

Ein Linearantrieb für ein magnetisch gelagertes, autonomes Transportfahrzeug

Dipl.-Ing. Dirk Brakensiek, Aachen, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Gerhard Henneberger, Aachen

Kurzfassung

Dieser Beitrag beschäftigt sich mit der Auslegung und der Inbetriebnahme eines Linear-Homopolarmotors als Antrieb eines magnetisch gelagerten, autonomen Transportfahrzeugs, sowie mit Messungen und Simulationen zum Fahrverhalten des Systems. Elektrische Komponenten wie Motor und Tragmagnet werden dabei in das mechanische System des Transportfahrzeugs integriert. Das Fahrzeug wird durch vier Tragmagnete schwebend gelagert und durch vier Linear-Homopolarmotoren angetrieben. Die benötigte Energie kann induktiv zum Fahrzeug übertragen werden, die Kommunikation mit dem Regelungsrechner kann per Funk erfolgen. Damit ist das Fahrzeug vollkommen autonom und kann sich frei und berührungslos bewegen. Die Strecke ist sowohl für das Schweben als auch für das Fahren rein passiv, und ist daher preiswert herzustellen und einfach aufzubauen. Durch das magnetische Schweben in Verbindung mit dem Linearantrieb arbeitet das System berührungsfrei. Dadurch ergeben sich Vorteile wie Verschleißfreiheit und hohe Geschwindigkeiten. Anwendungsgebiete eines derartigen Transportsystems sind beispielsweise Förderanlagen in Reinräumen und in der Lebensmittelindustrie oder Gepäckförderanlagen an Flughäfen.

Im folgenden Beitrag wird in einer Einleitung zunächst auf die Motivation und die Vorteile des Systems eingegangen. Der Beschreibung des Systems und des Funktionsprinzips des Motors schließen sich die Ergebnisse der Finiten-Elemente-Berechnung zur Auslegung der Maschine an. Weiterhin befasst sich der Beitrag mit dem Aufbau des am Institut für Elektrische Maschinen der RWTH Aachen errichteten Versuchsstandes und der Regelung sowie der Inbetriebnahme des Antriebs. Die Arbeit mit dem dabei eingesetzten DSP Controller Board wird erläutert, und die erzielten Fahrergebnisse werden gezeigt. Zur Simulation einer Kurvenfahrt des Fahrzeugs wird ein entsprechendes Simulationsmodell vorgestellt. Abschließend wird auf den Aufbau einer drahtlosen Datenübertragung eingegangen.

1 Einleitung

Magnetisches Schweben in Verbindung mit einem Linearantrieb bietet zahlreiche Vorteile, wie z.B. hohe Geschwindigkeit sowie Verschleiß- und Wartungsfreiheit. Ein derart gelagertes Transportfahrzeug ist daher äußerst zuverlässig. Des Weiteren treten keine mechanischen Laufgeräusche auf. Aufgrund der berührungs- und reibungsfreien Bewegung ist das System vollkommen abriebsfrei und eignet sich daher besonders für den Einsatz in sensiblen Bereichen wie z.B. in der Nahrungsmittel- oder der Halbleiterindustrie. Auch beim Transport von Gepäckstücken an Flughäfen können durch die Wartungsfreiheit Personalkosten eingespart werden. Weil das Fahrzeug etwa die doppelte Geschwindigkeit eines Förderbandes erreicht, kann damit die Gepäckumschlagszeit und damit auch die Umsteigezeit von einem Flugzeug zum anderen signifikant reduziert werden. In der Anwendung kann eine Vielzahl von Fahrzeugen auf einer langen, verzweigten Strecke eingesetzt werden, um ein flexibles und leistungsfähiges Transportsystem zu schaffen. Da wegen der vollständig passiv aufgebauten Strecke bei einem Ausfall des Systems nur ein Fehler an einem Fahrzeug vorliegen kann, ist das System sofort nach Entfernen des fehlerhaften Fahrzeugs wieder betriebsbereit.

2 Das Transportsystem

Beim vorgestellten Transportsystem kann sich ein Fahrzeug entlang einer vorgegebenen, passiven Strecke fortbewegen. Das Fahrzeug seinerseits besteht aus einem Fahrgestell, auf dem z.B. eine Gepäckschale montiert ist. Zwei Querträger, die über einen Längsträger miteinander verbunden sind, bilden das Fahrgestell. An den Enden der Querträger, also an den

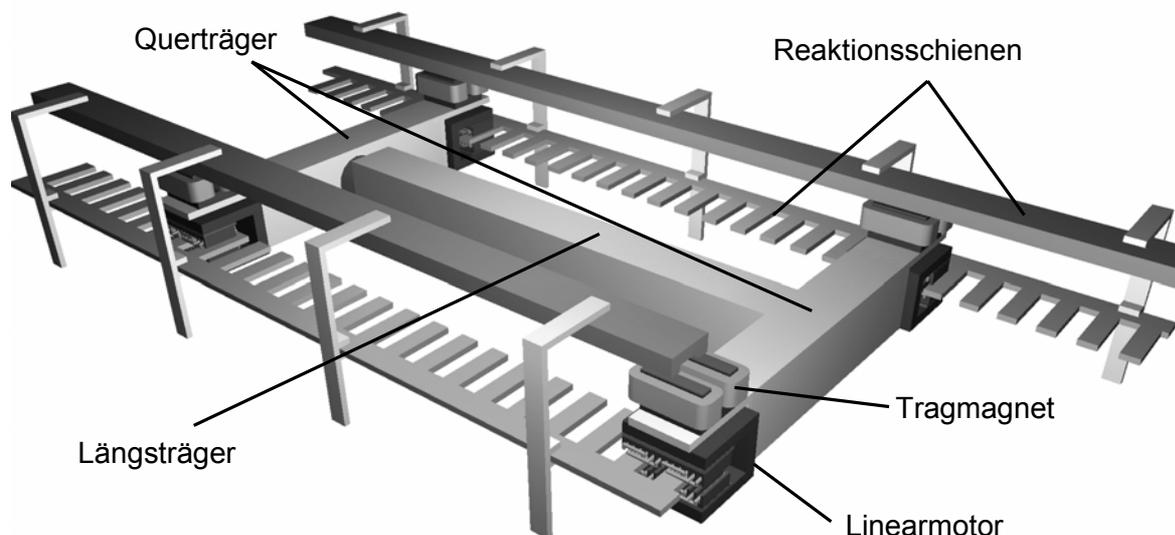


Bild 1: Schematischer Aufbau des Förderfahrzeugs

Ecken des Fahrzeugs, sind vier Triebköpfe angebracht. Die Triebköpfe bestehen jeweils aus einem Tragmagneten, einem Linearmotor und optional aus einem Pickup für die induktive Energieübertragung. Als Linearmotor wurde ein Kurzstator-Homopolarmotor gewählt, dessen Funktion im folgenden Kapitel näher erläutert wird [1]. Der über dem Motor angeordnete Tragmagnet kann als U- oder E-förmiges Joch ausgeführt sein. Permanentmagnete auf den Schenkeln des Jochs sorgen für die verlustfreie Grunderregung des Tragsystems. Der Fluss der Permanentmagnete schließt sich über das Joch und die über dem Magneten angeordnete Reaktionsschiene. Die Permanentmagnete sind so ausgelegt, dass die durch sie entstehende Kraft bei einem bestimmten Nennluftspalt gerade die Gewichtskraft des Fahrzeugs kompensiert. Ein Strom in den um die Schenkel des Tragmagneten gewickelten Spulen stabilisiert den Magneten in seinem Arbeitspunkt. Da die Tragkraft des Magneten umgekehrt proportional zum Quadrat des Luftspaltes ist, wird bei beladenem Fahrzeug ein Luftspalt kleiner als der Nennluftspalt gewählt. Dazu wird durch Einspeisen eines Stromes das Fahrzeug soweit angehoben bis der mittlere Strom in den Spulen minimal wird. Je ein Wirbelstromsensor misst den Luftspalt zwischen der Reaktionsschiene und dem Magneten. Um höhere Reluktanzkräfte zur Seitenführung zu erreichen, wird die Reaktionsschiene genutet. Die Ausführung des Tragmagneten als E-Joch verdoppelt für eine bestimmte laterale Auslenkung noch einmal die Seitenführungskraft im Vergleich zur U-förmigen Variante. Die Umrichter der Tragmagnete und der Motoren befinden sich ebenso wie Netzgeräte zur Energie-

