

E l e k t r i s c h e   S t i l l s t a n d s b r e m s e  
f ü r   N a h v e r k e h r s f a h r z e u g e  
m i t   G l e i c h s t r o m f a h r m o t o r e n

Abhandlung  
zur Erlangung  
des Titels eines Doktors der technischen Wissenschaften  
der

EIDGENOESSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE  
ZUERICH

vorgelegt von

H a n s   B ü t t i k e r

Dipl. El.-Ing. ETH

geboren am 22. Juni 1951  
von Wolfwil (Kt. Solothurn)

Angenommen auf Antrag von:

Prof. André Dutoit, Referent  
Prof. Dr. Konrad Reichert, Korreferent

## ZUSAMMENFASSUNG

---

Mit den heutigen Stellgliedern der Leistungselektronik ist es möglich, ein Nahverkehrsfahrzeug ausschliesslich mit dem Drehmoment der Fahrmotoren bis zum Stillstand abzubremsen und auf einer Steigung oder auf einem Gefälle im Stillstand zu halten. Das mechanische Bremssystem muss im normalen Bremsbetrieb im Gegensatz zur heutigen Fahrweise nicht mehr eingesetzt werden.

Damit wird es möglich, sich wie beim Fahren auch im Bremsbetrieb auf das elektrische Drehmoment der Fahrmotoren als einzige Regelgrösse zu beschränken, was insbesondere im Hinblick auf eine vermehrte Automatisierung der Verkehrsabläufe (Fahrbetrieb ohne Fahrzeugführer) von Vorteil ist.

Der durch die heutigen mechanischen Bremsen verursachte Abrieb der Bremsbeläge, Bremsklötze, Radkränze, etc. und die damit verbundenen Unterhaltsarbeiten einerseits und die Umweltbelastungen andererseits entfallen, was als zusätzlicher Vorteil betrachtet werden muss.

Eine Realisierung der elektrischen Stillstandsbremse bedingt die Lösung der folgenden Problemkreise:

- Erweiterung der heute üblichen el. Bremsschaltungen
- Regelung des el. Stillstandsbremssystems unter Einhaltung der für den Fahrgast zumutbaren maximalen Beschleunigungsänderungen ("Ruck")
- Ermittlung der durch die el. Stillstandsbremse bedingten thermischen Mehrbelastung der Fahrmotoren

### Erweiterung der heute üblichen el. Bremsschaltungen

Die für die elektrische Stillstandsbremse notwendigen Erweiterungen der heutigen Bremsschaltungen führen zu Lösungen, die auf anderen Gebieten der modernen Antriebstechnik (z.T. in kleineren Leistungsbereichen) seit Jahren angewendet werden. Die entsprechenden Schaltungen mit ihren Vor- und Nachteilen sind in Fachbüchern und in diversen Artikeln beschrieben.

Die vorliegende Arbeit beschränkt sich auf das Aufzeigen von einigen prinzipiellen Lösungsmöglichkeiten.

### Regelung der elektrischen Stillstandsbremse

Mit theoretischen Berechnungen und numerischen Simulationen wird gezeigt, dass es möglich ist, das Stillstandsbremssystem unter Einhaltung der durch den Fahrkomfortanspruch der Fahrgäste gegebenen Maximalwerte für die Beschleunigungs-, resp. Verzögerungsänderung ("Ruck") stabil zu regeln.

Die theoretischen Ergebnisse wurden mit Versuchen auf einem Fahrmotoren-Versuchsstand, auf dem es möglich ist, mit wirklichkeitsnahen Leistungsverhältnissen zu experimentieren, verifiziert.

#### Thermische Mehrbelastung der Fahrmotoren

Um die unterschiedliche thermische Belastung der Fahrmotoren bei der heute üblichen Betriebsart mit mechanischer Bremse im untersten Geschwindigkeitsbereich und dem postulierten System mit elektrischer Stillstandsbremse zu ermitteln, wurde ein thermisches Ersatzschaltbild des Fahrmotors aufgestellt und identifiziert. Ein Standardfahrzyklus wurde festgelegt. Die Erwärmung des Fahrmotors bei einer Fahrt auf einer Fahrstrecke mit ebenen Teilstücken, mit Steigungen und mit Gefällen wurde für beide Systeme ermittelt und die Resultate verglichen.

Die Erwärmung der Maschinenteile ist beim System mit el. Stillstandsbremse nur unwesentlich grösser als bei der heute üblichen Betriebsart (< 5 %). Die thermische Mehrbelastung der Fahrmotoren durch die el. Stillstands- und Haltebremse kann damit bei thermisch vernünftig ausgelegten Fahrmotoren toleriert oder durch eine leicht verstärkte Kühlung eliminiert werden.

## SUMMARY

Present control circuits of modern power electronics make it possible to decelerate public transportation vehicles (e.g. trolleys, street cars, etc.) exclusively with the torque of the electric motors. Furthermore such vehicles can be held in a stable position (stand still) on uphill or downhill grades. This eliminates the conventional use of mechanical braking systems when decelerating the vehicle in a regular traffic mode.

Thus the electric torque of the driving motors is used as the only control parameter in either accelerating or decelerating mode. This will be advantageous for the increased automatisa-tion of public traffic control (e.g. vehicles operating with-out driver).

Further advantages will be gained by the elimination of wheel rim wear and brake lining wear of conventional mechanical braking systems.

The realisation of electric 'stand still' brake requires solutions in the following problem areas:

- Modification of the conventional electrical braking cir-cuits.
- Control of the electric 'stand still' braking system by keeping the maximum acceleration and deceleration values below the limit acceptable for the passengers.
- Investigation of the additional thermal loading of the driving motors when applying the electric 'stand still' braking in a regular traffic cycle.

### Modification of the conventional electrical braking circuits

The required modification of the conventional braking systems circuitry leads to solutions found already years ago in other areas of modern motor control technique, although on smaller power levels. The advantages and disadvantages of such control circuits are covered adequately in text books and in published papers.

The present thesis will only give some basic principles of several possible solutions.

### Control of the electric 'stand still' braking system

The theoretical analysis as well as the numeric simulation in a computer indicate that an electric 'stand still' braking system can be controlled in a fully stable mode maintaining the tolerable limits of acceleration and deceleration requir-ed for an adequate riding comfort of the vehicle passengers.

The results found by the analysis have been verified in a vehicle motor test stand simulating the actual vehicle mass inertia by a rotating flywheel steel disc. The characteristics of the control system can thus be verified with experiments approaching the 'real' vehicle situation to a high degree.

Additional thermal loading of the electric drive motors

A thermal equivalent circuit of the electric motor has been set up to determine the various thermal loads of the motor occurring in a normal operating mode, in particular for two cases:

- lowest speed range including the mechanical braking phase
- lowest speed range including the electric 'stand still' braking system

For this purpose a standard driving cycle has been defined. The temperature increase of the driving motors has been determined for a level ride and for an uphill and downhill grade ride.

The results of the computer simulation show, that the added thermal load for the driving motors using the electric 'stand still' braking system is almost negligible with a temperature rise in the order of 5 percent as compared to the temperature conditions in the conventional riding mode using mechanical braking.

This indicates that present electric driving motors can either absorb this additional thermal load relying on the temperature tolerances of a well designed electric motor or eliminate any temperature increase by reinforced cooling.