

Aktive Lenkung der Achsen eines Straßenbahndrehgestells mit Einzelradantrieben

Joachim Böcker

Leistungselektronik und Elektrische Antriebstechnik

Universität Paderborn

D-33095 Paderborn

Tel.: 05251-60-2209, Fax.: 05251-60-3443

E-mail: boecker@lea.upb.de

Schlüsselwörter

Schienenfahrzeuge, Einzelradantriebe, aktive Lenkung

Zusammenfassung

Bei Schienenfahrzeugen mit Drehgestellen kommt es in Kurven prinzipbedingt zu einer Fehlstellung der Achsen. Diese sind dann nicht radial ausgerichtet, was im Nahverkehr, wo besonders kleine Kurvenradien anzutreffen sind, zu hohem Querschleupf führt, der mit Quietschen und starkem Verschleiß einhergeht. Eine radiale Ausrichtung würde den Verschleiß reduzieren und damit den Wartungsbedarf und die Stillstandszeiten verringern.

Die radiale Ausrichtung setzt voraus, dass die einzelne Achse im Drehgestell einen zusätzlichen Drehfreiheitsgrad um ihre Hochachse erhält. Die radiale Einstellung könnte durch einen separaten Aktuator bewerkstelligt werden. Ist das Fahrzeug jedoch aus Gründen der Niederflurkonstruktion ohnehin mit Einzelradantrieben ausgerüstet, kann ein Gierdrehmoment zur Achslenkung ohne zusätzlichen Aktuator direkt durch die elektrischen Fahrtriebe mittels unterschiedliche Traktionskräfte für das rechte und linke Rad erzeugt werden.

Für die Regelung des Lenkwinkels ist es erforderlich, die Kurvenkrümmung zu kennen. Diese kann aus Messung der Drehrate des Drehgestells gewonnen werden. Die Achsregelung erfordert verhältnismäßig wenig algorithmischen Aufwand und kann weitgehend innerhalb der vorhandenen Leittechnik realisiert werden.

1 Einführung

Schienenfahrzeuge werden heute zum großen Teil mit elektrischen Antrieben ausgerüstet. Sowohl bei Vollbahnen als auch im Nahverkehr ist dabei der Achsantrieb vorherrschend, bei dem ein elektrischer Antrieb jeweils eine starre Achse,

genauer einen Radsatz antreibt. Ein elektrischer Antrieb ist ein mechatronisches System, welches aus dem Motor, dem speisenden Stromrichter, der Sensorik und dem Steuerungs- und Regelungssystem (Leittechnik) besteht (Bild 1, dort ist die Leittechnik nicht dargestellt). Als Fahrmotoren sind bei Bahnfahrzeugen heute Drehstrom-Asynchronmotoren Stand der Technik. Permanentmagnet-Synchronmotoren wecken aber zunehmend Interesse aufgrund ihrer höheren Leistungsdichte. Gruppenantriebe, bei denen ein Stromrichter mehrere parallel geschaltete Motoren speist, werden gelegentlich bei Nahverkehrsfahrzeugen eingesetzt, doch erlaubt diese Antriebskonfiguration im Gegensatz zum Einzelachsantrieb nicht die kraftschlussoptimale Regelung jeder einzelnen Achse.