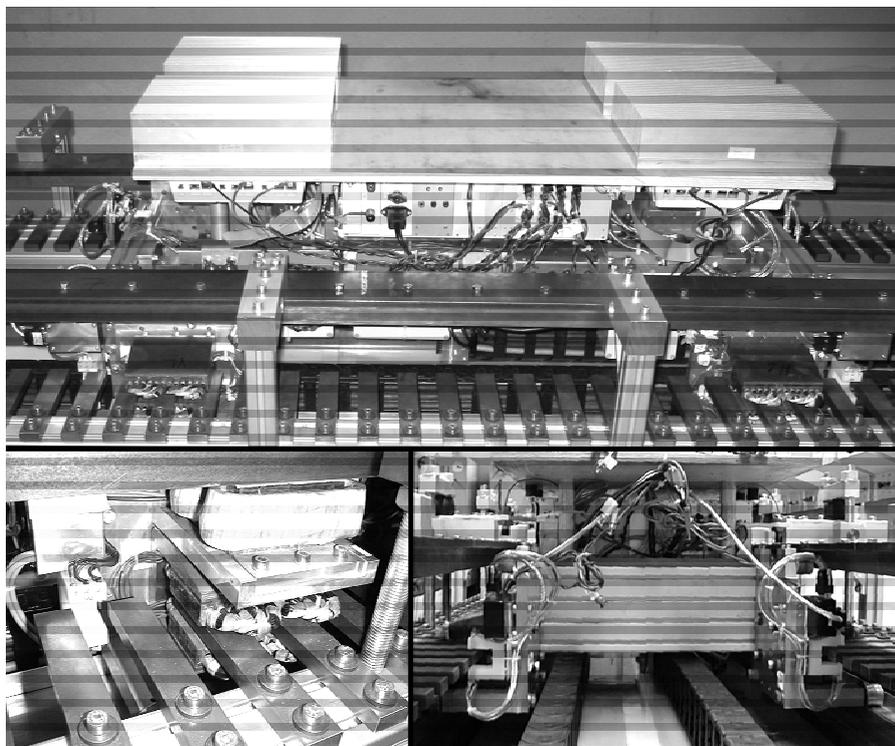


Bild 2: Der Versuchsstand

versorgung auf dem Fahrzeug. Die Polradlage des Motors wird mit drei im Abstand von 10 mm angeordneten Lichtschranken bestimmt. Die Strecke besteht aus zwei passiven Schienen, eine als Reaktionsschiene zum Tragen und seitlichen Führen, eine andere als Reaktionsschiene für den Antrieb. In Bild 1 ist der Aufbau des Systems schematisch dargestellt, Bild 2 zeigt ein Foto des am Institut aufgebauten Versuchstandes.

3 Der Homopolarmotor

Das Prinzip des Homopolarmotors ist in Bild 3 gezeigt. Zwei Selten-Erd-Permanentmagnete erzeugen einen Erregerfluss, der durch Flussleitstücke in der Strecke gebündelt wird und sich über die Anker und das Joch schließt. Betrachtet man nun die Induktion im Luftspalt, so erhält man durch die Flussbündelung eine hohe Flussdichte im Bereich A, während die Flussdichte im Bereich B gering ist. Werden die als konventionelle Wanderfeldwicklungen ausgeführten Ankerspulen in geeigneter Weise feldorientiert bestromt, so erreicht man im Bereich A eine hohe Antriebskraft in Bewegungsrichtung, während im Bereich B eine geringere Kraft entgegen der Bewegungsrichtung wirkt. Die resultierende Kraft wirkt in Antriebsrichtung. Die Ankerwindungen werden mit blockförmigen Strömen gespeist, d.h. zu einem bestimmten Zeitpunkt ist eine Phase positiv bestromt, eine andere Phase ist negativ bestromt und die dritte Phase ist stromlos. Der Strom kommutiert also alle 60° elektrisch zur nächsten Phase. Obwohl der Luftspalt des Motors aufgrund der Kopplung zum Tragsystem und der dort auszuregelnden Schwankungen groß ist, erreicht der Motor je nach Geschwindigkeit einen verhältnismäßig guten Wirkungsgrad. Aufgrund der doppelseitigen Ausführung

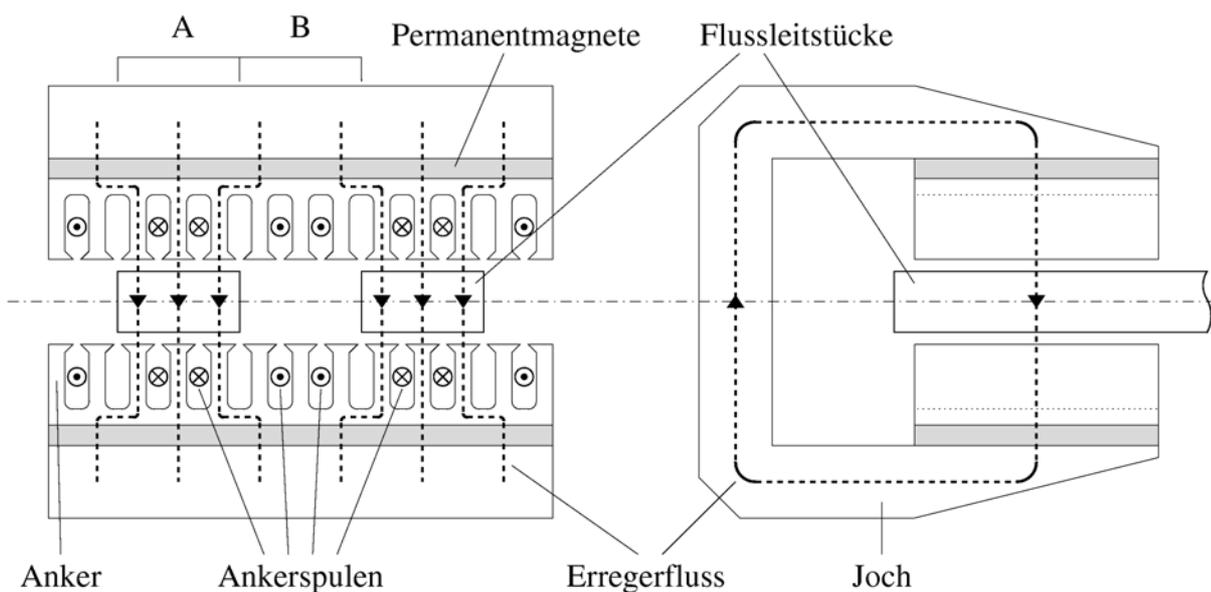


Bild 3: Funktionsprinzip des Homopolarmotors

der Maschine entsteht in der Symmetrielage der Flussleitstücke keine Normalkraft. Hierbei handelt es sich um eine labile Gleichgewichtslage. Wird der Motor aufgrund einer vertikalen Bewegung der Tragemagnete aus der Symmetrielage ausgelenkt, so entwickelt er Normalkräfte annähernd linear zur Auslenkung, die aber im Vergleich zu anderen Motorprinzipien gering sind. Die Bezeichnung Homopolarmaschine rührt daher, dass sich sowohl die Erregung als auch die Wanderfeldwicklung auf demselben Schenkel befinden.

