



Autorenkollektiv: ARNOLD NITSCH (Leiter), KLAUS-DIETER GEORGE, JÜRGEN GUTSCHE, DETLEF KLAUS, WOLFGANG HUNGER, HORSTMAR SEYFARTH, JOACHIM VOLGER

## Traktionseigenschaften der Ellokbaureihe 243 und die Konsequenzen für den Einsatz und die Bedienung (Teil 1)

Dieser Beitrag dient in erster Linie der Befähigung der Triebfahrzeugführer zur optimalen Ausnutzung ihres Triebfahrzeugs. Er sollte für die Ausbildung der Triebfahrzeugführer einbezogen werden, um deren Einsicht in die traktionstechnischen Zusammenhänge zu fördern.

### 1. Traktionstechnische Konzeption der Lokomotive

#### 1.1. Antrieb und Federsystem

Mit dem Erscheinen eines neuen Triebfahrzeugs verknüpfen sich stets differenzierte Erwartungen, die oft sogar konträr sind. So führen nicht nur eine Erhöhung der Fahrgeschwindigkeit, sondern z. B. auch eine Verbesserung der Arbeitsbedingungen für den Lokführer, eine bessere aerodynamische Qualität und ein höheres Design-Niveau fast zwangsläufig zu größerem technischen Aufwand. Damit verbunden sind wieder höhere Herstellungs- und Instandhaltungskosten sowie eine weitere Eskalation des technisch-technologischen Aufwands, beispielsweise durch den Einbau von Reservesystemen, die den durch die Komplizierung des Fahrzeugs erlittenen Zuverlässigkeitsverlust kompensieren müssen. Nur durch die Verwendung modernster Technologien und durch die Erhöhung des Integrationsgrades in der Lokomotivsteuerung können unter dieser Voraussetzung weitere Verbesserungen im Hinblick auf eine Zuverlässigkeitserhöhung und Senkung des Instandhaltungsaufwandes erreicht werden.

Die Entwicklung einer neuen Lokomotive läuft also immer auf die Wahl des dem gegenwärtigen Entwicklungsstand der Technik und Ökonomie entsprechenden optimalen Kompromisses hinaus. Die folgenden Ausführungen werden zeigen, daß sich diese Kompromisse auch auf die Traktionseigenschaften erstrecken müssen, mit welchen Mitteln die diesbezüglichen Zugstände begrenzt oder beseitigt werden können.

Das traktionstechnische Konzept der BR 243 enthält unter dem Aspekt weitgehender Vereinheitlichung mit der BR 250 aufgrund einer gegenseitigen Vereinbarung zwischen der DR und dem Lokomotivhersteller KLEW die Verwendung parallelgeschalteter 16 2/3 Hz-Reihenschluß-Direktmotoren. Diese werden von einem gemeinsamen Regelorgan, dem Thyristor-Hochspannungsschaltwerk, gespeist. Damit entspricht das Triebfahrzeug dem höchsten Stand der Antriebstechnik unter Verwendung von 16 2/3 Hz-Direktmotoren. Zur Verringerung der Beanspruchung des Gleises und der Fahrmotoren erhielt diese Lokomotive einen Schwebemotorenantrieb wie die BR 250. Dieser wurde zur Reduzierung der Beanspruchung der Kegelringfeder durch Umwuchten und Resonanzen mittels einer neuen Gummi-Schubfederung über das Fahrmotorgehäuse härter an den Drehgestellrahmen angekoppelt. Erhöhte Aufmerksamkeit mußte dem Federungskomfort der Lokomotive geschenkt werden, da die Laufruhe kürzerer 4achsiger Lokomotiven schwerer zu beherrschen ist als die längerer 6achsiger. Es wurde daher eine deutliche Verstimmung der Eigenfrequenzen der Primär- und Sekundärfederung durch eine stärkere Verlagerung des Federweges in die Kastenfederung vorgenommen und eine verschleißfreie Flexicoilfederung gewählt. Problematischer war die Auslegung der Querfederung der Lokomotive, welche sich durch die Verwendung der Flexicoilfederung zwangsläufig von der der Vorläufertypen unterscheidet.