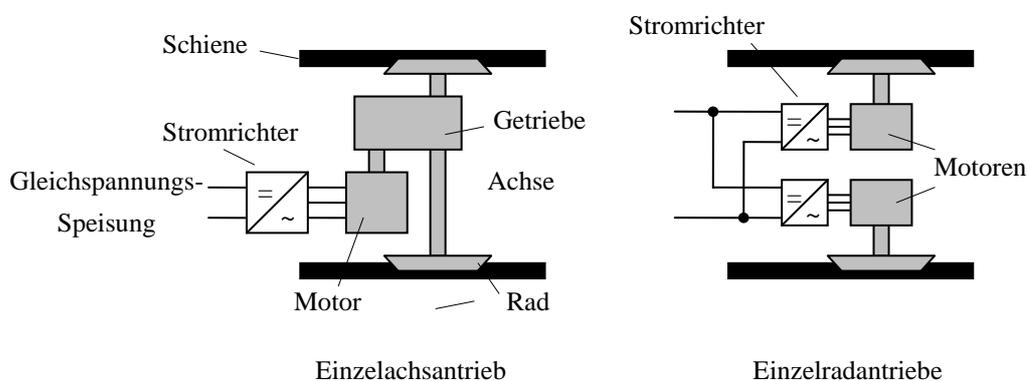


Bild 1: Strukturen von Einzelachs- und Einzelradantrieb

Der Radsatz mit starrer Achse und konischen Radprofilen besitzt wichtige laufdynamische Eigenschaften: Er zentriert sich im Spurkanal selbsttätig; auch in Kurven lenkt die Achse von allein an. Die unterschiedlichen Geschwindigkeiten des kurveninneren und -äußeren Rades stellen sich aufgrund der konischen Radprofile zusammen mit einer kleinen lateralen Verschiebung des Radsatzes passend ein. Bei nicht zu starker Kurvenkrümmung wird das Rad in der Regel nicht am Spurkranz anlaufen. Auf gerader Strecke kommt es mit konischen Radprofilen zum so genannten Sinuslauf (das Hin- und Herpendeln der Achse im Spurkanal), der zwar bei hohen Geschwindigkeiten nicht unproblematisch, bei mittleren und geringeren Geschwindigkeiten aber durchaus erwünscht ist, da er zu einer gleichmäßigen Beanspruchung der gesamten Lauffläche führt. Beim Nahverkehr findet man zum Teil allerdings auch nicht-konische, zylindrische Radprofile.

Die skizzierte selbst-stabilisierende Eigenschaft des Radsatzes ist jedoch nicht ausreichend, um den einzelnen Radsatz um seine Hochachse kinematisch völlig frei zu geben. Daher werden zwei Radsätze zu einem Drehgestell konstruktiv verbunden (Bild 2). Erst das Drehgestell erhält dann gegenüber dem Wagenkasten den Rotationsfreiheitsgrad um die Hochachse.

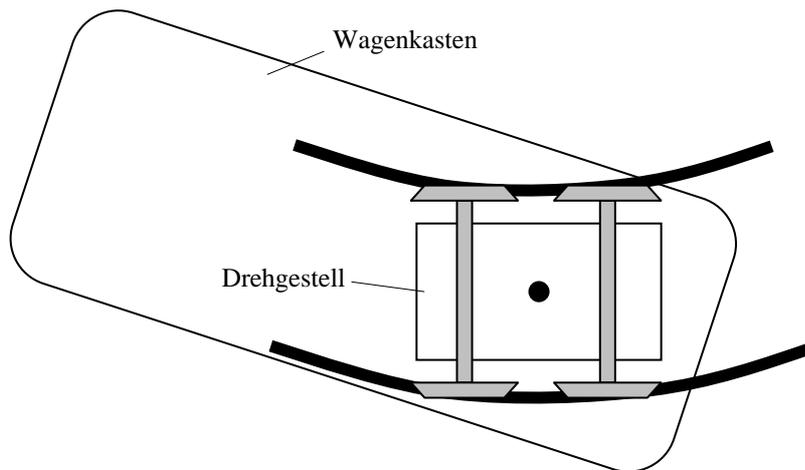


Bild 2: Fehlstellung der Achsen in einem Drehgestell

Bei der Anordnung zweier Radsätze in Drehgestellen kommt es aber, insbesondere in engen Kurven wie sie bei Straßenbahntrassen anzutreffen sind, unvermeidlich zu einer Achsfehlstellung (Bild 2). Diese führt zu unerwünschtem Querschleif des Rades auf der Schiene, welcher mit unangenehmem Quietschen, jedoch auch mit erhöhtem Verschleiß einhergeht. Bei sehr engen Kurven kann es darüber hinaus zum Anlauf des Spurkranzes kommen. Die Instandhaltung der Radsätze durch Abdrehen verschlissener Radprofile oder Austausch der kompletten Radsätze trägt nicht unwesentlich zu den Betriebskosten eines Schienenfahrzeugs bei. Die ideale radiale Einstellung der Achsen in der Kurve (Bild 3) wäre daher nicht nur eine technisch elegante, sondern auch eine wirtschaftlich sinnvolle Maßnahme. Da der einzelne Radsatz nicht einfach kinematisch frei gegeben werden kann, muss die radiale Einstellung durch eine geeignete Aktorik unterstützt werden.

