

CPS FÜR DIE MAGNETSCHNELLBAHN TRANSRAPID

G. Bühler, R. Czainski

1 EINLEITUNG

Die Übertragung elektrischer Energie auf mobile Einrichtungen ist eine bei technischen Systemen weit verbreitete Aufgabe. Bisher geschah dies fast ausschließlich unter Zuhilfenahme eines galvanischen Kontakts entweder durch eine Kabelverbindung oder bei ausgedehnten Verkehrssystemen durch Schleifkontakte (Stromschiene bzw. Pantograph). Allerdings ist dies mit deutlichen Nachteilen in Bezug auf Robustheit, Witterungsunabhängigkeit sowie Wartungsaufwand verbunden und mit der Philosophie des berührungslosen Schwebens im Fall der Magnetschnellbahn Transrapid nur schwer vereinbar.

Im Rahmen des vom BMVBW (Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen) geförderten Weiterentwicklungsprogramms für die neue Generation des Transrapidsystems wurde in Kooperation mit dem Konsortium *ThyssenKrupp-Transrapid* das ursprünglich am Institut entwickelte System zur berührungslosen Leistungsübertragung CPS™ an die spezifischen Bedürfnisse der Magnetschnellbahn angepasst. Es steht nun nach erfolgreicher Qualifikationsprüfung auf der Transrapid-Versuchsanlage-Emsland TVE im Mai 2005 für den regulären Einsatz in zukünftigen Projekten zur Verfügung (**Bild 1**).



Bild 1: Transrapid 08 am versorgten Fahrwegabschnitt auf der TVE

2 BORDENERGIEVERSORGUNG DES TRANSRAPID

Durch die Wahl des Langstatorkonzeptes entfällt zwar die Aufgabe, die Antriebsleistung auf das Fahrzeug übertragen zu müssen, allerdings werden dennoch etwa 150 kW pro Sektion zur Aufrechterhaltung der Trag- und Führungsfunktion sowie für die Klimaanlage benötigt. Zur Deckung des anfallenden Leistungsbedarfs des Fahrzeugs im Geschwindigkeitsbereich ab 100 km/h werden derzeit sogenannte Lineargeneratoren eingesetzt. Dabei handelt es sich um in die Polschuhe der Tragsmagnete integrierte Wicklungen, die durch Modulation des Tragsmagnetfeldes an der Nut-/Zahnstruktur des Statorpaketes während der Fahrt Leistung auskoppeln. Bedingt durch das physikalische Wirkungsprinzip sinkt die induzierte Spannung mit abnehmender Geschwindigkeit, so dass die Leistung unterhalb einer Geschwindigkeit von 100 km/h nicht mehr zur vollständigen Deckung des Leistungsbedarfs ausreicht. Im Wartungsbereich bzw. Bahnhof sowie an sogenannten Nothaltepunkten ist deswegen der Fahrweg derzeit in Schanghai mit DC-Stromschienen ausgerüstet, ähnlich wie bei einigen U-Bahnen. Naturgemäß ist ein solches System in diesem Anwendungsfall mit erheblichen, bei der berührungslosen Leistungsübertragung nicht vorkommenden, Nachteilen verbunden, wie

- mechanischer Verschleiß der Stromabnehmer durch Reibung bzw. Lichtbogenerosion sowie dadurch bedingte Schallemission
- im ausgefahrenen Zustand zusätzliche aeroakustische Schallemissionen
- hohe Anforderungen an die Positionierung
- Witterungssensibilität (Eisbildung, Verschmutzung)

Es galt nun, das im industriellen Bereich der Bodenförderfahrzeuge und Elektrohängebahnen bereits bewährte und vielfach im Einsatz befindliche System für den Einsatz im Transrapid zu ertüchtigen. Der gravierendste Unterschied besteht im Leistungsniveau. Während sich die Leistung bisher im Bereich von etwa 40 kW pro Wechselrichter bewegte, werden nun 250 kW zur Verfügung gestellt. Die für ein 3-Sektionen Fahrzeug erforderlichen 450 kW werden nicht zuletzt aus Gründen der Redundanz durch 2 autarke Systeme an beiden Fahrwegseiten realisiert. Weitere Unterschiede bestehen in der geometrischen Ausdehnung der Anlage bzw. die dadurch bedingte höhere Beeinflussbarkeit durch die Umwelt (z. B. der Temperaturgang der verwendeten Elektrobauteile).

