

Vom Bremsweg auf Eisenbahnen

Autor(en): **Müller, W.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **119/120 (1942)**

Heft 22

PDF erstellt am: **20.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-52478>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

INHALT: Vom Bremsweg auf Eisenbahnen. — Schweizerische Stil-
kunde von der Vorzeit bis zur Gegenwart. — Eidg. Technische Hochschule.
— Zum Unfall infolge plötzlichem Mauerbruch. — Mitteilungen: Rhone-
Kraftwerk Mörel (Oberwallis). Neue elektrische Rangierlokomotiven.

Fertigungsprobleme im Flugzeugbau. Gegen die Verwendung von Blei-
platten-Gelenken. — Nekrologe: Eugen Bosshard. — Literatur.
Mitteilungen der Vereine.
Vortragskalender.

Band 120

Der S. I. A. ist für den Inhalt des redaktionellen Nachdruck von Text oder Abbildungen ist nur mit Zustimmung

Teils seiner Vereinsorgane nicht verantwortlich der Redaktion und nur mit genauer Quellenangabe gestaffet

Nr. 22

Vom Bremsweg auf Eisenbahnen

Von W. MÜLLER, Obermaschineningenieur der SBB

Ueber die Theorie der Bremsung der Eisenbahnfahrzeuge und -züge ist eine umfangreiche Literatur vorhanden. Es ist nicht beabsichtigt, hier Neues von dieser Theorie beizutragen, sondern es soll über die im praktischen Eisenbahnbetrieb erzielbaren Bremswege und die Faktoren, von denen sie abhängen, einiges mitgeteilt werden. Die praktische Anwendung der theoretischen Regeln und Erkenntnisse hat seit anderthalb Jahrzehnten infolge Verdrängung der mit menschlicher Kraft betätigten Handbremsen der Güterzüge durch Druckluftbremsen und Steigerung der Fahrgeschwindigkeiten der Personen- und Güterzüge eine bedeutende Entwicklung erfahren, sodass auch der nicht speziell damit beschäftigte Fachmann einiges Interesse dafür finden mag.

Bekanntlich werden die Eisenbahnfahrzeuge in der Regel durch Anpressen von Bremsklötzen aus besonders dafür geeignetem Gusseisen an die Laufflächen der stählernen Radreifen der Fahrzeuge gebremst, wobei die Reibung zwischen den angepressten Bremsklötzen und den Radreifen die Umdrehung der Räder hemmt. Dieses einfache Verfahren, das wohl fast so alt ist wie die Erfindung der auf Rädern laufenden Fahrzeuge, findet heute noch in weit überwiegender Masse Anwendung. Besondere Bremsstrommeln oder Brems scheiben und neuzeitliche Bremsbeläge auf Bremsbacken oder -bändern findet man nur bei Triebfahrzeugen für aussergewöhnlich hohe Fahrgeschwindigkeiten und andern Spezialfahrzeugen, ebenso Bremsen ohne feste Reibkörper (hydraulische, elektrische usw.). Desgleichen dienen die ohne Vermittlung der Räder direkt an den Schienen angreifenden Reibungsbremsen (Magnetbremsen) nur besonderen Zwecken. Voraussichtlich werden die direkt auf die Radreifen wirkenden Klotzbremsen wegen ihrer Einfachheit und Zuverlässigkeit für gewöhnliche Personen- und Güterwagen noch lange bevorzugt bleiben, umso mehr, als es in letzter Zeit gelungen ist, Bremsklötze aus Material herzustellen, das gewisse unerwünschte Eigenschaften der Gusseisenklötze, von denen hier die Rede sein wird, in wesentlich geringerem Mass aufweist.

Für den Bahnbetrieb ist in erster Linie der *Bremsweg* S von Interesse, auf dem ein Fahrzeug oder Zug unter der Wirkung der Bremsen seine Fahrgeschwindigkeit von einem Anfangswert V_1 auf einen Endwert V_2 vermindert, wobei das grösste Interesse dem Spezialfall der Bremsung bis zum Stillstand, $V_2 = 0$, zukommt.

Den Anforderungen der Sicherheit entspricht natürlich am vollkommensten der kleinste Bremsweg, der mit tragbarem Aufwand erzielt werden kann. Auf der glatten Stahlschiene sind indessen dem kleinsten Wert des Bremsweges Grenzen gesetzt, die die Eisenbahnverwaltungen zwingen, mit grossem Aufwand dafür zu sorgen, dass den Zügen jederzeit «freie Bahn» gesichert ist. Beim Verkehr von Motorfahrzeugen auf der Strasse kann man sich dank der grösseren Haftung zwischen Gummiradreifen und Fahrbahn diesen Aufwand ersparen, begnügt sich aber gleichzeitig mit einem ganz bedeutend kleineren Sicherheitsgrad. Der kürzeste theoretisch erzielbare Bremsweg auf Schienen ergibt sich aus der grössten *Bremskraft* P , die von den gebremsten Rädern durch ihre *Haftung* auf die Schienen übertragen werden kann. Innert den auf normalspurigen Hauptbahnen vorkommenden Grenzen der *Raddrücke* G von etwa 2 bis 10 t kann in Betracht des schwankenden Wertes der Haftung mit genügender Annäherung angenommen werden, die grösste übertragbare Kraft sei dem Raddruck proportional: $P = G \cdot r$.

