

Zugsanprall im Hauptbahnhof Südwest: ein Beitrag zur dynamischen Untersuchung des Zugsanpralls im Geschwindigkeitsbereich bis 50 km/h

Autor(en): **Grob, Josef / Haidin, Nikola**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **108 (1990)**

Heft 19

PDF erstellt am: **08.08.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-77421>

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.

Sicherheit und Risiko**Zugsanprall im Hauptbahnhof Südwest**

Ein Beitrag zur dynamischen Untersuchung des Zugsanpralls im Geschwindigkeitsbereich bis 50 km/h

Im Auftrag der HB-City-Immobilien AG Zürich wurde durch die Ingenieurunternehmung Emch + Berger Zürich AG im Rahmen der Ingenieurgemeinschaft Zürich Hauptbahnhof Südwest eine Studie über den Zugsanprall [12] durchgeführt. Ein Auszug dieser Arbeit ist im vorliegenden Aufsatz wiedergegeben.

Südwestlich des heutigen Hauptbahnhofs ist die Gleisüberbauung Hauptbahnhof Südwest geplant. Mitten in Zü-

VON JOSEF GROB,
WINTERTHUR UND
NIKOLA HAJDIN,
BELGRAD

rich wird ein Zusatzbahnhof für die SBB, ein privates Dienstleistungszentrum mit Bahnanschluss und ein neues Wohnviertel entstehen. Die Hochbauten werden dabei auf eine Plattform abgestellt, welche die neue Bahnhofhalle nach oben hin abschliesst. Der Abstützung dieser Plattform, zwischen und neben den Geleisen, kommt dabei im Hinblick auf die Tragsicherheit eine entscheidende Bedeutung zu. Für solche Abstützungen im Gleisbereich stellt der Anprall von entgleisten Schienenfahrzeugen ein wichtiges, möglicherweise sogar entscheidendes Gefährdungsbild dar.

Die im Entwurf vorliegende «SBB-Richtlinie für die Anordnung und Ausbildung von Bauwerken bei Gefährdung durch Anprall von Schienenfahrzeugen» gibt wichtige Denkanstösse, hat aber in der vorliegenden Form nur den Charakter von Qualitätsanforderungen. Die in der Richtlinie angegebenen Ersatzlasten entsprechen nicht den bei einem Zugsanprall auftretenden Kräften.

Die über den Geleisen liegende Plattform des Hauptbahnhofs Südwest weist, wegen der Umsteigehalle mit den Rolltreppen und wegen der begrenzten Gesamthöhe trotz der hohen Vertikallasten eine beschränkte Bauhöhe auf. Die Plattform könnte die bei einem Stützensausfall infolge Zugsanprall entstehenden Beanspruchungen nicht mehr verkraften. Somit müssen die

Stützen selbst oder eine vorgelagerte Knautschkonstruktion die bei einem Anprall entstehende Energie aufnehmen können, was eine genaue dynamische Analyse erfordert.

Aufgabenstellung

Die Bedeutung der durchgeführten Studie wird unterstrichen durch die Anzahl der eingetretenen Zugsentgleisungen. Im Bereich des Hauptbahnhofs Zürich wurden nach Angaben der SBB im Mittel über die letzten 10 Jahre folgende Entgleisungen pro Jahr festgestellt:

Entgleisung ohne Zusammenstoss	4
Flankenfahrt mit Entgleisung	1
Auffahrt auf stehenden Zug mit Entgleisung	0,2
Auffahrt auf Prellbock mit Entgleisung	3
Total	8,2/Jahr

Diese Entgleisungen ereigneten sich zwischen den Geleiseenden im heutigen Kopfbahnhof und einer theoretischen Linie, 75 m ausserhalb des geplanten Hauptbahnhofs Südwest. Interessant für einen Zugsanprall auf eine Stütze des Hauptbahnhofs Südwest sind dabei nur die ersten beiden Entgleisungsarten (Entgleisung ohne Zusammenstoss und Flankenfahrt mit Entgleisung).