2.1 Fahrzeugseitige Komponenten

Prinzipiell bestehen mehrere Möglichkeiten zum Aufbau eines CPS-tauglichen magnetischen Kreises. Bisher bestand die präferierte Strategie darin, den Pick-up genannten Aufnehmer möglichst kompakt und klein zu bauen. Dies gelingt in zunehmendem Maße, je besser die magnetische Kopplung zwischen Primär- und Sekundärsystem gestaltet wird. Damit wären allerdings im Fall des Transrapid einige nicht zu akzeptierende Nachteile verbunden:

- zur Erlangung einer guten Kopplung müsste der am Fahrweg verlegte Primärleiter mehr oder weniger von dem Pick-up umgriffen werden, was hervorstehende, schallerzeugende Strukturen bedeutet hätte
- hohe Leistungskonzentration in einem bzw. wenigen Pick-ups, was die Ausfallwahrscheinlichkeit erhöht sowie
- die Systemverfügbarkeit aufgrund herabgesetzter Redundanz vermindert
- zusätzliche Schallemission bei hoher Geschwindigkeit

Aus diesen Gründen wurde eine flächige, beidseitig in die Verkleidungsstruktur entlang des gesamten Fahrzeugs integrierte Lösung gewählt, die zudem in Richtung der Betonträgerstruktur des Fahrwegs weist und damit von außen unsichtbar ist (**Bild 2, Bild 3**).

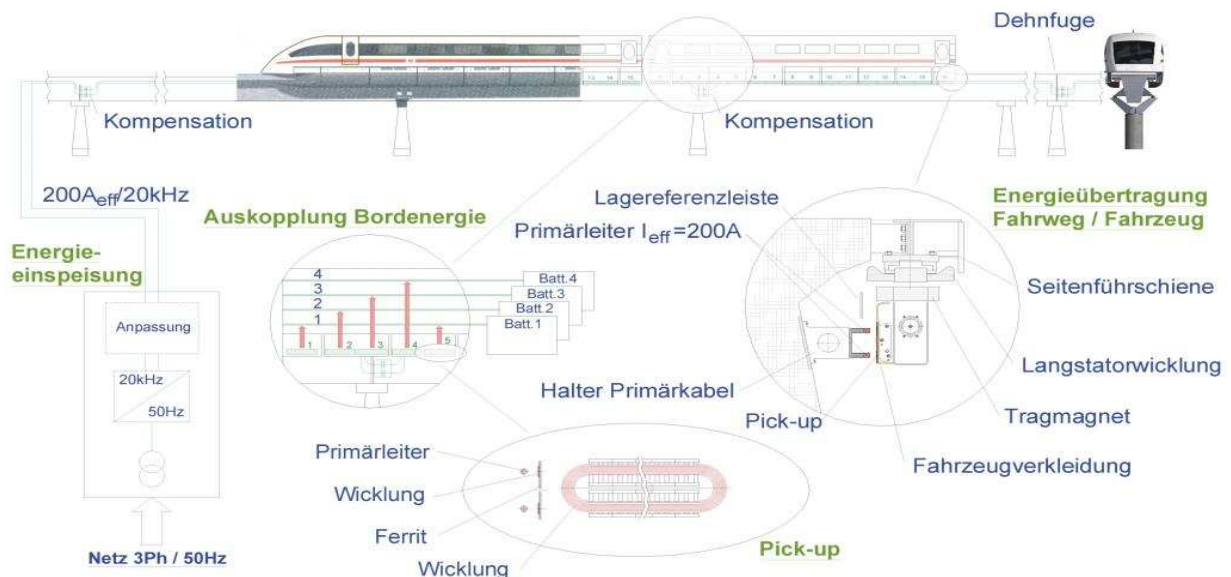


Bild 2: Komponenten der berührungslosen Leistungsübertragung für das Transrapid-Fahrzeug