Es ist zu vermuten, dass der *Haftwert* r vom Raddurchmesser abhängig ist, doch kann dies bei den unbedeutenden Unterschieden der verwendeten Raddurchmesser neben den erheblichen Schwankungen des Wertes r aus andern Ursachen vernachlässigt werden. Während früher angenommen wurde, dass r sich mit der Geschwindigkeit ändere, herrscht heute die durch Erfahrung und neueste Versuche gestützte Auffassung vor, dass diese Abhängigkeit nicht vorhanden oder so gering sei, dass sie gegenüber der starken Abhängigkeit des Reibungswertes der gusseisernen Bremsklötze von der Geschwindigkeit und andern Einflüssen keine Rolle spielt. In hohem Masse wird jedoch der Haftwert r durch den Zustand der Schienenoberfläche — trocken, feucht, nass, sauber, staubig, schmierig usw. — beeinflusst. Das ist einer der Gründe, weshalb die Messung von r sehr schwierig

ist. Der Wert ändert sich während der Fahrt oft und rasch und wird durch äussere Umstände, wie Stosslücken der Schienen, häufig gestört. Da Eisenbahnräder in der Regel paarweise durch eine durchgehende Achswelle verbunden sind, beeinflusst beim Bremsen das eine Rad eines Paares das andere bald in günstigem, bald in ungünstigem Sinne. Wird aber ein Räderpaar, das zusammen mit der die beiden Räder verbindenden Achswelle im Bahnbetrieb meistens kurz «*Achse*» genannt wird, infolge Ueberschreitung des Haftwertes r durch die Bremsung an der Drehung gehindert, so ist die nun durch gleitende Reibung auf die Schiene übertragene Kraft bedeutend kleiner, als die bei rollenden Rädern übertragbare Bremskraft P , sodass die Räder erst nach einer wesentlichen Verminderung der Bremsung wieder zu rollen beginnen. Dabei erhalten sie schädliche und für die Reisenden lästige Flachstellen an den Laufflächen und, was für die Bremsung selbst wichtiger ist, sie üben die von ihnen erwartete Bremskraft nur unvollständig aus. Aus beiden Gründen muss das Festbremsen von Rädern vermieden werden, d. h. es darf nur mit minimalen Werten von r gerechnet werden. Auf Grund der Erfahrung ist eine zuverlässige Uebertragung einer Bremskraft von mehr als etwa 150 kg pro t des vom Rad auf die Schiene ausgeübten Druckes ($r = 0,15$) bei ungünstigen Verhältnissen nicht gewährleistet.

Der kleinste Bremsweg S_{\min} würde somit erreicht, wenn vom Augenblick, in dem der Beginn der Bremsung veranlasst, beabsichtigt oder befohlen wird, bis zum Stillstand die der Grenze der Haftung $r = 0,15$ entsprechende Bremskraft gleichbleibend ausgeübt werden könnte. Unter Berücksichtigung der übrigen verzögernden Kräfte — Rollwiderstand, Lagerreibung, Luftwiderstand — von denen besonders der letztgenannte von der Geschwindigkeit und von der Formgebung der Fahrzeuge abhängt, sowie der Trägheit der rotierenden Massen der Achsen und Räder ergäbe sich bei einer solchen idealen Bremsung auf horizontaler Bahn bei den gewöhnlich in Betracht kommenden Geschwindigkeiten V in km/h ein kleinster Bremsweg in m von angenähert:

$$S_{\min} \sim 0,026 \cdot V^2$$

Ein mit $V_1 = 100$ km/h fahrender Zug könnte danach auf horizontaler Bahn bei voller Ausnutzung der unter ungünstigen Umständen vorhandenen Haftung zwischen Rad und Schiene vom Beginn der Bremsung bis zum Stillstand auf einem Weg von etwa 260 m angehalten werden. Bei $V_1 = 125$ km/h wäre S_{\min} ungefähr 400 m. Auf einem Gefälle von 26‰ würden diese Bremswege etwa 315 bzw. 460 m betragen. Unter besonders günstigen Umständen und bei Verwendung von Streusand zur Verbesserung der Haftung kann der Haftwert r bis etwa zum doppelten Betrag steigen, wobei sich angenähert halb so grosse S_{\min} ergeben würden.

In Wirklichkeit werden die Bremswege bedeutend länger als diese theoretisch möglichen S_{\min} . Auf Schnellzughauptstrecken der schweizerischen Hochebene werden Bremswege von 800 m, bei ausländischen Bahnen 700 bis 1000 m als praktisch mögliche Grenzen erzielt. Die theoretisch möglichen Minima werden beträchtlich überschritten, weil der Haftwert r nicht oder nur während eines kleinen Teils der Bremsung voll ausgenützt wird, und zwar aus mehreren Gründen, von denen ausstehend die Rede sein soll.

Vorerst braucht es Zeit zur Entwicklung der Bremskraft. Der Bremser an der *Handbremskurbel* beispielsweise hat nach Wahrnehmung des Befehls zum Bremsen einige Kurbelumdrehungen zu machen, bis die Bremsklötze an den Rädern anliegen, und hierauf mit wachsender Kraftanstrengung die Kurbel weiter zu drehen, bis entweder seine Muskelkraft erschöpft oder aber die Grenze der Haftung zwischen Rad und Schiene erreicht ist. Diese darf aus den bereits erwähnten Gründen nicht überschritten, d. h. die Umdrehung der Räder darf nicht verhindert werden, weshalb der Bremser bei steigender Kraft vorsichtig vorgehen muss. Vom Empfang des Bremsbefehls bis zur Ausübung der grössten zulässigen oder möglichen Kraft an der Bremskurbel ist je nach der erforderlichen Zahl der Kurbelumdrehungen und der Grösse der an der Kurbel auszuübenden Kraft, d. h. je nach dem Gewicht des Wagens und dem Uebersetzungsverhältnis der Kraft von der Kurbel bis zu den Bremsklötzen, mehr oder weniger Zeit erforderlich. Für mittlere Verhältnisse bei Handbremsen und den dabei üblichen verhältnismässig kleinen Geschwindigkeiten ist mit Bremswegverlängerung von 120 bis 160 m zu rechnen.