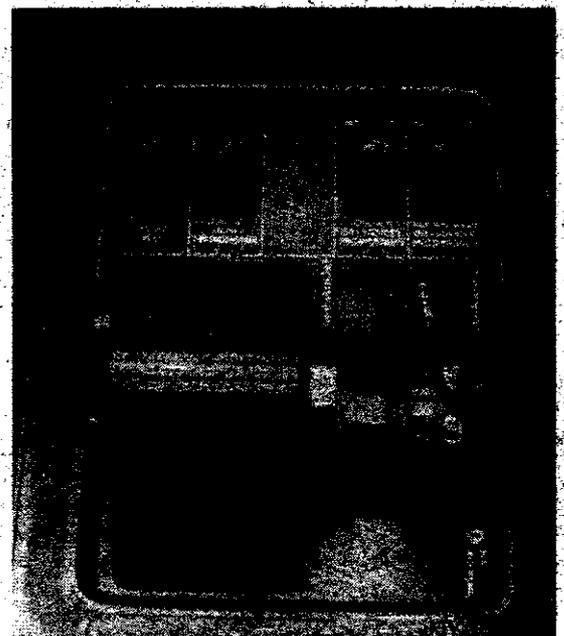
Alle diese Maßnahmen wirken sich in unterschiedlicher Weise auch auf die Traktionseigenschaften der Lokomotive aus, da sie den Kraftschluß zwischen Rad und Schiene beeinflussen.

#### 1.2. Fahrzeugleitsystem

Mindestens ebenso hoch wie der Einfluß von Antrieb und Federsystem ist der der veränderten Steuerungskonzeption der Lokomotive: Da zum Zeitpunkt der Lokomotiventwicklung auch der allgemeine Einsatz der punktförmigen Zugbeeinflussung PZ 80 feststand, wurde selbstverständlich ein Leitsystem (Gesamtheit der zur Führung der Lokomotive erforderlichen Steuer- und Regelsysteme) realisiert, das den Lokomotivführer von der Aufgabe der infolge der Überwachung genauer einzuhaltenen jeweiligen Höchstgeschwindigkeit weitgehend entlastet. Dazu wurde in Verbindung mit einem neuen Fahrshalterkonzept als Hauptsteuerung eine Fahrsteuerung mit Geschwindigkeitsregelung und unterlagerter Zugkraftregelung vorgesehen.

Das bedeutet, daß der Lokführer nach Vorgabe der Fahrtrichtung und der gewünschten Zugkraft in Prozenten der auf einen Kraftschlußbeiwert zwischen Rad und Schiene von 0,33 bezogenen Anfahrzugkraft die gewünschte Fahrgeschwindigkeit stufenlos vorgibt (Bild 1). Dieser auf einem analogen Anzeigergerät ablesbare Geschwindigkeitsollwert wird nach einer kurzen Beruhigungszeit, in welcher keine weitere Sollwertänderung erfolgte, mit der an den Achsen 1 und 4 aus der Achsdrehzahl ermittelten Istgeschwindigkeit verglichen. Das führt bei Nichtübereinstimmung zu einer entsprechenden Änderung des internen Zugkraftsollwertes der Geschwindigkeitsregelung (bzw. auch des Sollwertes der elektrischen Widerstandsbremse), bis beim Erreichen des Sollgeschwindigkeits-

Bild 1 Fahrshalter der BR 243:  
vorn u. l. n. r.: Richtungswähler, Geschwindigkeitswähler mit Auslaufaste, Zugkraft-Bremskraftwähler, auf-ab-Hilfsfahrshalter, darüber Schalter für Instrumentenbeleuchtung und Sonderprogramme der Geschwindigkeitsregelung



werts der Zugkraftsollwert stufenlos den jeweiligen Wert der Fahrwiderstandskraft annimmt. Der Zugkraftsollwert seinerseits enthält die Vorgabe eines entsprechenden Fahrmotorstroms, der in einem Regler mit PID-Verhalten mit dem Istwert verglichen wird und bei Abweichungen zum Auf- oder Ablauf des Hochspannungsschaltwerks /1/ führt.

Da diese starre Regelung auf jede Änderung des Streckenwiderstands reagieren würde und z. B. bei dessen vorübergehender Verminderung zu energetisch vollkommen unnötigen und unerwünschten Bremsvorgängen führte, wurde die Geschwindigkeitsregelung neben der im Fahrschaltherhandgriff installierten Taste „freier Auslauf“ durch folgende Sonderprogramme erweitert:

- „nur Fahren“ (die Regelung toleriert Überschreitungen der Istgeschwindigkeit, die elektrische Bremse wird nicht wirksam),
- „nur Bremsen“ (die Regelung vollzieht sich nur im Bereich der elektrischen Bremse und verhindert Übergänge in den Bereich der Zugkraftausübung),
- „bedingter freier Auslauf“ (die Regelung ist nur bis zum Erreichen der Sollgeschwindigkeit aktiv und schaltet danach die Zug- bzw. Bremskraft ab).

