

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 78 (1987)

Heft: 5

Artikel: Digitale Regelung von Gleisbremsen in Rangierbahnhöfen

Autor: Stalder, H.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-903832>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 18.03.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Digitale Regelung von Gleisbremsen in Rangierbahnhöfen

Hp. Stalder

Es wird ein Verfahren zur Regelung der Geschwindigkeit von ablaufenden Wagen in den Gleisbremsen automatisierter Rangierbahnhöfe beschrieben.

L'article décrit une méthode pour régler la vitesse des coupes dans les freins de voie d'une gare de triage automatisée.

1. Einleitung

Ein Rangierbahnhof ist im Prinzip eine Wagen-Sortieranlage, in der die zu sortierenden Wagen und Wagen-Gruppen, kurz Abläufe genannt, meist mit Hilfe der Gravitation in verschiedene Gleise sortiert werden. Die zu sortierenden Abläufe werden in den meisten Fällen über eine Bergkuppe abgestossen und laufen dann frei in Richtung ihres Zielgleises. Damit in der Zone, in der sich die Abläufe frei bewegen, der Ablaufzone, keine unerwünschten Einholungen von Abläufen mit unterschiedlichen Laufeigenschaften stattfinden, werden dort in bestimmten Abständen Gleisbremsen eingebaut, die die Aufgabe haben, die Geschwindigkeit der Abläufe so zu beeinflussen, dass weder Einholungen im Fahrweg noch Eckstöße im Weichenbereich auftreten können; dabei sind die Auslaufgeschwindigkeiten aus den Gleisbremsen mit recht hoher Präzision einzuhalten.

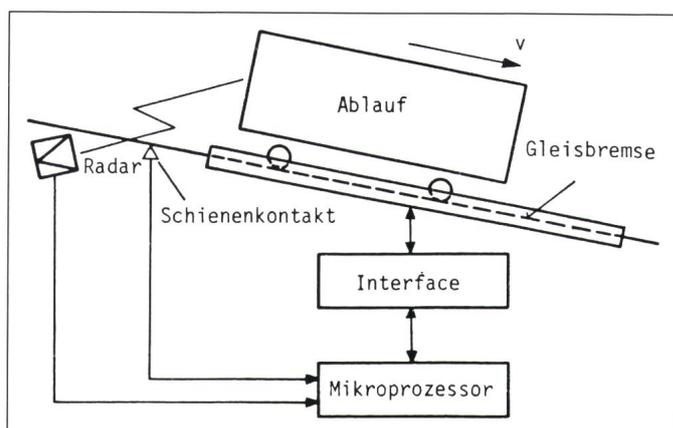
Das im folgenden beschriebene Verfahren zur Regelung der Geschwindigkeit von Abläufen in Gleisbremsen wurde erstmals in den sogenannten Richtungsgleisbremsen des Rangierbahnhofs Muttenz II bei den SBB erprobt.

2. Der Geschwindigkeitsregelkreis

Das Abbremsen der Abläufe wird über die Messung von deren Geschwindigkeit mittels Doppler-Radargeräten realisiert. Das Radargerät misst gleichzeitig auch den Weg, den der Ablauf in der Bremse zurückgelegt hat; als Ortsbezugspunkt dient ein Schienenkontakt, der vor der Bremse montiert wird. In Figur 1 ist der Aufbau des Regelkreises dargestellt: Der Mikroprozessor berechnet aus der Doppler-Frequenz des Radars die Geschwindigkeit des Ablaufes und dessen Lage in der Gleisbremse. Aufgrund dieser Messdaten und aufgrund der später beschriebenen Regelalgorithmen gibt der Mikroprozessor Steuerbefehle über ein Interface an die Gleisbremse ab, so dass der Ablauf wunschgemäß verzögert wird. Werden elektrodynamische Gleisbremsen (Wirbelstrombremsen) geregelt, so ist das Interface ein Stromrichter, mit dem ein Strom von 1000 A geregelt wird; im Fall der Regelung von hydraulischen Gleisbremsen ist das Interface eine Hydrauliksteuerung.