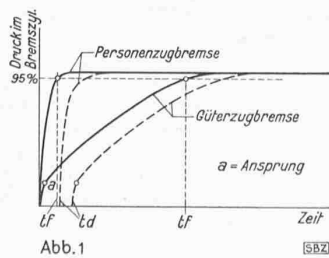
Selbsttätige Druckluftbremsen der für den Verkehr in Reisezügen bestimmten Wagen — kurz *Personenzugbremsen* genannt — erfordern für die Erzeugung des vollen Bremsklotzdruckes weniger Zeit. Bekanntlich treten diese Bremsen in Tätigkeit, wenn der Druck in der durch den ganzen Zug durchgehenden Hauptluftleitung vermindert wird. Wird diese Druckverminderung vom Lokomotivführer veranlasst, was die Regel ist, so braucht es zu ihrer Fortpflanzung bis zum letzten Wagen eine gewisse Zeit, die *Durchschlagszeit*, die ausser von der Länge der Leitung, ihrem Durchmesser, Krümmungen usw., auch von der Konstruktion der Steuerventile der Druckluftbremse abhängig ist. Nach den Vorschriften des Internationalen Eisenbahn-Verbandes (I.E.V.) muss die *Durchschlagsgeschwindigkeit* bei Personenzugbremsen mindestens 150 m/sec betragen. Neue Druckluftbremssysteme erreichen Durchschlagsgeschwindigkeiten von 200 m/sec und mehr. Mit besonders zusätzlichen Einrichtungen sollen Durchschlagsgeschwindigkeiten von 750 m/sec erzielt worden sein. In einem 300 m langen Schnellzug springen daher (ohne solche Sondereinrichtungen) die Bremsen am letzten Wagen nach $1\frac{1}{2}$ bis 2 sec an, d. h. erst nach dieser Zeit *beginnt* Druckluft am letzten Wagen in den Bremszylinder einzuströmen. Bis der Druck im Zylinder seinen vollen Wert (von etwa $3\frac{1}{2}$ kg/cm²) erreicht hat, verstreichen bei Personenzugbremsen weitere Sekunden. Nach internationaler Vorschrift des I.E.V. soll diese «Füllzeit des Bremszylinders» bei vierachsigen Personen- und Gepäckwagen mit Drehgestellen $3 \div 5$ sec, für andere Wagen $4 \div 8$ sec betragen. Der Bremswegverlust aus Durchschlagszeit und Füllzeit der Bremszylinder beträgt ungefähr $0,5 V_1$ bis $1 V_1$ m, bei Schnellzugsgeschwindigkeit von 100 km/h somit bis zu 100 m.

Die Durchschlagsgeschwindigkeit der Druckluftbremsen für Güterzüge — kurz *Güterzugbremsen* genannt — muss nach internationalen Vorschriften mindestens 100 m/sec betragen. Es werden bei einzelnen Bremssystemen ebensogrosse Werte erreicht wie bei den Personenzugbremsen. Die Güterzüge sind aber länger, in der Schweiz bis etwa 750 m, sodass die Durchschlagszeit bis zum letzten Wagen 7,5 sec erreichen kann. Wesentlich länger als bei den Personenzugbremsen ist auch die Entwicklungszeit des Druckes in den Bremszylindern, und zwar ist dies notwendig, damit sich die in den Zug- und Stossapparaten (Kupplungen und Puffern) der Wagen beim Bremsen auftretenden Kräfte allmählich ausgleichen können, ohne gefährliche Grösse anzunehmen, insbesondere auch damit die Bremsung des letzten Wagens nicht erst beginnt, wenn der erste schon seine volle Bremskraft entwickelt hat, wobei sich im vordern Zugteil Pufferdrücke von gefährlicher Grösse ereignen könnten.

Die langsame Entwicklung des Bremsklotzdruckes ist bei Güterzügen umso nötiger, als nicht alle Güterwagen mit Druckluftbremsapparaten ausgerüstet sind und als die Kupplungen im Gegensatz zu den Personenzügen nicht straff angezogen werden, weil sonst die Lokomotiven nicht immer im Stande wären, die langen Züge in Bewegung zu setzen. In der Schweiz sollen gemäss bundesrätlicher Verordnung mindestens 70% der im Jahre 1929 vorhanden gewesenen und alle seither gebauten Güterwagen mit der Güterzugbremse (System Drolshammer) ausgerüstet sein.¹⁾ Eine internationale Bindung für die Ausrüstung der Güterwagen mit Druckluftbremsapparaten besteht noch nicht, dagegen muss gemäss Vorschrift des I.E.V. an allen Güterwagen die durchgehende Hauptluftleitung für die Bremse vorhanden sein.

