

# 1 Einleitung

## 1.1 Elektromagnetische Kompatibilität zwischen den Stromrichtern und Gleisfreimeldeanlagen in Bahnstromnetzen

Durch die rasante Entwicklung der Leistungselektronik sowie ihrer Steuerungs- und Regelungstechnik werden leistungselektronische Schaltungen, vor allem Stromrichter, nicht nur in Triebfahrzeugen sondern auch zunehmend in statischen Einrichtungen und Anlagen im Bahnstromnetz eingesetzt. Als Folge der Schaltheftungen der leistungselektronischen Bauelemente entstehen nichtsinusförmige Verläufe von Strömen und Spannungen. Dies führt zu Oberschwingungen im Traktionsstrom.

Zur Fahrwegsicherung und Abstandshaltung werden im Streckennetz der Deutschen Bahn (DB) neben Achszählern und Fahrzeugsensoren (Schleifen) überwiegend Gleisfreimeldeanlagen mit Gleisstromkreisen verwendet. Aus elektroenergietechnischer Sicht dienen die Fahrschienen zum Rückführen eines Teiles des Traktionsstromes zum speisenden Unterwerk. Gleichzeitig werden die Fahrschienen aber als Teile von Stromkreisen der Gleisfreimeldeanlagen benutzt.

In Deutschland arbeiten die Gleisstromkreise überwiegend mit den Frequenzen von 42 Hz und 100 Hz sowie im Tonfrequenzbereich von 4,75 kHz bis 16,8 kHz (sog. Tonfrequenzgleisstromkreise). Ist der Traktionsrückstrom mit Stromüberschwingungen dieser Frequenzen behaftet, kann es zu Störungen eines Gleisstromkreises kommen, wenn seine Störfestigkeit überschritten wird. Weiterhin können Achszähler und Fahrzeugsensoren durch Magnetfelder beeinflusst werden, die von Oberschwingungen des Schienenstromes hervorgerufen werden können.

Die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) von Gleisfreimeldeanlagen mit Stromrichtern, die im Bahnnetz betrieben werden, ist eine grundlegende Voraussetzung für einen sicheren, zuverlässigen und wirtschaftlichen Bahnbetrieb. Kompatibilitätsprobleme zwischen Stromrichtern und Gleisfreimeldeanlagen sind ein bedeutsames Hindernis bei der Zulassung

- neuer bzw. veränderter Fahrzeuge und statischer Anlagen für das bestehende Streckennetz;
- der in einem bestimmten Streckennetz fahrenden Fahrzeuge für andere Netze.

Bei den sicherheitsrelevanten Störungen, d.h. wenn ein vom Zug besetzter Streckenabschnitt als frei gemeldet wird, wird die Sicherheit des Schienenverkehrs gefährdet. Wird dagegen ein freier Abschnitt infolge einer Störbeeinflussung als besetzt angezeigt (nicht sicherheitsrelevante Störungen), wird die optimale Ausnutzung der Kapazität des Streckennetzes verhindert.

Bevor ein Fahrzeug auf den Strecken von DB Netz betrieben werden kann, muss es zahlreichen Zulassungsverfahren unterzogen werden. Die Zulassung betrifft die Beeinflussung der Gleisstromkreise erfolgt nach den Richtlinien von DB Netz [1]. Das Zulassungsverfahren schreibt die Durchführung von Messfahrten mit dem zuzulassenden Fahrzeug vor. Bei den Messfahrten wird der Emissionsstörstrom des Fahrzeugs gemessen und mit den Grenzwerten verglichen, die in [1] frequenzspezifisch

## 1 Einleitung

festgelegt sind. Um möglichst viele Bedingungen abzudecken, die im normalen Betrieb vorkommen können, müssen zahlreiche Messfahrten an unterschiedlichen Tagen zu unterschiedlichen Zeiten durchgeführt werden. Bei den Messungen sind Fahrspiele durchzuführen, die alle Geschwindigkeiten und Betriebe (Anfahren, Bremsen, Auslaufen u.s.w.) beinhalten. Auf Grund der vielen Messfahrten, die von [1] gefordert werden, ist das Zulassungsverfahren mit hohen Kosten und großem Zeitaufwand verbunden.

