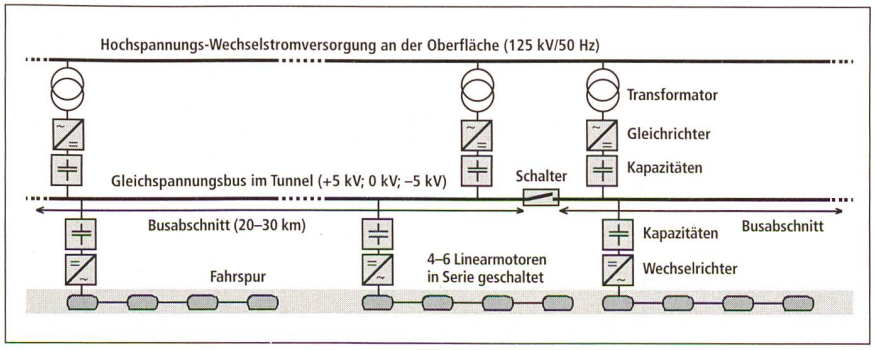

Bild 5 Topologie der Energieversorgung im Tunnel.

Die Parallelschaltung aller Kapazitäten der Wechselrichter ergibt eine beträchtliche Menge gespeicherter Energie und bewirkt somit ein Verhalten des Busses ähnlich dem eines Kabels mit einer sehr geringen Kurzschlussimpedanz. Ohne Gegenmassnahmen würde der Kurzschlussstrom mehrere zehntausend Ampère erreichen, was zur Zerstörung des Versorgungssystems führen würde und daher vermieden werden muss. Deshalb wurde mit zusätzlichen Halbleiterschaltern eine geeignete Schutzbeschaltung realisiert, die das gleichzeitige Entladen der Kapazitäten verhindert und trotzdem die Energierückführung beim Bremsen zulässt.

Weiter wurde das Verhalten des Gleichspannungsbusses bei plötzlichen Laständerungen betrachtet. Diese treten immer dann auf, wenn die einzelnen motorseitigen Wechselrichter den Antrieb des Fahrzeugs übernehmen beziehungsweise wieder abgeben. Für die Untersuchungen wurde der Gleichstrom eines einzelnen Wechselrichters als trapezförmig angenommen. Das plötzliche Auftreten eines solchen Stromblocks bewirkt einen Spannungseinbruch auf dem Gleichspannungsbus an der Stelle des betreffenden Wechselrichters, überlagert von einem transienten Einschwingvorgang. Der Betrag des Spannungseinbruchs ist dabei proportional zu der Länge des stromdurchflossenen Busabschnitts, dessen ohmschen Widerstands und der Stromamplitude.

Am stärksten wirkt sich der transiente Einschwingvorgang aus, wenn eine Seite der Buseinspeisung ausgefallen ist und der Strom über die ganze Länge des Busses zu der anderen Einspeisestelle geführt werden muss. Doch selbst in diesem Extremfall liegt das Überschwingen der Busgleichspannung im Bereich weniger Prozente des Nennwerts, was auf die Verteilung der Glättungskapazitäten entlang des Busses zurückzuführen ist.

Verhalten des Wechselspannungssystems

Das schliesslich favorisierte Gesamtsystem zur Energieversorgung ist eine Hybridanordnung, bei der ein Wechselrichter vier bis sechs Linearmotoren in Serie speist. Wenn ein derartiges Teilsystem aktiv ist, bezieht jeweils nur ein Linearmotor Wirkleistung, während alle anderen lediglich den Wechselstrom leiten und dabei aufgrund ihrer Streureaktanz induktive Blindleistung aufnehmen.

Die zeitlichen Verläufe der Ströme und Spannungen für die Anordnung von vier in Serie geschalteter Linearmotoren wurden berechnet, wobei für einen einzelnen Motor ein bezogener Statorwiderstand von $R = 0{,}02$ pu und eine bezogene Streureaktanz von $L_\sigma = 0{,}1$ pu angenommen wurden. Die im aktiven Motor induzierte Gegenspannung von 4,8 kV führt zu einem Leistungsfaktor von $\cos \varphi_2 = 0{,}85$ für das gesamte Teilsystem. Das wesentliche Resultat der Untersuchungen ist, dass der Phasenstrom trotz der geschalteten Motorspannungen lediglich einen kleinen Anteil an Oberschwingungen aufweist. Obwohl die Spannung des offenen Sternpunktes gegenüber Erde schaltungsbedingt relativ hoch ist, stellt das transiente Überschwingen keine Gefahr für die Wicklungsisolation der Linearmotoren dar.

