

Prüfung des Verhaltens von Fenstern bei schnellen Zugbegegnungen

Von Ernst Kalkbrenner und Wolfgang Krügel, München

(Mitteilung aus der Gruppe für nichtmetallische Erzeugnisse der Bundesbahn – Versuchsanstalt München)

(Eingegangen am 27. Oktober 1980)

Die Steigerung der Begegnungsgeschwindigkeit von Intercityzügen machte Versuche zur Überprüfung der Berstfestigkeit von Reisezugwagen-Fenstern erforderlich. Nach anfänglichen Begegnungsversuchen auf Hochgeschwindigkeitsstrecken wurden weitere

Versuche auf einer Vibrationsmaschine im Laboratorium ausgeführt. Die für diese Versuche eingesetzte Vibrationsmaschine ermöglichte die Bewertung der Fenster in kurzer Zeit und mit geringem Aufwand.

Testing the behaviour of windows in high speed express train encounters

The increased speeds at which express trains meet has made testing of the bursting strength of railway coach windows necessary. After initial encounter tests on high speed stretches of track further tests

were made in the laboratory with a vibration machine. The vibration machine used for these tests allowed evaluation of windows in a short time and with little outlay.

Essai pour étudier le comportement des fenêtres des trains se croisant à grande vitesse

La vitesse croissante à laquelle se croisent les trains TEE rend nécessaire la vérification de la résistance à l'éclatement de leurs fenêtres. Après des essais de croisement sur des voies à grande vitesse, les essais

ont été poursuivis en laboratoire sur une machine pour essais de vibrations. Cette machine a permis de tester les fenêtres en peu de temps et à faible coût.

1. Einführung

Die Einführung des Intercityverkehrs mit Spitzengeschwindigkeiten von 200 km/h und die beabsichtigte Steigerung der Maximalgeschwindigkeit machten Überlegungen zum Festigkeitsverhalten der Fenster von Reisezugwagen erforderlich. Bei den Fenstern der nicht klimatisierten Fahrzeuge handelt es sich noch um horizontal geteilte, leicht zu öffnende Übersetzfenster. Die Scheiben der klimatisierten Fahrzeuge sind wegen der Klimakonstanzhaltung im Fahrzeug ungeteilt und nicht zu öffnen. Auch die neuen 2.-Klasse-Großraumwagen besitzen wegen ihrer Klimaanlage ungeteilte Scheiben. In allen Fällen handelt es sich um Isolierglasscheiben, bestehend aus zwei miteinander verklebten Verbundsicherheitsgläsern.

Während der Fahrt sind diese Fenster einer vom rollenden Fahrzeug ausgehenden Vibrationsbeanspruchung ausgesetzt, die die Scheiben hauptsächlich zu Resonanzschwingungen anregt. Diesen Schwingungen überlagern sich bei Zugbegegnungen die durch den Gegenzug induzierten Schwingungen, wobei besonders Bug- und Heckwellen Beachtung verdienen. Beim Auftreten starker Druckwechsel stellt sich die Frage des Berstens von Scheiben bei Zugbegegnungen im Hochgeschwindigkeitsbereich auf freier Strecke und im Tunnel. Ferner interessiert die Bauteilsicherheit gegen Bersten und darüber hinaus die Schwingfestigkeit des Systems.

Der experimentellen Lösung dieser Frage widmete sich die Gruppe für nichtmetallische Erzeugnisse der Bundesbahn-Versuchsanstalt München. Nach anfänglichen Begegnungsversuchen [1] auf der Hochgeschwindigkeitsstrecke bei Rheda in Westf., die hauptsächlich der Erfassung der Randbedingungen dienten, wurden die Versuche im Laboratorium weitergeführt. Hierbei leistete eine Vibrationsmaschine, über die im weiteren berichtet werden soll, wertvolle Dienste [2].

2. Versuchseinrichtung

2.1. Vibrationsmaschine

Kernpunkt der Maschine ist ein trichterförmiges Gehäuse, an dessen weites Ende ein Wagenwandelement mit Fensterausschnitt angeschraubt wird (Bild 1). Das schmalere Ende des Trichters mündet in einen prismatischen Bereich, in dem ein großflächiger Kolben hin- und hergeführt wird. In den Fensterausschnitt des Wagenwandelementes wird das zu prüfende Seitenfenster des Reisezugwagens eingesetzt. Das Wagenwandelement kann ausgetauscht werden und läßt sich bei anderen Fenstergrößen durch solche mit geeigneten Ausschnitten ersetzen.