Soll ein Fahrzeug, das z.B. für das Schienennetz der DB zugelassen wurde, in einem anderen Land betrieben werden, ist die Zulassung nach den landesspezifischen Vorschriften des jeweiligen Netzbetreibers neu durchzuführen. Den Zulassungsverfahren aller europäischen Länder liegen die Messfahrten mit anschließender Auswertung des Emissionsstörsstromes zu Grunde. Ein bedeutender Nachteil dieser Verfahren ist ihre Ungenauigkeit und die daraus resultierende Nichtübertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Streckennetze. Diese Tatsache ist auf zwei Erscheinungen zurück zu führen, die in den eingesetzten Zulassungsverfahren nicht berücksichtigt werden:

1. ein **wellenartiges Ausbreitungsverhalten** der tonfrequenten Störströme und
2. **Resonanzerscheinungen** im Fahrleitungsnetz.

Die tonfrequenten Störströme breiten sich entlang der Strecke **wellenartig** aus und werden in Abhängigkeit von den Netzverhältnissen und der Entfernung vom Fahrzeug entweder gedämpft oder verstärkt. Die Gleisstromkreise, die sich in einer Entfernung vom Fahrzeug befinden, können daher von einem verstärkten Störstrom beeinflusst werden, der das Mehrfache vom Emissionsstrom sein kann.

Auch die **Resonanzerscheinungen** tragen zu der Verfälschung der auf den Emissionsstrommessungen basierenden EMV-Analyse bei. Liegt zum Beispiel eine Parallelresonanz zwischen den Netzimpedanzen vor, die vom Fahrzeug aus in beiden Streckenrichtungen gesehen werden, sind die einzelnen Störströme beider Richtungen größer als ihre Summe (der gemessene Emissionsstrom).

Zusammenfassend stellt die Ungenauigkeit der gegenwärtigen Zulassungsverfahren, die in den europäischen Ländern eingesetzt werden, ein Hindernis auf dem Wege zu ihrer Harmonisierung dar. Nicht an letzter Stelle stehen auch die Wirtschaftlichkeitsaspekte.

### 1.2 Motivation und Zielsetzung

Die Verbesserung eines Zulassungsverfahrens kann durch seine wissenschaftliche Begründung erzielt werden. Dies setzt ausführliche Kenntnisse über das Ausbreitungsverhalten der Störströme und die Resonanzerscheinungen voraus. Trotz verstärkter Forschungsaktivitäten letzter Zeit ([2,3,4,5,6,7] u.a.) liegen derzeit immer noch keine konkreten, wissenschaftlich begründeten und praktisch realisierbaren Vorschläge zur Verbesserung der Genauigkeit und der Wirtschaftlichkeit des Zulassungsverfahrens vor.

Aus dieser Situation heraus entstand die Motivation für die vorliegende Arbeit, die Untersuchungen auf diesem Gebiet fortzusetzen. Zum Ziel wurde die Erarbeitung solcher Vorschläge gesetzt.

## 1 Einleitung

Für die Untersuchungen sind rechnergestützte Modelle von Betriebsmitteln und Fahrleitungsnetzen sowie ein Verfahren zur Berechnung dieser Modelle erforderlich. Die Untersuchungen sollen die Arbeitsfrequenzen der Gleisstromkreise abdecken, wobei die höchste bei 16,8 kHz liegt. Herkömmliche Modelle und Berechnungsverfahren sind im Tonfrequenzbereich mit großen Fehlern methodischer oder numerischer Herkunft behaftet und somit für die Untersuchungen ungeeignet. Zu einem weiteren wichtigen Ziel dieser Arbeit wurde die Entwicklung eines dafür geeigneten Netzmodells und Berechnungsverfahrens gesetzt.