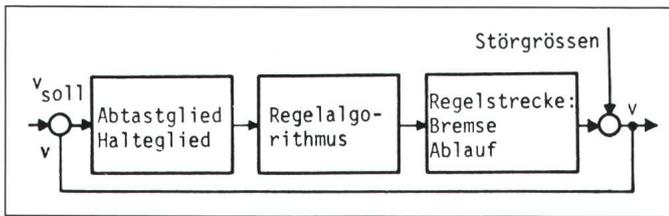
Der in Figur 1 dargestellte Regelkreis kann gemäss [1] mit dem in Figur

Figur 1
Aufbau des
Regelkreises



Adresse des Autors

Hanspeter Stalder, dipl. El.-Ing. ETH,
SBB Bauabteilung, Sektion Automation,
Mittelstrasse 43, 3030 Bern.



Figur 2
Modell des Regelkreises

2 dargestellten Modell der regeltechnischen Untersuchung zugänglich gemacht werden. Im Abtast-/Halteglied wird berücksichtigt, dass es sich um einen digitalen Regelkreis handelt. Als Regelalgorithmus kommen P- oder PI-Regler in Frage, und die Regelstrecke beschreibt die Eigenschaften der Gleisbremse und des zu bremsenden Ablaufes.

Die Eigenschaften der Gleisbremse werden mit folgender Übertragungsfunktion $G_1(p)$ beschrieben:

$$G_1(p) = K_B / (1 + p \cdot T_1) \quad (1)$$

Der Ablauf kann mit der Übertragungsfunktion $G_2(p)$ beschrieben werden:

$$G_2(p) = 1 / (m \cdot p) \quad (2)$$

Wird ein PI-Regler verwendet, so lautet der Regelalgorithmus

$$G_0(p) =$$

$$K_1 [1 + (T_S / T_I - 1) \exp(-T_S \cdot p)] / [1 - \exp(-T_S \cdot p)] \quad (3)$$

Damit ergibt sich nach der Transformation in den z -Bereich folgende Übertragungsfunktion $F_0(z)$ für den Vorwärtszweig:

$$F_0(z) = \frac{K_B K_1}{m} \cdot \left(\frac{z-1}{z} \right) \quad (4)$$

$$\cdot \left(\frac{1 + (T_S / T_I - 1) z^{-1}}{1 - z^{-1}} \right) \cdot \left[\frac{T_S \cdot z}{(z-1)^2} - \frac{T_I \cdot z}{z - \exp(-T_S / T_I)} \right]$$

Es bedeuten:

- K_B Bremskraftkonstante
- T_1 Zeitkonstante der Gleisbremse
- m Masse des Ablaufes
- K_1 Verstärkung des PI-Reglers
- T_S Abtastzeit des Regelkreises
- T_I Integrationszeitkonstante des PI-Reglers

Die Stabilität des Regelkreises wurde anhand der Funktion

$$1 + F_0(z) = 0 \quad (5)$$

für variable Kreisverstärkung

$$K = (K_B \cdot K_1 / m) \text{ untersucht.}$$

Das Schrittwortverhalten des Regelkreises (Differenz zwischen v_{soll} und v) wurde durch numerische Inversion der Gleichung

$$\delta v(z) = z / [(1 + F_0(z)) \cdot (z-1)] \quad (6a)$$

untersucht, das Rampenantwortverhalten mit der Gleichung

$$\delta v(z) = T_S \cdot z / [(1 + F_0(z)) \cdot (z-1)^2] \quad (6b)$$

Im Fall der Regelung von Gleisbremsen versteht man unter der Schrittwortantwort das zeitliche Verhalten der Ablaufgeschwindigkeit, wenn dem Regler bei Einfahrt des Ablaufes in die

Gleisbremse dauernd die gewünschte Auslaufgeschwindigkeit als Sollgeschwindigkeit vorgegeben wird. Bei der Rampenantwort wird dem Regler dagegen eine Gerade (Rampe) als Sollgeschwindigkeit vorgegeben, wobei die Neigung dieser Sollgeraden so bemessen ist, dass der Ablauf bei Ausfahrt aus der Gleisbremse gerade die gewünschte Auslaufgeschwindigkeit erreicht.