Der Antrieb des Kolbens erfolgt durch ein Kurbelgetriebe, dessen Amplitude durch eine Exzenterverstellung variiert werden kann. Es handelt sich um einen

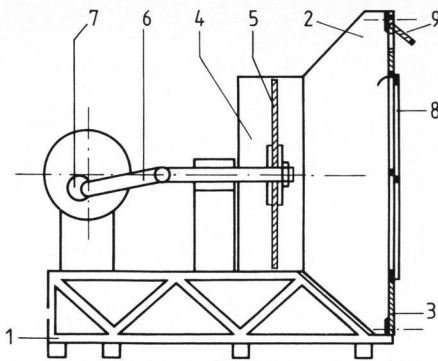


Bild 1. Prinzip der Vibrationsmaschine

- 1: Maschinenfundament
- 2: trichterförmiges Gehäuse
- 3: Platte mit Fensterausschnitt
- 4: Zylinder
- 5: Kolben
- 6: Kurbelantrieb
- 7: Motor mit Schwungscheibe und Exzenter
- 8: Versuchsfenster
- 9: Bypassklappe

Gleichstrommotor mit veränderlicher Drehzahl. Zwischen Motor und Exzenterseibe ist noch ein Stufengetriebe geschaltet. Zur Schonung dieses Getriebes und zur gleichmäßigen Energieübertragung ist die Exzenterseibe als Schwungscheibe ausgebildet.

Bild 2 zeigt die tatsächliche Ausführung, mit der in der Bundesbahn-Versuchsanstalt München seit mehreren Jahren mit Erfolg Fenster geprüft werden. Bei einer Antriebsleistung von etwa 4 kW ermöglicht die Maschine eine Kolbenfrequenz bis zu 45 Hz bei $\pm 2,5$ mm Kolbenhub, von 8 bis 10 Hz bei ± 45 mm Hub und 4 bis 5 Hz bei 50 mm Hub. Die durch die Kolbenbewegung erzeugte Druckamplitude erreicht im unteren Frequenzbereich bis zu $\pm 5\,000$ Pa und bei 15 Hz immerhin noch $\pm 2\,500$ Pa. Im Bereich der Scheibenresonanz fällt der Druck jedoch stark ab, da dann die erregende Luftschwingung in Phase mit der Scheibenschwingung liegt.

Bypassklappen ermöglichen eine gezielte Veränderung des Luftdruckes, was insbesondere dann wichtig ist, wenn die Luftdruckamplitude bei gleichbleibender Frequenz und konstantem Kolbenhub rasch ansteigen soll.

2.2. Meßeinrichtungen

Aus früheren Messungen ist bekannt, daß bei der verwendeten Scheibenbefestigung die maximale Scheibendehnung in der Mitte der der Luftdruckwelle zugewandten Scheibe auftritt. Aus diesem Grunde werden die Dehnungsmeßstreifen (DMS) nur in Scheibenmitte aufgeklebt, wobei besondere für Glas geeignete Klebstoffe verwendet werden. Die Signale der in Scheibenmitte längs und quer angebrachten Dehnungsmeßstreifen werden mit Trägerfrequenz-Meßverstärkern verstärkt und mit einem Speicheroszillografen oder einem Lichtpunktschreiber registriert.

Der auf die Scheibe einwirkende Luftdruck wird mit einer unmittelbar vor der Scheibe angebrachten elektroni-

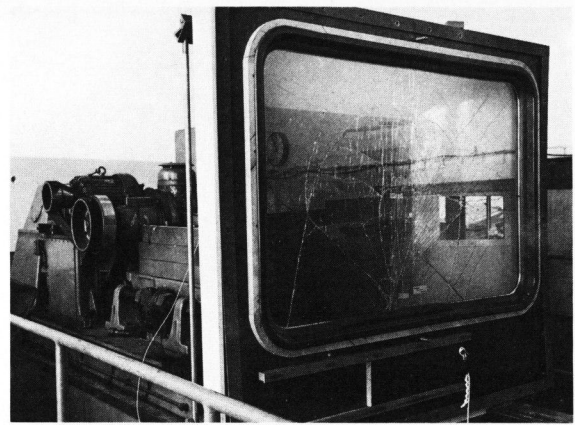


Bild 2. Ansicht der Vibrationsmaschine. Scheibenbruch nach Verschiebung des Elastomerprofils.