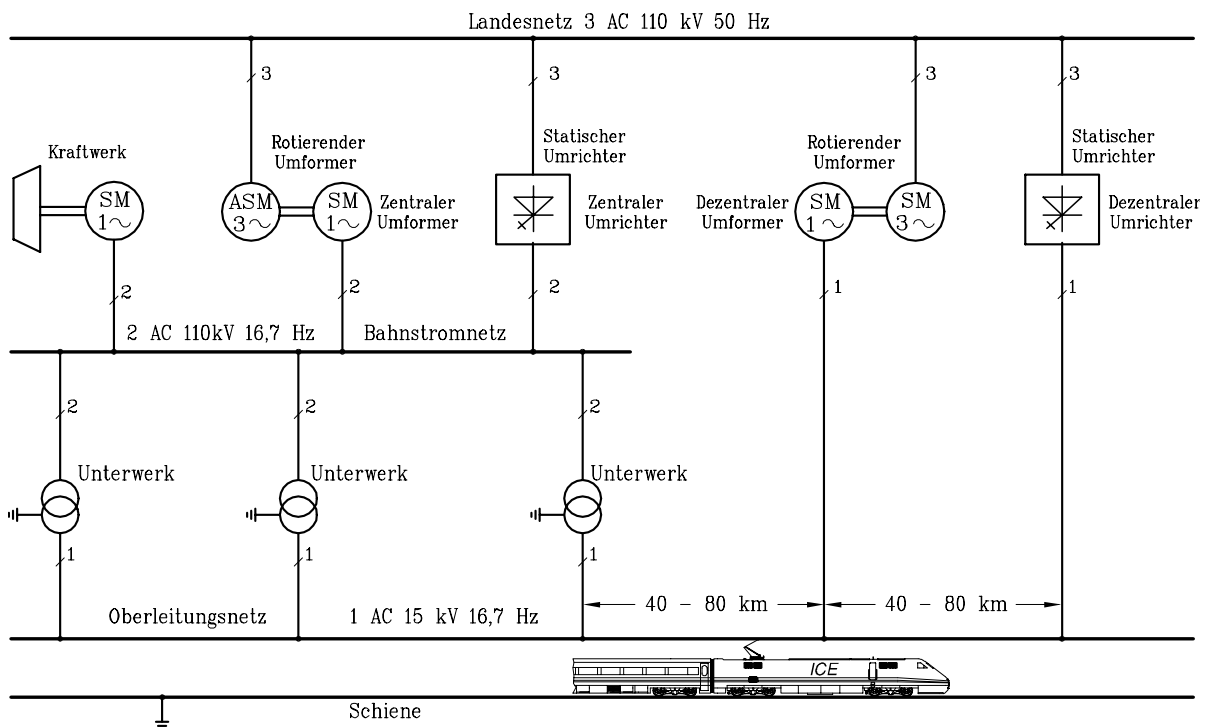
Der eigentliche Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit liegt bei der Ausbreitung der Stromüberschwingungen in den Wechselstrom-Fahrleitungsnetzen der DB. Die Entstehung der Überschwingungen sowie ihre Ausbreitung im 110-kV-Netz sind nicht Gegenstand dieser Arbeit. Da die überwiegende Mehrheit der im Fahrleitungsnetz betriebenen Stromrichter in elektrischen Schienenfahrzeugen installiert ist, stehen Fahrzeuge als Störquellen im Vordergrund der Untersuchung. Die erzielten Ergebnisse sind jedoch auf fahrleitungsseitige Stromrichter der ortsfesten Anlagen grundsätzlich übertragbar. Ferner, obwohl die Stromüberschwingungen hinsichtlich der Beeinflussung der Gleisstromkreisanlagen im Mittelpunkt dieser Arbeit steht, sind die Ergebnisse auch für Achszähler und Fahrzeugsensoren relevant, da diese durch elektromagnetische Felder der Überschwingungsströme beeinflusst werden.