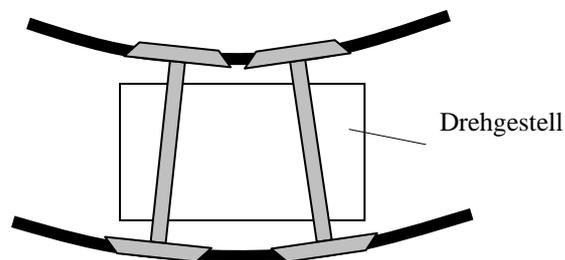


Bild 3: Ideale radiale Achsstellung

Das Prinzip der Lenkung einzelner Achsen oder des gesamten Drehgestells ist Gegenstand vieler Forschungsarbeiten. Oftmals wird dabei die Lenkung nicht

angetriebener Achsen im Drehgestell betrachtet [Gol99], [Per02], [She04]. Die Lenkung wird dabei durch zusätzliche Aktuatoren bewerkstelligt. Eine Lenkung unter Verwendung von vier einzeln steuerbaren Radnabenantrieben ohne zusätzliche Aktorik durch ist Gegenstand in [Li03], allerdings wird dabei das Drehgestell im Spurkanal insgesamt gelenkt; die Achsen werden nicht radial eingestellt.

Hier soll der Idee nachgegangen werden, die Lenkung einer Achse nicht durch zusätzliche z. B. hydraulische Aktorik oder durch konstruktive passive mechanische Maßnahmen, sondern durch den elektrischen Antrieb selbst zu bewerkstelligen. Dies erfordert jedoch den Einsatz von Einzelradantrieben (Bild 1 rechts), bei denen nicht nur die einzelne Achse, sondern jedes einzelne Rad durch einen eigenen Antrieb separat gesteuert wird. Allein aus Gründen der Achslenkung sind Einzelradantriebe derzeit wirtschaftlich jedoch kaum zu rechtfertigen. Einzelradantriebe werden aber bereits heute vereinzelt in Straßenbahnen eingesetzt, um Konstruktionen mit niedriger Flurhöhe zu ermöglichen, die den Einstieg vom Straßenniveau besonders für Behinderte erleichtern, was mit starren durchgehenden Achsen nicht möglich wäre. Kommen also aufgrund der Niederflurkonstruktion ohnehin Einzelradantriebe zum Einsatz, können diese ohne allzu großen zusätzlichen Aufwand für weitere mechatronische Funktionen wie der Achslenkung genutzt werden.

2 Systemstruktur

Um mit dem elektrischen Antrieb die Lenkung der Achse im Drehgestell zu bewerkstelligen, wird die starre Radsatzwelle aufgegeben. Das rechte und linke Rad einer Achse sind mit separaten Einzelradantrieben ausgerüstet. Die konstruktive Anordnung zweier Räder auf einer Achse wird zwar beibehalten, jedoch sind die Räder nun nicht mehr starr gekoppelt. Diese Achskonstruktion kann verhältnismäßig einfach auch als Niederflurkonstruktion ausgeführt werden, da keine Drehmomente zu übertragen sind. Jeder der Motoren, welche im Bild 4 auf den Rad-

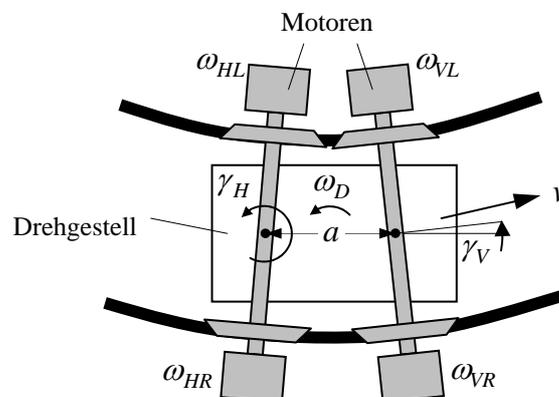


Bild 4: Drehgestell mit Einzelradantrieben

außenseiten angeordnet sind oder alternativ als Radnabenmotoren ausgeführt sein könnten [Li03], kann ein unterschiedliches Drehmoment bzw. eine unterschiedliche Drehzahl einstellen. (Die Stromrichter sind in Bild 4 nicht dargestellt.)