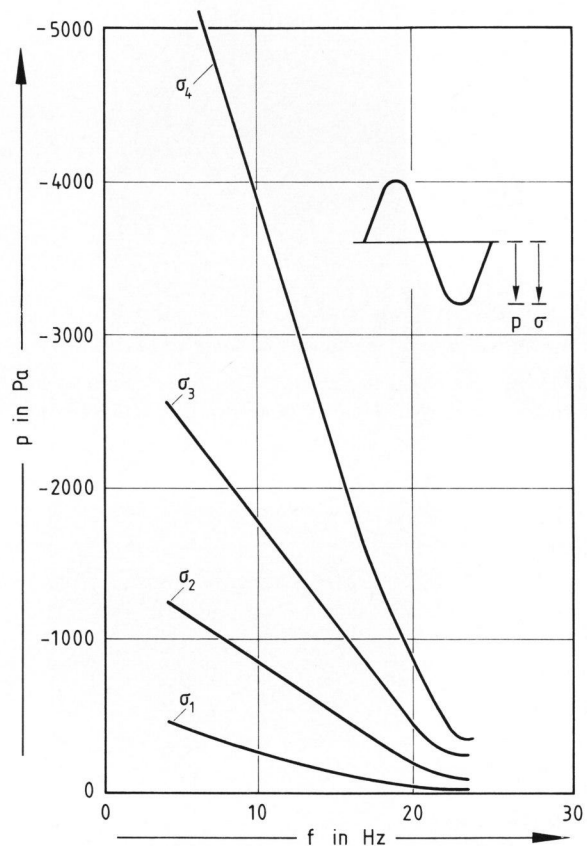


Bild 3. Vergleichsspannung in der Scheibenoberfläche als Funktion von Druck und Frequenz ($\sigma_1 < \sigma_4$).

sehen Druckmeßdose erfaßt. Dadurch lassen sich die Verwendung langer Schlauchmeßleitungen und die diesen Meßleitungen eigene Dämpfung vermeiden. Die zulässige Meßfrequenz des eingesetzten Druckaufnehmers ist auf den Bereich bis 20 Hz begrenzt.

Am Umfang der Schwungscheibe ist ein magnetischer Signalgeber angebracht, so daß pro Schwungscheibenumdrehung eine Meßmarke auf dem Registrierpapier aufgezeichnet wird. Damit gelingt es, die Kolbenstellung

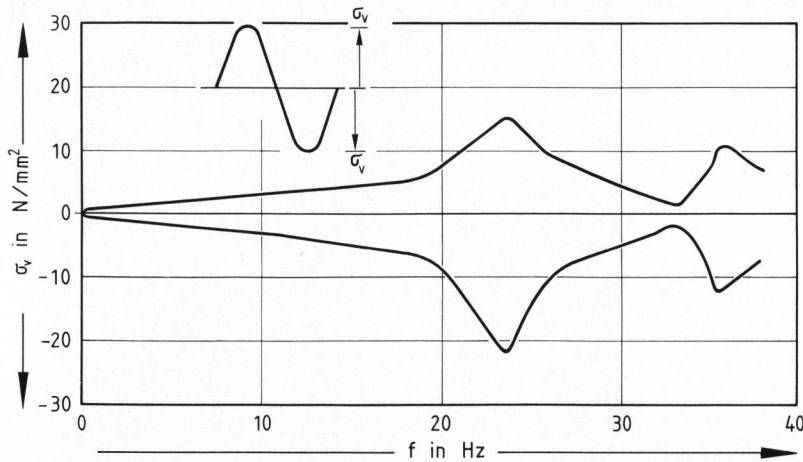


Bild 4. Darstellung der kritischen Frequenzen einer Scheibe. Bei gleichbleibenden Kolbenhub ergeben sich bei kritischen Frequenzen ausgeprägte Spannungsmaxima.

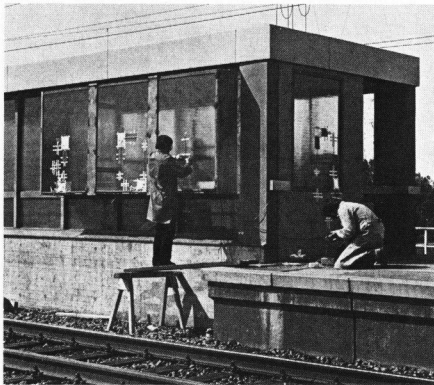


Bild 5. Montage von Dehnungsmeßstreifen an Glasfenstern eines unmittelbar neben einer Schnellfahrstrecke gelegenen Bahnsteigaufganges.