Bei den Untersuchungen der vorliegenden Arbeit wird immer Bezug auf 15-kV-16,7-Hz-Fahrleitungsnetz der DB genommen. Die entwickelten Modelle und die gewonnenen Ergebnisse lassen sich jedoch auf andere Bahnstromsysteme, z.B. auf Gleichstrom- oder 25-kV-50Hz-Wechselstromsysteme adaptieren und übertragen.

## 2 Stand der Technik bei Bahnstromversorgung und Signalanlagen

### 2.1 Das Bahnstromversorgungssystem der DB

Aufgabe der Bahnenergieversorgung ist es, einen ungestörten, zuverlässigen und sicheren Bahnbetrieb mit der elektrischen Zugförderung zu ermöglichen. Bei der DB wird der elektrische Zugbetrieb mit 15-kV-16,7-Hz betrieben. Die notwendige Energie wird aus dem dreiphasigen 110-kV-50-Hz-Landesnetz bezogen sowie in bahneigenen Kraftwerken erzeugt. Wie in Bild 1 gezeigt, unterscheidet man zwischen der zentralen und der dezentralen Bahnenenergieversorgung.



**Bild 1:** Bahnstromversorgungssystem in Deutschland.

Bei der zentralen Energieversorgung wird die dreiphasige 110-kV-50-Hz-Energie aus dem Landesnetz durch zentrale Umformer- und Umrichterwerke zunächst in zweiphasige 110-kV-16,7-Hz-Energie umgewandelt. Die Energieübertragung erfolgt durch das 110-kV-16,7-Hz-Bahnstromnetz. Am 01.01.2002 waren zur Versorgung des zentralen Netzes 2587 MW Leistung installiert, davon 1733 MW in Wärmekraft-, Wasserkraft- und Pumpspeicherwerken sowie 600 MW in zentralen Umformerwerken und 254 MW in Umrichterwerken [8]. Zum 01.01.2006 stieg die installierte Umrichterleistung im zentralen Bahnstromnetz auf 503 MW [9].

Bei der dezentralen Energieversorgung wird die Einphasenleistung mit der Nennfrequenz von 16,7 Hz durch dezentrale Umformer- und Umrichterwerke erzeugt und über Sammelschienen und Streckenabzweige verteilt. Die installierte Leistung in den Umformerwerken des dezentralen Netzbereiches betrug zum 01.01.2002 624 MW [8]. Im Juli 2002 wurde ein dezentrales Umrichterwerk (Urw Wolframshausen) mit zwei 15-MW-Umrichtern bei Nordhausen in Thüringen in Betrieb genommen [10].

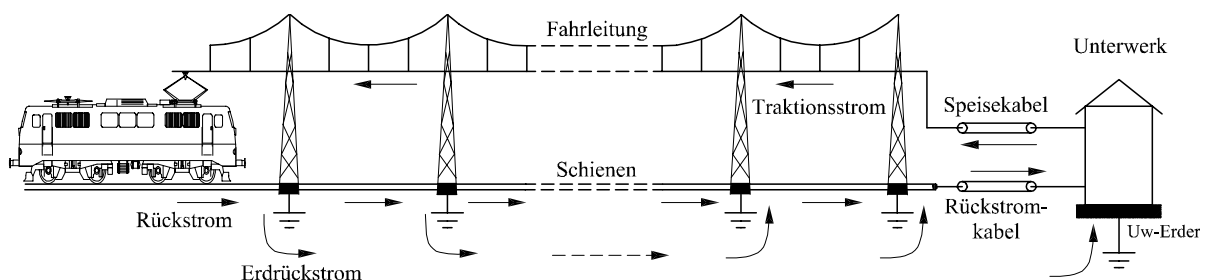
## 2 Stand der Technik bei Bahnstromversorgung und Signalanlagen

Die Einspeisung der Bahnenergie in die Fahrleitungsanlage erfolgt mit Hilfe der Unterwerke. Man unterscheidet dabei