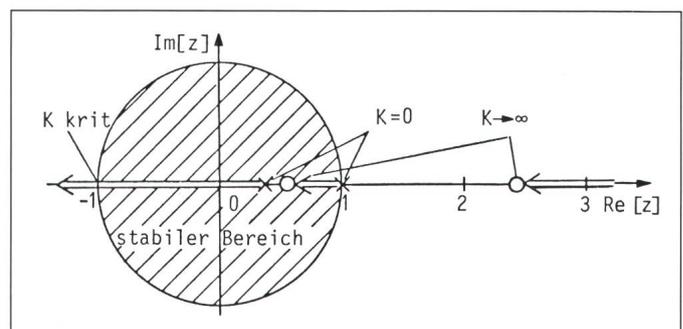
Die Figuren 3 und 4 zeigen die Stabilitätsuntersuchung für einen P- und einen PI-Regler: Der Regelkreis ist solange stabil, als sich die Wurzelortskurve innerhalb des Einheitskreises in der z -Ebene befindet; die Kreisverstärkung ist so zu bemessen, dass der stabile Bereich unter allen Betriebsbedingungen nicht verlassen wird.

Die Figuren 5 bis 8 zeigen das Verhalten des Regelkreises bei Schrittwort- und Rampenantwort für den P-Regler und den PI-Regler.

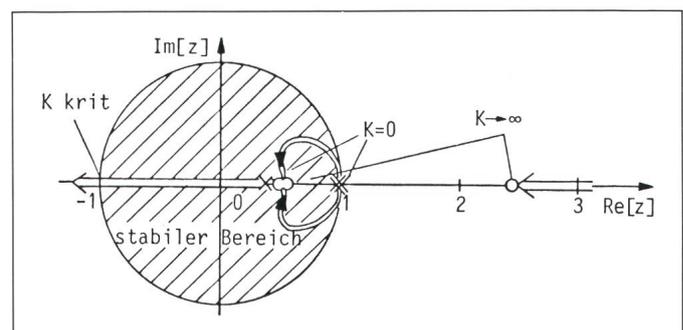
Aus den Untersuchungen zur Stabilität und zum Antwortverhalten des Regelkreises ergeben sich einige wesentliche Aspekte, die bei der Definition der Regelalgorithmen zu berücksichtigen sind:

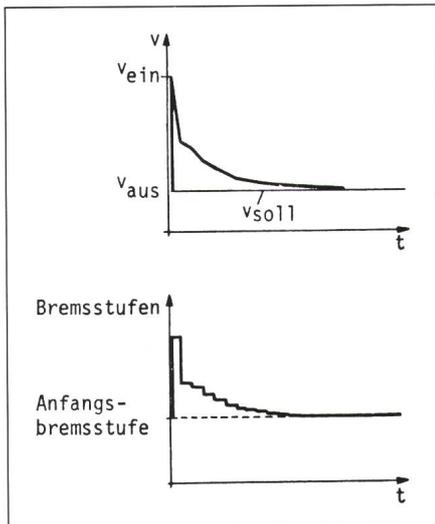
- Bei der Berechnung der Regelverstärkung K_1 ist die Gesamtmasse m des zu bremsenden Ablaufes zu berücksichtigen.

Figur 3
Stabilität mit P-Regler



Figur 4
Stabilität mit PI-Regler



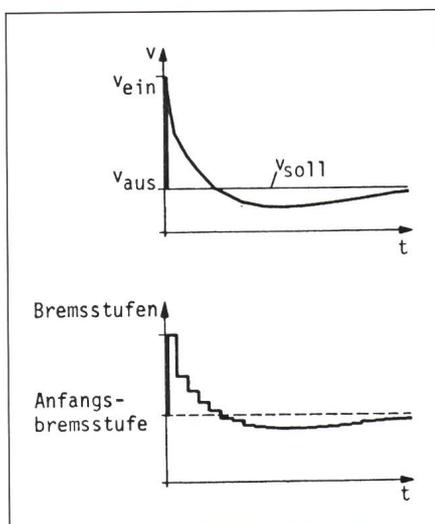


Figur 5 Schrittantwort des P-Reglers

- Die Bremskraftkonstante K_B ist abhängig von der momentan in der Gleisbremse befindlichen Anzahl Achsen X ; dementsprechend ist X in der Reglerverstärkung K_I zu berücksichtigen.