Eine nicht triviale Aufgabe ist die Bestimmung der gewünschten Lenkwinkel γ_V und γ_H für die Achsen. Im stationären Fall ergibt sich der ideale Lenkwinkel für beide Achsen aus der Krümmung κ der Trasse zu

$$\gamma_V = -\gamma_H \approx \frac{a\kappa}{2} .$$

Die Krümmung selbst ist jedoch direkt nur schwierig messbar. Dagegen kann mit einem Drehratensensor die Winkelgeschwindigkeit des Drehgestells $\omega_D = \dot{\alpha}_D$ verhältnismäßig zuverlässig gemessen werden. Mit der Fahrgeschwindigkeit v können hieraus die Krümmung

$$\kappa = \frac{\omega_D}{v}$$

und die Sollwerte der Lenkwinkel

$$\gamma_V^* = -\gamma_H^* = \frac{a\omega_D}{2v}$$

bestimmt werden. Genauer betrachtet, ist dieser so ermittelte Krümmungswert in etwa der Mittelwert der Krümmungen an den Positionen der vorlaufenden und den nachlaufenden Achse. Das hat zur Folge, dass bei einem Einlauf in eine Kurve z. B. mit einer sprungförmigen Änderung der Krümmung die vorlaufende Achse mit einer Fehlstellung in diese Kurve einfährt, bis sich das Drehgestell anfängt zu drehen. Es zeigt sich, dass diese vorübergehende Fehlstellung toleriert werden kann.