- *Bahnnumspannwerke*, die die 16,7-Hz-Einphasenenergie aus dem 110-kV-Netz der zentralen Bahnenergieversorgung auf die 15-kV-Betriebsspannung der Fahrleitungsanlagen umspannen,
- *dezentrale Umformerwerke*, in denen die dreiphasige Energie des 50-Hz-Landesnetzes mit Hilfe rotierender Maschinen in einphasige Energie des 16,7-Hz-Bahnnetzes umgewandelt und gleichzeitig nach dem Umspannen auf die 15-kV-Spannung dem Fahrleitungsnetz zugeführt wird,
- *dezentrale Umrichterwerke*, die die gleiche Aufgabe wie die der dezentralen Umformerwerke mit Hilfe von leistungselektronischen Bauelementen übernehmen,
- *Schaltposten sowie Kuppelstellen*, die die 16,7-Hz-15-kV-Bahnenergie von anderen Unterwerken beziehen und dann dem Fahrleitungsnetz zuführen beziehungsweise verschiedene Fahrleitungsabschnitte miteinander verbinden und ein- oder ausschalten.

Das Zuführen der 15-kV-16,7-Hz-Traktionsenergie zu den fahrenden Zügen erfolgt, wie in Bild 2 gezeigt, über Fahrleitungen. Die Fahrleitungen der DB Netz werden als Oberleitungen ausgeführt. Eine Fahrleitung besteht somit aus einem oberirdischen Fahrdraht mit oder ohne Längstragwerk und Abspannungen. Parallel zu den Fahrleitungen kann eine oberirdische Speiseleitung oder eine Verstärkungsleitung verlegt werden.

Zur Rückführung des Traktionsrückstromes werden nichtisolierte Fahrschienen und Rückleitungsseile auf Fahrleitungsmasten eingesetzt. Die Fahrschienen sind über die Erdungsseile mit den Rückleitungsseilen verbunden und über die Masterder geerdet. Dadurch wird das Erdreich in die Rückstromführung mit einbezogen. Über die an den Fahrschienen angeschlossenen Rückstromkabel sowie über die Erdungsanlage des Unterwerkes wird der Rückstrom zu den Nullschienen der Unterwerke geführt.



**Bild 2:** Traktionsstromführung.

Das mit Oberleitungen elektrifizierte Streckennetz der DB war zum 01.01.2005 rund 18900 km lang. Durch den Bau neuer oder Wiederaufbau früherer Strecken besonders in Berlin sowie durch Elektrifizierung bestehender Strecken kamen im Jahre 2005 insgesamt 193 km Strecke mit Oberleitungen bei DB Netz hinzu [9].

## 2.2 Elektrische Triebfahrzeuge

Am 31.12.2005 besaß die Deutsche Bahn knapp 2700 elektrische Lokomotiven und über 2000 elektrische Triebzüge [9]. Die Triebfahrzeuge älterer Baureihen sind mit Kommutator-Fahrmotoren mit Anschlittsteuerung oder Amplitudensteuerung über Stufenschaltwerk ausgerüstet. Durch Erneuerung des Triebfahrzeugbestandes werden sie nach und nach durch moderne Triebfahrzeuge in Drehstromantriebstechnik mit Asynchronmotoren und Spannungszwischenkreisumrichtern ersetzt.

So wurden im Jahre 2005 Lokomotiven mit Kommutator-Fahrmotoren BR 141 vollständig, die BR 110, 140 sowie 155 in großer Stückzahl durch moderne Lokomotiven mit Drehstromantrieben BR 146, 185 und 189 ersetzt. Dadurch hat sich das Verhältnis zwischen Kommutator- und Drehstromfahrmotortechnik von 1:0,4 nach 1:0,5 verschoben. Unter Regionalverkehrs- und S-Bahn-Triebzüge stieg der Anteil mit Drehstromantriebstechnik im gleichen Jahr um 3 Prozentpunkte auf 77%. Auch die Hochgeschwindigkeitszüge ICE 1 (BR 401), ICE 2 (BR 402), ICE 3 (BR 403) sowie ICE-T (BR 411 bzw. 415) sind in Drehstromtechnik ausgeführt.