4 Berechnung der Kräfte

Zur Auslegung des Motors und zur Kraftbestimmung wurde ein dreidimensionales Finite-Elemente-Modell des Motors erstellt. Die Kräfte des Motors in die drei möglichen Raumrichtungen wurden für 30 verschiedene Positionen der Flussleitstücke über einer elektrischen Periode berechnet [2]. Die mit der kommerziellen Software Ansys aufgebauten Modelle bestehen aus ca. 450.000 Elementen und 80.000 Knoten. Mittels am Institut entstandener Softwarepakete wurde das Feldproblem gelöst und die Kräfte berechnet [3]. Neben den Kräften unter Nennbedingungen wurden auch die Kräfte bei Überlast und bei vertikaler Verschiebung des Motors bestimmt. Bild 4 zeigt die Antriebskraft des Motors bei Nennstrom, die Rastkraft in Antriebsrichtung, sowie die um die Rastkraft bereinigte Antriebskraft. Die Rastkraftwelligkeit, die in dieser Maschine wegen des End- und des Nuteffektes entsteht, ist mit ± 30 N vergleichsweise hoch. Für die Anwendung als Fördersystem hat dies allerdings aufgrund der Trägheit des Gesamtsystems keinen Einfluss. Die rein elektrisch erzeugte Kraft besitzt dagegen nur äußerst geringe Schwankungen.

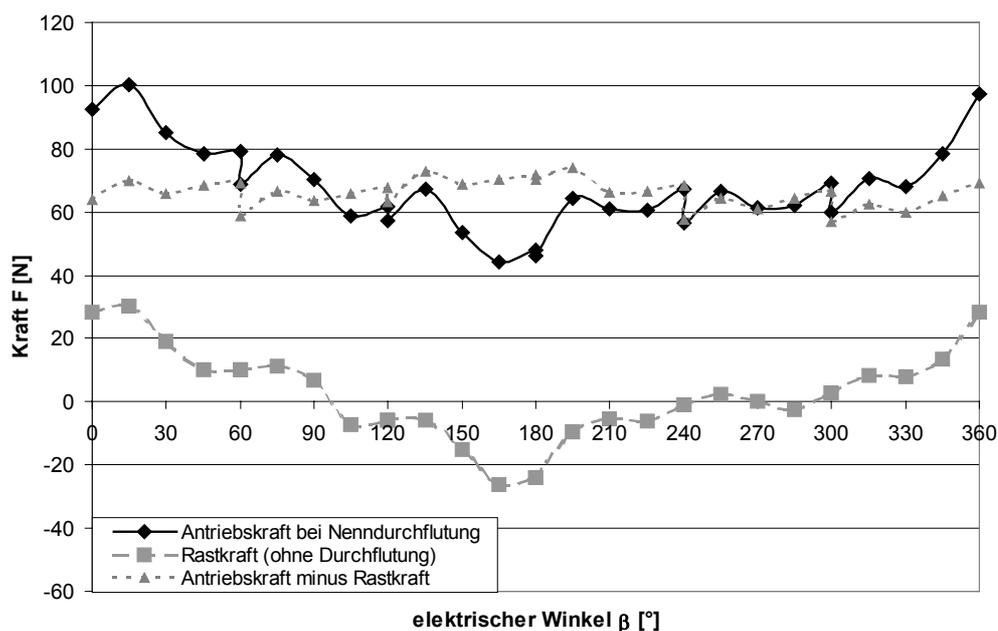


Bild 4: Kräfte in Antriebsrichtung unter Nennbedingungen

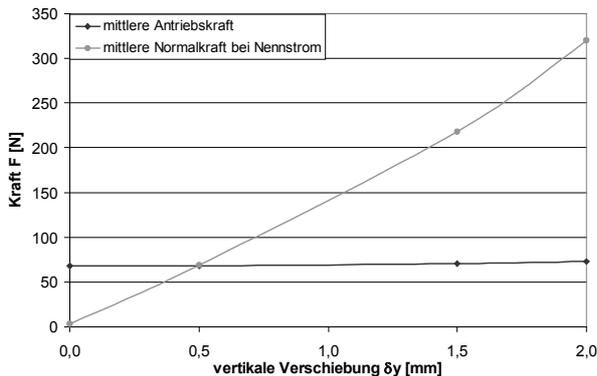


Bild 5: Kräfte bei vertikaler Auslenkung

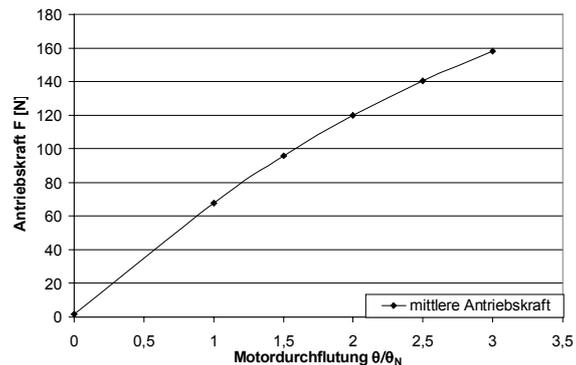


Bild 6: Kräfte bei Überlast

Mit einer mittleren Antriebskraft eines Motors von 68 N besitzt das Fahrzeug folglich bei vier Motoren eine Nennantriebskraft von 272 N. Bei einer Masse von etwa 125 kg wird damit eine Nennbeschleunigung von $a_{nenn} = 2,18 \text{ m/s}^2$ erreicht. Bild 5 zeigt die mittleren Antriebs- und Normalkräfte bei vertikaler Verschiebung des Motors. Es ist zu erkennen, dass als Folge einer vertikalen Verschiebung des Motors Normalkräfte entstehen, die annähernd linear zur Verschiebung sind. Die Antriebskräfte sind dagegen unabhängig von der vertikalen Verschiebung. Bei einer Kombination des Motors mit einem Tragsystem belasten diese Normalkräfte das Schwebesystem. Beim ausgelegten Motor sind die Normalkräfte mit 140 N/mm allerdings äußerst gering. In Bild 6 ist zu erkennen, dass bei etwa 1,4-facher Motornenn-durchflutung Sättigung eintritt, und dass das Fahrzeug bei 3-facher Nenndurchflutung eine maximale Beschleunigung von $a = 5,06 \text{ m/s}^2$ besitzt.

Neben der Kraftbestimmung auf einer geraden Strecke wurde auch eine Kraftberechnung für eine Kurvenfahrt durchgeführt. Als Kurveninnenradius wurde $r_i = 1 \text{ m}$ festgelegt. Hierbei muss aufgrund der unterschiedlichen Überdeckung von Primärteil und Flussleitstücken die Gesamtkonstruktion des Fahrzeugs miteinbezogen werden. Besitzt jede Achse ein Gelenk, so unterscheidet sich die Überdeckung von Primär- und Sekundärteil in der Kurve kaum von der entsprechenden Überdeckung auf der Geraden. Demzufolge sinkt die Antriebskraft in der Kurve nur um 2 % ab. Besitzt das Fahrzeug bei einer Fahrzeuglänge von $l_{FzG} = 1,2 \text{ m}$ allerdings keine Gelenke, so sinkt die Kraft um 57,5 % ab. Eine kurze Fahrzeuglänge, große Kurvenradien oder alternativ Gelenke sind somit anzustreben.