Bei den meisten dieser Entgleisungen handelt es sich um Unfälle, bei denen nur die Geleise, die Fahrleitung und das rollende Zugmaterial betroffen waren. Noch nie prallte bis heute ein Zug an eine Stütze der alten Perronüberdachung. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Zug nach einer Entgleisung an

eine auf dem Perron stehende Stütze des Hauptbahnhofs Südwest prallt, ist sehr klein und dürfte schätzungsweise für den Fall der Flankenfahrt etwa ein Promille und für die übrigen Entgleisungsfälle etwa ein Viertel Promille betragen. Folglich dürfte die Eintretenswahrscheinlichkeit für ein solches Ereignis im Bereich von 500 Jahren liegen.

Im Hauptbahnhof Zürich verkehren fast nur Personen- und Schnellzüge, bei denen auch die schwerste SBB-Schnellzugslokomotive Re 6/6 (120t, 11000 PS) in Einfach- und Doppeltraktion eingesetzt wird. Die Fahrgeschwindigkeit wird im Bahnhofbereich automatisch überwacht mit 40 km/h oder 11,1 m/sec. Bei der durchgeführten Studie über den Zugsanprall wurde deshalb von folgenden Gefährdungsbildern ausgegangen:

- Frontaler Anprall eines Schnellzugs mit einer oder zwei Loks Re 6/6 und Wagen EW IV im Geschwindigkeitsbereich zwischen 4 und 15 m/sec.
- Schiefer Anprall eines Schnellzugs im Geschwindigkeitsbereich bis 15 m/sec. (im vorliegenden Aufsatz nicht behandelt)

Harter und weicher Stoss

Bei einer dynamischen Analyse des Anpralls wird zwischen weichem und hartem Stoss oder Anprall unterschieden. Beim weichen Stoss weist der anprallende Körper eine bedeutend grössere Verformbarkeit als der gestossene Bauteil oder Körper auf. Die Verformungen des gestossenen Körpers können unter diesen Umständen bei der Berechnung der Stoss- oder Anprallkraft vernachlässigt werden, womit die Interaktion zwischen anprallendem und gestossenem Körper entfällt. Das heisst, die Berechnung des Stossvorganges kann mit zwei getrennten dynamischen Untersuchungen durchgeführt werden:

- Dynamische Analyse des anprallenden Körpers (oder eines Systems von anprallenden Körpern) und Berechnung der Stosskraft, inklusive Grösse und zeitlichem Verlauf, unter der Voraussetzung eines *starr gestossenen Körpers*.
- Dynamische Analyse des gestossenen Körpers oder Bauteils für eine in Grösse und zeitlichem Verlauf *gegebene Stosskraft*.

Beim harten Stoss ist eine solche Trennung nicht möglich und die dynamische Untersuchung im Grunde genommen komplizierter. Zu welcher Stossart ein gegebener Fall gehört, hängt in erster Linie vom Verhältnis der Verformungen des anprallenden und gestossenen Körpers ab, d.h. von der Interaktion zwischen dem anprallenden Körper und dem gestossenen Bauteil.

Der Zugsanprall auf eine Tragkonstruktion kann unter folgenden Voraussetzungen als weicher Stoss behandelt werden:

- Die Tragkonstruktion weist eine relativ hohe Steifigkeit und einen genügend grossen Bruchwiderstand auf, so dass die Tragkonstruktion beim Zugsanprall nur relativ kleine elastische bzw. plastische Verformungen erleidet.
- Die gesamte kinetische Energie des Zuges wird durch plastische Verformungen des anprallenden Körpers, d.h. des Zuges, aufgenommen. Ist dies nicht der Fall, muss auch die Verformung der gestossenen Tragkonstruktion in die Berechnung eingesetzt werden.

