Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung

Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine

Band: 71 (1953)

Heft: 26

Artikel: Zur Wirkungsweise der Schleuderschutz-Bremse elektrischer Triebfahrzeuge

Autor: Pflanz, Karl

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-60578

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 04.02.2026

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

sämtlichen Mörtelmauerwerks in Bruchstein mit Mörtel aus hydraulischem Kalk, 400 kg/m³ Sand, auch in den Tunneln. Portland-Zement kam nur bei Gewölben über 20 m Spannweite (in Spitzstein- oder Schichtsteinmauerwerk) zur Verwendung, sowie bei nassen Tunnelstrecken. Beton wurde bei der ganzen Albulabahn überhaupt nicht verwendet! Soviel wie möglich wurde Trockenmauerwerk ausgeführt, bis zu grosser Mauerhöhe (z. B. 11 m Stützmauerhöhe bei der Station Tiefencastel).

Märchenhaft mögen den heute Bauenden die folgenden Tatsachen anmuten: Es gab keine Stundenlöhne; der normale Arbeitstag, der ohne Aufzahlung um bis 2 Stunden erhöht werden konnte, hatte 11 Stunden. Der mittlere Taglohn aller Arbeitskategorien: Handlanger, Mineur, Maurer, Handwerker, betrug, auf die Gesamt-Bauausführung bezogen, Fr. 3.41 für den Arbeitstag von 11 bis 13 Stunden. Mit diesem Lohn lebten aber die Arbeiter gar nicht schlecht. So erinnert sich der Schreibende an Arbeitskompagnien (der Mannschaft ganzer italienischer Dörfer), die ihren eigenen Wein von Italien kommen liessen, bei gutem Essen (ein- bis zweimal Fleisch pro Tag mit Reis oder Teigwaren und einem Liter Wein pro Mann und Tag) für die Verköstigung (inkl. Wein) Fr. 1.— pro Tag ausgaben, wozu noch 25 bis 40 Rappen pro Tag für Logis kamen! Derartige Lohnverhältnisse erklären die folgenden Einheitspreise: Erd- und Fels-Bewegung inkl. alle Transporte im Mittel 1.50 bis 1.90 Fr./m³; Trockenmauerwerk (Steine aus Bruch) 6 Fr./m³; häuptiges Bruchsteinmauerwerk (in Mörtel) 18 Fr./m³.

Die **Linie Reichenau-Ilanz,** die unterste Strecke der Vorderrhein-Linie Reichenau-Disentis, eröffnet am 1. Juni 1903, wurde entgegen dringendstem Abraten der Geologen als die sog. Rheinlinie dem Rheinufer nach geführt, auf dem und teilweise durch den Fuss der Trümmerbreccie des prähistorischen Felsschlipfes von Flims (welche Trümmermassen auf 5 Mio m³ geschätzt wurden). Die Geologen bezeichneten den Bau einer Bahn auf diesem Trasse als mit den grössten Schwierigkeiten verbunden und deshalb fast undurchführbar; sie rieten deshalb zur Wahl einer der drei in Frage stehenden Varianten: 1. über Versam-Valendas nach Ilanz, mit Höhenverlust von 136 m und einer Maximalsteigung von 30 ‰; Mehrlänge gegenüber der Rheinlinie 2,15 km. 2. über Trins-Flims-Con nach Ilanz, mit Höhenverlust von 255 m und einer Maximalsteigung von 29 ‰; Mehrlänge 3,90 km. 3. über Trins-Flims/Waldhaus nach Ilanz mit einem Höhenverlust von 400 Meter, Maximalsteigung 45 ‰; Mehrlänge 5,7 km. Die grossen betriebstechnischen Nachteile dieser drei Bergvarianten gegenüber der eine Gesamthöhendifferenz von 92 m ohne Höhenverlust mit einer mittleren Steigung von 5 ‰ überwindenden Rheinlinie lagen auf der Hand. Es bedurfte aber auch hier des Mutes der projektierenden und bauenden Ingenieure, um trotz des geologischen Kassandrarufes die Verantwortung für die Ausführung der Rheinlinie zu übernehmen. Die Tatsachen haben diesen Mut gerechtfertigt.

1. Juli 1953 Hans Studer

Zur Wirkungsweise der Schleuderschutz-Bremse elektrischer Triebfahrzeuge

Von Prof. Dr. KARL PFLANZ, Linz (Oesterreich)

DK 621.335-592.52:625.095

1. Einleitung

Das Durchschleudern der Triebräder bei schweren Anfahrten zählt zu den unangenehmsten Erscheinungen des Zugförderungsdienstes. Bisher wurde dieser Vorgang fast ausschliesslich durch Sandstreueinrichtungen bekämpft. Trotz Weiterbildung von der einfachsten Form mit handbedienter Schaufel bis zur Ausführung mit druckluftbetätigten Misch- und Förderdüsen, haben diese Einrichtungen bisher nicht voll befriedigt. Das Festbacken des Sandes durch die Rüttelbewegungen des Fahrzeuges, die Gewölbebildung beim Auslauf und schliesslich das Verlegen der Sandrohrmündungen über der Schiene durch Schnee und Eis bilden eine ständige Quelle von Störungen. Die Entwicklung der Einzelachsantriebe mit ihrem verstärkten Einfluss der Achsdruckverlagerungen durch das Zughakenmoment lassen die Frage des Schleuderschutzes besonders in den Vordergrund treten.

Die Brown-Boveri-Schleuderschutzbremse[1]) umgeht grundsätzlich die Verwendung von Sand und stellt nur eine Zusatzeinrichtung zur normalen Druckluft-Bremsausrüstung des Fahrzeuges dar. Mit Hilfe eines Drucküber-setzers, der vom Führerstand über ein elektropneumatisches Ventil gesteuert wird, ist es möglich, die Bremsklötze innerhalb 0,5 bis 1 Sekunde mit etwa 0,9 bis 1,0 atü Zylinderdruck an die Räder zu legen und nach dem Auslassen des Druckknopfes ebenso rasch wieder zu lösen.