Die Seitenführungskräfte werden beim Fahrzeug fast komplett von den Tragsmagneten übernommen. Verjüngt man die Flussleitstücke an der Innenseite des Motors, so kann man aber auch mit den Motoren eine Seitenführungskraft erzeugen: Ist die Höhe der Flussleitstücke an Innen- und Außenseite um lediglich 6,6 % verschieden, so kann man die Seitenführungskraft

je nach Eintauchtiefe der Flussleitstücke in den Motor um 20 bis 40 % steigern. Dabei verringert sich die Antriebskraft nur um etwa 6 %, die Normalkraft geht um 10 bis 15 % zurück. Lässt man eine stärkere Verjüngung der Flussleitstücke zu, so steigt die Seitenführungskraft zwar an und die Normalkraft sinkt, allerdings sinkt auch die Antriebskraft überproportional stark.

5 Der Versuchsstand

Der Versuchsstand lässt sich im Wesentlichen in zwei Teile aufteilen: Er besteht zum einen aus dem Fahrzeug und der Strecke, die bereits im zweiten Kapitel beschrieben wurden, und zum anderen aus dem Kontrollstand. Beim Kontrollstand handelt es sich um ein dSPACE Prozessorboard, auf dem die Regelungssoftware in Echtzeit ausgeführt wird. Die zur Regelung notwendigen Positionssignale der Lichtschranken werden dem Prozessorboard über eine Potentialtrennung zugeführt. Die mit Stromwandlern gemessenen Istströme der Motoren werden ebenfalls an das Board übermittelt. Aus dem Vergleich von Soll- und Istströmen generiert die Stromregelung die Gate-Ansteuersignale für die Leistungselektronik, die über eine Pegelanpassung an die Umrichter geleitet werden. Zurzeit erfolgt die Signalübertragung und die Energieversorgung über Kabel, die über eine Schleppkette zum Fahrzeug geführt werden. Bild 7 zeigt schematisch die Struktur des Versuchsstands.

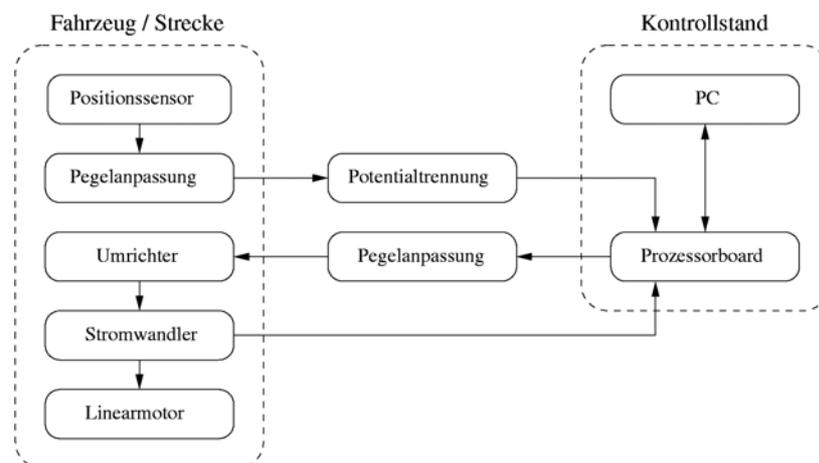


Bild 7: Schematische Darstellung des Versuchsstandaufbaus

6 Regelung und Inbetriebnahme

Die Regelungsstruktur des Antriebs ist als dreistufige Kaskadenregelung aufgebaut [6]. Die innerste Schleife ist die Stromregelung, die mittlere Schleife die Geschwindigkeitsregelung und die äußerste Schleife die Positionsregelung. Positions- und Geschwindigkeitsregler sind als PI-Regler mit Ausgangsbeschränkung und Anti-Windupschleife ausgeführt. Der Strom-

regler ist als Toleranzbandstromregler realisiert. Alternativ hierzu wurde auch ein PWM-Stromregler getestet, der zur Toleranzbandstromregelung vergleichbare Ergebnisse liefert. Beim PWM-Stromregler kann jedoch durch geeignete Parametrierung des Reglers die Geräuschentwicklung des Motors deutlich verringert werden. Beim Aufbau des Versuchstandes und dem Entwurf der Regelung wurde Wert darauf gelegt, möglichst viele Teile als Software zu implementieren, um eine große Flexibilität zu erhalten.

Die zur Regelung benötigte aktuelle Geschwindigkeit wird durch Filterung und Differenzierung aus dem Positionssignal gewonnen. Als Filter kommt dabei ein Butterworth-Tiefpass zweiter Ordnung mit einer Grenzfrequenz von 10 Hz zum Einsatz. Das Positionssignal wird ebenfalls zur phasenrichtigen Bestromung des Motors verwendet.

Bild 8 zeigt das Ergebnis eines Fahrversuchs am Prüfstand. Ein mit MLIB/MTRACE geschriebenes Fahrprogramm steuert dabei die Sollwertvorgaben für das Fahrzeug. Auf einer geraden Strecke von 5 m Länge wird eine maximale Geschwindigkeit von $3,3 \text{ m/s}$ erreicht. Die scheinbar großen Geschwindigkeitsschwankungen bei langsamer Fahrt entstehen aufgrund der Differenzierung des mit 10 mm vergleichsweise grob aufgelösten Wegsignals. Daher werden die Regler bei einer Positionsabweichung kleiner als 35 mm abgeschaltet.

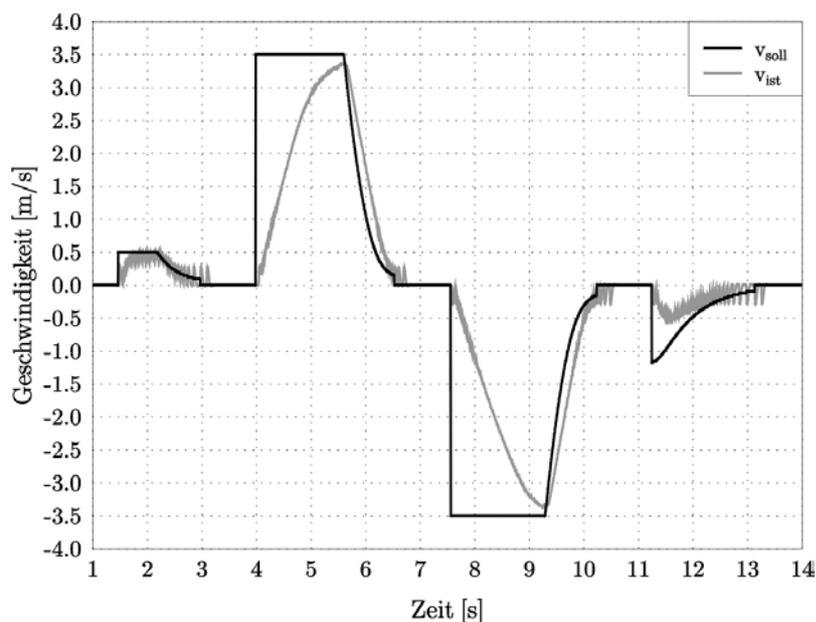


Bild 8: Fahrergebnisse

Die komplette Regelung läuft auf einem DS1103 PPC Controller Board. Das Modell der Regelung wird zuerst graphisch als Matlab/Simulink Modell erstellt [5]. In diesem Zustand kann die Regelung auch durch eine Simulation auf ihre Funktionsfähigkeit überprüft werden. Anschließend wird das Simulink-Modell mit Hilfe des Real-Time-Workshops in eine auf der Hardware lauffähige Applikation compiliert. Zur Beeinflussung der Regelungsvariablen des

Modells wird danach mit dem Programm ControlDesk eine Monitoring-Oberfläche erzeugt, aus der heraus der Bediener das Fahrzeug steuern kann [4].