Aus diesen Gründen also muss die Entwicklungszeit des Bremsklotzdruckes bei den Güterzügen (Füllzeit des Bremszylinders) nach internat. Vorschriften mindestens 28 sec betragen. Als Höchstgrenze sind 60 sec festgesetzt. In Wirklichkeit beträgt sie im Mittel etwa 35 ÷ 45 sec. Der Bremswegverlust gegenüber dem theoretisch möglichen kürzesten Bremsweg infolge der Durchschlagszeit und der Füllzeit der Bremszylinder der Güterzugbremse kann zu etwa $4 V_1$ m veranschlagt werden, d. h. bei der in der Schweiz für Güterzüge mit Druckluftbremsen erlaubten Höchstgeschwindigkeit von 60 km/h auf etwa 240 m. Die Entwicklung des Druckes in den Bremszylindern der Personen- und der Güterzugbremsen ist in der Abb. 1 dargestellt.

Der Beginn des Druckanstieges verschiebt sich, wie durch das gestrichelte Diagramm angedeutet, um die Durchschlagszeit t_d , die verschieden ist je nach der Entfernung jedes Fahrzeuges von der Stelle, an der ein Luftaustritt aus der Hauptluftleitung die Bremsung veran-



¹⁾ Beschrieben in SBZ durch M. Weiss, in Bd. 92 S. 3*ff.

lasst. In der Regel ist diese Stelle das Bremsventil des Lokomotivführers. Beim Ziehen der Notbremse in einem Wagen oder bei Beschädigung der Hauptluftleitung, z. B. bei Zugtrennungen, Platzen eines Kupplungsschlauches usw., kann der Luftaustritt an beliebiger Stelle des Zuges eintreten. Der Zeitverlust bis zum Beginn des Druckanstieges in den Bremszylindern ist dementsprechend für jeden Fall und jedes Fahrzeug verschieden. Die Füllzeit des Bremszylinders t_f wird vom Beginn des Druckanstieges im Bremszylinder bis zur Erreichung von 95% des vollen Zylinderdruckes gemessen, weil der schleichende Anstieg der letzten 5% keine genaue Messung erlaubt.

Bei den Güterzugbremsen steigt nach den internationalen Vereinbarungen der Druck im Bremszylinder zuerst rasch, dann langsam an, bis er seinen vollen Wert erreicht hat. Der erste rasche Anstieg a wird «Ansprung» oder «Einschuss» genannt und hat zum Zweck, so rasch als es die Durchschlagsgeschwindigkeit ermöglicht, im ganzen Zuge alle Bremsklötze leicht an die Radreifen anzulegen, damit Reibungswiderstände der Ruhe im Bremsgestänge sofort überwunden werden, die Kräfte in den Zug- und Stossapparaten zwischen den Wagen sich ausgleichen und der nachherige langsame Anstieg des Druckes gleichmässig, ohne gefährliche Stösse und Zerrungen vor sich geht. Der Druck nach dem Ansprung darf nach den internationalen Vereinbarungen höchstens 20% des vollen Bremszylinderdruckes betragen. Bei den Personenzugbremsen ist ein Ansprung wegen des ohnehin raschen Ansteigens des Zylinderdruckes nicht nötig.

Eine weitere Ursache, weshalb die wirklichen Bremswege wesentlich grösser ausfallen als die bei voller Ausnutzung des Wertes der Haftung zwischen Rad und Schiene $r = 0,15$ theoretisch möglichen kleinsten Bremswege S_{min} , liegt in der bereits als unerwünscht bezeichneten Eigenschaft der gusseisernen Bremsklötze, die darin besteht, dass sich ihr Reibungswert f auf den stählernen Radreifen mit der Fahrgeschwindigkeit V beträchtlich ändert. Seit Eisenbahnen bestehen sind zahllose Versuche ausgeführt worden, um diese Abhängigkeit zu messen. Es sind Kurven aufgezeichnet und Näherungsformeln aufgestellt worden, aber heute noch ist die Zuverlässigkeit der Ergebnisse umstritten; es würde zu weit führen, sie hier zu erörtern. Die Messung begegnet Schwierigkeiten, besonders bei kleinen Geschwindigkeiten, hauptsächlich weil der Reibungswert f ausser von der Geschwindigkeit V noch von mehreren andern Faktoren abhängig ist, so von der Witterung, der während einer Bremsung rasch wachsenden Temperatur der Bremsklötze und ihrer Kühlung durch den Fahrwind, der momentanen, während der Bremsung sich ebenfalls ändernden Beschaffenheit der reibenden Flächen und nicht zuletzt vom Bremsklotzdruck (wovon noch die Rede sein wird), ganz abgesehen von der Zusammensetzung und vom Gefüge des verwendeten Gusseisens. Messungen im Versuchstand ergeben deshalb keine brauchbaren Resultate, sie müssen am fahrenden Fahrzeug ausgeführt werden. Die Ergebnisse von Messungen bei gleichbleibender Geschwindigkeit weichen stark ab von solchen, die während einer Bremsung von V_1 bis zum Stillstand aufgenommen werden, wobei aus den angeführten Gründen die Dauer der Bremsung ebenfalls von Einfluss auf die Ergebnisse ist.

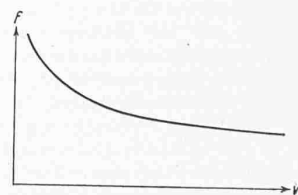


Abb. 2

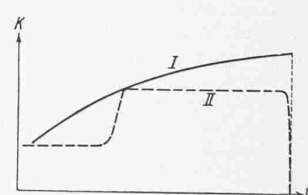


Abb. 5

Der Verlauf der Kurve für f als Funktion von V entspricht im allgemeinen der Abb. 2. Bei grossen Geschwindigkeiten, $V > 100$ km/h, ist f im Mittel von der Grössenordnung 0,08, bei $V = 5$ km/h $2\frac{1}{2}$ bis 3 mal so gross.