- Beim Schrittantwortverhalten schalten die Regler am Anfang hohe Bremsstufen (und damit hohe Bremskräfte) ein; die Gleisbremse wird dadurch vorwiegend im Einlaufbereich abgenutzt, was nicht erwünscht ist. Beim Rampenantwortverhalten wird dem Ablauf die kinetische Energie gleichmäßig über die ganze Bremslänge entzogen, so dass die Bremse auf ihrer ganzen Länge etwa gleichmäßig abgenutzt wird.

- Beim Schrittantwortverhalten weisen weder P- noch PI-Regler stati-



Figur 6 Schrittantwort des PI-Reglers

sche Regelfehler auf. Nach genügend langer Zeit stimmen die Istgeschwindigkeit und die Sollgeschwindigkeit überein.

- Beim Rampenantwortverhalten weist der P-Regler einen statischen Rampenfehler auf: Die Neigungen der Ist- und Sollgeschwindigkeit bleiben auch nach sehr langer Zeit unterschiedlich, und die Istgeschwindigkeit kann somit nie die Sollgeschwindigkeit erreichen. Der PI-Regler dagegen weist keinen statischen Rampenfehler auf.

- Der PI-Regler braucht im allgemeinen länger als der P-Regler, bis er eingeschwungen ist.

Der Wunsch nach gleichmäßiger Abnutzung der Bremsleisten der Gleisbremsen bedeutet, dass dem Regler eine Rampe als Sollgröße vorgegeben werden muss; sollen keine statischen Rampenfehler entstehen, ist ein PI-Regler zu verwenden.

3. Die Regelalgorithmen

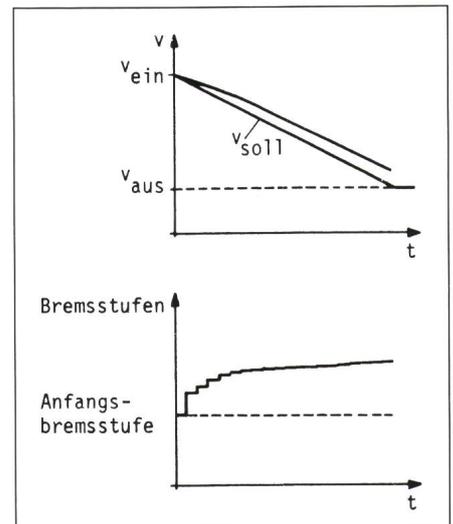
Ausgehend von den vorhergehenden theoretischen Überlegungen können die Regelalgorithmen formuliert werden. Es wird ein PI-Regler realisiert mit Rampe als Führungsgröße (v_{soll}).

Die Istgeschwindigkeit v wird mittels Radar erfasst, auf geeignete Weise geglättet und auf den jeweils nächsten Abtastzeitpunkt T_S aktualisiert.

Der Ablauf soll die Auslaufgeschwindigkeit beim Auslauf der letzten Achse aus der Bremse erreichen, so dass Abschaltzeiten der Bremse und Restbremskräfte infolge Restreibung von Ablaufachsen an den Bremsbalken keinen Einfluss auf die Präzision der Auslaufgeschwindigkeit haben.

Der vom Ablauf zurückgelegte Weg S wird ebenfalls mit dem Radar ermittelt und auf die Lage eines Schienenkontaktes vor der Bremse bezogen; während des Regelprozesses ist damit der Standort des Ablaufes in der Bremse jederzeit bekannt. In den folgenden Betrachtungen ist die Lage des erwähnten Schienenkontaktes vereinfachend unmittelbar am Bremsenanfang angenommen.