7 Simulationsmodell

In der Anwendung soll das Fahrzeug auch in der Lage sein, Kurven zu durchfahren. Um nun eine geeignete Strategie für eine Kurvenfahrt zu erarbeiten, wird ein Simulationsmodell des Fahrzeugs entwickelt. Da schon die Regelung in Matlab/Simulink implementiert wurde, bietet sich für die Erstellung des Simulationsmodells ebenfalls dieses Programm an. Wegen der hohen Geschwindigkeit des Stromreglers und der Trägheit des kompletten Fahrzeugs werden der Stromregler und der Umrichter im Simulationsmodell vernachlässigt, der Sollstrom wird also gleich dem Iststrom gesetzt. Für die Simulation wird demnach die Regelung des realen Systems nahezu unverändert übernommen und das Fahrzeug durch ein Modell der Regelstrecke ersetzt, das in Bild 9 dargestellt ist.

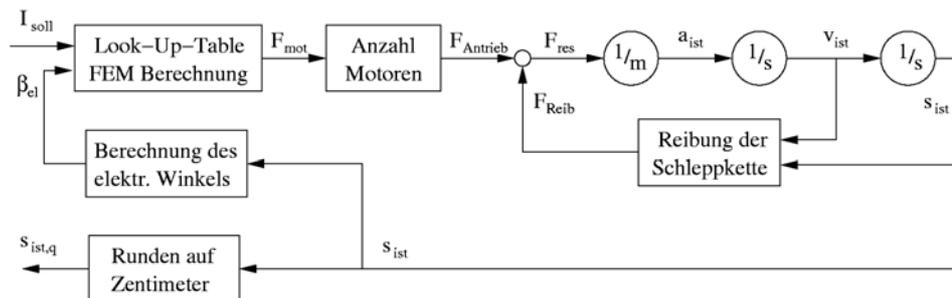


Bild 9: Das Modell der Regelstrecke

Mit Hilfe einer aus den FEM-Kraftberechnungen stammenden Look-Up-Table wird die dem aktuellen Strom entsprechende Kraft eines Motors bestimmt. Um die resultierende Kraft zu erhalten, wird von der Gesamtkraft aller Motoren die Reibkraft der Schleppkette abgezogen. Nach dem Newton Gesetz $F = m \cdot a$ kann mit der Masse des Fahrzeugs die Beschleunigung und durch zweifache Integration der zurückgelegte Weg des Fahrzeugs berechnet werden. Aus dem kontinuierlich verlaufenden Weg des Fahrzeugs wird zum einen der für die Kraftbestimmung notwendige elektrische Winkel des Motors bestimmt, und zum anderen durch Rundung die Funktion des Wegensensors nachgebildet. Weil die Parameter der Reibkraft der Schleppkette nicht gemessen werden können, werden sie in der Simulation derart variiert, dass simulierter und gemessener Geschwindigkeitsverlauf übereinstimmen. Die Korrektheit dieses Vorgehens wird im Folgenden gezeigt. Bild 10 zeigt den Vergleich von gemessener und simulierter Istgeschwindigkeit und Istposition für eine Sollgeschwindigkeit von $0,5 \text{ m/s}$.

Es ist kaum ein Unterschied festzustellen. In gleicher Weise korrespondieren Messung und Simulation für andere Sollgeschwindigkeiten, z.B. 2 m/s . Man kann feststellen, dass das Modell die Realität mit hinreichender Genauigkeit abbildet.

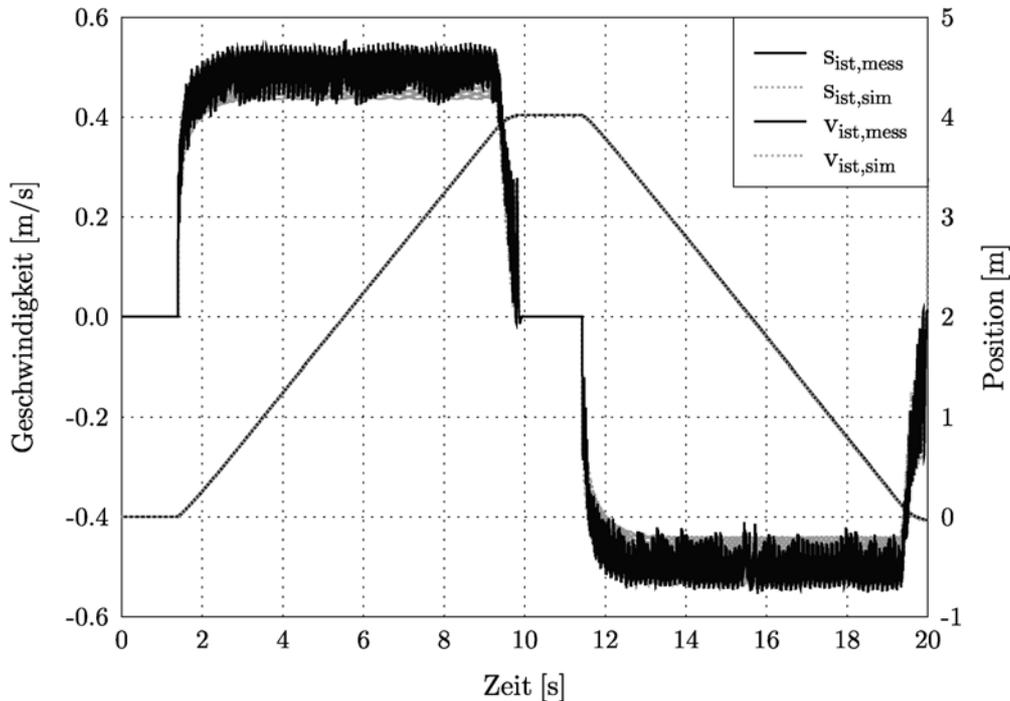


Bild 10: Vergleich zwischen Messung und Simulation

Aufgrund der Dimensionierung der Kurve mit einem Innenradius von $r_i = 1 \text{ m}$ und des Fahrzeugs mit einer Länge von $l_{FzG} = 1,2 \text{ m}$ ist es notwendig, beide Fahrzeugachsen mit Gelenken zu versehen und jeden Motor einzeln anzusteuern. In der Kurve müssen nun bei unveränderter Bewegung des Fahrzeugs in der Kurve die inneren Motoren entsprechend des Radienverhältnisses einen kürzeren Weg, die äußeren Motoren einen längeren Weg in der gleichen Zeit zurücklegen. Daher werden bei Eintritt einer jeden Achse in die Kurve die Sollgeschwindigkeiten der inneren und äußeren Motoren angeglichen. Zusätzlich wird über einen Kurvenregler die Abweichung der Achse von der idealen, radialen Stellung bestimmt und als Stellgröße ein zusätzlicher Sollstrom für den inneren und äußeren Motor addiert. Als dritte Maßnahme wird, um der Achse analog zum Radiensprung zwischen Gerade und Kurve das Einlenken zu erleichtern, ein Stromstoß auf den äußeren Motor gegeben. Das daraus resultierende Regelmodell ist in Bild 11 dargestellt. Für die Simulation werden wieder die Stromregler und die Umrichter vernachlässigt. Als Regelstrecke wird das Modell nach Bild 9 verwendet, es werden allerdings die Antriebskraft und die Reibkraft sowie die Masse jeweils nur auf einen Motor bezogen. Im Vergleich zum Modell mit nicht einzeln angesteuerten Motoren sind diese Werte geviertelt. Das Modell der gesamten Regelstrecke wird also auf alle vier

Einzelregelstrecken bzw. Motoren aufgeteilt. Die Rückkopplung der Einzelteile untereinander geschieht durch die Mittelwertbildung der Einzelwege.