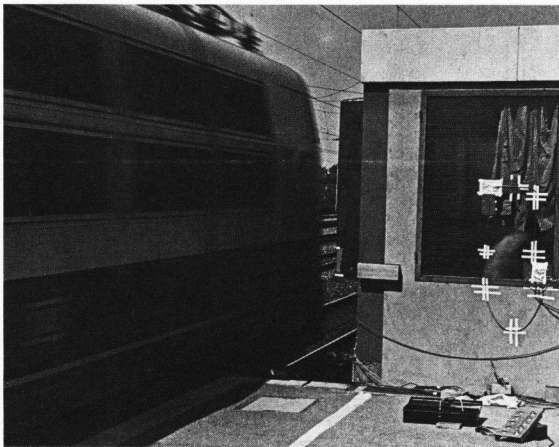


Bild 6. Vorbeifahrt einer Elektro-Lokomotive an einem Bahnsteigaufgang mit vermindertem Lichtraumprofil.

auf dem Papier zu registrieren und aus dem Meßmarkenabstand die Frequenz zu errechnen.

3. Meßergebnisse

Als wesentliches Meßergebnis läßt sich die Abhängigkeit des mechanischen Spannungszustandes der Ober-

fläche in Scheibenmitte von Druckamplitude und Frequenz der Anregung festhalten. Mit den experimentell bestimmten Ergebnissen kann ein Diagramm gezeichnet werden, in dem die Ordinate den Druck und die Abszisse die Frequenz kennzeichnen. Die Kurvenzüge des Diagrammes sind Linien gleicher Vergleichsspannung des Glases (Bild 3). Aus dem Diagramm läßt sich auch erkennen, daß bei bestimmten Frequenzen nur geringe Anregungen erforderlich sind, um in der Scheibe verhältnismäßig hohe mechanische Spannungen zu erzeugen. Im Resonanzgebiet lassen sich deshalb trotz beachtlicher Dämpfung des Fenstersystems hohe Spannungen erzeugen — allerdings bleiben die erreichbaren Luftdrücke gering.

Stellt man am Kurbeltrieb der Fensterprüfmaschine einen Hub von nur 1 bis 2 mm ein, so ist der erreichbare Luftdruck zwar ebenfalls nur gering, doch läßt sich die Frequenz der Anregung kurzzeitig auf 50 Hz steigern. Bei dieser Frequenz ist zwar keine verlässliche Druckanzeige zu erwarten, doch funktionieren Frequenzanzeige und Spannungsmessung mit den Dehnungsmeßstreifen noch einwandfrei. Bild 4 zeigt ein so gewonnenes Diagramm mit dem maximalen Spannungsausgang als Ordinate und der Anregungsfrequenz als Abszisse. Bei gleichbleibendem Kolbenhub zeigen sich hier deutlich zwei Maxima. Wenn auch die Angaben der Spannung nur qualitativen Charakter haben, lassen sich doch die kritischen Frequenzen des untersuchten Fensters erkennen, bei denen besonders starke Schwingungsamplituden zu erwarten sind.

4. Weitere Anwendungen

Die Anwendungsmöglichkeiten sind vielfältig, sie brauchen sich nicht auf Messungen an Fahrzeug-Fensterscheiben zu beschränken.

Die wichtigste und erste Frage ist jedoch meistens die Sicherheit gegen Bersten bei Auftreten hoher Luftdruckwellen, sie kann bei festen Bauwerken ebenso wie bei Fahrzeugen beantwortet werden. Bild 5 zeigt z. B. einen Bahnsteigaufgang, der unmittelbar an einer Strecke mit Schnellfahrten liegt. An diesen Scheiben wurden Deh-

nungsmeßstreifen angebracht, mit denen die Betriebsbeanspruchung bei Vorbeifahrt von Zügen (Bild 6) ermittelt wurde. Nach diesen Messungen überführte man diese Scheiben zur Vibrationsmaschine und steigerte die Druckamplitude bis zum Scheibenbruch. Mit Kenntnis der von vorbeifahrenden Zügen auf die Fensterscheibe einwirkenden Drücke und der dabei auftretenden Spannungen ließ sich die Sicherheit gegen Scheibenbruch ausrechnen.