Um während einer Bremsung zum Zweck, einen Zug auf möglichst kurzem Weg anzuhalten, die Haftung zwischen Rad und Schiene voll auszunützen, müsste darnach der *Bremsklotzdruck* K während des ganzen Bremsvorganges stetig der Aenderung der Bremsklotzreibung f derart angepasst werden, dass stets die grösste von den Rädern auf die Schienen übertragbare Bremskraft P erzeugt wird, die vorn als dem Raddruck G proportional angenommen wurde. Es müsste somit durch Aenderung des Klotzdruckes K nach Massgabe der Geschwindigkeit $P = G \cdot r = K \cdot f = \text{konst.}$ gemacht werden.

Dem Bremsler an der Handkurbel wäre dies möglich, wenn ihm Messinstrumente für Geschwindigkeit und Klotzdruck oder

gar für die erzeugte Bremskraft P zur Verfügung ständen. In Wirklichkeit passt der erfahrene Bremser den Klotzdruck einigermaßen der Geschwindigkeit an, indem er die Bremse anfänglich dem Gewicht des Wagens entsprechend stark anzieht und sie bei abnehmender Geschwindigkeit etwas löst. Er muss jedoch peinlich vermeiden, dass Räder festgebremst werden, und erzeugt deshalb meistens eine namhaft unter der zulässigen Grenze bleibende Bremskraft.

Bei Druckluftbremsen kann mit geeigneten Apparaten der Klotzdruck selbsttätig in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit geregelt werden. Entsprechend dem in Abb. 2 dargestellten Verlauf des Reibungswertes f als Funktion der Geschwindigkeit V und unter gleichzeitiger Berücksichtigung, dass f auch eine Funktion des Bremsklotzdruckes K ist — wovon noch die Rede sein wird — müsste zur Erfüllung der Gleichung $K \cdot f = \text{konst.}$ der Klotzdruck K als Funktion von V nach der in Abb. 3 dargestellten Kurve I reguliert werden. Zur restlosen oder auch nur angenäherten Erfüllung dieser Forderung wären jedoch komplizierte Einrichtungen erforderlich, umso mehr, als f nicht nur mit V , sondern auch mit K sich ändert. Solche sind wohl ausgeführt und erprobt worden, haben sich aber bisher noch nicht bewährt oder sind für allgemeine Verwendung zu wenig einfach. Man begnügt sich deshalb in der Regel damit, Fahrzeuge, die für höchste Geschwindigkeiten bestimmt sind, mit Einrichtungen zu versehen, die den Klotzdruck in einer oder mehreren Stufen dem mit abnehmender Geschwindigkeit zunehmenden Reibungswert f in roher Annäherung selbsttätig anpassen. In der Abb. 3 ist durch Kurve II dargestellt, wie bei einstufiger Regulierung der Klotzdruck K als Funktion der Geschwindigkeit V ungefähr verläuft. Da hierbei niemals $K \cdot f > G \cdot r$ werden darf, bleibt die Summe der während der Bremsung von V_1 bis zum Stillstand auftretenden Bremskräfte P bedeutend unter der theoretisch möglichen und der Bremsweg wird entsprechend grösser als S_{min} .

Der hohe Preis und die Unterhaltskosten für derartige Einrichtungen stehen der allgemeinen Einführung im Wege. Bei der grossen Mehrzahl der Fahrzeuge, insbesondere bei allen Güterwagen, begnügt man sich deshalb mit Druckluftbremsapparaten, die nach Einleitung einer *Vollbremsung* durch den Lokomotivführer und Füllung der Bremszylinder bis zum gewollten Druck einen von der Geschwindigkeit unabhängigen, d. h. nach Erreichung des Vollwertes konstanten Bremsklotzdruck erzeugen. Dieser darf nicht grösser sein, als er sich aus der Gleichung $K \cdot f = G \cdot r$ mit dem grössten, kurz vor dem Stillstand vorhandenen Reibungswert f ergibt, da sonst die Räder vor dem Stillstand des Fahrzeuges festgebremst würden. Es ist erwähnt worden, dass bei $V \sim 5 \text{ km/h}$ f das $2\frac{1}{2}$ bis dreifache seines Wertes bei $V > 100 \text{ km/h}$ annimmt. Die Bremskraft P bleibt infolgedessen bis kurz vor dem Stillstand wesentlich unter dem Wert $G \cdot r$, was den Bremsweg umso mehr verlängert, als sein grösster Teil bei Geschwindigkeiten zurückgelegt wird, die wegen des kleinen Reibungswertes f einen grösseren Klotzdruck K zulassen. Nach der Erfahrung darf die Summe der effektiven Drücke aller Bremsklötze einer Achse (Räderpaar mit Achswelle) ungefähr 70% des Druckes der beiden Räder auf die Schiene betragen, wenn Gewähr vorhanden sein soll, dass selbst unter ungünstigen Umständen kein nennenswertes Gleiten der Räder auf den Schienen vorkommt. Für $r = 0,15$, wie vorn angenommen, ergibt sich hieraus $f_{\text{max}} = \frac{0,15}{0,7} = 0,214$.