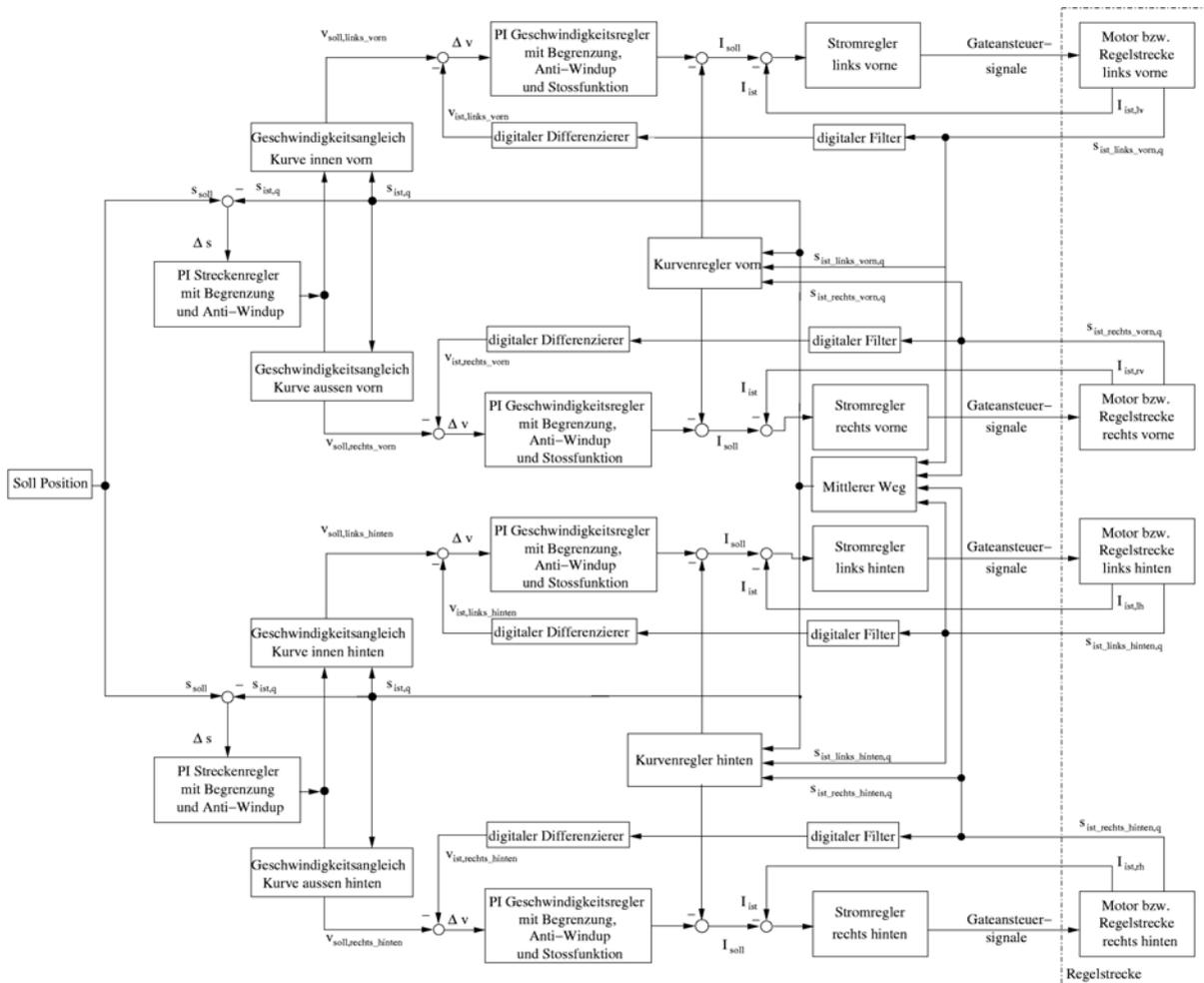


Bild 11: Regelmodell für die Kurvenfahrt

Zurzeit wird am Versuchsstand eine Kurve aufgebaut, um die in der Simulation erprobten Regelstrategien in der Praxis umzusetzen.

8 Drahtlose Datenübertragung

Wie bereits erwähnt, wird das Fahrzeug zunächst durch eine Schleppkette, die unter dem Fahrzeug läuft, mit Energie versorgt und über Mess- und Steuerkabel betrieben. Da das Transportfahrzeug am Ende der Entwicklung autonom und über beliebig lange Wegstrecken einsetzbar sein soll, ist es erforderlich, jede leitungsgebundene Verbindung zwischen Fahrzeug und Strecke zu vermeiden. Zur Bereitstellung der Energie existieren zwischenzeitlich

induktive Energieübertragungen in der entsprechenden Leistungsklasse. Zur schnellen Datenübermittlung wird eine Funkstrecke aufgebaut.

Die Signale lassen sich in die digitalen Signale der Lichtschrankenwegerfassung und zur Ansteuerung der Umrichter und in die analogen Signale der Istströme der Motoren unterteilen. Bei einer Regelzykluszeit von ca. 0,1 ms darf die Datenübertragung zwischen Fahrzeug und Kontrollstand nicht wesentlich länger als diese Regelzeit dauern. Aufgrund der hohen Geschwindigkeitsanforderung an die Datenübertragung werden die Signale nicht alle über einen Kanal, sondern jeweils über einen separaten Kanal übertragen.

Realisiert wird die Funkstrecke mit Modulen, die in den lizenzfreien sog. ISM-Bändern arbeiten. Die ISM-Bänder (Industrial-Scientific-Medical) sind bestimmte Frequenzbereiche (z.B. 434 MHz oder 2,4 GHz), die ohne Autorisation für bestimmte Anwendungen, eben Industrie, Wissenschaft und Medizin, mit kleiner Leistung (± 10 dBm) betrieben werden können. Diese Frequenzen liegen einem internationalen Abkommen zugrunde.

Für die Übertragung der analogen Stromsignale wurde ein Modul im 2,4 GHz-Bereich gewählt, die Übertragung der digitalen Lichtschrankensignale geschieht im 434 MHz-Band. Für die Iststromerfassung wird der Strom im Motor mit einem Stromwandler auf eine Spannung abgebildet. Diese Spannung kann zum einen über ein Kabel zum Kontrollstand übertragen werden oder zum anderen über das 2,4 GHz Funkmodul, nachdem sie zunächst mit einem Spannungs-zu-Frequenz-Wandlerbaustein (U-F Wandler) frequenzmoduliert wurde. Der U-F Wandler transformiert eine Signalspannung von -10 V in ein Rechtecksignal mit einer Amplitude von 1 V und einer Frequenz von 30 kHz und eine Signalspannung von $+10$ V in ein Rechtecksignal mit einer Amplitude von 1 V und einer Frequenz von 300 kHz. Nach der Übertragung wird die Frequenzmodulation mit einem entsprechenden Frequenz-zu-Spannungs-Wandlerbaustein wieder rückgängig gemacht. Hier kann jedoch nur eine unipolare Spannung von 0 V bis 10 V erzeugt werden, was im Betrieb aber keine Einschränkung darstellt. Bild 12 zeigt die Signalwege schematisch.