2. Haftvermögen an der Schiene

a) Grundsätzliche Zusammenhänge

Für die Entstehung der grösst erreichbaren Zugkraft gilt nach Bild 1 die bekannte Gleichung

$$(1) \qquad Z = \mu_s Q$$

mit Q als Achsdruck und μ_s als Haftreibungswert an der Schiene. Für gleichmässige Fahrt, d. h. nicht schleuderndes Rad, wird dem Radsatz vom Fahrmotor über den Antrieb das Moment $M_a = Z r = \mu_s Q r$ aufgedrückt (Antriebsdrehmoment). Unter der gleichen Voraussetzung besteht im Aufstandspunkt A reines Rollen, also keine Gleitgeschwindigkeit zwischen Rad und Schiene. Tatsächlich dreht sich das Rad als Folge des Formänderungsschlupfes etwas schneller, als der Fahrgeschwindigkeit entspricht, doch soll diese Erscheinung hier ausser Betracht bleiben. Beginnt unter dem Einfluss abgesunkenen Haftvermögens an der Schiene oder erhöhten Antriebsdrehmomentes M_a der Radsatz zu schleudern, so vergrössert sich seine Umfangsgeschwindigkeit v_0 (die gleich der Fahrgeschwindigkeit ist) um einen Betrag, der als Gleitgeschwindigkeit v_g am Radaufstandspunkt A in Erscheinung tritt. Im Punkte A besteht dann Rollen nach vorwärts mit der Fahrgeschwindigkeit v_0 und gleichzeitig Gleiten nach rückwärts mit der Gleitgeschwindigkeit v_g. Wie später gezeigt werden wird, ist das Verhältnis zwischen v_0 und v_g von wesentlichem Einfluss auf den Haftreibungswert μ_s an der Schiene.

b) Neuere Forschungsergebnisse

Die einfache, früher viel verbreitete Auffassung, dass bei einem reinen Rollvorgang die «höhere» Haftreibung der Ruhe herrsche, welche dann bei Beginn eines auch nur geringen Gleitens in die «niedrigere» Gleitreibung übergeht, ist auf ein Eisenbahnrad nicht anwendbar. Schon der Längenunterschied der äusseren und inneren Schiene erzwingt in jedem Gleisbogen einen mehr oder minder starken Gleitvorgang, ohne dass ein in einen Bogen einfahrendes Triebfahrzeug merklich an Zugkraft verliert, wie die tägliche Praxis zeigt. Trotz dieser, zu Beginn des Eisenbahnwesens noch recht unklaren Vorstellungen wurde erst vergleichsweise spät, etwa gleichzeitig mit Beginn der Vollbahnelektrifikation grossen Ausmasses in Europa, der so grundlegend wichtige Reibungswert μ_s planmässigen Forschungen unterzogen. Die ersten Untersuchungen von *A. E. Müller*[2]) zeigen ebenso wie nachfolgende Arbeiten wohl sehr grosse Streuungen untereinander, doch gemeinsam stark abfallende Tendenz des Wertes μ_s mit zunehmender Fahrgeschwindigkeit, während *Metzkow*[3]) (1934) innerhalb eines Bandes von $\mu_s = 0{,}17$ bis 0,23 und $V = 10$ bis 100 (km/h) einen von der Fahrgeschwindigkeit unabhängigen Verlauf des Beiwertes μ_s erhält. *Kother*[4]) hat 1940 alle bis dahin vorliegenden Ergebnisse in einem gemeinsamen Schaubild dargestellt. Trotz der grossen Streuungen legte Kother einen Mittelwert durch diese Ergebnisse und stellt hiefür die Gleichung auf

$$(2) \qquad \mu_s = \frac{9}{V\,(\mathrm{km/h}) + 42} + 0{,}116$$

Diese Gleichung zeigt — den genannten Ergebnissen folgend — ein ebenfalls stark fallendes μ_s mit zunehmendem V (Bild 2). Die Sorgfalt der Versuchsdurchführung sowie die

[1]) A. E. Müller: Ueber Schienenreibung und Schleuderschutz. «Brown-Boveri-Mitteilungen» Juli/August 1951.

[2]) A. E. Müller: Reibungsverhältnisse bei Gross-Elektrolokomotiven. «ETZ» 1928, S. 17 . . . 19.

[3]) Metzkow: Untersuchungen der Haftung zwischen Rad und Schiene. «Organ» 1934, Heft 13.

[4]) Kother: Verlauf und Ausnutzung des Haftwertes zwischen Rad und Schiene bei elektrischen Triebfahrzeugen. «Elektrische Bahnen» 1940, Heft 12.