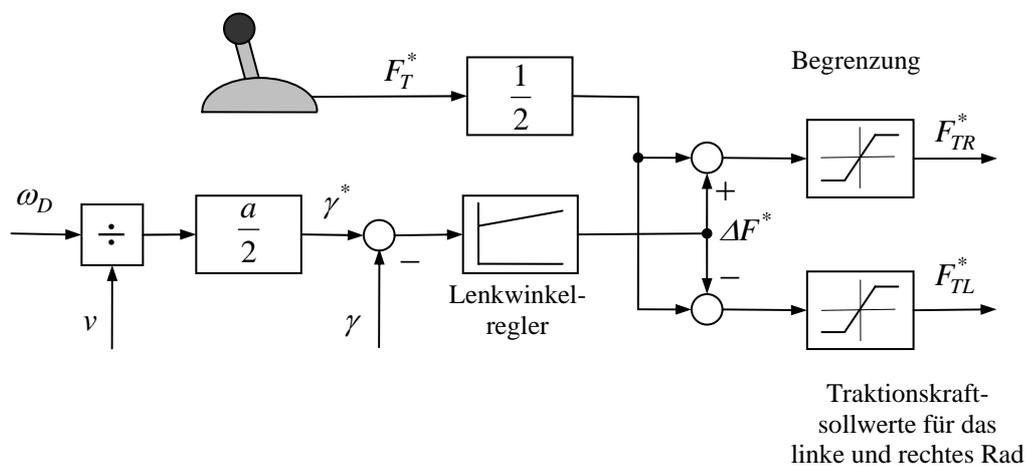


Bild 5: Vereinfachte Struktur der Lenkwinkelregelung einer Achse

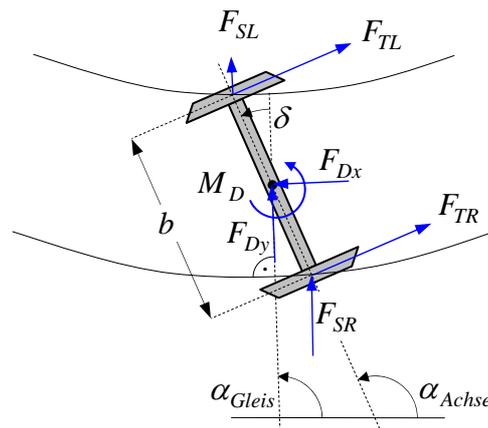


Bild 6: Kräfte und Drehmomente an einer Achse

Die Differenz zwischen dem gemessenen Lenkwinkel und dem Soll-Lenkwinkel wird jeweils einem Lenkwinkelregler zugeführt. Der Lenkwinkelregler verändert die Soll-Traktionskräfte der beiden Antriebe einer Achse, so dass ein Gierdrehmoment entsteht. Die Traktionskräfte F_{TL} und F_{TR} an den Rädern sind aber nicht die einzigen Kräfte, die zu dem Gierdrehmoment beitragen. Das Bild 6 zeigt eine freigeschnittene Achse mit ihren ebenen Kräften und Drehmomenten: F_{SL} und F_{SR} sind die Seitenführungskräfte, wobei das kurvenäußere Rad aufgrund des Radprofils den wesentlichen Anteil der Seitenführung übernimmt. F_{Dx} , F_{Dy} , M_D sind die Schnittkräfte und das Drehmoment zwischen Achse und Drehgestell. Mit dem Drehwinkel der Achse gegenüber einem raumfesten Bezugssystem α_{Achse} lässt sich die Dynamik um die Hochachse (Gieren) durch die Differentialgleichung

$$\begin{aligned} \Theta_{Achse} \ddot{\alpha}_{Achse} &= M_{gier} \\ &= b(F_{TR} - F_{TL}) - M_D + b(F_{SR} - F_{SL}) \sin \delta \\ &\approx b(F_{TR} - F_{TL}) - M_D + b(F_{SR} - F_{SL})(\alpha_{Achse} - \alpha_{Gleis}) \end{aligned}$$

beschreiben. Die Kräfte des Drehgestells auf die Achse F_{Dx} , F_{Dy} liefern keinen Beitrag zum Gierdrehmoment, sehr wohl aber die dadurch verursachten Seitenführungskräfte F_{TL} , F_{TR} im Spurkanal. Bei idealer radialer Einstellung, wenn also der Anlaufwinkel δ gleich Null ist, haben die Seitenführungskräfte keinen Einfluss. Hat die Achse aber bereits eine unerwünschte Lage, wirken die Seitenführungskräfte, die im Wesentlichen von Kurvenkrümmung und dem Quadrat der Fahrgeschwindigkeit bestimmt werden, zusätzlich destabilisierend. Hieraus lässt sich eine untere Grenze für die Proportionalverstärkung des Lenkwinkelreglers abschätzen, damit der Regler diese destabilisierende Wirkung kompensiert.

Die Einstellung der Traktionskräfte F_{TL} und F_{TR} nach den vorgegebenen Sollwerten F_{TL}^* und F_{TR}^* ist Aufgabe der elektrischen Antriebe und ihrer unterlagerten Regelungen. Hierbei wirkt die Dynamik des geregelten elektrischen Antriebs und

des mechanischen Antriebsstrangs zwischen Motor und Rad. Diese wurde in der Systemmodellierung berücksichtigt. Da deren maßgebliche Zeitkonstanten aber unter denen für die Achslenkung liegen, wird hier nicht weiter darauf eingegangen. Man darf für die Betrachtung des Lenkproblems näherungsweise

$$F_{TL} \approx F_{TL}^* \quad \text{und} \quad F_{TR} \approx F_{TR}^*$$

annehmen. Dies trifft allerdings nicht mehr zu, wenn der Kraftschluss des Rad-Schiene-Kontakts aufgrund schlechter Kraftschlussbedingungen bzw. durch Überschreiten der maximalen Kraftschlusskraft beim Anfahren oder Bremsen verloren gegangen ist. Dieser Zustand wird heute durch leistungsfähige Kraftschlussregelungen in der Regel vermieden bzw. sehr schnell erkannt. Die Soll-Traktionskraft wird dann sehr schnell reduziert und der Kraftschluss wieder hergestellt. Dennoch könnte bei einseitigem Kraftschlussverlust kurzzeitig ein starkes ungewolltes Gierdrehmoment entstehen, welches die Achse sehr schnell verdrehen und zu einem großen Anlaufwinkel mit der Gefahr des Entgleisens führen würde. Um dieser Gefahr zu begegnen, wird ein passiver Dämpfer zwischen Drehgestell und Achse vorgesehen, der derartigen abrupten Lenkwinkeländerungen entgegen wirkt. Außerdem wird eine Rückstellfeder berücksichtigt, um die neutrale Stellung der Achse bei Geradeausfahrt auch mit abgeschalteten Antrieben zu ermöglichen. Das Drehmoment zwischen einer der Achsen und dem Drehgestell ist demnach