Zur Vermeidung von Missverständnissen sei bemerkt, dass man häufig nicht mit den effektiven Bremsklotzdrücken rechnet, sondern mit jenen, die sich aus dem Druck im Pressluftbremszylinder und der Gestängeübersetzung rechnerisch unter Vernachlässigung des Wirkungsgrades ergeben. Bei einem Wirkungsgrad für Druckluftbremsen von 0,85 bis 0,9 entspricht ein effektiver Klotzdruck von 70% des Raddruckes einem rechnerischen von rd. 80%. Der Wirkungsgrad ist von der Anordnung des Bremsgestänges abhängig.

Die wiederholt erwähnte Abhängigkeit des Reibungswertes f gusseiserner Bremsklötze auf stählernen Radreifen von der Grösse des Klotzdruckes K hat zwar keinen ungünstigen Einfluss auf den Bremsweg, ist aber doch eine interessante Erscheinung. Sie wurde erstmals anlässlich von Versuchen, die die Deutsche Reichsbahn für den I. E. V. 1930 für die Aufstellung der Vorschriften über die Bewertung der Wirkung der Güterzugbremsen ausführte, festgestellt und spielt bei dieser Bewertung, von der am Schlusse noch die Rede sein wird, eine wichtige Rolle.

Bei den erwähnten Versuchen wurde festgestellt, dass Züge von gleichem Gewicht und mit gleicher Summe aller Bremskräfte an den Rädern $P = K \cdot f$ bei gleicher Anfangs-

geschwindigkeit V_1 kürzere Bremswege ergaben, wenn leichte (leere) Wagen in grösserer Zahl, folglich mit mehr Bremsklötzen im Zuge waren, als wenn die Züge aus schweren (beladenen) Wagen in kleinerer Zahl, also mit weniger Bremsklötzen bestanden. Da der Druck K auf den einzelnen Klotz bei schweren Wagen grösser ist als bei leichten, schloss man vorerst auf eine Abhängigkeit des Reibungswertes f vom spezifischen Druck pro cm^2 Reibfläche eines Klotzes und nahm deshalb Versuche mit Bremsklötzen von verschiedener Grösse bzw. Länge vor (die Breite ist durch das Profil der Radreifen begrenzt). Die Versuche zeigten jedoch, dass die Länge der Bremsklötze auf den Bremsweg einen so geringen Einfluss ausübt, dass sie als Ursache der beobachteten Erscheinung nicht in Frage kommt. Es wurde dies darauf zurückgeführt, dass sich die gekrümmte Reibfläche der Bremsklötze unter dem Einfluss der Reibungswärme streckt (Abb. 4), sodass die Enden der Klötze nicht oder nur mit geringem Druck an die Radreifen gepresst werden, wobei dieser Vorgang umso ausgeprägter ist, je länger die Bremsklötze sind.

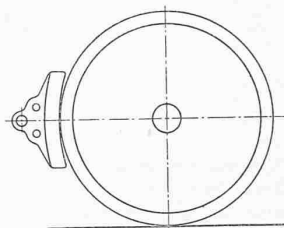


Abb. 4

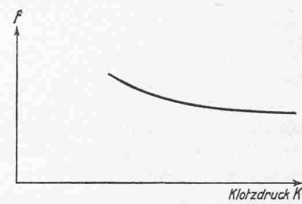


Abb. 5

[52]

Daraus muss geschlossen werden, dass der Reibungswert f gusseiserner Bremsklötze auf stählernen Radreifen mit steigendem Klotzdruck K pro Klotz abnimmt. Spätere, für die Bewertung der Bremswirkung der Personenzugbremse ausgeführte Versuche haben diese Feststellung bestätigt. Die absoluten Werte f in Abhängigkeit vom Klotzdruck K wurden bei den Versuchen nicht ermittelt, weil sie für den Zweck der Versuche, die Bewertung der Bremswirkung, nicht nötig waren und hauptsächlich weil die Messung von f , wie vorn erläutert, schwierig ist. Dagegen kann aus den Versuchsergebnissen auf den allgemeinen Charakter der Abhängigkeit des Reibwertes f vom Klotzdruck K geschlossen werden. Er ist aus der Abb. 5 ersichtlich, die zeigt, dass diese Abhängigkeit besonders bei kleinen Klotzdrücken K spürbar ist. Die Feststellung dieser Erscheinung wurde seither in der Weise zur Verbesserung der Bremswirkung ausgenützt, dass anstatt zwei Bremsklötzen pro Rad, wie vorher üblich,

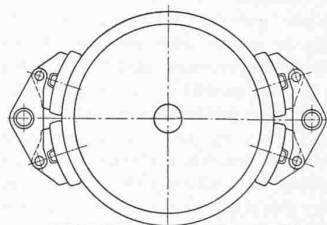
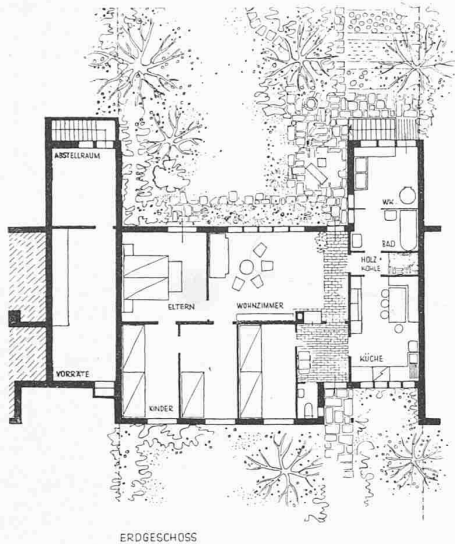