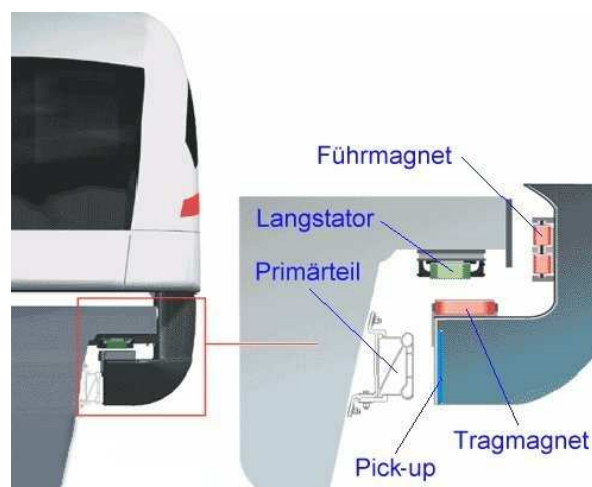


Bild 3: Relative Lage der primär- und sekundärseitigen Strukturen der berührungslosen Leistungsübertragung

Um die spröde Ferritstruktur vor Bruch zu schützen, wurde sie aus vielen kleinen Riegeln zusammengesetzt, welche umgeben von einer elastischen Masse in die Verkleidungselemente einlaminiert wurden. Alle Materialien wurden unter Berücksichtigung der geltenden Brandvorschriften ausgewählt. Jeder Pick-up ist fahrzeugseitig mit einem eigenen, bereits im derzeitigen Transrapid vorhandenen Hochsetzsteller zur Batterieladung verbunden, so dass hier eine hohe Redundanz gewährleistet ist. Der aufgrund passiver Bauelemente recht unwahrscheinliche Ausfall eines Pick-up fällt damit kaum ins Gewicht.



Bild 4: Blick unter das Transrapidfahrzeug auf die mit Pick-ups ausgerüstete Verkleidungsstruktur

Bild 4 zeigt einen Blick auf die mit Pick-ups versehene Verkleidungsstruktur der Tragmagneten (gelb). Oben rechts (in rot) ist ein Teil des Statorpaketes inkl. Wicklung zu erkennen. Von außen unterscheidet sich die vordere Verkleidungsklappe mit Pick-up nicht von der dahinter liegenden herkömmlichen Variante.

2.2 Fahrwegseitige Komponenten

Zentrales Bauteil der ortsfesten Systeme ist der Wechselrichter, welcher die dreiphasig mit 50 Hz bereitgestellte Netzspannung in eine einphasige, hochfrequente umwandelt. Es handelt sich dabei um einen in mechanischer und elektronischer Hinsicht modifizierten Industrie-Wechselrichter, dessen Steuerkarte und Treiberstufe durch Eigenentwicklungen ersetzt wurden. Die Steuer- und Regelsoftware samt Ansteuerung wurde überarbeitet und den Erfordernissen angepasst.

Um die pro Fahrzeug übertragbare Leistung von der Anzahl zu versorgender Einheiten unabhängig zu machen, ist eine Stromquellencharakteristik erforderlich, die ein dem Wechselrichter nachgeschalteter Vierpol realisiert. Um die Schaltverluste der IGBTs zu minimieren, wird der Wechselrichter resonant betrieben. Er verfügt u. a. über eine automatische Erkennung einer Wirkleistungsentnahme. Dies ermöglicht eine drastische Herabsetzung der Verlustleistung für den Fall, dass bei Abwesenheit des Fahrzeugs keine Leistung benötigt wird. In diesem Fall wird auf den sogenannten Sensorstrom-Modus umgeschaltet, dessen Stromstärke gerade ausreicht, um ein einfahrendes Fahrzeug sicher zu erkennen. Unmittelbar nach der Detektierung des Fahrzeugs wird auf den Nennstrom von $200 A_{\text{eff}}$ umgeschaltet. Umgekehrt wechselt das System automatisch ohne Inanspruchnahme der Betriebsleittechnik wieder zurück, wenn das Fahrzeug den versorgten Bereich verlässt.