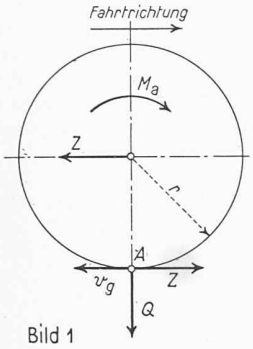


Bild 1

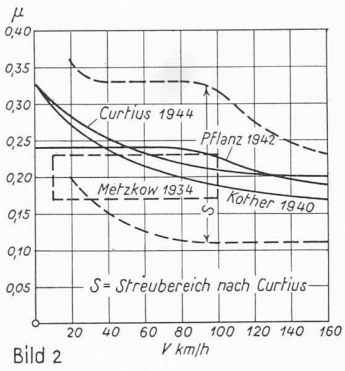


Bild 2

Anzahl der Einzelwerte, welche zu den verschiedenen μ_s-Kurven geführt haben, wurde von Kother noch nicht besonders berücksichtigt. Es standen sich somit um diese Zeit einerseits die Kothersche Gleichung mit absinkendem μ_s, anderseits die Metzkowschen Ergebnisse mit gleichbleibendem, also geschwindigkeitsunabhängigem μ_s — letztere allerdings nur bis 100 (km/h) — gegenüber. Zur Aufklärung des Widerspruches zwischen gleichbleibender oder absinkender Reibung wurde 1942 vom Verfasser die Auswertung der Metzkowschen Versuche auf Grund der noch zur Verfügung stehenden Originalschaubilder fortgesetzt[5]). Bei den Untersuchungen Metzkows wurde ein zweiachsiger, mit einem Dynamometer versehener Messwagen ohne nachlaufenden Zug mit gleichbleibender Geschwindigkeit geschleppt und eine der beiden Achsen bis zu ihrem Stillstand gebremst. Noch ungebremst hat die Messachse eine konstante Winkelgeschwindigkeit ω. Mit zunehmender Bremswirkung dreht sie sich immer langsamer, ω nimmt ab, während an der Schiene eine Gleitgeschwindigkeit v_g entsteht. Ist die Achse festgebremst, also $\omega = 0$ geworden, so rutscht sie mit einer Gleitgeschwindigkeit, die gleich der — unverändert gebliebenen — Fahrgeschwindigkeit ist, über die Schienen. Den Verlauf der zugehörigen Zugkraft bzw. der aus der Beziehung $\mu_s = Z / Q$ gewonnenen Reibungsziffer zeigt Bild 3. Bei $V = 10$ (km/h) bleibt im Schlupfgebiet, d. h. von $\omega = \text{const}$ bis $\omega = 0$ entsprechend den Punkten A bis B der Wert μ_s fast konstant, während bei $V = 30$ (km/h) schon früher, nämlich bei Punkt C der Wert μ_s abzusinken beginnt. Bei $V = 100$ (km/h) beginnt aber schon bei Eintritt geringsten Gleitens (Punkt D) die Reibungsziffer abzusinken. In anderer Form ausgedrückt, lässt Bild 3 erkennen, dass der Reibungswert μ_s nicht von der Fahr- oder, richtiger gesagt, Rollgeschwindigkeit v_0 des Rades allein, sondern auch von seiner Gleitgeschwindigkeit v_g abhängt, und zwar in der Weise, dass das Rad umso «gleitempfindlicher» wird, je schneller es rollt. Bei kleiner Fahrgeschwindigkeit kann zusätzlich starkes Gleiten auftreten, ohne zu einem Absinken des Reibungswertes zu führen. Bei schnellerem Rollen beginnt schon bei kleinerem Gleiten das Absinken. Aus einer grösseren Anzahl der Originalschaubilder von Metzkow wurde auf diese Weise Bild 4 gezeichnet. Aus ihm ersieht man beispielsweise, dass ein mit einer Fahrgeschwindigkeit von 60 km/h gleichmässig rollendes Rad, dessen Haftwert $\mu_s = 0{,}244$ beträgt, zusätzlich mit $v_g = 1{,}8$ m/s gleiten kann. Erst bei $v_g > 1{,}8$ m/s beginnt μ_s abzusinken. Jene Gleitgeschwindigkeit, bei der μ_s abzusinken beginnt, sei als *Grenzgleitgeschwindigkeit* v'_g bezeichnet.

[5]) Pflanz: Rad und Schiene als Reibungsgetriebe. «El. Bahnen» 1944, Heft 1—2.

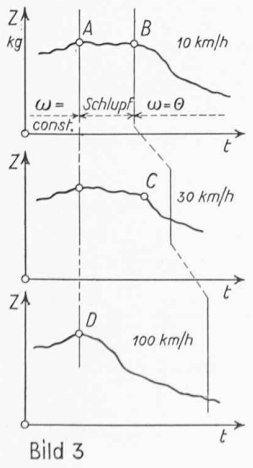


Bild 3

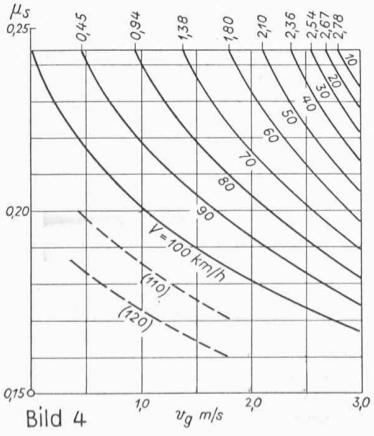


Bild 4

Bild 4 zeigt sich auf einen mittleren μ_s-Wert von 0,244 und zeigt nur den *grundsätzlichen* Zusammenhang zwischen Fahrgeschwindigkeit, Gleitgeschwindigkeit und Reibungsziffer. Bei besonders günstigem Schienenzustand würde μ_s höher, bei schlechtem tiefer liegen, ohne dass die Form der μ_s—v_g-Kurve nach Bild 4 grundsätzlich geändert würde.

Der Schleudervorgang eines mit hoher Zugkraft arbeitenden Triebfahrzeuges kann nun entstehen, wenn entweder durch Aenderung des Schienenzustandes bei gleichbleibendem Antriebsdrehmoment das H a f t u n g s a n g e b o t der Schiene absinkt, also ein den Radsatz beschleunigendes Ueberschuss-Drehmoment entsteht, oder durch Schalten auf die nächsthöhere Fahrstufe das vorher nicht ganz voll ausgenützt gewesene Haftungsangebot der Schiene überschritten wird. Der erste Fall ist zweifellos der häufigere und insofern auch der unangenehmere, als er mehr oder minder überraschend auftritt und erst durch Sondermassnahmen — Betätigung des Sandstreuers oder der Schleuderschutzbremse — der normale Fahrzustand wieder hergestellt werden kann und nicht nur durch einfaches Rückdrehen des Fahrschalters. Jedenfalls treten aber beim Schleudern Gleitgeschwindigkeiten in den Radaufstandspunkten auf und damit auch die Möglichkeit, dass sich ein durch abgesunkenes Haftungsangebot entstandener Schleudervorgang verstärkt und zwar durch Ueberschreiten der Grenzgleitgeschwindigkeit. *Den letztgenannten Fall näher zu prüfen, ist das Ziel der vorliegenden Untersuchung.*

Vorerst sei noch darauf hingewiesen, dass alle bisherigen Ergebnisse der Haftwertforschung — mit Ausnahme jener von Metzkow — an *ziehenden*, die von Metzkow aber an *gebremsten* Achsen gewonnen sind. Es wird also im vorliegenden Zusammenhang stillschweigend das Bestehen der Gleichung «Ziehen = Bremsen» vorausgesetzt. Besondere Untersuchungen über diese Frage liegen nicht vor. Die Erfahrung zeigt aber, dass grundlegende Unterschiede der Reibungswerte nicht zu bestehen scheinen.

3. Berechnung des Schleudervorganges

Der untersuchte Vorgang zerfällt in vier Perioden.

Periode I: Das Antriebsdrehmoment und das aus Achsdruck, Reibungsziffer und Radhalbmesser gebildete Gegendrehmoment sind gleich. Kein Schleudern. Die Periode bedarf keiner näheren Prüfung.

Periode II: Durch Verschlechterung des Schienenzustandes sinkt das Gegendrehmoment. Das zunächst grössere Antriebsdrehmoment beschleunigt den Radsatz. Durch die entstehende Drehzahlerhöhung sinkt das Antriebsdrehmoment ebenfalls ab, bis sich ein neuer Gleichgewichtszustand eingestellt hat. Am Ende schleudert die Achse mit gleichmässiger Ueberdrehzahl.

Periode III: So lange Schienenzustand und Fahrstufe sich nicht ändern, hält das gleichmässige Schleudern an.