Abb. 6

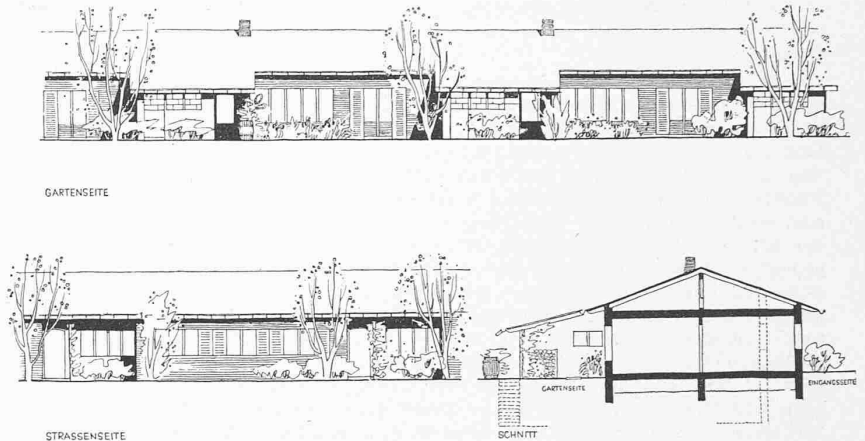
[52]

deren vier angeordnet werden, wie Abb. 6 zeigt. Diese Doppelanordnung der Bremsklötze ist besonders bei grossem Raddruck vorteilhaft, der einen entsprechend hohen Gesamtklotzdruck pro Rad erfordert, ferner bei Fahrzeugen für hohe Geschwindigkeiten mit abgestuftem Klotzdruck nach Abb. 3, bei dem für die obere Geschwindigkeitsstufen Klotzdrücke bis zu etwa 220% des Raddruckes Anwendung finden.

Dass der einer vollen Ausnützung des Haftwertes r entsprechende minimale Bremsweg S_{min} nicht eingehalten wird, hat eine dritte Ursache in der veränderlichen Belastung der Fahrzeuge. Es ist zwar möglich, durch Regelung des Bremsklotzdruckes in Abhängigkeit von der Belastung die Bremskraft P auf das Bruttogewicht des Fahrzeuges G selbsttätig abzustimmen, indem man zwischen Wagenkasten und Achsen eine Art Waage einbaut, durch deren Spiel entweder der Druck im Bremszylinder oder dessen Übersetzung auf die Bremsklötze geändert wird. Solche Einrichtungen werden, sofern ihr Spiel während der Fahrt nicht gehemmt wird, durch die am bewegten Fahrzeug auftretenden Massen Trägheitskräfte zweckwidrig beeinflusst. Sie haben nicht grosse Verbreitung gefunden. Dagegen sind von Hand einstellbare Vorrichtungen für die sogenannte *Lastabremsung* allgemein üblich und vom I. E. V. für Wagen mit Personenzugbremse vorgeschrieben, wenn die Tragkraft mindestens gleich dem Eigengewicht ist, ebenso durch bundesrätliche Verordnung für schweizerische Wagen mit Güterzugbremsen mit mehr als 15 t Ladegewicht. Mit solchen Einrichtungen wird aber



1. Preis. Entwurf Nr. 27. — Arch. JOS. SCHÜTZ und R. WINKLER, Zürich
Wohnungstyp des Fünzimmer-Einfamilien-Reihenhauses. — Masstab 1 : 300



die Bremskraft in der Regel nicht für jede beliebige Belastung des Wagens genau eingestellt, sondern dies geschieht nur für eine, höchstens zwei Stufen der Last, da die Erstellungs- und Unterhaltskosten für kontinuierlich wirkende Vorrichtungen für die Lastabbremung sich nicht lohnen würden. Für einen Güterwagen von 12 t Eigengewicht und 20 t Ladegewicht mit Lastabbremung in einer Stufe ergibt sich beispielsweise das in Abb. 7 wiedergegebene Diagramm des Klotzdruckes in % des Bruttogewichtes, wenn die Lastabbremung für ein Bruttogewicht von 20 t (Gewicht der Ladung 8 t) bemessen ist. Ist der Wagen nicht leer oder beträgt das Gewicht seiner Ladung nicht genau 8 t, so bleibt darnach der effektive Bremsklotzdruck unter 70%; er fällt bis auf 42 bzw. 44% des Raddruckes. Der Haftwert r wird dann selbst bei kleinen Geschwindigkeiten, d. h. grossem Reibungswert f bei weitem nicht ausgenützt, was unvermeidlich eine weitere Verlängerung der Bremswege zur Folge hat.