$$M_D = C\gamma + D\dot{\gamma} .$$

3 Simulationsergebnisse

Das beschriebene System wurde detailliert mit dem Werkzeug Matlab/Simulink modelliert und simuliert. Das Verhalten wurde für verschiedene Streckenprofile und Bedingungen untersucht. Die Bilder 7 und 8 zeigen die zeitlichen Verläufe für die vordere bzw. für die hintere Achse eines Drehgestells für einen exemplarischen Streckenverlauf, welcher rampen- und sprungförmige Änderungen der Kurvenkrümmung beinhaltet. Die Strecke wird dabei mit einer Geschwindigkeit von 5 m/s durchfahren. Bei der vorlaufenden Achse sind Regelfehler und Anlaufwinkel größer als bei der nachlaufenden, was auf die oben beschriebene Sollwert-erzeugung aus der Drehrate des Drehgestells zurückgeht. Außerdem empfiehlt sich eine Filterung des Drehratenmesswerts, was zu einer weiteren Verzögerung beiträgt. Bei konstanter Krümmung stellt sich ein Regelfehler bzw. Anlaufwinkel von 0 ein. Während der Kurvenübergänge treten Abweichungen auf. Der Anlaufwinkel tangiert bei der vorlaufenden Achse nur kurz den als noch sicher geltenden Maximalwert von etwa $0,6^\circ$ (s. Schranken in den Bildern 7 und 8), bei der nachlaufenden Achse ist der Anlaufwinkel deutlich kleiner.