Periode IV: Die Schleuderschutzbremse wird angelegt und erzeugt ein Gegendrehmoment. Die entstehende Drehzahlverminderung erhöht nun wieder das Antriebsdrehmoment. Dreht sich der Radsatz wieder der Fahrgeschwindigkeit entsprechend, so halten sich das Antriebsdrehmoment einerseits und die Gegendrehmomente aus Schienenreibung und Schleuderschutzbremse anderseits das Gleichgewicht.

Mit Ende der Periode IV ist das Abfangen des Schleudervorganges beendet. Die Schleuderschutzbremse kann gelöst werden. Hat sich der Schienenzustand unterdessen nicht gebessert, muss sie neuerdings betätigt werden.

Zur Beurteilung der *zweiten Periode* wird angenommen, dass der ursprünglich an der Schiene bestandene Reibungswert μ_s auf μ'_s abgesunken sei ($\mu'_s < \mu_s$), während das Antriebsdrehmoment $r\,Q\,\mu_{sa}$ trotz der entstehenden Drehzahlerhöhung in einem kleinen Drehzahlintervall noch unverändert bleibe. Unter μ_{sa} ist bei dieser Annahme jener Reibungswert verstanden, mit dem das Haftungsvermögen an der Schiene vom Antrieb her in Anspruch genommen wird. Im Drehsinne wirkt nun nach Bild 5 das Antriebsdrehmoment $r\,Q\,\mu_{sa}$. Entgegengesetzt wirkt das Gegendrehmoment $r\,Q\,\mu'_s$ und der Trägheitswiderstand $\gamma\,\Theta$ mit γ (s^{-2}) als Winkelbeschleunigung und Θ (kg m s^2) als Trägheitsmoment des Radsatzes und der auf den Radsatz bezogenen Rotormasse.

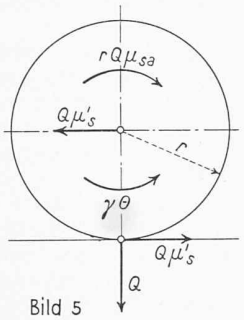


Bild 5

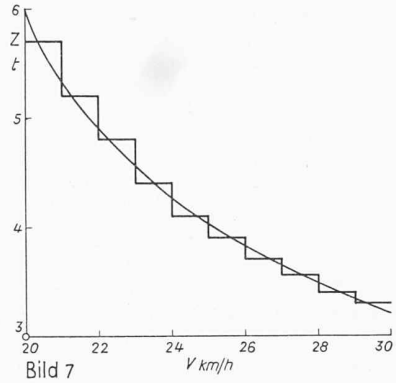


Bild 7

Es gilt somit

$$(3) \qquad r\,Q\,\mu_{sa} - r\,Q\,\mu'_s - \gamma\Theta = 0$$

Wird der Unterschied zwischen dem Reibungswert aus dem Antriebsdrehmoment (μ_{sa}) und jenem aus der abgesunkenen Schienenreibung (μ'_s) mit $\Delta\mu_s$ bezeichnet, so ergibt sich $\Delta\mu_s = \mu_{sa} - \mu'_s$ und man erhält aus Gleichung (3) für die Winkelbeschleunigung

$$(4) \qquad \gamma = \frac{r\,Q\,\Delta\mu_s}{\Theta}$$

Es sei ferner ω_0 die Winkelgeschwindigkeit des noch nicht schleudernden und ω_1 die des schleudernden Radsatzes nach der Zeit t. Die zugehörigen Umfangsgeschwindigkeiten seien v_0 bzw. v_1. Es ergibt sich die Geschwindigkeitszunahme $\omega_1 = \omega_0 + \gamma\,t$ und $v_1/r = v_0/r + \gamma\,t$, oder $(v_1 - v_0)/r = \gamma\,t$. Mit $\Delta v = v_1 - v_0$ als Zunahme der Umfangsgeschwindigkeit erhält man $\gamma = \Delta v/r\,t$ oder aus Gleichung (2)

$$(5) \qquad t = \frac{\Delta V\,\Theta}{3{,}6\,r^2\,Q\,\Delta\mu_s}$$

wenn ausserdem Δv (m/s) $\cdot\,3{,}6 = \Delta V$ (km/h) gesetzt wird. Die Gleichung (5) besagt also, welche Zeit verstreicht, wenn der Radsatz bei unverändert angenommenem Unterschied der Reibungsziffern seine Umfangsgeschwindigkeit um den Betrag ΔV erhöht.

Als Beispiel ist in Bild 6 der Schleudervorgang eines mit 20 000 kg belasteten Radsatzes dargestellt. Es ist eine gleichmässige Fahrgeschwindigkeit von $V = 20$ (km/h) angenommen und ausserdem vorausgesetzt, dass bei Schleuderbeginn im Punkte B der Strecke durch Verschlechterung des Schienenzustandes der Reibungswert an der Schiene von $\mu_s = 0{,}285$ auf $\mu'_s = 0{,}193$ absinkt (Punkte C, D). Für seinen weiteren Verlauf nach der Linie $\mu'_s = f_1\,(t)$ ist die untere Grenze der Untersuchungen von *Curtius* und *Kniffler*[6]) gewählt. Die Linie $\mu_{sa} = f_2\,(t)$ stellt den sich aus dem Antriebsdrehmoment ergebenden Reibungswert dar, und zwar ist für die Rechnung angenommen, dass innerhalb einer entstehenden Geschwindigkeitserhöhung des Rades um 1 (km/h) entsprechend $\Delta V = 1$ (km/h) die Zugkraft Z bzw. der Reibungswert μ_{sa} nicht absinken, sondern konstant bleiben, wie Bild 7 zeigt. Der Zusammenhang zwischen Zugkraft und Geschwindigkeit nach Bild 7 entspricht ungefähr der Fahrstufe 15 der Lokomotive Ae 4/4 der Lötschbergbahn. Aus den Linien $\mu_{sa} = f_2\,(t)$ und $\mu'_s = f_1\,(t)$ (Bild 6) ergibt sich unmittelbar der Unterschied $\Delta\mu_s$ der Reibungswerte. Für $\Delta V = 1$ (km/h) und $\Delta\mu_s$ aus Bild 6 ist nun die Zeit gerechnet worden, die verstreicht, wenn der Radsatz seine Umfangsgeschwindigkeit um jeweils 1 (km/h) erhöht. Auf diese Weise wurde die Linie $v_s = f_3\,(t)$ erhalten. Sie stellt jene Fahrgeschwindigkeit dar, welche der Winkelgeschwindigkeit des schleudernden Radsatzes entspricht. Die v_g-Skala links lässt auch erkennen, dass in diesem Falle die nach rückwärts gerichtete Gleitgeschwindigkeit v_g (Bild 1) bei einem angenommenen Radhalbmesser $r = 0{,}7$ m die Grösse 2,22 m erreicht. Bei $t \approx 1{,}8$ s wird mit $V = 28$ km/h der Gleichgewichtszustand zwischen Antriebsdrehmoment und Gegendrehmoment erreicht, d. h. die *zweite* Periode ist beendet und die *dritte* beginnt.