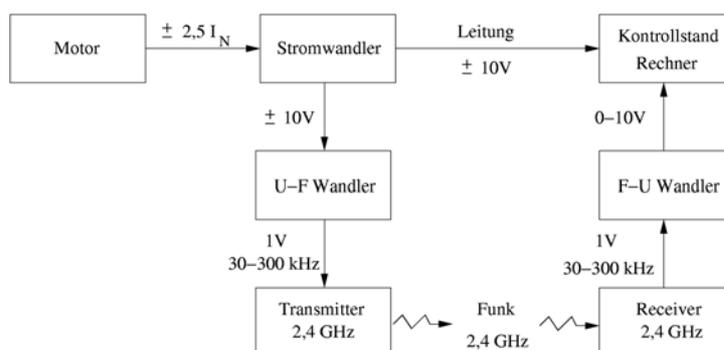


Bild 12: Funkübertragung der analogen Signale

Die Signalverzögerung durch das Funkmodul beträgt lediglich $0,4 \mu s$. Durch die gesamte Signalvor- und -nachbereitung stellt sich eine Verzögerung von $0,15 ms$ ein, d.h. nur 1,5 Regeltaktzyklen. Bild 13 zeigt den Vergleich der Leitungs- und der Funkübertragung für den gemessenen Iststrom einer Phase bei Betrieb des Motors. Das per Funk übertragene Stromsignal deckt sich vollkommen mit dem über die Leitung übertragenen Stromsignal. Die Stromsignale der anderen beiden Phasen sind jeweils um 120° phasenverschoben und decken sich ebenfalls mit dem über die Leitung übertragenen Signal.

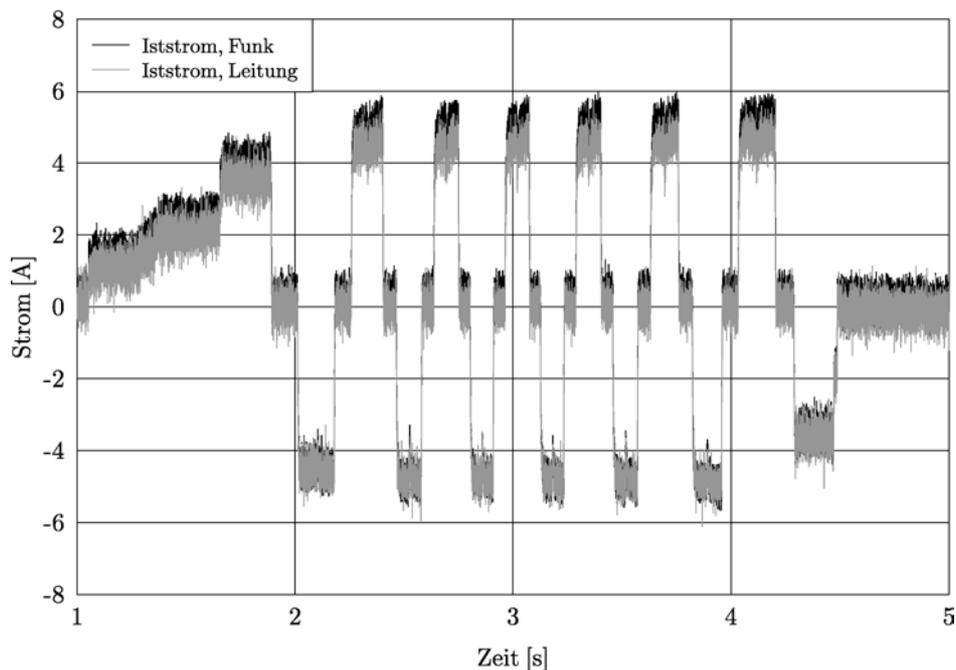


Bild 13: Ergebnis der Funkübertragung, Iststrom

Für die Übertragung der digitalen Wegsignale wird ein Funkmodul im 434 MHz-Band mit einer Maximalübertragungsrate von 4,8 kBit/s ausgewählt. Die Verzögerungszeit des Funkmoduls beträgt in etwa $0,25 ms$, daher ist es für die Anwendung geeignet. Dieses Modul hat allerdings den Nachteil, dass es erst für Übertragungen ab etwa 300 Bit/s eingesetzt werden kann, da es unter dieser Mindestübertragungsrate zu Schwingungen kommen kann. Daher wird das Nutzsignal der Lichtschranken mit 1 kHz manchestercodiert. Dadurch überträgt das Funkmodul immer mit einer Rate von 1 kBit/s.

Bei der Manchestercodierung wird eine logische „1“ des Nutzsignals in eine „01“ Folge und eine logische „0“ in eine „10“ Folge codiert. Diese Codierung kann durch eine einfache XOR-Verknüpfung des Nutzsignals mit einem Clocksignal erfolgen. Um das Nutzsignal mit dem Clocksignal zu synchronisieren, wird das Nutzsignal zunächst über ein D-Flip-Flop geführt. Die Realisierung der Manchestercodierung ist in Bild 14 dargestellt.

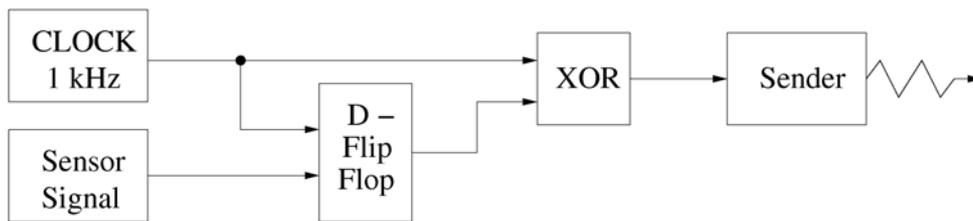


Bild 14: Manchestercodierung

Das derart codierte Signal wird über die Funkstrecke übertragen und muss dann auf der Empfangsseite wieder decodiert werden. Die Decodierung wird softwareseitig durchgeführt. Sie beruht auf der Tatsache, dass im codierten Signal für zwei Clocktakte derselbe Wert anliegt, wenn das Nutzsignal seinen Pegel geändert hat. Folgen zwei Nullen aufeinander, so muss das Nutzsignal von „Low“ auf „High“ gewechselt haben, folgen zwei Einsen aufeinander, so muss das Nutzsignal von „High“ auf „Low“ gegangen sein. Bild 15 zeigt exemplarisch die in SMD-Technik aufgebaute Platine mit Manchestercodierung und Sender.

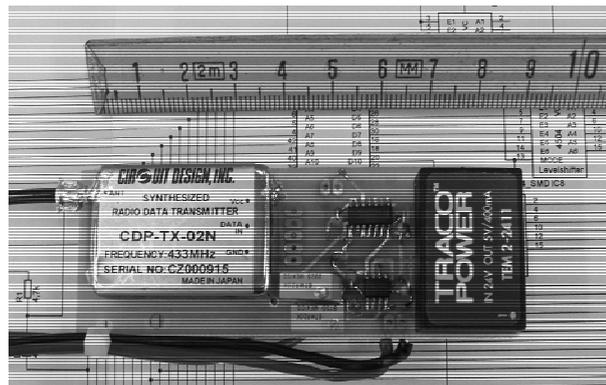


Bild 15: Senderplatine mit Manchestercodierung

Überträgt man auf verschiedenen Sendefrequenzen alle drei Lichtschrankensignale auf diese Art, so kann man in gewohnter Weise den zurückgelegten Weg des Fahrzeugs bestimmen. Bild 16 zeigt einen Ausschnitt der per Funk und per Leitung übertragenen Wegsignale bei einer Fahrt des Fahrzeugs. Das per Funk übertragene Signal folgt dem über Leitung übertragenen Signal mit einer minimalen Verzögerung von durchschnittlich etwa 0,7 ms.