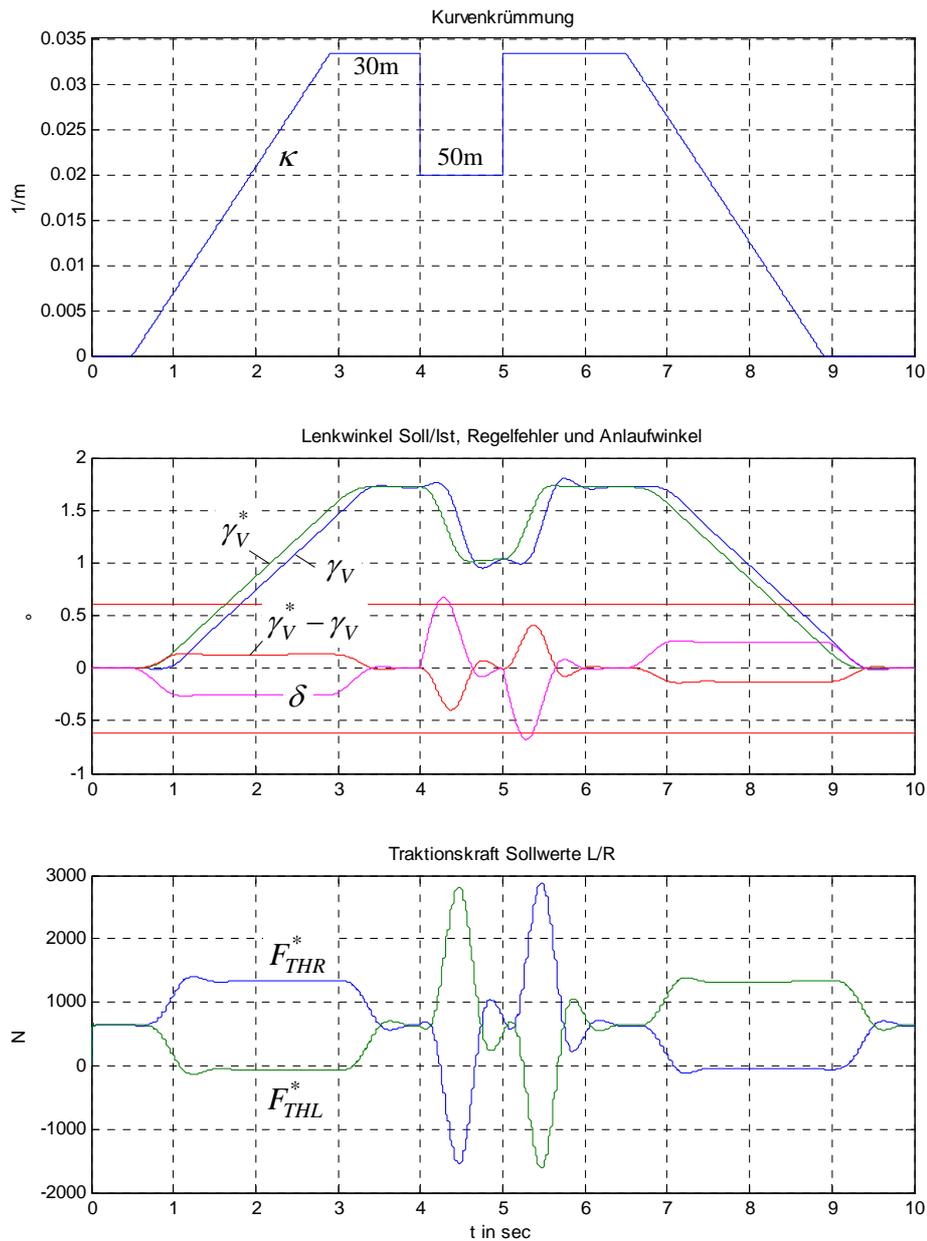


Bild 7: Zeitliche Verläufe für die vordere Achse

Der stufenförmige Verlauf der Traktionskraftsollwerte geht auf die zeitdiskrete Arbeitsweise der Antriebsregelung zurück. Für die überlagerten Regelungsfunktionen, die auch die Lenkregelung umfasst, ist eine Reglerzykluszeit von 50 ms vorgesehen. Der Lenkregler, der als *PI*-Regler ausgeführt wurde, benötigt mit einigen Nebenfunktionen nur verhältnismäßig geringen algorithmischen Aufwand, so dass er in die bestehenden Leittechnik-Komponenten ohne Zusatzaufwand integriert werden kann.