Bild 5: Blick in die Schaltschränke des Einspeisecontainers. Links der Vierpol während der Montage, rechts der Wechselrichter mit Schutz und Netzsicherungen

Bedingt durch spezifische örtliche Gegebenheiten ist eine Distanz von bis zu 1 km zwischen Wechselrichter und dem Einspeisepunkt am Fahrweg zu überbrücken. Dies geschieht vorzugsweise mittels eines niederinduktiven und im Außenraum magnetisch feldfreien Koaxialkabels (**Bild 6**), welches allerdings aus Gründen der außergewöhnlichen Einsatzbedingungen (hohe Leistung, hohe Frequenz, minimale Brandlast) speziell entwickelt werden musste. Das fehlende äußere Magnetfeld ermöglicht die wechselwirkungsfreie Verlegung in beliebiger Umgebung. Nachdem ein am Institut hergestelltes Labormuster (**Bild 7**) erfolgreich getestet wurde, konnte ein einsatztaugliches Exemplar entsprechender Länge in Auftrag gegeben werden. Der Innen- bzw. Außenleiter besteht aus Gründen der Minimierung der Verlustleistung (Skin-Effekt) im Unterschied zu den herkömmlichen Typen aus lackisolierten Einzeladern. Die speziell verröbelten Stränge sind zwecks Potentialsteuerung (Homogeni-

sierung der elektrischen Feldstärke) direkt mit einer leitfähigen Bandage umwickelt.

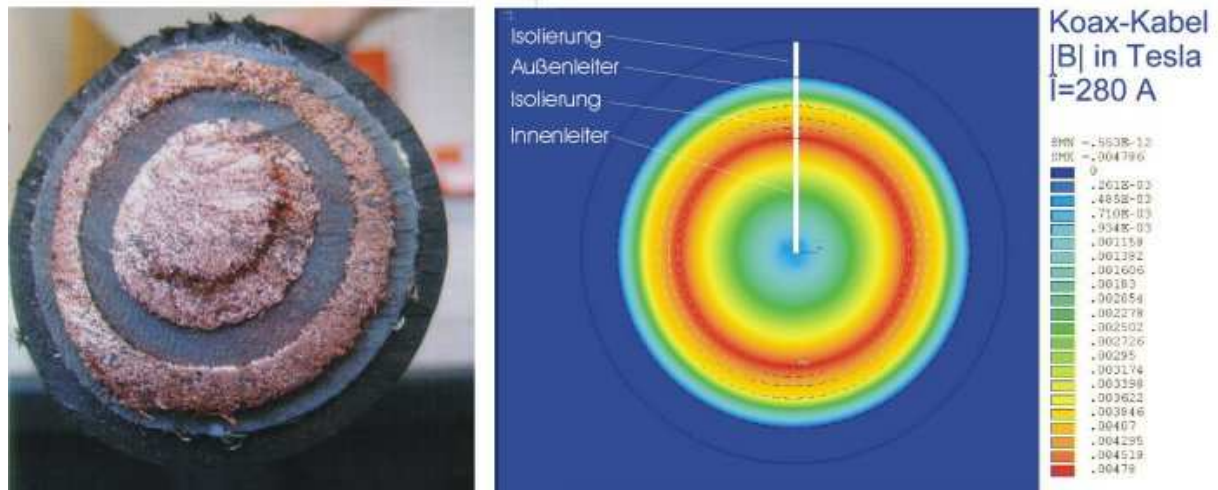


Bild 6: Querschnitt der koaxialen Speiseleitung zwischen Wechselrichter und Einspeisepunkt. Links das Originalkabel, rechts eine FEM-Berechnung der Flussdichte bei Nennstrom

Entlang des versorgten Fahrwegabschnittes ist beidseitig jeweils eine Leiterschleife mit eigenem Wechselrichter geplant. Auch hier besteht das Kabel aus so genannter Hochfrequenzlitze, die ebenfalls eigens entwickelt werden musste. Während der Qualifikationsphase wurde allerdings lediglich eine Seite ausgerüstet. Zur Kompensation der Induktivität sind in regelmäßigen Abständen Kondensatoren angebracht (**Bild 8**), so dass die Strecke aus Sicht des Wechselrichters eine reine ohmsche Last darstellt.