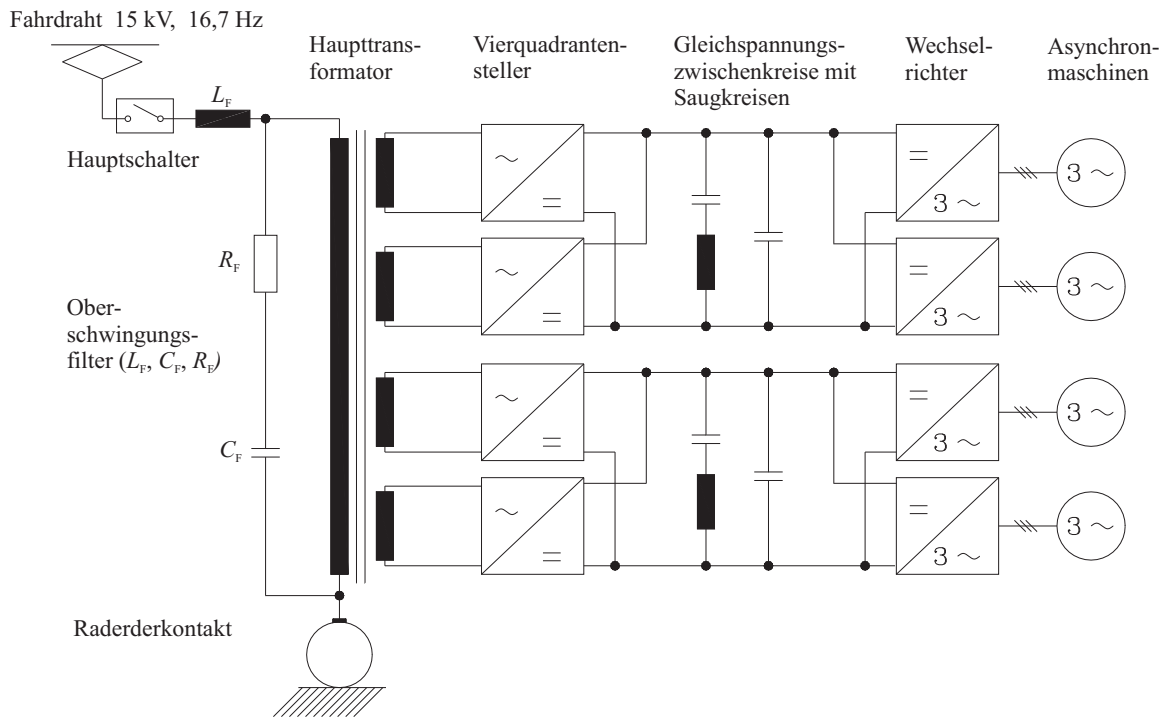
Die prinzipielle Schaltung eines Triebfahrzeugs in Drehstromtechnik ist in Bild 3 dargestellt [11, 12]. Die Fahrmotoren werden aus dreiphasigen Traktionswechselrichtern gespeist. Die Wechselrichter erzeugen Ausgangsspannungen variabler Frequenz und variabler Amplitude. Sie werden aus den Gleichspannungszwischenkreisen versorgt. Diese bestehen aus Stützkondensatoren und auf die zweite Harmonische der Netzfrequenz abgestimmten Saugkreisen. Der zur Speisung der Zwischenkreise benötigte Gleichstrom wird von den Vierquadrantenstellern (4QS) geliefert. Die Einspeisung der 4QS erfolgt aus Sekundärwicklungen des Haupttransformators. Je nach Baureihe kann ein Störstromfilter an einer speziellen Filterwicklung oder an der Primärseite des Haupttransformators angeschlossen werden.

## 2.3 Gleisfreimeldeanlagen

Für einen sicheren Bahnbetrieb müssen Vorkehrungen getroffen werden, um Auffahrunfälle zu vermeiden. Zu den Vorkehrungen zählen Abstandshaltung der Züge und Fahrwegsicherung [13].