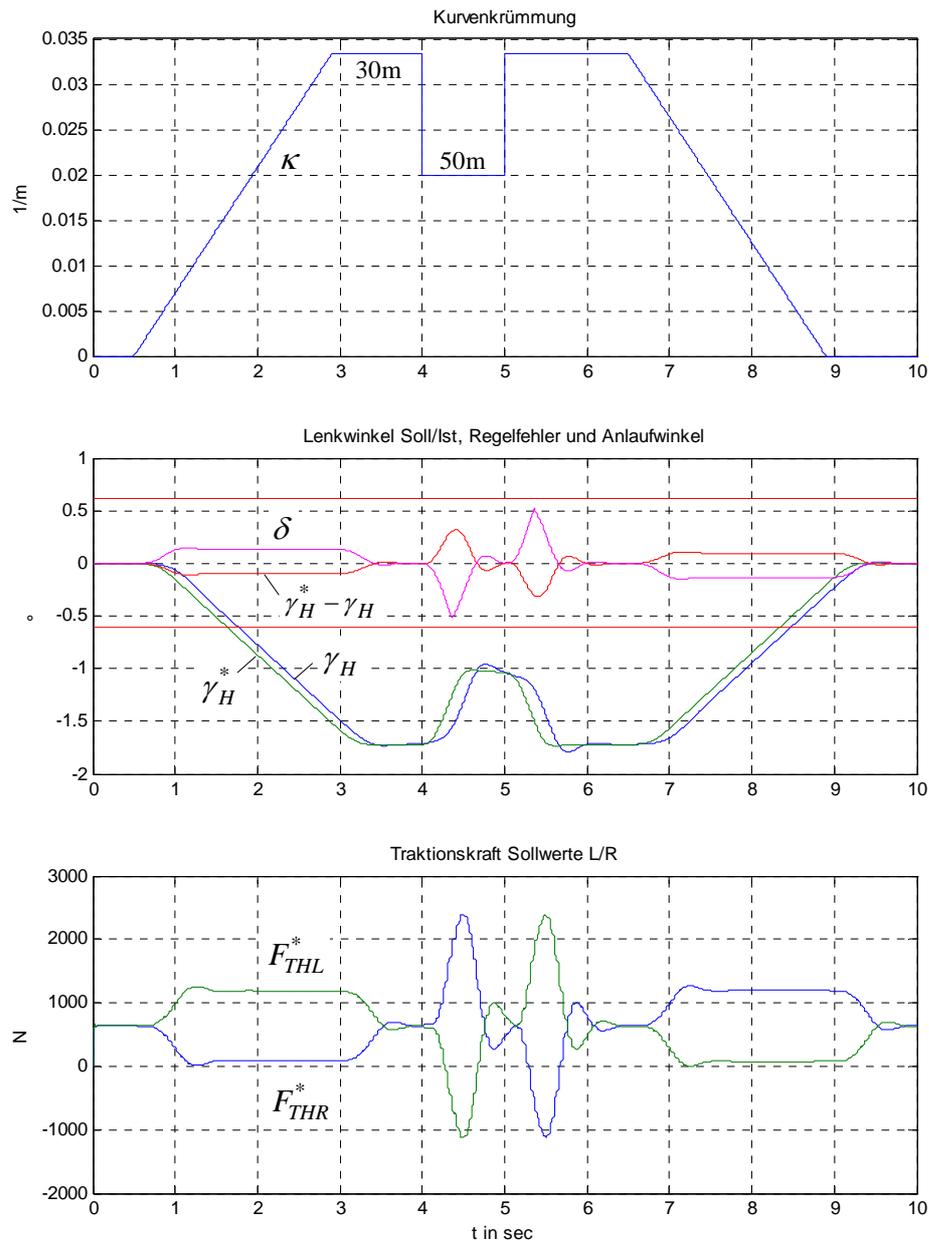


Bild 8: Zeitliche Verläufe für die hintere Achse

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die Ausführungen zeigen, dass es möglich ist, mit Einzelradantrieben die Achse eines Drehgestells zu lenken und eine ideale radiale Anlenkung zu erreichen. Sind Einzelradantriebe aus Gründen der Niederflurkonstruktion ohnehin vorgesehen, ist diese Funktionalität mit verhältnismäßig geringem Zusatzaufwand erreichbar. Der Nutzen besteht in einem Zuwachs an Komfort durch Vermeidung des Kurvenquietschens, wichtiger aber noch in einer erheblichen Verminderung des Ver-

schleißes durch die radiale Achsstellung, da der Querschlepp minimiert wird. Die Sicherheit wird durch eine unabhängige Überwachung und durch Rückfallebenen gewährleistet, auf die in diesem Beitrag nicht weiter eingegangen wurde. Die hier vorgestellte Achslenkung ist von ihrem Prinzip nicht auf die Anordnung zweier Achsen in einem Drehgestell beschränkt. Das Prinzip kann auch auf Einzelachs-fahrwerke übertragen werden.

Literatur

- [She04] Shen, S.; Mei, T.X.; Goodall, R.M.; Pearson, J.T.: "A Novel Control Strategy for Active Steering of Railway Bogies", Control 2004, University of Bath, UK, Sept. 2004
- [Li03] Li, J.; Goodall, R.M.; Mei, T.X.; Li, H.: "Steering Controllers for Rail Vehicles with Independently-Driven Wheel Motors", Electronic systems and control division, Loughborough University, 2003
- [She03] Shen, S.; Mei, T.X.; Goodall, R.M.; Pearson, J.T.; Himmelstein, G.: "Active Steering of Railway Vehicles: A Feedforward Strategy", European Control Conference, Cambridge UK, Sept. 2003.
- [Per02] Perez, J.; Busturia, J.M.; Goodall, R.M.: "Control Strategies for Active Steering of Bogie-Based Railway Vehicles", Control Engineering Practice, 10, pp. 1005-1012, (2002)
- [Nag00] Nagy, Z.; Wickens, A.H.; Goodall, R.M.: "Steering Controllers for Future Railway Vehicles", AVEC 2000 5th Int. Symp. on Advanced Vehicle Control, Michigan, USA, August 2000, pp 669-676 .
- [Mei99] Mei, T.X.; Goodall, R.M.: "Optimal Control Strategies for Active Steering of Railway Vehicles", 14th IFAC World Congress, Beijing, July 1999, pp 251-256.
- [Gol99] Goldschmidt, S.; Wallaschek, J.: "Modelling and design of an active steering system for the bogie", Proceedings of the 3rd International Heinz Nixdorf Symposium on Mechatronics and Advanced Motion Control, Bd. 49. Paderborn, Deutschland, Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn, 1999, S. 333-351.
- [Lan96] Langelüddeke, K.; Wallaschek, J.: „Untersuchung zur Stabilität des Laufverhaltens von Schienenfahrzeugen mit passiv gelenkten Einzelrädern“, ZAMM, Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik 76 (1996), S. 289-290.