Jede Ablaufachse wird über die gesamte Bremslänge L_B gebremst, so dass bei total N_A Achsen des Ablaufes ein Summenbremsweg $S_{Bt} = N_A \cdot L_B$ zurückgelegt wurde, wenn der Ablauf die Bremse verlässt.



Figur 7 Rampenantwort des P-Reglers

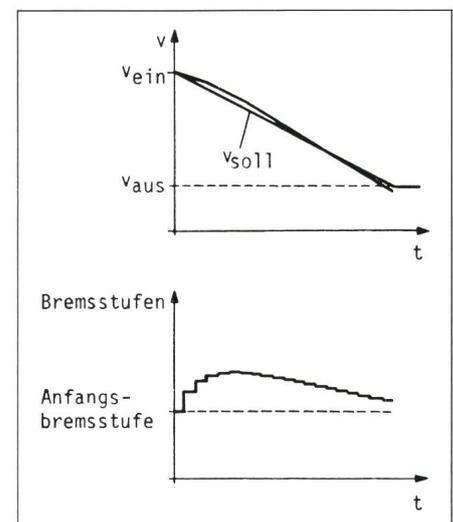
3.1 Anfangsbremsstufe

Damit für den Regelprozess Zeit gewonnen werden kann, ist es sinnvoll, vor Einfahrt eines Ablaufes in die Bremse eine Anfangsbremsstufe B_0 einzustellen; damit ist zudem gewährleistet, dass der Regler besser auf Abweichungen zwischen Ist- und Sollwert reagieren kann. Für die Berechnung der Anfangsbremsstufe wird die Energiegleichung verwendet ($F_B =$ Bremskraft):

$$m(v_e^2 - v_a^2) / 2 = F_B \cdot L_B \quad (7)$$

$$B_0 = C \cdot G_m [(v_e^2 - v_a^2) / (2g' \cdot L_B) - N_A N] \quad (8)$$

- B_0 Anfangsbremsstufe
- C Umrechnungsfaktor
- G_m mittleres Achsgewicht des Ablaufes
- v_e Einfahrtgeschwindigkeit des Ablaufes in die Bremse
- v_a Ausfahrtgeschwindigkeit des Ablaufes aus der Bremse



Figur 8 Rampenantwort des PI-Reglers

- g' Erdbeschleunigung (reduziert zur Berücksichtigung der rotierenden Massen der Achsen)
- L_B Nutzlänge der Bremse
- N_A Achszahl des Ablaufes
- N Neigung des Gleises

3.2 Anfangs-Reglerverstärkung

Die Reglerverstärkung K_I ist abhängig von der Anzahl Achsen X , die sich momentan in der Bremse befinden ($K = \text{Konstante}$):

$$K_I = K \cdot N_A \cdot G_m / X \quad (9)$$

Bei der ersten einlaufenden Achse ist $X = 1$.

3.3 Geschwindigkeitssollwert

Für die Berechnung des Sollwertes der Geschwindigkeit wird wieder die Energiegleichung (7) verwendet.

Dieser Sollwert v_{soll} wird jeweils unter Beachtung der aktuellen Istgeschwindigkeit v und der noch verfügbaren Bremslänge ($N_A \cdot L_B - S_B$) berechnet:

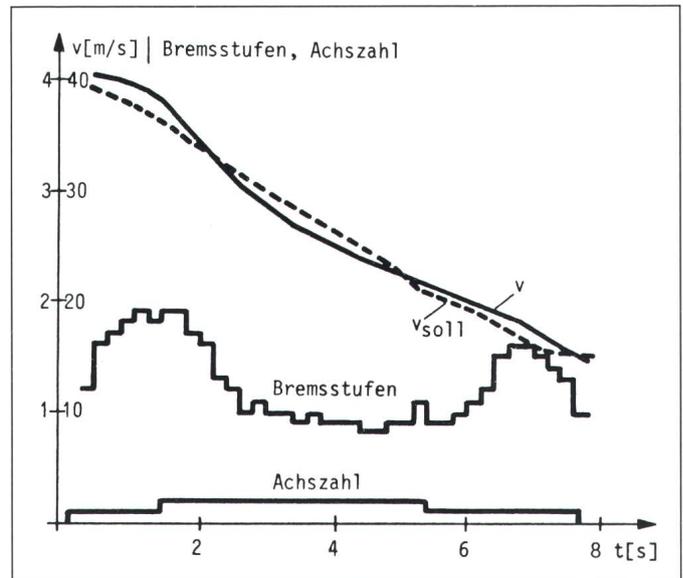
$$v_{soll} = v'_{soll} + (v_a^2 - v^2) X \cdot T_S / 2(N_A \cdot L_B - S_B) \quad (10)$$