Gebraucht der Lokführer die Bedienmöglichkeiten dieser Regelung ebenso überlegt wie die konventionellen Steuerungssysteme anderer Triebfahrzeuge, in dem er überflüssige Übergänge in den Bremsbetrieb oder ein anhaltendes Fahren in den unteren (weniger wirtschaftlichen) Fahrstufen vermeidet, ist eine energiesparende Fahrweise bei immer noch deutlichem Gewinn an Bedienkomfort möglich. Die Nutzung der Sonderprogramme erfordert gute Streckenkenntnis und Übung und führt auch zu einer verminderten Schaltfrequenz.

Mit der Einführung der Geschwindigkeitsregelung wurden aber nicht nur bestimmte Aufgaben des Lokführers von der Regelung übernommen, sondern es wurden ihm gleichzeitig auch gewohnte Eingriffsmöglichkeiten (z. B. Schaltwerkklau) entzogen.

Dieser Nachteil einer Geschwindigkeitsregelung äußerte sich zunächst augenscheinlich in der bis dahin nicht gekannten Schleuderingeigung der Baumusterlokomotive 212 001 und führte im Verlauf der Baumustererprobung zur Entwicklung eines Schlupfregelungs-systems, der AHO.

Die Wirkungsweise dieser AHO beruht auf der physikalischen Tatsache, daß die Übertragung von Zug- und Bremskräften stets mit einem positiven oder negativen Schlupf (Relativgeschwindigkeit zwischen Radumfang und Schiene) verbunden ist, welcher mit zunehmender Kraftschlußanforderung zunimmt (Bild 2). Diese Zunahme des Schlupfes ist bei trockenen und sauberen Schienen nahezu linear und proportional der Fahrgeschwindigkeit. Sie beruht im Idealfalle ausschließlich auf der elastischen Verformung des Rad- und Schienenmaterials in der Richtung der Kraftschlußbeanspruchung und wird als Mikroschlupf bezeichnet. Erreicht die Radumfangskraft aber einen von zahlreichen Faktoren (Nässe, Luftfeuchtigkeit, Schienentemperatur, Verunreinigung, Rostbildung, Kraftschlußvorbeanspruchung durch Bogenfahrt oder unruhigen Fahrzeuglauf usw.) abhängigen Maximalwert, beginnt ein mit plastischer Verformung der an den Materialoberflächen befindlichen Grenzzonen einhergehender Bereich höherer Schlupfgeschwindigkeiten. Die Materialerwärmung in der Berührungsfäche beträgt dann bis etwa 800 °C. Die einsetzende „Schmierwirkung“ der herausgerissenen erhitzten Materialteilchen verhindert ein weiteres Ansteigen der übertragbaren Tangentialkräfte (Bild 2 – fallender Bereich der Kurve) und führt den Radsatz unter Umständen in einen instabilen Bereich sehr hoher Schleuder- oder Gleitgeschwindigkeiten (Makroschlupf).

Die AHO hat also die Aufgabe, diesen Übergang vom Mikro- in den Makroschlupf rechtzeitig am Ansteigen der Schlupfgeschwindigkeit zu erkennen und dafür zu sorgen, daß das Kraftschlußmaximum nicht überschritten wird.

Bei einer Lokomotive ohne Laufachsen, Meßrollen oder sehr komplizierte Meßsysteme kann die Schlupfgeschwindigkeit einzelner Achsen ebenso wie die zur Ermittlung der Kurve nach Bild 2 notwendige absolute Fahrgeschwindigkeit nicht bestimmt werden. Durch meßtechnische Untersuchungen ist bekannt, daß aufgrund der unterschiedlichen Achsbelastungen bei Zugkraftausübung (Bild 4) bei gleicher anliegender Motorspannung und gleichen äußeren Voraussetzungen für die Kraftschlußbildung den einzelnen Achsen typische, unterschiedliche Schlupfgeschwindigkeiten zugeordnet sind, wobei die größte Differenz zwischen der ersten und letzten Achse auftritt.

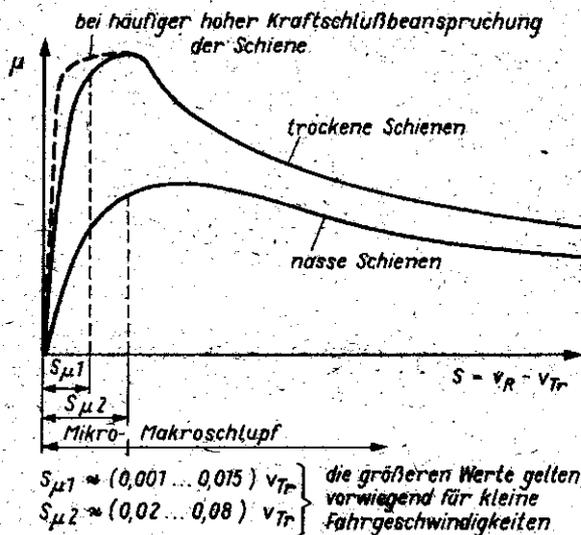


Bild 2 Abhängigkeit des Kraftschlußbeiwertes vom Schlupf S bei unterschiedlichen Schienenzuständen  
 $v_R$  – Radumfanggeschwindigkeit  
 $v_{Tr}$  – Translationsgeschwindigkeit (Fahrgeschwindigkeit) des Triebfahrzeuges