Häufig gelingt es nicht, die Versuchsscheiben auch bei der maximalen Druckamplitude von $\pm 5\,000$ Pa zu zerstören. In solchen Fällen muß die Sicherheit durch einen Vergleich der mit den DMS festgestellten Vergleichsspannung mit der Biegefestigkeit des Glases abgeschätzt werden. (Die bei einer Begegnung zweier Intercityzüge auf freier Strecke bei einer Relativgeschwindigkeit von 2×200 km/h auftretende Bugwelle erreicht etwa ± 700 Pa.)

Eine weitere Anwendungsmöglichkeit ist die Bewertung von Fensterscheiben bei Dauerbeanspruchung, d. h. bei ständig wiederholten Druckwellen. Es geht dabei um die Aussage, ob und wenn ja, nach welchen Beanspruchungen Scheiben bersten, wenn fortlaufend Zugbegegnungen mit hohen Druckamplituden stattfinden (Wöhler-Versuch). Dabei können auch fabrikneue Scheiben mit solchen verglichen werden, die schon betriebliche Verschleißerscheinungen aufweisen.

Der Vergleich verschiedener Rahmenkonstruktionen läßt sich ebenso einfach durchführen wie die Kontrollen der Dauerfestigkeit von Isolierglasscheiben. Bisher sind Kunststoffrahmen und Aluminiumrahmen miteinander verglichen worden. Bei der Optimierung von Konstruktionen für Neubauserien liefert diese Messung wesentliche Entscheidungshilfen und trägt damit zur Minimierung späterer Reparaturkosten in den Ausbesserungswerken bei.

Da die Vibrationsmaschine mit einer Beregnungsanlage ausgerüstet werden kann, läßt sie sich auch für Dichtigkeitsversuche einsetzen. Scheibenkonstruktionen, die sich unter gleichzeitiger Beregnung und Vibration als dicht erweisen, dürften in der Praxis auch bei starkem Schlagregen dicht bleiben. Es wurden mehrere Versuche durchgeführt, bei denen die Fensterscheiben auch mit

Fahrzeuginnenscheiben besprüht wurden, um die korrosive Einwirkung auf den Scheibenverbund zu bewerten. Bei solchen Versuchen ist jedoch mit Vorsicht zu arbeiten, da der korrosive Angriff sich nicht nur auf das Untersuchungsobjekt erstreckt, sondern auch auf die Maschinen des umgebenden Laboratoriums übergreifen.

Der Einsatz der Vibrationsmaschinen braucht sich nicht auf Fahrzeugscheiben zu beschränken. Er läßt sich auch auf Platten aller Art ausweiten, die nicht aus Glas hergestellt sind. Man kann z. B. auch Auskleidungen und Schallschluckelemente von Tunnelwänden oder Bestandteile von Schallschutzwänden entlang von Schnellfahrstrecken untersuchen. Bei Schallschluckelementen handelt es sich häufig um komplex aufgebaute Teile (z. B. Lochwände mit Steinwollehinterfüterung), die nicht selbstverständlich dauerhaft sein müssen. Druckluftwechselfersuche auf der Fensterprüfmaschine ermöglichen hier eine rasche und wirksame Vorauswahl der zur Debatte stehenden Alternativen.

5. Zusammenfassung

Mit der vorgestellten Vibrationsmaschine für Fensterscheiben lassen sich zwar nicht alle durch Wind und Druckwellen an Fenstern und Platten auftretenden Beanspruchungen naturgetreu nachvollziehen, doch können sinusförmige Schwingungen hoher Amplitude und Frequenz erzeugt werden. Damit lassen sich vor allem Fragen zur Dauerfestigkeit von Platten und Scheiben rasch beantworten. Mit Drücken bis zu $5\,000$ Pa (bei 5 Hz) und mit Frequenzen bis zu 20 Hz (bei 800 Pa) übertrifft die Vibrationsmaschine vergleichbare Prüfstände mit Lüfterantrieb und Ventilumsteuerung. Diese Fähigkeit eröffnet der Maschine einen weiten Anwendungsbereich.

6. Literatur

- [1] Kalkbrenner, E.: Beanspruchung der Fensterscheiben von Reisezugwagen bei hohen Begegnungsgeschwindigkeiten. Eisenbahntechn. Rdsch. **24** (1975) S. 459–462.
- [2] Kalkbrenner, E. und Krügel, W.: Vorrichtung zum Hervorrufen von Vibrationen an Fenstern, insbesondere an Seitenfenstern von Reisezugwagen. Patentanmeldung Nr. P 26 51 959 v. 13. 11. 1976. Anm.: Bundesbahn-Zentralamt Minden.

81R0142