Im folgenden wird der Zugsanprall in den vorher genannten zwei Schritten für elastisch-plastisches Verhalten von Zug und Tragkonstruktion durchgeführt.

Anprallkraft-Zeit-Funktionen

Dynamisches Rechenmodell

Während über den Anprall von Strassenfahrzeugen und Flugzeugen verschiedene theoretische und experimentelle Arbeiten durchgeführt wurden, liegen über den Zugsanprall bis heute keine systematischen Untersuchungen vor. Das in [1] beschriebene vereinfachte Energiemodell liefert lediglich einen statischen Ersatzwert der Anprallkraft, wobei die Verformungen der anprallenden Körper angenommen werden. Dieses einfache Verfahren bietet leider keine Information über den zeitlichen Verlauf der Anprallkraft und somit keinerlei Möglichkeit für eine dynamische Analyse des gestossenen Bauteils. Ausserdem ist die Grösse der Anprallkraft von geschätzten Verformungen abhängig, die nicht konstant sondern ihrerseits eine Funktion der kinetischen Energie, d.h. der Geschwindigkeit der entsprechenden Massen sind.

Da für den Zugsanprall kaum brauchbare Versuchsergebnisse vorliegen, wird im folgenden für den Zugsanprall ein diskretes Masse-Feder-Modell verwendet, das sich auf die Analyse der Tragstruktur von Lokomotiven und Wagen stützt. Beim Zugsanprall treten relativ

grosse Verformungen im plastischen Bereich auf, die bei den üblichen statischen und dynamischen Berechnungen von Lokomotiven oder Wagen nicht berücksichtigt werden. Bis heute gibt es auf diesem Gebiet nur wenige Untersuchungen, z.B. [9].

Die Massen von Lokomotive und Wagen eines Zuges werden als konzentrierte Massen angenommen. Das Verformungsverhalten von Lokomotive und Wagen wird durch fiktive, diskrete Federelemente (E-Elemente) beschrieben, welche die einzelnen Zugmassen miteinander verbinden (vgl. Bild 1). Dabei wird vorausgesetzt, dass sich alle Glieder der Kette in gerader Linie auf der x-Achse bewegen.

Das Verhalten der Federelemente wird durch Kraft - Verformungs - Diagramme dargestellt (vgl. Bild 2), wobei F die Federkraft und δ die Verformung der Feder darstellen. Die Form dieser Diagramme hängt von der Verformbarkeit von Lokomotive und Wagen ab und wird später behandelt. Die Verformungen der Federelemente E_i und E_{i-1} sind gegeben durch:

$$(1) \quad \begin{aligned} \delta_i &= w_{i+1} - w_i \\ \delta_{i-1} &= w_i - w_{i-1} \end{aligned}$$

Dabei ist w_i die axiale Verschiebung der Masse m_i . Der Zusammenhang zwischen Federkraft und Verformung ist durch irgendeine Federkennlinie gegeben (vgl. Bild 2). Damit ergeben sich folgende Federkräfte:

$$(2) \quad \begin{aligned} F_i &= F(\delta_i) \\ F_{i-1} &= F(\delta_{i-1}) \end{aligned}$$

Mit den auf das Massenelement m_i wirkenden Kräften nach Bild 3 erhält man folgende Bewegungsgleichung:

$$(3) \quad m_i * \ddot{w}_i - F_i + F_{i-1} = 0$$

Das System dieser Differentialgleichungen für $i = 1, 2, \dots, I$ kann in Matrixform geschrieben werden.