Schlussfolgerungen

Die beschriebenen Untersuchungen zeigen, dass ein Energieversorgungssystem mit einem hohen Grad an Redundanz zur Speisung des Linearantriebs von Swissmetro realisierbar ist. Die Topologie eines kombinierten Gleich- und Wechselspannungssystems wurde aufgrund ökonomischer Gründe gewählt, um insbesondere die benötigte Anzahl Wechselrichter klein zu halten, da diese die kostenintensivsten Komponenten darstellen. Die durchgeführten Simulationen bezüglich des transienten Systemverhaltens unter normalen und gestörten Betriebsbedingungen haben weder aussergewöhnliches Überschwingen, noch zu grosse Oberschwingungen, noch Resonanzprobleme aufgezeigt.

Das Labormodell

Um die theoretischen Untersuchungen zu verifizieren, wurde ein vollständiges Modell des Linearmotors und des Frequenzumrichters in einem reduzieren Leistungsbereich (2 kW) aufgebaut und erfolgreich in Betrieb genommen. Um Platz zu sparen, wurde der Linearmotor wie in Bild 6 dargestellt aufgebaut: Das eigentliche Fahrzeug mit den passiven Eisenpolen wurde zu einem Rad von 1,5 m Durchmesser gebogen. Der Kurzstator-Linearmotor mit einer Länge von 0,6 m wurde dabei unterhalb des Rads plaziert. Die Gleichstrommaschine in der linken Bildhälfte dient bei Messungen lediglich als Last.

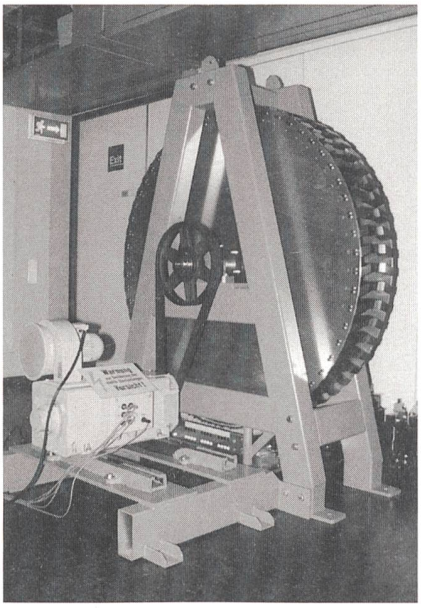

Bild 6 Das Labormodell.

Auf einer Hälfte des Radumfangs wurden die passiven Eisenklötze durch gleich schwere Messingklötze ersetzt, die sich vollkommen unmagnetisch verhalten. Somit kann auch das periodische Ein- und Ausfahren des Fahrzeugs in den Kurzstator untersucht werden.

Literatur

[1] Groupe d'étude électromécanique: *Chapitre IX électromécanique*, Rapport niveau 3 d'étude préliminaire, EPFL, 1992.

[2] *M. Jufer, A. Cassat, N. Macabrey: Swissmetro – High speed underground transportation system*, Maglev '95 conference, Germany, 1995.

[3] *A. Cassat, N. Macabrey, M. Jufer: Electromecanical aspects of the Swissmetro pilot track Geneva to Lausanne*, Maglev '98 conference, Japan, 1998.

[4] *A. Cassat: Chapitre IX électromécanique*, Rapport niveau 4 d'étude préliminaire, EPFL, 1992.

[5] *M. Rosenmayr: Power supply of the propulsion system and distribution of energy*, Swissmetro report ETH 1.0016/1.4100/a, ETHZ, 1996.

[6] *H. Glavitsch, M. Rahmani: Une première évaluation de l'alimentation du système de propulsion*, Rapport Swissmetro ETHZ 1.0021/1.4110/a,1997.

Swissmetro: Production d'énergie pour un système d'entraînement à hautes performances avec moteurs linéaires à stator court

Le projet Swissmetro est un système complémentaire de transport rapide, sûr, économique et ménageant l'environnement, qui peut être réalisé indépendamment de voies de circulation aériennes. Swissmetro doit pouvoir, par exemple, parcourir la distance Genève-Zurich en 57 minutes. Le système d'entraînement est basé sur un type spécial de moteur électrique linéaire, qui est fixé de manière stationnaire dans le tunnel alors que le véhicule porte uniquement des éléments réactifs passifs. Un système de sustentation et de guidage électromagnétique permet des vitesses de pointe jusqu'à 500 km/h.