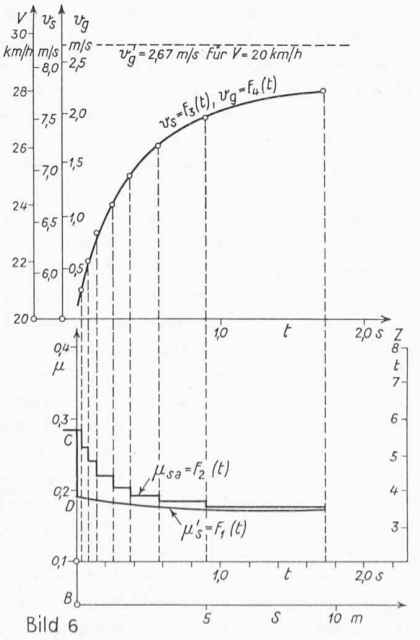


Bild 6

Der Verlauf des Haftungsangebotes der Schiene nach Bild 6 — Linie $\mu'_s = f_1\,(t)$ — ist wohl als der untere Grenzwert der Untersuchungen von Curtius und Kniffler begründet, kann aber nicht als allgemein gültig bezeichnet werden. Der *wirkliche* Verlauf als Funktion der Zeit und — bei $V = \text{const}$ — auch als Funktion des zurückgelegten Weges ist unbekannt. Man weiss nur, dass bei Schleuderbeginn etwa entsprechend den Punkten S_1 und S_2 von Bild 8 der Wert μ_s auf μ'_s absinkt, wobei der Verlauf von μ_s in Bild 8 völlig willkürlich angenommen ist. Wenn es auch für einen Einzelfall gelingen würde — vermutlich nur unter einem ungewöhnlich grossen Aufwand messtechnischer Mittel — den Wert μ'_s für einzelne Schienenstellen zu erforschen, so dürfte diesem Ergebnis keine allgemeine Bedeutung zugeschrieben werden. Diese Unsicherheit entzieht einer genauen Berechnung den Boden und lässt es auch nicht vertretbar erscheinen, weitere Nebenumstände, wie den genauen Verlauf der Motorkennlinie, den Bremsgestängewirkungsgrad, den durch pneumatische Vorgänge bedingten Verlauf des Druckanstieges im Bremszylinder und dergleichen in die Betrachtungen besonders genau einzuführen.

Als Ergebnis der in Bild 6 durchgeführten Untersuchung sei nur festgehalten, dass bei plötzlichem Absinken des Haftungsangebotes der Schiene von seinem Höchstwert auf die untere Grenze in etwa 2 s die Drehzahl des Radsatzes — bezogen auf die Fahrgeschwindigkeit von 20 km/h — auf etwa 28 km/h steigt. Sinkt μ_s nicht so stark, so vergehen mehrere Sekunden bis zum Erreichen der erhöhten Drehzahl. Der unbekannte Verlauf von μ'_s kann aber auch diese Werte noch wesentlich ändern.

4. Annähernde Darstellung des Bremsvorganges

Zur Abbremsung des schleudernden Radsatzes wirkt der Drehung die Bremskraft $\varepsilon\,Q\,\mu_K$ entgegen (Bild 9). Der Beiwert ε sei das Verhältnis des Klotzdruckes K zum Achsdruck Q, also $\varepsilon = K/Q$. Für normale Bremsen ist $\varepsilon \approx 0{,}8$ zu setzen, bei Schnellbahnbremsen kann dieses Verhältnis bis etwa 1,6 betragen.

Bei Beginn der Periode IV, d. h. Beginn der Schleuderschutzbremsung, wirkt nach Bild 9 rechtsdrehend das Antriebsdrehmoment $r\,Q\,\mu_{sa}$ und das Moment des Trägheitswiderstandes $\gamma\cdot\Theta$ linksdrehend das Bremsmoment (Gegendrehmoment) $r\,\varepsilon\,Q\,\mu_K$ mit μ_K als Klotzreibungsziffer und das Moment $r\,Q\,\mu'_s$ des Reibungswiderstandes an der Schiene. Es besteht somit die Gleichung

$$r\,Q\,\mu_{sa} + \gamma\,\Theta - r\,\varepsilon\,Q\,\mu_K - r\,Q\,\mu'_s = 0$$

Nach Umformung erhält man

$$(6) \qquad r\,Q\,\mu'_s - r\,Q\,\mu_{sa} + r\,\varepsilon\,Q\,\mu_K - \gamma\,\Theta = 0$$

Aehnlich wie bei der Behandlung des Schleudervorganges sei wieder angenommen, dass das Antriebsdrehmoment $r\,Q\,\mu_{sa}$ über kleine Geschwindigkeitsintervalle unveränderlich und

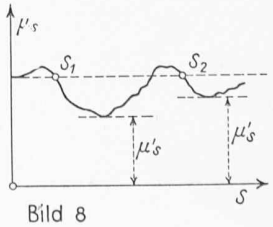


Bild 8

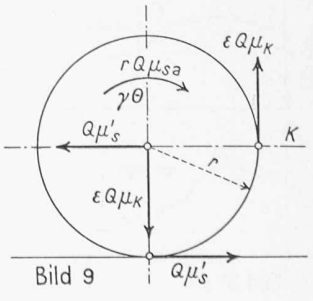


Bild 9

[6]) E. W. Curtius und A. Kniffler: Neue Erkenntnisse über die Haftung zwischen Triebrad und Schiene. «El. Bahnen» 1944, Nr. 1/2 und 3/4.