Geht man nun davon aus, dass sich die Geschwindigkeit des Fahrzeugs aufgrund seiner Trägheit zwischen zwei Wegmessimpulsen der Lichtschranke nicht allzu stark ändert, so kann diese durchschnittliche Verzögerung herausgerechnet und korrigiert werden. Das derart generierte Signal besitzt dann im Mittel keine Verzögerung gegenüber dem über die Leitung übertragenen Signal mehr. Hierbei merkt man sich bei jedem per Funk übertragenen Impuls die Zeit, die seit dem letzten Impuls vergangen ist. Da bekannt ist, dass der aktuelle

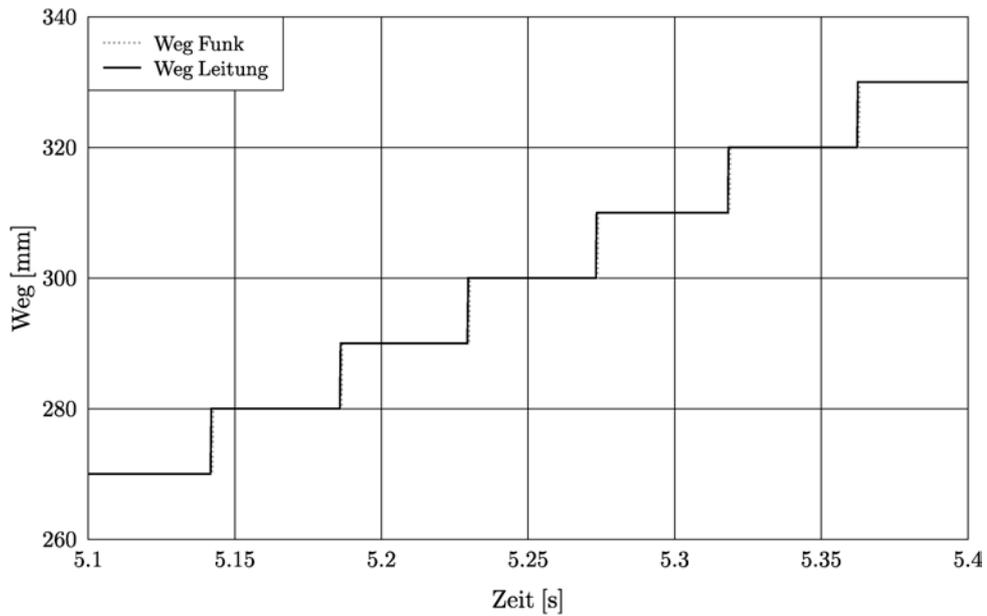


Bild 16: Funk- und Leitungsübertragung des Wegsignals

Impuls bereits 0,7 ms zu spät gekommen ist, kann nun ein Impuls generiert werden, der um eben diese Zeit früher als der vergangene Impuls kommt. Werden Sonderfälle wie starkes Beschleunigen oder Verzögern ausgeschlossen, so erhält man die in Bild 17 dargestellte Häufigkeitsverteilung der Verzögerungen von verzögertem Originalfunksignal und korrigiertem Signal. Es ist zu erkennen, dass die Verzögerung des korrigierten Signals im Mittel 0 ms beträgt, allerdings hat die Streuung der Verzögerung zugenommen.

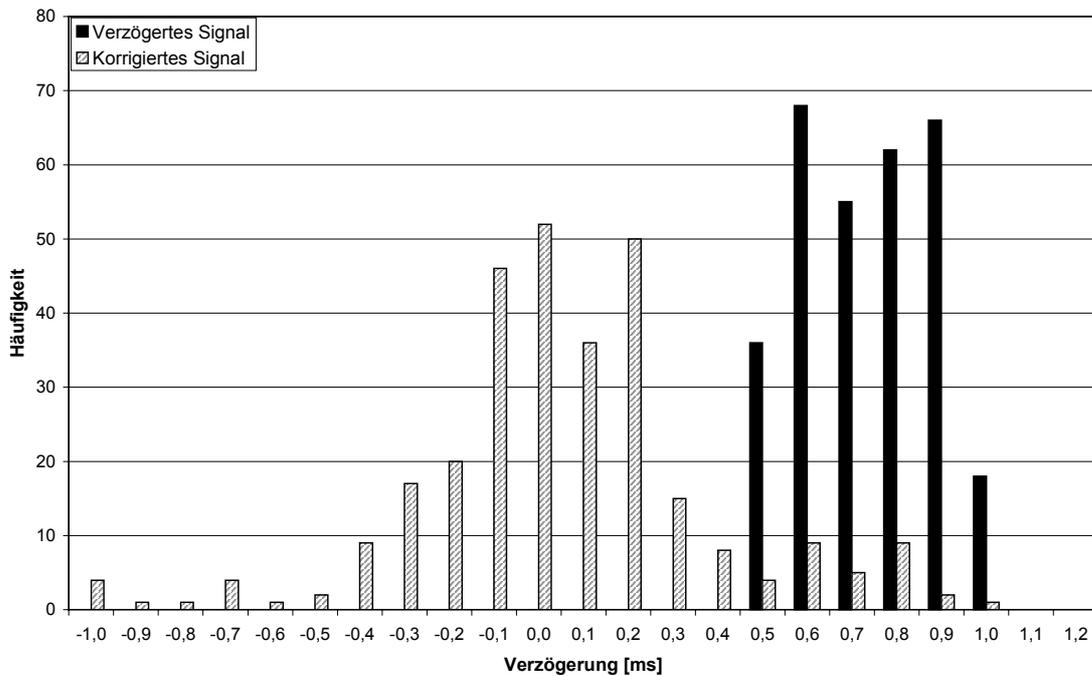


Bild 17: Häufigkeitsverteilung der Verzögerung von Funk- und korrigiertem Signal

9 Zusammenfassung und Ausblick

Im vorliegenden Beitrag wird die Auslegung und Inbetriebnahme eines Linearantriebs für ein magnetisch gelagertes, autonomes Transportfahrzeug beschrieben. Dabei werden nach einer Vorstellung des Gesamtkonzeptes die Ergebnisse zur Auslegung des Motors präsentiert. Anschließend werden die Inbetriebnahme des Transportfahrzeugs und der Aufbau eines Simulationsmodells für den Antrieb erläutert. Zum Abschluss wird die Entwicklung und der Aufbau einer geeigneten Funkdatenübertragung dargestellt.

Zukünftige Arbeiten werden die praktische Erprobung der Kurvenfahrt und die Implementierung eines Regelungssystems auf dem Fahrzeug zum Inhalt haben.

Literatur

- [1] W. Evers, *Entwicklung von permanenterregten Synchronlinearmotoren mit passivem Sekundärteil für autonome Transportsysteme*, Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der RWTH Aachen, Verlag Shaker, 2000.
- [2] D. Brakensiek, G. Henneberger, *Design of a Linear Homopolar Motor for a Magnetic Levitating Transportation Vehicle*, The 3rd International Symposium on Linear Drives for Industry Applications (LDIA 2001), p. 352-355, Nagano, Japan, 2001.
- [3] D. Albertz, *Entwicklung numerischer Verfahren zur Berechnung und Auslegung elektromagnetischer Schienenbremssysteme*, Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der RWTH Aachen, Verlag Shaker, 1999.
- [4] dSPACE GmbH, *ControlDesk, Experiment Guide, Installation and Configuration Guide*, Paderborn, 2001
- [5] The MathWorks Inc., *Simulink, Dynamic System Simulation for Matlab*, Using Simulink, Version 4, Natick, MA, USA, 2000
- [6] D. Brakensiek, *Design of a Controller for a Linear Drive of a Magnetic Levitating Transportation Vehicle*, 15th International Conference on Electrical Machines (ICEM 2002), Conference Record, Brugge, Belgium, 2002.