Bild 7: Herstellung eines Labormusters für ein Leistungs-Koaxialkabel für hohe Frequenzen am IMAB



Bild 8: Fahrwegträger mit Kabelhalterung aus faserverstärktem Kunststoffprofil sowie Kompensationskondensator und Funktionsüberwachung

3 ERFAHRUNGEN WÄHREND DER INBETRIEBNAHME

In Vorbereitung auf die Qualifikationsphase der berührungslosen Leistungsübertragung wurde im Emsland ein aus den Bestandteilen

- Wechselrichter 250 kW
- Vierpol
- ca. 1 km lange koaxiale Speiseleitung
- 300 m einseitig am Fahrweg verlegte Primärschleife (**Bild 8, Bild 9**)
- Fahrzeug mit 4 Pick-ups

aufgebautes System installiert. Aufgrund der im Vergleich zum Laboraufbau großen Ausdehnung der ortsfesten Anlage traten spezifische Erscheinungen auf, die am Laboraufbau nur qualitativ nachweisbar waren. Der tatsächliche Grad der Beeinflussung war im voraus jedoch nicht quantifizierbar. Hierzu zählen vor allen Dingen kapazitive Ströme durch die im bzw. auf dem Erdreich verlegte koaxiale Speiseleitung sowie die Beeinflussung des Primärteils durch das fahrzeugseitige Sekundärteil. Beides konnte durch entsprechende Gegenmaßnahmen beherrscht werden. Während mehrerer Überfahrten, zunächst mit niedriger Geschwindigkeit, später mit bis zu 350 km/h, wurde das Systemverhalten fahrzeugintern und extern registriert inklusive Auslösung eines Zwangshalts innerhalb des Primärteils. Dabei

wurde keine Beeinträchtigung der Fahrzeugsysteme festgestellt. In **Bild 9** ist eine Aufnahme des Fahrwegträgers mit dem darüber befindlichem Fahrzeug dargestellt. Auf der rechten Seite der Betonstruktur ist das verkleidete Primärteil zu erkennen sowie ganz außen (links und rechts) die Fahrzeugverkleidung der Tragmagneten mit integrierten Pick-ups. Sämtliche Einheiten zwischen Netzanschluss und Beginn der koaxialen Speiseleitung (Netztrafo, ggf. Drossel, Wechselrichter, Vierpol) sind in einem Stahlcontainer untergebracht (**Bild 10**) und bilden somit eine kompakte Einheit.



Bild 9: Blick von unten auf den Fahrwegträger mit darüber befindlichem Fahrzeug

Als Grundlage für die Auslegung zukünftiger Anlagen wurden u. a. Messungen der Systemgrößen wie Induktivität der Primärschleife, Verlustleistungen aller Komponenten insbesondere Wechselrichter, Koaxialkabel und Primärteil durchgeführt. Dabei konnte festgestellt werden, dass sämtliche Größen den Erwartungen entsprachen.



Bild 10: Einspeisecontainer (Außen- und Innenansicht) während der EMV-Messungen

Aufgrund der rel. hohen Arbeitsfrequenz von 20 kHz sind elektromagnetische Störungen nicht grundsätzlich auszuschließen. Da nach dem Wechselrichter allerdings nur Sinusgrößen vorkommen, waren breitbandige Störungen nicht zu vermuten. Um die EMV nachzuweisen, wurden seitens des TÜV, der Berufsgenossenschaft sowie weiterer unabhängiger Stellen entsprechende Gutachten erstellt, aus denen hervorgeht, dass für Fahrgäste und Wartungspersonal keinerlei Gefahr ausgeht. Ebenso sind die fahrwegseitigen Komponenten in dieser Hinsicht unproblematisch.

4 AUSBLICK

Nachdem sich die berührungslose Leistungsübertragung im industriellen Sektor bereits auf moderatem Leistungsniveau bewährt hat, steht nun eine höhere Leistungsklasse zur Verfügung. Für den Transrapid bedeutet das eine prinzipiell geschwindigkeitsunabhängige Leistungsübertragung, weniger Wartungsaufwand sowie einen erweiterten Einsatzbereich unter widrigen Umgebungsbedingungen (Niederschlag, Vereisung, Sandsturm ...).

Neben der Systemoptimierung aufgrund der bisher gewonnenen Erfahrungen wird derzeit an spezifischen Fragen bzgl. der Auslegung einer Anlage für die Magnetschnellbahnverbindung zwischen München-Hauptbahnhof und dem Flughafen *Franz-Josef-Strauß* gearbeitet, die sich u. a. durch Besonderheiten wie zu versorgende Tunnels und Weichen auszeichnet. Die Fahrzeit zwischen Innenstadt und Flughafen ließe sich von derzeit 45 Minuten (Bus, Kfz) auf 10 Minuten verkürzen.