- v'_{soll} Sollgeschwindigkeit im vorherigen Abtastpunkt
- S_B $S'_B + X \cdot D$ «verbrauchte» Bremslänge; bei Ausfahrt des Ablaufes aus der Bremse ist $S_B = S_{Bt}$
- S'_B «verbrauchte» Bremslänge im vorherigen Abtastpunkt
- D Wegstrecke pro Radarimpuls

3.4 Berechnung der Bremsstufen während des Regelprozesses

Beim PI-Regler berechnen sich die Bremsstufen wie folgt:

Figur 10
Messergebnis



$$U_K = U'_K + K_I(v - v_{soll}) + K_I(T_S / T_I - 1) v'_D$$

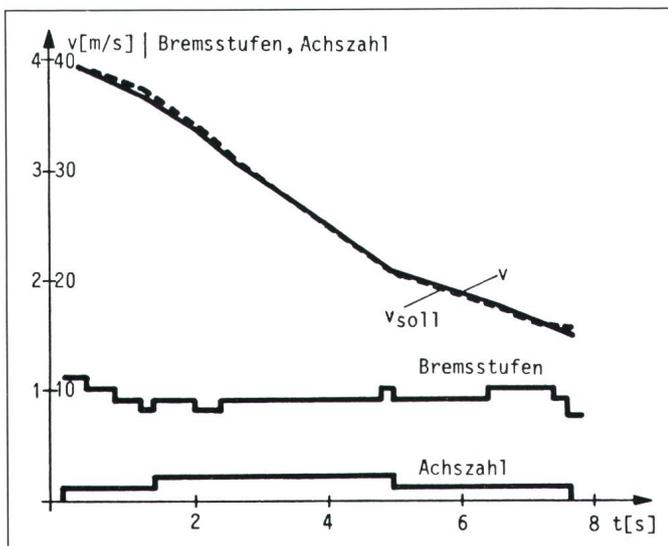
$$B_S = B_0 + U_K \quad (11)$$

- B_S Bremsstufe, die zum Abtastzeitpunkt ausgegeben wird
- U_K Bremsstufenänderung
- K_I Reglerverstärkung
- v'_D Differenz von Ist- und Sollgeschwindigkeit im vorherigen Abtastpunkt

4. Ergebnisse

Die im Kapitel 3 umschriebenen Algorithmen wurden auf einem Rechner simuliert: Für die Istgeschwindigkeit und den zurückgelegten Weg wurden Annahmen getroffen und dann untersucht, wie der Regler darauf und auf verschiedene Abläufe reagiert. Figur 9 zeigt das Ergebnis einer solchen Simulation.

Figur 9
Simulationsergebnis



Die Algorithmen wurden auch mit einer Versuchsanlage erprobt. In Figur 10 ist der gleiche Ablauf dargestellt wie in Figur 9. Die Abweichung von v_{soll} und die Schwankung der Bremsstufen sind grösser, weil in der Praxis bei der Messung von v gewisse Unstetigkeiten auftreten. Das Ziel wird jedoch trotzdem erreicht: Die Auslauf-Sollgeschwindigkeit wird erreicht, und zwar erst mit der letzten Achse.