$$(4) \quad [M] * (\ddot{w}) + [F] = 0$$

Ist das Gleichungssystem (4) im Zeitpunkt t_n ($n = 1, 2, 3, \dots, N$) erfüllt, so gilt:

$$(5) \quad {}^{t_n} [M] * (\ddot{w}) + {}^{t_n} [F] = 0$$

Ebenso erhält man für den Zeitpunkt $t_n + \Delta t$:

$$(6) \quad {}^{t_n + \Delta t} [M] * (\ddot{w}) + {}^{t_n + \Delta t} [F] = 0$$

Durch die Entwicklung in eine Taylorreihe ergibt sich daraus bei Vernachlässigung der Glieder höherer Ordnung:

$$(7) \quad {}^{t_n} [M] * (\ddot{w}) + [M] * (\Delta \ddot{w}) + {}^{t_n} [F] + [\Delta F] = 0$$

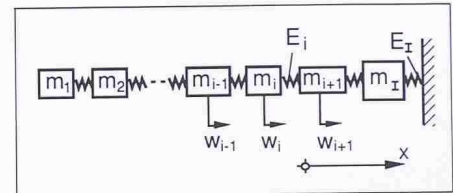


Bild 1. Rechenmodell für Zugsanprall

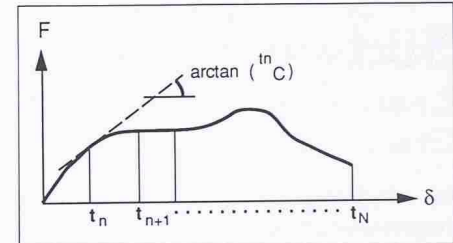


Bild 2. Federkennlinie

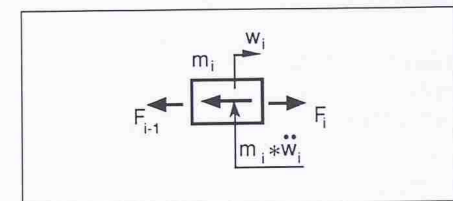


Bild 3. Kräfte auf Massenelement

$$(8) \quad \begin{aligned} \text{mit } (\Delta \ddot{w}) &= {}^{t_n + \Delta t} (\ddot{w}) - {}^{t_n} (\ddot{w}) \\ (\Delta w) &= {}^{t_n + \Delta t} (w) - {}^{t_n} (w) \end{aligned}$$

Für ein Δt in bezug auf die Dauer des Anpralls kleines Zeitinkrement Δt gilt die folgende lineare Beziehung:

$$(9) \quad \Delta F_i = C_i * (\Delta \delta_i) = C_i * {}^{t_n} (\Delta w_{i+1} - \Delta w_i)$$

Darin ist C_i die Steigung der Tangente für δ_i im Zeitpunkt $t = t_n$, Bild 2. Durch Einsetzen des Ausdruckes (9) in die Gleichung (7) erhält man unter Berücksichtigung von Gleichung (5):

$$(10) \quad [M] * (\Delta \ddot{w}) + {}^{t_n} [C] * (\Delta w) = 0$$

Dabei gelten folgende Anfangsbedingungen:

$$(11) \quad \begin{aligned} {}^{t=0} (w) &= 0 \\ {}^{t_n} (\Delta w) &= 0 \\ {}^{t=0} (\dot{w}) &= (v_0) \\ {}^{t_n} (\Delta \dot{w}) &= {}^{t_n} (\dot{w}) \end{aligned}$$

Die Anprallkraft $F^*(t)$, welche auf das als starr angenommene Bauteil übertragen wird, ist mit der Federkraft F_i des Federelementes E_i identisch, solange die Geschwindigkeit w_i grösser als Null ist. Kommt die Masse m_i zum Stillstand, wird das Federelement E_i überbrückt und somit die Federkraft F_{i-1} direkt auf das starre Bauteil übertragen. Diese Überbrückung der Feder kann durch Einführung eines starren Kuppelungsstabes berücksichtigt werden (vgl. Bild 4).