Die Wirkungsweise der AHO beruht deshalb auf der Ausgabe einer Korrekturspannung zur Anpassung des vom unterlagerten Zugkraftregelkreis vorgegebenen Zugkraftwerts an die realen momentanen Kraftschlußverhältnisse in Abhängigkeit von der festgestellten Schlupfdifferenz zwischen den beiden äußeren Achsen.

Dazu wird ständig die Differenz zwischen dem der vorgewählten Zugkraft entsprechenden Stromwert und dem Maximalwert der Fahrmotorströme ermittelt, im Moment des Beginns erster Makroschlupferscheinungen gespeichert und als den Zugkraftsollwert senkendes Korrektursignal ausgegeben.

Der Zustand des schädlichen Makroschlupfes einzelner Achsen wird als „Schleudern“ definiert /2/ und als entsprechendes Signal aus der größten Motorstromdifferenz aller vier Fahrmotoren abgeleitet, das in den Schleuderkanal der AHO genau so eingreift wie eine Zunahme der Radumfanggeschwindigkeit > 2 m/s<sup>2</sup>, die die Lokomotive im Normalfall nicht erreichen kann.

Nach der Senkung des Zugkraftsollwerts wird dieser langsam wieder angehoben, um ihn an die möglicherweise wieder besser gewordenen Kraftschlußbedingungen anzupassen. Eine Konstanz des Zugkraftkorrekturwerts stellt sich nur dann ein, wenn die erforderliche Drehzahldifferenz zwischen den äußeren Achsen so groß ist, daß sie dem Wert der differenzabhängigen Korrekturgröße entspricht. Auf diese Weise wird ein Schlupfregelkreis wirksam, dessen Sollwert mit fallendem Haftwert steigt, was der allgemeinen Tendenz der Abhängigkeit zwischen dem erforderlichen Schlupf und dem Kraftschlußbeiwert entspricht. Diese Abhängigkeit läßt sich durch die sogenannte Zielfunktion  $\lambda$  s ( $\mu$ ) (siehe Abschn. 2.2.) formulieren. Beim Überschreiten einer Schlupfdifferenz von 1 km/h wird der Lokomotivführer über eine Meldeleuchte „V!“ informiert, was ihm die Möglichkeit zum Erkennen nachlassender Kraftschlußbedingungen oder auch von Fehlern in der Regelung gibt.

Zur Reduzierung der Wahrscheinlichkeit unerkannten Allachs-schleudern wird bei Radumfangbeschleunigung > 2 m/s<sup>2</sup> das Schaltwerk abgesteuert und die Schleuderbremse aktiviert sowie hierüber die optische Meldung „S“ abgegeben.

Das Gleiche geschieht bei der Indikation „Schleudern“ aus der Motorstromdifferenz.

Das für diesen Vorgang verantwortliche Signal beeinflusst auch die Haftwertorientierung, indem es über eine Rampenfunktion die Vergleichsstelle zwischen dem Istwert des Fahrmotorstroms und dem korrigierten Zugkraftsollwert so beeinflusst, daß der wirksame Sollwert abhängig vom Abstand der so erkannten Schleudervorgänge reduziert wird. Daraus leitet sich eine Verringerung des abgegebenen Zugkraftsollwerts bei häufiger werdenden Schleudervorgängen ab!

Mit der Einführung der bei der Baumusterlok noch nicht optimierten AHO wurde erwartungsgemäß eine wesentliche Verbesserung des Führungsverhaltens der Lokomotive erreicht und damit die seriemäßige Anwendung der Geschwindigkeitsregelung erst ermög-

licht. Obwohl mit dem Übergang von den 140-km/h-Getrieben der Baumusterlok 212 001 auf die 125-km/h-Getriebe der BR 243 infolge der steiler verlaufenden Zugkraftkennlinie in den einzelnen Bereichen der Fahrmotorspannung bereits eine weitere deutliche Verringerung der Schleudernerneigung eintrat (Bild 3) und der pneumatische Achslastausgleich auf die Bedingungen schlechter Kraftschlußverhältnisse optimiert wurde (Bild 4), zeigte die Baumusterlok 243 001 bei diesen ungünstigen Adhäsionsbedingungen noch eine überdurchschnittliche Neigung zum Übergang in den Makroschlupfbereich, der auch nach Optimierung der AHO bei den Serienlokomotiven noch vermindert auftrat.