- **Abstandshaltung.** Im Bahnhofsbereich und auf der freien Strecke dürfen sich die Züge nur auf einen bestimmten räumlichen Abstand nähern. Der Fahrweg wird deshalb in Zugfolgeabschnitte unterteilt. Es darf sich nur ein Zug in einem Zugfolgeabschnitt befinden. Um dies zu gewährleisten, wird vor Beginn des Zugfolgeabschnitts ein Signal aufgestellt, das die Einfahrt in den Zugfolgeabschnitt erst dann freigibt, wenn sichergestellt ist, dass der Vorauszug den Abschnitt geräumt hat.
- **Fahrwegsicherung.** Vorwiegend im Bahnhofsbereich ergeben sich durch unterschiedliche Stellungen aufeinanderfolgender Weichen verschiedene Fahrwege. Damit die Zugfahrt zugelassen werden darf, muss sichergestellt werden, dass der Fahrweg unbesetzt ist.

## 2 Stand der Technik bei Bahnstromversorgung und Signalanlagen



**Bild 3:** Hauptschaltbild eines Triebfahrzeuges mit Drehstromantriebstechnik.

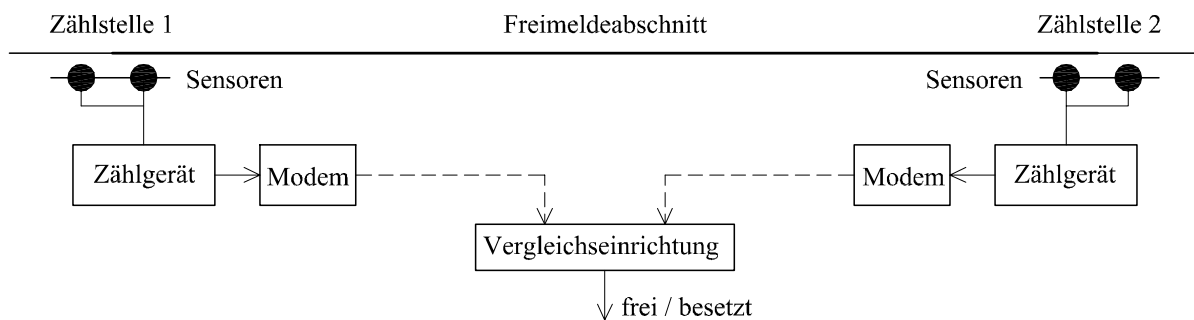
Derzeit werden diese Aufgaben mit Hilfe von Gleisfreimeldeanlagen erfüllt. Gleisfreimeldeanlagen sind ein wesentlicher Bestandteil der Sicherheits- und Überwachungstechnik. Sie dienen dazu, den Besetzt- bzw. Freizustand eines Gleisabschnitts anzuzeigen. Im allgemeinen werden folgende Arten von Gleisfreimeldeanlagen unterschieden [14]:

1. Achszähler
2. Gleisstromkreise
3. Tonfrequenzgleisstromkreise

Eine Gleisfreimeldeanlage mit **Achszählern** ist in Bild 4 gezeigt. Bei Einfahrt eines Zuges in einen Gleisabschnitt werden die Achsen des Zuges eingezählt. Am Ende des Abschnittes befindet sich ein weiterer Zählpunkt, der die Achsen des Zuges auszählt. Durch eine Vergleichseinrichtung werden die Zählergebnisse am Anfang und am Ende des Gleisabschnittes verglichen. Wenn die Zahl der eingezählten mit der Zahl der ausgezählten Achsen übereinstimmt, wird der Abschnitt freigemeldet. Die Radensoren an den Zählpunkten werden direkt an den Schienen montiert. Sie sind in der Regel als Doppelsensoren ausgeführt, um ein richtungsselektiertes Ein- und Auszählen zu gewährleisten sowie das mehrfache Zählen einer auf dem Kontakt pendelnden Achse, z.B. beim Strecken eines zum Stehen gekommenen Zuges zu verhindern. Von einer Sendespule des Sensors wird ein magnetisches Wechselfeld abgestrahlt und von einer Empfangsspule aufgenommen. Das elektromagnetische Wechselfeld zwischen Sender und Empfänger wird durch den Spurkranz eines vorbeierollenden Rades verändert. Dies führt zur Änderung der in der Empfangsspule induzierten Spannung.