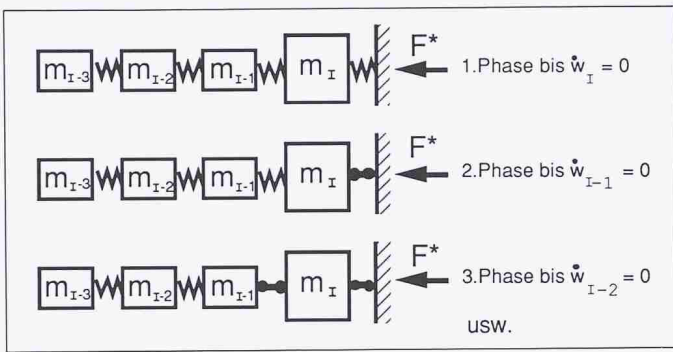


Bild 4. Schrittweise Berechnung

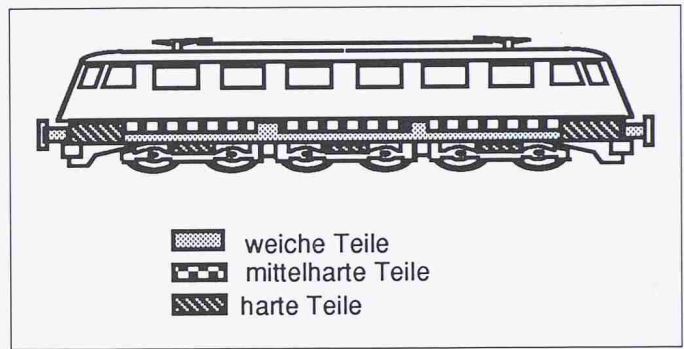


Bild 5. Lokomotive Re 6/6

Die Lösung der Differentialgleichungen (11) mit konstanten Koeffizienten und gegebenen Anfangsbedingungen kann entweder numerisch oder analytisch durchgeführt werden. Für die numerische Lösung kommen Verfahren in Frage, die mit Zeitinkrementen arbeiten, wie z.B. das bekannte Verfahren von Newmark. Bestehende Computerprogramme enthalten derartige Lösungsverfahren und können zur Analyse des Anprallvorgangs benutzt werden. Bedingung ist, dass beim Anhalten der Massen die Überbrückungen der betreffenden Federelemente (Bild 4) durch gezielte Massnahmen im Programm berücksichtigt werden können.

Federkennlinien

Eine wissenschaftlich fundierte Untersuchung des Zugsanpralls kann nur auf Grund des Verformungsverhaltens der Tragkonstruktion von Lokomotiven und Wagen durchgeführt werden.

Lokomotive Re 6/6

Leider gibt es keine experimentellen Untersuchungen, insbesondere im Massstab 1:1, über das Verformungsverhalten von Lokomotiven im Falle eines Anpralls. Zwar geben verschiedene Fotos und Protokolle von Zugsunfällen ein globales Bild über das Verformungsverhalten von Lokomotiven, wesentliche Daten über die Anprallwirkungen sind jedoch kaum vorhanden. Vor allem fehlen Angaben über die Verformungswege einzelner Lokomotivteile und auch der ganzen Lokomotive, sowie über die kurz vor dem Anprall gefahrene Zugs- bzw. Lokgeschwindigkeit.

Die Berechnung der Federkennlinien beruht, ähnlich wie bei der Untersuchung des Flugzeuganpralls, auf einer theoretischen Analyse des Verformungsverhaltens der Lokomotive beim Anprall. Als Unterlagen für die Lokomotive Re 6/6 dienen Konstruktionspläne der Schweiz. Lokomotiv- und Maschinenfabrik (SLM), Winterthur, sowie verschiedene Gespräche mit Herrn Vogel von der Entwicklungsab-

teilung der SLM. Die Tragkonstruktion einer Lokomotive besteht, stark vereinfacht, aus dem Lokrahmen und drei Drehgestellen. Es handelt sich dabei um ein sehr komplexes System verschiedenartiger Bauteile, welche ein stark unterschiedliches Verformungsverhalten aufweisen. Dies führt zu folgender Klassifikation der tragenden Bauteile des Lokrahmens (Bild 5):

- weiche, relativ leicht verformbare Teile: Puffer und Längsträger des Lokrahmens im Bereich der Drehgestelle (bis zu deren Anschlag an die Querträger des Lokrahmens).
- mittelharte Teile, die erst unter höherer Beanspruchung verformt werden: Querträger des Lokrahmens, Quer- und Längsträger der Drehgestelle sowie Motorhalter.
- harte Teile: Stossbalken (äussere Querträger des Lokrahmens) und Antriebsmotoren.