Diese äußerte sich in einem etwas geringeren Kraftschlußbeiwert bei der Anfahrt aus dem Stand bis etwa 10 km/h und in vereinzelt auftretenden „Kraftschlußseinbrüchen“ während der Phase der Ausübung höherer Zugkräfte bei Geschwindigkeiten über 40 bis 60 km/h.

So entstand eine Diskrepanz zwischen der nach dem Kriterium der thermischen Belastbarkeit der Fahrmotoren und der über den Kraftschluß realisierbaren Zugkraft in einer Größenordnung, welche die bisher umfangreichsten Messungen zum Problem des Rad-Schienschlupfes und der Kraftschlußausnutzung bei der DR rechtfertigte.

Die Zielstellung dieser Optimierung bestand im Erreichen einer Marschfahrt mit 30-Minuten-Zugkraft (ca. 140 kN) bei mittleren Kraftschlußverhältnissen ( $\mu = 0,15 \dots 0,22$ ) ohne notwendige Eingriffe durch den Lokomotivführer.

**2. Maßnahmen und Untersuchungen zur Verbesserung der Kraftschlußausnutzung**

**2.1. Kraftschlußausnutzung mit dem realisierten Leitsystem der Lokomotive**

Die genaue Erfassung der physikalischen Zusammenhänge der Kraftschlußbedingungen und deren Beeinflussungsmöglichkeiten gehört sicher zu den kompliziertesten Problemen der Grundlagenforschung auf dem Gebiete der Eisenbahntechnik. Allein das Forschungs- und Versuchsamt (ORE) der UIC widmete dieser Aufgabe 20 Jahre intensiver Forschungsarbeit, in deren Ergebnis u. a. folgende grundsätzliche Bemerkungen zum Rad-Schiene-Kraftschluß [3] formuliert sind:

- Der Kraftschluß zwischen dem rollenden Rad und der Schiene ist stets mit einem Schlupf verbunden, dessen Optimalwert bei jeweils maximaler übertragbarer Radumfangskraft mit steigender Fahrgeschwindigkeit zunimmt und Absolutwerte zwischen 0,2 und 4 ... 10 km/h annehmen kann.
- Der Kraftschlußbeiwert folgt einer stochastischen Verteilung und schwankt in Abhängigkeit von den früher genannten Faktoren in den Grenzen von  $\approx 0,035$  bis über 0,5, wobei Änderungen in der Größenordnung von 1 zu 2 über eine Zeit gleicher Witterungsbedingungen selten überschritten werden, aber durchaus innerhalb von Gleislängenabschnitten von einigen Metern möglich sind.

Bild 3 Einfluß der Motorkennlinie auf das Schlupfverhalten der Achse  
 a - steile Motorkennlinie (z. B. Asynchronmaschine)  
 b - Motorkennlinie mittlerer Steilheit (z. B. Gleichstrommaschine mit gemischter Erregung)  
 c - flache Motorkennlinie (z. B. Reibenschlußmotor)  
 1 - Zustand vor dem Kraftschlußverfall  
 2 - Zustand nach dem Kraftschlußverfall  
 $\mu_1, \mu_2$  - Kraftschlußbeanspruchung vor und nach dem Kraftschlußverfall