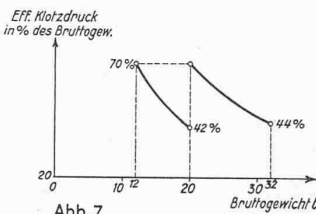


Abb. 7

Bei Personenwagen ist die Lastabbremung durch handbetätigte Umstellvorrichtungen nicht gut durchführbar, weil die Belastung bei jedem Stationshalt, ja sogar während der Fahrt ändert und vor der Abfahrt ohne Zeitverlust nicht ermittelt werden kann. Andererseits ist das Eigengewicht — im Gegensatz zu den Güterwagen — im Verhältnis zur Belastung gross, sodass der Einfluss der Aenderung der Belastung auf den Bremsweg weniger gross ist. Immerhin sinkt bei modernen Personenwagen leichter Bauart²⁾ von beispielsweise 26 t Eigengewicht mit 80 Sitzplätzen der effektive Bremsklotzdruck, wenn er bei leerem Wagen z. B. 70% des Wagengewichtes beträgt, bei vollbesetzten Wagen, d. h. etwa 6 t Ladung, auf 57%. Höher darf er nicht gewählt werden, da sonst die Räder bei leerem Wagen festgebremst werden könnten. Da ein so kleiner Klotzdruck für Fahrzeuge, die für grosse Fahrgeschwindigkeiten bestimmt sind, nicht genügt, haben die SBB ihre leichten Stahlwagen zwar nicht mit einer Einrichtung zur Abbremung der Last, aber mit einer solchen zur Regulierung des Bremsklotzdruckes in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit in einer Stufe, wie sie vorn erwähnt wurden (Abb. 3) ausgerüstet, um die Bremswegverlängerung bei beladenem Wagen unschädlich zu machen. Bei schweren Personenwagen ist der Einfluss der Aenderung der Last natürlich geringer. Bei einem solchen von 40 t Gewicht und 80 Sitzplätzen variiert beispielsweise der effektive Bremsklotzdruck nur zwischen 70 und 61% des Gewichtes. Immerhin ist auch dies mit einer Verlängerung des Bremsweges verbunden.

Schliesslich ist noch zu berücksichtigen, dass, wie schon bemerkt, besonders bei Güterzügen, hin und wieder auch bei Personenzügen, nicht alle Wagen oder nicht alle Wagenachsen mit Bremsen ausgerüstet sind, und zwar aus ökonomischen Gründen. Gemäss Vorschrift des I. E. V. müssen 20% aller

Güterwagen Handbremsen haben. Ueber die Ausstattung mit Luftdruckbremsen besteht, wie bereits bemerkt, keine internationale Bindung, und auch nach schweizerischen Vorschriften müssen nicht alle vorhandenen Güterwagen Druckluftbremsen haben.

Nach diesen Darlegungen leuchtet es ein, dass die Berechnung des Bremsweges eines Eisenbahnzuges oder -fahrzeuges keine einfache Aufgabe ist. Ausser etwa bei der Untersuchung von Eisenbahngefährdungen oder Unfällen stellt sich übrigens diese Aufgabe in der Praxis nur bei der Bearbeitung der Behelfe, die den Beamten der Stationen und des Zugdienstes in die Hand gegeben werden, damit sie die Züge so zusammenstellen können, dass die erforderlichen Bremsmittel vorhanden sind.

Diese Behelfe müssen so gestaltet sein, dass sie trotz der hier erläuterten zahlreichen Faktoren, die den Bremsweg beeinflussen, in kürzester Zeit mit einer einfachen Rechnung festzustellen erlauben, wie ein Zug hinsichtlich der Bremsausrüstung seiner Wagen zusammengesetzt sein muss, damit er ohne Gefahr auf jedem Abschnitt der von ihm zu befahrenden Strecke mit der im Dienstfahrplan vorgeschriebenen Geschwindigkeit fahren darf, bzw. welche Geschwindigkeiten einem Zug von gegebener Zusammensetzung auf den einzelnen Streckenabschnitten mit Rücksicht auf die daselbst vorhandenen Gefälle der Bahn vorzuschreiben sind. Zu diesem Zweck wird die Bremswirkung jedes mit Bremsen ausgerüsteten Wagens nach international vereinbarten Vorschriften des I. E. V. unter Berücksichtigung aller den Bremsweg beeinflussenden Faktoren durch Rechnung oder Versuch bewertet und als «Bremsgewicht» am Wagen angeschrieben. Dieses Bremsgewicht ist somit ein Mass für die Bremseigenschaften des Wagens. Die erwähnten Behelfe sind Tabellen, die für eine gegebene Fahrgeschwindigkeit das Bremsgewicht angeben, das für die verschiedenen Gefälle oder Streckenabschnitte auf je 100 t Zuggewicht erforderlich ist. Die auszuführende Rechnung, Zusammenzählen der Gewichte und der Bremsgewichte aller Wagen und Ausrechnung des Verhältnisses, ist somit sehr einfach.

Die Aufstellung der internationalen Vorschriften über die Bestimmung der Bremsgewichte war eine schwierige und zeitraubende Arbeit, die ein Unterausschuss des I. E. V. unter dem Vorsitz der SBB in den Jahren 1928 bis 1939 neben andern wichtigen Aufgaben vollendet hat. Dem Unterausschuss stunden dabei die Ergebnisse umfangreicher, von den grossen im Unterausschuss vertretenen Bahnverwaltungen zu diesem Zweck durchgeführter Versuche zur Verfügung. Dennoch war es wegen der zahlreichen den Bremsweg beeinflussenden Faktoren wie auch wegen der unterschiedlichen Verhältnisse und Bedürfnisse der beteiligten Bahnverwaltungen oft nicht leicht, die Meinungen unter einen Hut zu bringen. Die grosse Arbeit hatte neben der Erfüllung ihres Zweckes — der einheitlichen Bewertung der Bremswirkung der Eisenbahnwagen aller Hauptbahnen Europas, die einerseits zur Erhöhung der Sicherheit des Eisenbahnbetriebes, andererseits zur Möglichkeit der Anwendung grösserer Fahrgeschwindigkeiten, wesentlich beiträgt — fruchtbaren Einfluss auf die Erkenntnis des Bremsvorganges wie auch auf die technische Entwicklung der Eisenbahnbremsen, die im gleichen Zeitabschnitt grosse Fortschritte aufwies.

²⁾ Vgl. Leichtstahlwagen der SBB in Bd. 110, S. 13* und 116*.