## 2 Stand der Technik bei Bahnstromversorgung und Signalanlagen

Die Amplitudenänderungen und deren zeitliche Folge werden ausgewertet. Moderne Achszählsysteme (z.B. Az LM 6315 FieldTrac von Alcatel oder Az S M von Siemens) sind für Geschwindigkeiten bis zu 440 km/h zugelassen.



**Bild 4:** Gleisfreimeldeanlage mit Achszählern.

Wie es aus dem Wirkungsprinzip von Sensoren hervorgeht, können metallene Teile des Fahrzeugs, die sich im selben Bereich befinden wie der Spurkranz, den Achszähler beeinflussen [4]. In der Praxis trifft das neben einigen Serienfahrzeugen hauptsächlich auf Instandhaltungsfahrzeuge wie Schienenschleifzüge oder Schienenmessfahrzeuge zu. Wenn Bremsen von Fahrzeugen der Schiene nahe kommen, können Achszähler durch die Metallmasse und ihre elektromagnetischen Eigenschaften gestört werden. Ferner werden Achszähler durch Magnetfelder im Gleisbereich beeinflusst, die von Oberschwingungen des Schienenstromes hervorgerufen werden können. Um aus Zählfehlern resultierende Störungen des Betriebsablaufes zu reduzieren, werten weitere, übergeordnete Vergleichseinrichtungen die Signale mehrerer benachbarter Freimeldeabschnitte aus.

Bei Verwendung von Achszählern ist eine Isolierung der Schienen nicht nötig, so dass beide Fahrschienen der Führung des Traktionsstromes dienen.

Das einem **Gleisstromkreis** zu Grunde liegende Prinzip wurde bereits 1871 von William Robinson in den USA entwickelt. Freimeldeeinrichtungen mit Gleisstromkreisen nutzen die Gleise als Teile der Stromkreise. Zur Gleisfreimeldung mittels Gleisstromkreisen werden die beiden Schienen eines Gleises gegeneinander elektrisch isoliert. Die einzelnen Freimeldeabschnitte sind ebenfalls durch Isolierstöße elektrisch voneinander getrennt. An einem Ende eines Abschnittes legt man an die beiden Schienen des Gleises eine Spannung an, an das andere schaltet man ein Gleisrelais. Befährt ein Zug den Abschnitt, so wird die angelegte Spannung durch dessen Achsen kurzgeschlossen. Dadurch wird das Gleisrelais stromlos. Bei den 16,7-Hz-Strecken der DB arbeiten die Gleisstromkreise überwiegend mit 100 Hz. Auf den 1200-V-Gleichstromstrecken der Hamburger S-Bahn sowie auf Strecken mit gleichzeitig Gleichstrom- und 16,7-Hz-Traktion arbeiten die Gleisstromkreise mit der Frequenz von 42 Hz [15]. Bei anderen Bahnstromsystemen sind Gleisstromkreise mit den Arbeitsfrequenzen von 50, 75 und 125 Hz üblich. Auf nicht elektrifizierten Strecken der DB werden die Gleisstromkreise mit der Arbeitsfrequenz von 50 Hz eingesetzt.

Man unterscheidet bezüglich Rückführung des Traktionsstromes und Bahnerdung bei der elektrotechnischen Gestaltung der Gleise mit Gleisstromkreisen zwischen einschienig und zweischienig isolierten Gleisen. Die einschienige Isolierung wird auf nicht-elektrifizierten Strecken allgemein und bei elektrifizierten Strecken nur im