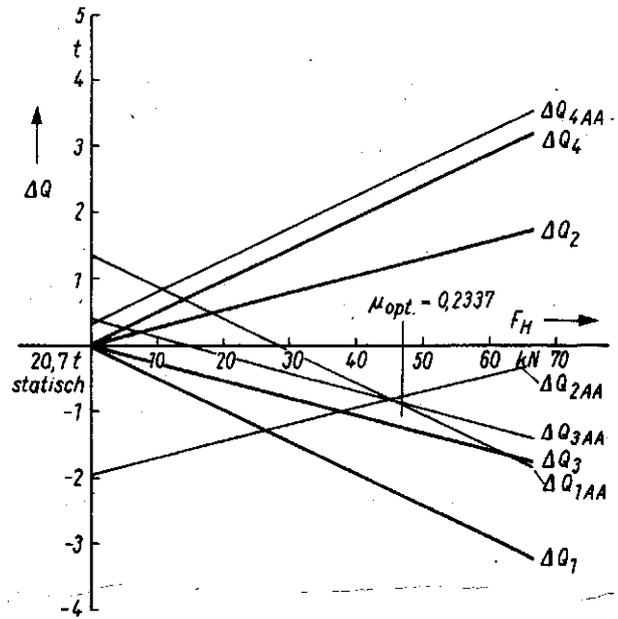
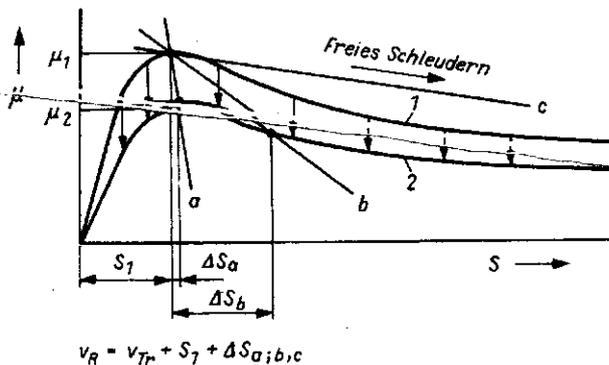


Bild 4 Wirkung des pneumatischen Achslastausgleiches bei unterschiedlichen übertragbaren Zugkräften  
 $\Delta Q_{iAA}$  - statische Differenz der Achsfahrmasse ohne Achslastausgleich  
 $\Delta Q_{iAA,4}$  - dgl. mit Achslastausgleich  
 $\mu_{opt}$  - Kraftschlußbeiwert, auf welchen der Achslastausgleich optimiert wurde

- Die übertragbare Radumfangzugkraft ist im Gegensatz zu früheren Lehrmeinungen eine geschwindigkeitsunabhängige Größe, die in Tangentialrichtung nie in voller Größe wirksam werden kann, da der Kraftschluß durch eine Schlupfvorbeanspruchung teilweise „aufgebraucht“ wird. Diese Schlupfvorbeanspruchung wird u. a. durch die laufdynamischen Parameter des Triebfahrzeugs und die Gleisanlage bestimmt und ist damit in Abhängigkeit von den dynamischen Eigenschaften des Fahrzeugs, des Antriebs und der Drehmomentenregelung geschwindigkeitsabhängig. Daraus folgt, daß sich Fahrzeuge mit unterschiedlichen Federungs- und Antriebssystemen auch unterschiedlich verhalten müssen.

Auf Grund von Toleranzen in diesen Systemen bis hin zum Rad-durchmesser und zur Achsparallelstellung unterscheiden sich sogar Fahrzeuge gleichen Typs hinsichtlich der mittleren Kraftschlußausnutzung voneinander.

- Für die Wahl des Leitsystems eines Triebfahrzeugs ist es außerordentlich wichtig, daß es keine typisierbaren Abhängigkeiten des Kraftschlußbeiwertes von Schlupf- und der Fahrgeschwindigkeit gibt.

Die einzige in einer Regelung zu nutzende Gemeinsamkeit dieser Kurven (Bild 2) besteht im Vorhandensein eines Schlupfes, dem ein Maximum einer übertragbaren Radumfangskraft zuzuordnen ist.

Aus dieser letzten Feststellung folgt, daß die nach einer Zielfunktion  $\mu(\Delta S)$  arbeitende AHO immer nur auf eine mittlere angenommene Abhängigkeit des Kraftschlußbeiwertes vom Schlupf optimiert werden kann, wobei zusätzlich angenommen wird, daß die ausgewertete Schlupfdifferenz zwischen den Achsen 1 und 4 wirklich als Maß für den zumindest für die jeweils führende Achse größeren Absolutschlupf gelten kann.

In Anbetracht dessen, daß die Optimierungsmessungen für schlechte Kraftschlußbedingungen praktisch nur bei künstlich benetzten Schienen (mittels vor der führenden Achse angeordneten Wasserdüsen) durchgeführt werden können. Da andernfalls die Reproduzierbarkeit der Messungen nicht zu sichern ist, wurde die ursprüngliche Zielfunktion der AHO (Bild 5) unter solchen den natürlichen Verhältnissen nur eingeschränkt entsprechenden Bedingungen ermittelt.

Im praktischen Fahrbetrieb wurde wiederholt festgestellt, daß insbesondere bei einsetzendem Regen oder hoher Luftfeuchtigkeit und relativ kalten Schienen durch die Verwendung der Hilfssteuerung noch erhebliche Zugkraftgewinne zu erzielen waren. Hieraus leitete sich die Notwendigkeit weiterer Optimierungsmessungen und die Suche nach besseren Verfahren der Schlupfregelung ab.