ausserdem kleiner als das Moment des Reibungswiderstandes an der Schiene, also auch $\mu_{sa} < \mu'_s$ sei. Der Unterschied der Reibungswerte ist $\Delta\mu_s = \mu'_s - \mu_{sa}$. Man erhält aus Gleichung (6) den Ausdruck $r\,Q\,(\Delta\mu_s + \varepsilon\,\mu_K) - \gamma\,\Theta = 0$ und weiter

$$(7) \qquad \gamma = \frac{r\,Q\,(\Delta\mu_s + \varepsilon\,\mu_K)}{\Theta}$$

Die Winkelgeschwindigkeit des noch ungebremst schleudernden Radsatzes sei ω'_0. Ihr entspricht die Geschwindigkeit v_0'(m/s) am Radumfang. Die nach dem Absinken um ΔV bestehende Winkelgeschwindigkeit sei mit ω'_1, bzw. die Umfangsgeschwindigkeit mit v_1' (m/s) bezeichnet. Es gilt somit $\omega'_1 = \omega'_0 - \gamma\,t$, wenn t die der Geschwindigkeitsabnahme um ΔV entsprechende Zeit in s bedeutet. Aus

$$v_1'/r = (v_0'/r) - \gamma\,t \text{ und } v_0' - v_1' = \Delta v' \text{ folgt}$$

$$(8) \qquad \gamma = \frac{\Delta v'}{r\,t}$$

und mit Gleichung (7) weiter

$$\frac{\Delta v'}{r\,t} = \frac{r\,Q\,(\Delta\mu_s + \varepsilon\,\mu_K)}{\Theta}$$

Wird das Geschwindigkeitsintervall ΔV in km/h eingeführt, so ergibt sich

$$(9) \qquad t = \frac{\Delta V\,\Theta}{3{,}6\,r^2\,(\Delta\mu_s + \varepsilon\,\mu_K)\,Q}$$

Aehnlich wie bei der Berechnung des Schleudervorganges wurden auch bei der Ableitung der Gleichung (9) vereinfachende Annahmen getroffen. Sie beziehen sich auf die schon früher genannten Reibungswerte bzw. ihren Unterschied $\Delta\mu_s$ und den Verlauf der Motorkennlinie. Eine weitere, noch zu begründende Annahme bezieht sich auf das Bremsmoment $r\,\varepsilon\,Q\,\mu_K$ das, in dieser Form geschrieben, Unveränderlichkeit der Klotzreibungsziffer μ_K und ebenso Unveränderlichkeit des pneumatisch erzeugten Klotzdruckes $K = \varepsilon\,Q$ voraussetzt. Beide Voraussetzungen treffen in Wirklichkeit nicht völlig zu. Der beim Schleuderschutzvorgang bestehende Geschwindigkeitsunterschied ist aber doch, verglichen mit dem Intervall zwischen Höchstgeschwindigkeit und Stillstand eines Fahrzeuges, ziemlich klein, so dass mit der Annahme eines von der Fahrgeschwindigkeit unabhängigen Wertes μ_K kein allzu grosser Fehler entstehen wird. Um den wirklichen Verlauf des Klotzdruckes $K = \varepsilon\,Q$ beurteilen zu können, ist in Bild 10 der auf dem Prüfstand der *Werkzeugmaschinenfabrik Oerlikon* aufgenommene Bremszylinderdruck wiedergegeben. Wie ersichtlich, wird nach $t = 1$ s ein Zylinderdruck von ungefähr 0,2 atü erreicht und nach einer weiteren Sekunde der Volldruck von 1,0 atü der Schleuderschutzbremsung. Die Schaulinie nach Bild 10 ist nicht mit dem Lokomotiv-Steuerventil LST 1, sondern durch möglichst rasches Oeffnen eines Handrades aufgenommen. Beim LST-1-Ventil beträgt die gesamte Füllzeit die Hälfte, das heisst ~ 1 s.

Wie schon erwähnt, wäre es besonders im Hinblick auf die Unsicherheit des Reibungswertes kaum vertretbar, die — auch nicht exakt vorliegende — Abhängigkeit der Klotzreibungsziffer μ_K von der Fahrgeschwindigkeit und den genauen Druckanstieg im Bremszylinder in die Rechnung einzuführen. In Bild 11 ist der Bremsvorgang daher nur für folgende Werte dargestellt. Geschwindigkeitsintervall $\Delta V = 5$ km/h, $\Delta\mu_s = 0{,}015$, 0,030 und 0,045, $\mu_K = 0{,}2$ und $\varepsilon = 0{,}1$. Die Annahme $\varepsilon = 0{,}1$ besagt, dass bei einem Achsdruck von 20 000 kg mit einem Klotzdruck $K = 2000$ kg gerechnet wird und berücksichtigt nun, dass die Rechnung nach Gleichung (9) den gesamten Bremsvorgang, das heisst den Druckanstieg von Null bis 1,0 atü umfasst.

Nach Bild 11 ergeben sich für die gewählten Unterschiede $\Delta\mu_s$ die Bremszeiten 0,256, 0,330 und 0,476 s. Diese Werte erscheinen auf den ersten Blick wohl ausserordentlich klein. Sie mögen in Wirklichkeit wohl etwas anders, das heisst wahrscheinlich grösser sein; *wesentlich* grösser aber sicher nicht, denn die Praxis zeigt, dass ein einwandfreies Abfangen des schleudernden Radsatzes nur durch eine pneumatisch so rasch arbeitende Einrichtung möglich ist. Obwohl das zuerst von *Schelling* eingeführte Abfangen des schleudernden Radsatzes ursprünglich mit der wesentlich langsamer arbeitenden Zusatzbremse vorgenommen wurde, war die Entwicklung rasch arbeitender Einrichtungen notwendig gewesen, weil das eben

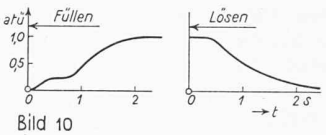


Bild 10

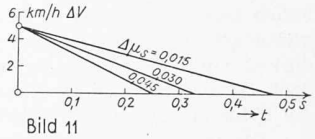


Bild 11

so rasch erfolgende Lösen ein Abnehmen der Zugkraft am Zughaken der Lokomotive sicher verhindert.