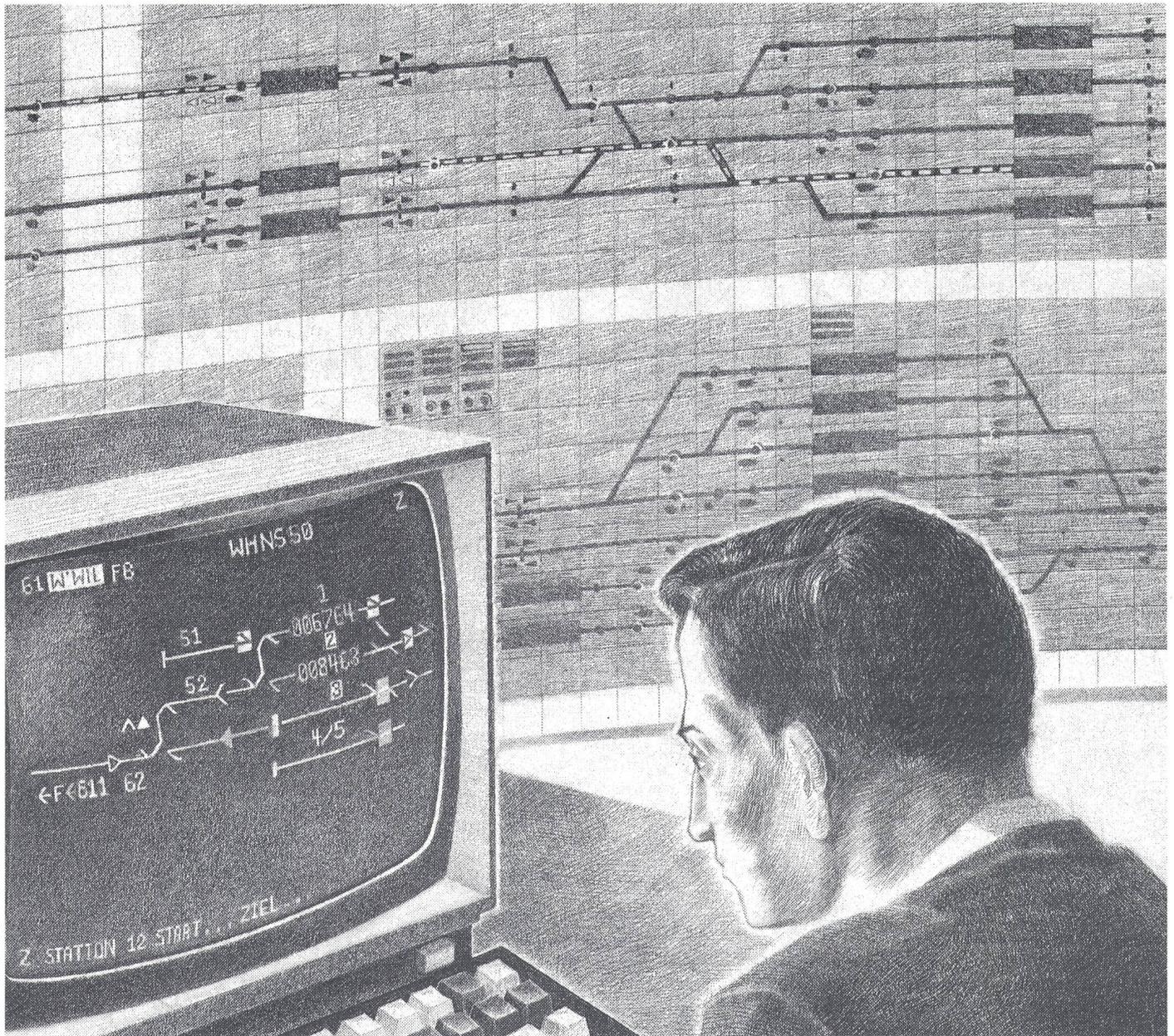
5. Zusammenfassung

In den beschriebenen Regelalgorithmen wurden folgende wesentliche Punkte berücksichtigt:

- PI-Regler zwecks Vermeidung von statischen Rampenfehlern,
- laufende Aktualisierung der Sollwertvorgabe, so dass Regelabweichungen mitberücksichtigt werden,
- Berücksichtigung der Masse des Ablaufes und der momentan in der Bremse befindlichen Anzahl Achsen in der Reglerverstärkung K_I ,
- Ausnutzung der gesamten Bremslänge,
- Hohe Reglerverstärkung, damit der Regler Witterungseinflüsse und schlechte Bremswirkung infolge kleiner Reibungskoeffizienten zwischen Bremsbalken und zu bremsendem Rad selbsttätig ausgleichen kann.