## 2.2. Optimierung der AHO

Da die Kraftschlußverhältnisse, auf welche die AHO zu optimieren waren, nur in jahrelangen Messungen zu statistisch gesicherten Ergebnissen führen würden, war eine empirische Vorgehensweise unter Verwendung der erwähnten Kraftschlußmessung mit Hilfssteuerung erforderlich. Das Verfahren der Kraftschlußmessungen mußte hierfür stufenweise verfeinert werden und beruhte bei den letzten vergleichenden Messungen stets auf der digitalen Verarbeitung von Wegimpulsen sehr kurzer Teilung (ca. 10 mm) aller Achsen, die mit denen einer Meßwagenachse als praktisch schlupffreies Normal ständig verglichen wurden. Meßwertaufnahme und -auswertung waren nur mit Hilfe elektronischer Rechentechnik realisierbar.

Die Messungen mit Handsteuerung zeigten, daß bei den kritischen Kraftschlußbedingungen, unter welchen die AHO vom Lokführer am meisten gebraucht wurde, das Kraftschlußoptimum bei einer Differenz der Schlupfgeschwindigkeiten zwischen Achse 1 und 4 von 3,58 km/h erreicht wurde. Die bisherige Zielfunktion führte aber bereits bei einem Schlupf von 2,1 km/h zu einer Begrenzung der Zugkraft durch Verharren auf dem erreichten Motorstrom (Bild 5 v, Linie a). Die in Handsteuerung ermittelten höheren Nutzschlupfwerte (z. B. bei  $v = 90$  km/h bis zu 10 km/h Schlupf der ersten Achse bei nassen Schienen) wurden mit der neuen Zielfunktion nach Linie c  $\Delta S$  (km/h) =  $7,5 - 17\mu$  ( $\mu$  = aus dem Motorstrom im Moment des Schleuderns ermittelter Kraftschlußbeiwert) nahezu erreicht, welche bei allen Serien-Triebfahrzeugen Verwendung fand und sich in den nachfolgend beschriebenen weiteren Messungen zu anderen Maßnahmen der Kraftschlußverbesserung bestätigte.

Zur optimierten AHO ist zu bemerken, daß die angegebene Zielfunktion mit ihren hohen Schlupfanforderungen auch zu einer weniger empfindlichen Reaktion der Zugkraftregelung auf Schlupfänderungen führte, d. h., der Schaltwerkrücklauf wird auf wenige Stufen begrenzt oder ganz unterbunden.

Damit ist mit dem Vorteil einer hohen Nutzschlupfausnutzung bei geringen Kraftschlußbeiwerten aber auch der Nachteil einer häufigeren Überschreitung des Kraftschlußoptimums bei sich kurzfristig verbessernden Kraftschlußverhältnissen verbunden. (Mögliches Aufleuchten der Meldeleuchte „V!“)

Nur durch Reduzierung der Schlupfanordnung durch die Vorwahl eines geringen Zugkraftsollwerts (Parallelverschiebung der Zielfunktion in Richtung kleinerer Schlupfgeschwindigkeiten) kann der Lokführer mit einem im praktischen Betrieb schwer zu erlangenden Einfühlungsvermögen den sich ständig ändernden Optimalschlupf suchen. In solchen Fällen hat sich in der Praxis die Benutzung der Hilfssteuerung oft als das überschaubare Mittel zur Erhöhung der Zugkraft erwiesen.

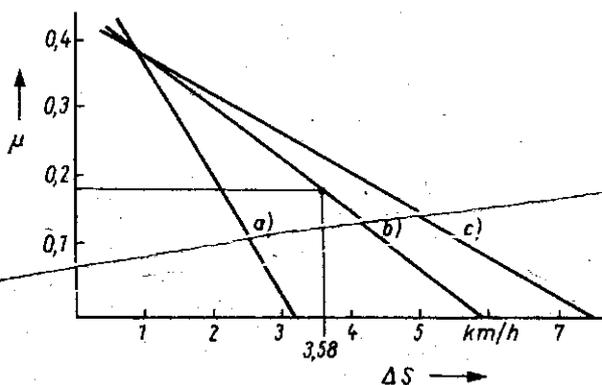
Bild 5 Zielfunktionen der AHO

a:  $\Delta S = 3,2 - 6,2\mu$  (ursprüngliche Funktion)

b:  $\Delta S = 5,9 - 13,0\mu$

c:  $\Delta S = 7,5 - 17,0\mu$  (neu festgelegte Funktion)

$\Delta S$  - Schlupfdifferenz zwischen der ersten und letzten Achse ( $S_1 = S_4 \pm \Delta S$ )