5. Schleudervorgang und Haftwerte von Metzkow

Wie schon an Hand von Bild 4 erläutert, besteht zwischen der Fahrgeschwindigkeit V, der Gleitgeschwindigkeit v_g und der Reibungsziffer μ ein Zusammenhang in dem Sinn, dass ein langsam rollendes Rad stark, ein schneller rollendes aber nur weniger stark gleiten kann, ehe es zu einem Absinken der Reibungsziffer aus Ursache der Gleitgeschwindigkeit kommt. Bild 4 kann die Grenzgleitgeschwindigkeit v_g' als Funktion von V unmittelbar entnommen werden. Sie ist als Linie $v_g' = f_1\,(V)$ in Bild 12 dargestellt. Die Linie $v_g' = f_1\,(V)$ besagt zum Beispiel, dass ein mit $V = 50$ km/h rollendes Rad bis zu $v_g' = 2{,}1$ m/s gleiten kann, ohne dass μ absinkt. Für $v_g < 2{,}1$ m/s befindet man sich im Gebiet gleichbleibender, für $v_g < 2{,}1$ m/s im Gebiet absinkender Reibung, wobei aber immer gleichbleibender Schienenzustand vorausgesetzt wird. Es besteht somit die Möglichkeit, dass ein schleuderndes und damit auch eine Gleitgeschwindigkeit aufweisendes Rad die Grenzgleitgeschwindigkeit überschreitet, womit die Reibungsziffer kleiner wird und sich der Schleudervorgang verstärkt.

Um diesen Fall zu prüfen, ist in Bild 12 an der Abszisse der Geschwindigkeitsmasstab auch in m/s gezeichnet. Durch die Verbindung aller Punkte gleicher Wertigkeit (zum Beispiel $v = 2{,}0$ m/s in Bild 12) mit jenen der Ordinate, ergibt sich die Linie a und ihr Neigungswinkel ω. Beispielsweise würde ein bei Stillstand des Fahrzeuges mit $v_g = 1{,}6$ m/s schleuderndes Rad eine Drehzahl aufweisen, die einer Fahrgeschwindigkeit von 5,76 km/h entspricht. Die Ausmittlung, welche Geschwindigkeitszunahme ΔV ein schleudernder Radsatz noch ohne Ueberschreiten der Grenzgleitgeschwindigkeit aufweisen kann, sei am Beispiel von $V = 50$ km/h gezeigt. Im Punkt $V = 50$ km/h der Abszisse ist die Lotrechte b errichtet und mit der Linie $v_g' = f_1\,(V)$ geschnitten (Punkt 1). Gleichzeitig wird im Punkt $V = 50$ km/h unter dem Neigungswinkel φ die Gerade c gezeichnet. Sie schneidet eine Waagerechte durch Punkt 1 im Punkte 2. Die Ablotung des Punktes 2 auf die Abszisse ergibt den Wert 57,25 km/h, bzw. ein $\Delta V = 7{,}25$ km/h. Das bedeutet, dass bei $V = 50$ km/h Fahrgeschwindigkeit ein Rad bis 57,25 km/h schleudern kann, ohne dass sein Reibungswert aus dem Grunde des Ueberschreitens der Grenzgleitgeschwindigkeit v_g' auf der Schiene absinkt. Auf diese Weise ist die Linie $\Delta V = f_2\,(V)$ gezeichnet worden. Ebenso kann die Ueberdrehzahl, das heisst jene Drehzahl, um welche sich das schleudernde Rad schneller dreht als der Fahrgeschwindigkeit entsprechen würde, in Hundertteilen der normalen Drehzahl — also jener ohne Schleudern — bestimmt werden. Dieser Ueberdrehzahl entspricht die Linie $\Delta V\ (\%) = f_3\,(V)$.

Der Verlauf der Schaulinien nach Bild 12 lässt erkennen, dass sich im niedrigen Geschwindigkeitsbereich, d. h. bis etwa $V = 50$ km/h die Drehzahl der schleudernden Achse stark er-

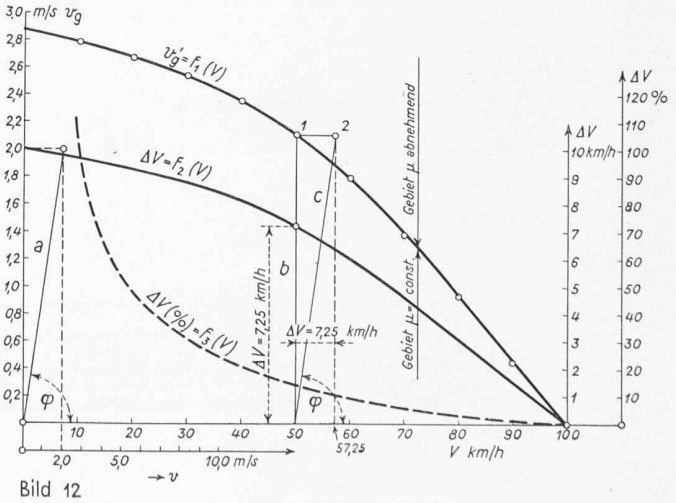


Bild 12

höhen kann, ohne dass es zu einem Ueberschreiten der Grenzgleitgeschwindigkeit kommt. Mit zunehmender Fahrgeschwindigkeit sinkt allerdings die mögliche Ueberdrehzahl stark ab, doch ist in diesem Gebiet wegen der abnehmenden Zugkraft die Schleudergefahr auch nicht mehr gross.

Die in Bild 4 gestrichelt gezeichneten Linien sind extrapoliert und entstammen nicht unmittelbar den Versuchen von Metzkow. Sie besagen, dass bei $V > 100$ km/h auch ohne Berücksichtigung des Gleitens nurmehr kleinere Reibungswerte entstehen, wie auch Bild 4 zeigt. Da aber im hohen Geschwindigkeitsbereich die Schleudergefahr nur gering ist, wurde sie dort auch nicht näher untersucht.

6. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

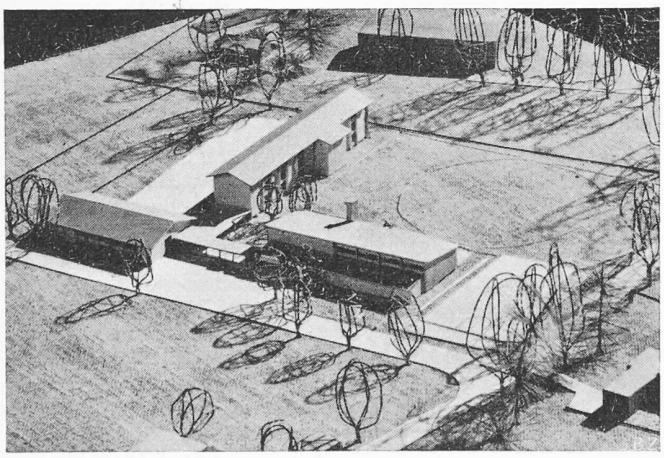
Wenngleich die Bewegungsvorgänge bei der Schleuderschutzbremse grundsätzlich einfach sind, stellen sich der praktischen Beurteilung Schwierigkeiten entgegen. Sie sind im Umstand begründet, dass die wirkliche Grösse des Haftungsangebotes der Schiene unbekannt ist. Wir kennen von diesem, gewöhnlich als «nützliche Reibung» bezeichneten Haftwert wohl die obere und die untere Grenze (Bild 2, Streugebiet S) und auch seinen mittleren Verlauf als Funktion der Fahrgeschwindigkeit, doch versagt diese Kenntnis im Einzelfall. Wenngleich es vielleicht unter Verwendung besonderer, noch zu entwickelnder Messeinrichtungen möglich wäre, den augenblicklichen Schienenzustand einer Versuchsstrecke festzustellen, würde dieses Ergebnis keine allgemeine Gültigkeit besitzen. Es erscheint daher zulässig, in die Rechnung vereinfachende Annahmen einzuführen.