Literatur

- [1] O. Föllinger: Lineare Abtastsysteme. München/Wien, Verlag R. Oldenbourg, 1974.
- [2] J. P. Pfander und A. Hörder: Mikrocomputergesteuerte elektrodynamische Richtungsgleisbremse. Rangiertechnik und Gleisanschlusstechnik 40(1980).
- [3] H. König u. a.: Der automatische Rangierbahnhof Zürich-Limmattal. Technische Rundschau 72(1980)33, S. 17...19.



Zukunft dem öffentlichen Verkehr

Das bedeutet noch bessere Anschlüsse und noch dichtere Zugfolgen.

Als führendes Schweizer Unternehmen unterstützen wir die zukunftsbezogenen Bestrebungen der Bahnen durch unser umfassendes Leistungsangebot von Bahnsicherungs- und Verkehrsleitsystemen neuester Technologie. Wir sind der kompetente Partner für deren Entwicklung, Engineering und Produktion.

Unseren 500 Mitarbeitern bieten wir ein attraktives Arbeitsumfeld mit vielen herausfordernden Funktionen.

Integra Signum AG

Industriestrasse 42
CH-8304 Wallisellen

Tel. 01/832 32 32

integra **signum**

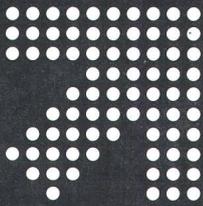
ASEGA setzt Signale.

Wir projektieren, fabrizieren
und montieren:

Eisenbahn-Sicherungsanlagen
Niveaublink- und Barrierenanlagen
Tastenstellwerke
Blockanlagen
Fernsteuerungen
HF- und NF-Steuerungssysteme
(SESAM-PLUS)

ASEGA-WEBS

ASEGA AG
Bereich Bahnen
Reussstrasse 1
6038 Gisikon Tel. 041 9107 70



Raychem

Kunststoffe für die Hochspannung

neu:
wärmeschrumpfende Isolatoren

neu:
Lichtwellenleiter für die nach-
trägliche Installation auf
Freileitungen bis 161 kV

Raychem AG
Postfach 229, 6340 Baar
Tel. 042/31 81 31
Telex 868 704

Haefely simuliert Transienten

- Blitzstossspannungen und Ströme nach IEC, IEEE, SAE u. a. bis 10000 kV/500 kA
- Schaltimpulse
- elektrostatische Entladungen
- NEMP nach NATO Normen und Kundenanforderungen von 0,5 bis 1500 kV, Einzel- und sich repetierende Impulse
- EMV Testgeräte
- Prüfung von Avionics und Flugzeugen nach MIL 461/RSD 5, CS 10 und 11; SAE, AIRBUS usw.

Transientenprüfgeräte für elektronische Komponenten, Baugruppen und Systeme.



Type PSD 15 A für die Simulation von Entladungen statischer Energie bis 15 kV, nach IEC 801-2; Typ RSD 25 A bis 25 kV



PEMI 12 Steilstossgenerator für EMP Simulation bis 12 kV; 50 kV/m E-Feld 130 A/m H-Feld



Burst Generator nach IEC TC65/WG4, erzeugt sich repetierende Spikes bis 4 kV Impulsform 5/50 ns 8 kV Modul als Zusatz erhältlich

Wenn es Ihnen wichtig ist, ob Ihre Produkte immun gegen transiente Vorgänge sind, sollten Sie mit uns sprechen.

HAEFELY

High Voltage Test Systems
Emil Haefely & Cie AG
Postfach
CH-4028 Basel/Schweiz
Tel.: 061/53 51 11

High Voltage Test Systems
Micafil GmbH
Postfach 4301/44
D-4600 Dortmund 41
Tel.: 0231/40 24 95