## 2.3. Die Feldparallelschaltung (FPS) als andere Möglichkeit der Verbesserung des Führungsverhaltens

Wie bei allen Wechselstrom-Direktmotorlokomotiven mit Reihenschlußmotoren sind bei der BR 243 die Fahrmotoren parallel geschaltet. Gelangt auch nur eine Achse der Lokomotive in den Makroschlupfbereich, wird in Abhängigkeit von der damit verbundenen Radumfangbeschleunigung, der Geschwindigkeitsdifferenz der Achsen untereinander oder der durch die unterschiedliche Gegen-EMK hervorgerufenen Motorstromdifferenz für alle Achsen gleichzeitig die Motorspannung begrenzt, oder verringert bzw. die Schleuderbremse (die im Rahmen der Kraftschlußmessungen nach den Kriterien deren Effektivität und der Verhinderung erneuter nach deren Abschaltung induzierter Schleudervorgänge ebenfalls optimiert wurde) ausgelöst. Dadurch wird die damit einhergehende Zugkraftreduzierung auch für die noch stabil arbeitenden Achsen wirksam. Eine Selektivität der Zugkraftregelung für jede einzelne Achse wäre also wünschenswert, was aber durch das vorhandene technische Konzept nicht ermöglicht werden kann. In begrenztem Umfang ist diese Selektivität aber durch die von der Firma Oerlikon entwickelte und bei den Schweizer Bundesbahnen verbreitet angewendete [4] sowie in anderer Realisierungsform bei Gleichrichterlokomotiven in der UdSSR [5] erprobte Parallelschaltung der Fahrmotorfelder zu erreichen (Bild 6). Deren Wirkungsweise beruht auf der Stützung des Feldstroms des durch Schlupferhöhung mit einer höheren Drehzahl arbeitenden Motors über die Ausgleichsverbinder. Der damit für den momentanen Arbeitspunkt übererregte Motor verringert sein Drehmoment und synchronisiert in der Folge seine Drehzahl mit der der übrigen Motoren. In [5] werden als Vorteil solcher Schaltungen, welche einen Übergang des schleudernden Antriebs auf eine starre Kennlinie gewährleisten, auch andere Effekte wie ein um etwa 50% geringerer Sandverbrauch, eine Verringerung des Kommutatorverschleißes von ungefähr 7% und sogar eine gewisse Energieeinsparung durch Schlupfverringering genannt. Um Überlastungen der Motoren und unzulässige Ausgleichsströme zu vermeiden, ist eine starre Parallelschaltung der Fahrmotorfelder nicht möglich.

Nach den in [4] beschriebenen Optimierungsregeln wurden die in den Feldverbindern befindlichen Drosseln und Widerstandswerte bestimmt und meßtechnisch konkretisiert. Außer den Drosseln und Feldverbindungsleitungen ist je Motor ein Schütz erforderlich, was eine Abschaltung einzelner Motoren im Störfalle und den Übergang auf die elektrische Bremse ermöglicht. Dieser Aufwand erforderte eine genaue Abwägung des technischen Nutzens einer solchen Einrichtung. Deshalb wurden drei Triebfahrzeuge (243004, 024 und 052) ausgerüstet, wovon die 243004 einem umfangreichen Meßprogramm unterzogen und die anderen beiden Lokomotiven der Betriebserprobung zugeführt wurden. Der Effekt der FPS bestand für den Lokführer nur in kürzeren Schleuderphasen. Die BR 243 ist allerdings nicht unmittelbar mit den stufenweise gesteuerten Schweizer Lokomotiven vergleichbar, da die stufenlose Zugkraftregelung der BR 243 im Falle eines langsamen Überganges aller Achsen in den Makroschlupfzustand die auf der natürlichen Kennlinie der Fahrmotoren bei gegebener Motorspannung fallende Zugkraft bei Betrieb in der Hauptsteuerung selbsttätig nachregelt und damit die Achsen höher in den Bereich des Makroschlupfes führt. Hinzu kommt, daß die FPS als differenzschlupfbegrenzende Maßnahme der AHO in zweierlei Weise entgegenwirkt:

Die AHO benötigt zur Reaktion eine Schlupfdifferenz zwischen den Achsen, welche aber durch die FPS begrenzt wird; die Nutzschlupfanforderung der AHO führt bei gleicher Schlupfdifferenz nach der Zielfunktion mit FPS theoretisch zu einem höheren Gesamtschlupf aller Achsen.

Die Messungen zur Klärung der Einführungswürdigkeit der FPS wurden mit AHO durchgeführt und bezogen sich auf einen Variantenvergleich von Anfahrten mit und ohne FPS.