Unter diesen vereinfachenden Annahmen zeigt die Rechnung, dass grössenordnungsmässig im unteren Geschwindigkeitsbereich, d. h. bei hohem Motordrehmoment nach etwa 1 bis 2 s der Radsatz voll durchschleudert, sich also der neue Gleichgewichtszustand zwischen vermindertem Haftungsangebot der Schiene und abgesunkenem Antriebsdrehmoment einstellt. Aus diesem Grunde arbeiten die Schleuderschutzeinrichtungen auch in sehr kurzen Ansprechzeiten.

A. E. Müller vermutet, dass zwischen dem Verhalten eines «schleuderschutzgebremsten» Radsatzes und den Haftwerten von *Metzkow* Zusammenhänge bestehen, deren Feststellung im Interesse der genauen Kenntnis des gesamten Schleuderschutzvorganges liegt. Aus den Versuchen Metzkows lässt sich ableiten, dass bei gleichbleibendem Schienenzustand ein langsam rollender Radsatz an seinen Aufstandspunkten vergleichsweise grosse Gleitgeschwindigkeiten ohne Absinken der Reibungsziffer aufweisen kann. Erst nach Ueberschreiten einer bestimmten Grenzgleitgeschwindigkeit sinkt die Reibungsziffer — immer noch bei gleichbleibendem Schienenzustand — ab (Bild 4). Es wäre nun denkbar, dass ein Radsatz infolge abgesunkenem, aber in diesem Zustand gleichbleibendem Haftungsangebot der Schiene beim Schleudern seine Grenzgleitgeschwindigkeit überschreitet und sich der Schleudervorgang damit noch weiter verstärkt. In Bild 12 ist nun gezeigt, dass dies, zumindest bei kleinen Fahrgeschwindigkeiten, meist nicht der Fall sein wird. Beispielsweise kann bei $V = 20$ km/h der Radsatz seine Drehzahl um fast 50 % erhöhen, ohne dass sich durch Ueberschreiten der Grenzgleitgeschwindigkeit der Schleudervorgang verstärkt. Bei höheren Fahrgeschwindigkeiten wird der Radsatz wohl gleitempfindlicher; es genügen bei $V = 60$ km/h schon 10 % Ueberdrehzahl, um in das gefährdete Gebiet zu kommen. Dieser Fall wird aber seltener auftreten, weil im oberen Geschwindigkeitsbereich das Haftungsangebot auch einer Schiene von ungünstigem Zustand vom Antriebsdrehmoment fast nie voll in Anspruch genommen wird.

*

Die vorstehende Abhandlung verwendet die Reibungsziffern von Metzkow als Grundlage. Diese Werte stimmen gut mit dem bisher praktisch beobachteten Verhalten der Schleuderschutzbremse überein. Es wäre aber doch vorteilhaft, die gezeigten Zusammenhänge experimentell zu überprüfen. Bei derartigen Versuchen müssten nur Stromaufnahmen des Fahrmotors, Drehzahl des Radsatzes und Druckverlauf im Bremszylinder entsprechend genau registriert werden.



Modellansicht aus Nordosten

Wettbewerb für ein Sekundarschulhaus mit Turnhalle in Bolligen

DK 727.1 (494.24)

Aus dem Raumprogramm

Es sind unterzubringen:

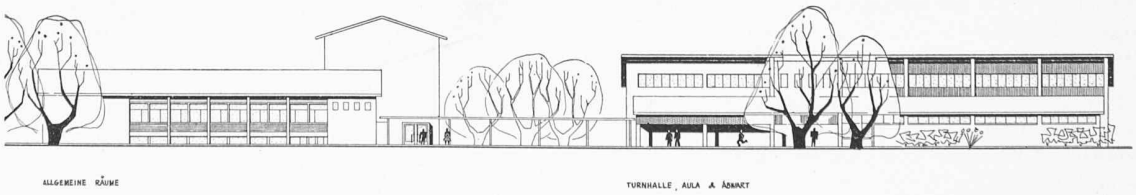
A. Schulhaus: 10 Klassenzimmer für maximal 36 Schüler, 1 Zeichnungssaal, 1 Materialraum dazu, 1 Physikzimmer, 1 Material- und Uebungsraum, 2 Handarbeitszimmer für je 20 Schülerinnen, 1 Werkraum für Schreinerei und Cartonnage mit Materialraum und Sammlungszimmer, Bibliothek und Lehrmittel, Lehrerzimmer, Vorsteherzimmer, Schulküche, Theorie- und Essraum, Singsaal (Aula) mit Schulbühne und kleinem Operateurraum. Gedeckte Pausenhalle.

B. Abwartwohnung mit 4 Zimmern und Nebenräumen.

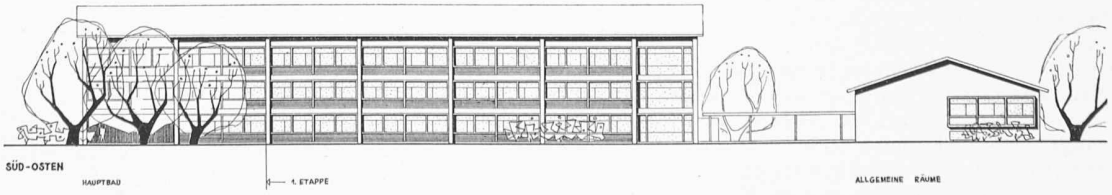
C. Turnhalle mit Nebenräumen.

D. Freiflächen: Pausenplatz, Hartturnplatz, Spielwiese, Schulgarten.

E. Erweiterungsbau: 5 Klassenzimmer und Nebenräume.



Nordostansicht, Masstab 1:700



Südostansicht, Masstab 1:700