Für jedes Bauteil wird zuerst die Fliesskraft F_y unter Berücksichtigung des lokalen Beulens der Bleche ermittelt. Dabei geht man von der reduzierten mitwirkenden Querschnittsfläche A_e nach Norm SIA-161 (1979) aus:

$$(12) F_y = \sigma_y \cdot A_e (\sigma_y = \text{Flie遢spannung})$$

Statt des üblichen Rechenwertes für die Flie遢spannung σ_y des Stahles Fe 360 von 235 N/mm² wird hier ein Rechenwert von 290 N/mm² entsprechend etwa der 90%-Fraktile verwendet, um auf der sicheren Seite zu bleiben. Dies scheint auch dadurch berechtigt, dass die Flie遢grenze mit zunehmender Verformungsgeschwindigkeit [11] ansteigt. Trotzdem dürfte beim Zugsanprall die Auswirkung der höheren dynamischen Flie遢grenze gering sein, da dieser Anstieg sowohl für den stossenden (Lokomotive) als auch für den gestossenen Körper (Bauteil) zutrifft. Anschliessend wird das Tragverhalten der Bauteile nach Ausbildung plastifizierter Querschnitte im postkritischen Bereich abgeschätzt. Die dabei typische Entfestigung kann mittels eines verhältnismässig einfachen Rechenmodells (Bild 6) abgeschätzt werden.

Das in Bild 6 gezeigte Kraft-Verformungsdiagramm wird für die Berechnung der Anprallkraft-Zeit-Funktion vereinfacht, indem die $F-\Delta l$ -Funktion (Bild 6) durch ein rechteckiges Diagramm $F_y-\Delta l_R$ ersetzt wird. Dabei wird die Kraft F mit dem Maximalwert F_y beibehalten und der zugehörige Stauchweg Δl_R aus der Bedingung gleicher Verformungsarbeit ermittelt:

$$(13) F_y \cdot \Delta l_R = \int_0^{\Delta l-\max} F \cdot d(\Delta l)$$

bzw.

$$(14) \Delta l_R = \frac{1}{F_y} \int_0^{\Delta l-\max} F \cdot d(\Delta l)$$

Eine solche Annahme liegt in Bezug auf die Berechnung der Anprallkraft auf der sicheren Seite.

Für die Berechnung der $F-\delta$ -Diagramme wird die Lokomotive entsprechend der Anordnung von drei Drehgestellen in drei Teile unterteilt, d.h. als dynamisches Modell der Lokomotive werden drei Massenpunkte mit entsprechenden Federelementen angenommen (Bild 7). Die Kraft-Verformungs-Diagramme sind aus den Anteilen der einzelnen Tragelemente zusammengesetzt. Entsprechend der hinsichtlich Steifigkeit und Tragwiderstand unterschiedlichen Bauteile ergeben sich stufenförmige Federkennlinien; bei Entlastung verhalten sich die Federn elastisch. Die elastischen Verformungen sind relativ klein und beeinflussen die Resultate nur unwesentlich.

Diese Federkennlinien werden für die dynamische Untersuchung des Zugsanpralls verwendet. Man erkennt bereits aus diesen Diagrammen, dass die Lokomotive Re 6/6 und vermutlich auch viele andere bezüglich Anprall schlecht konzipiert sind.

Schnellzugwagen EW IV

Beim Zugsanprall spielen die weniger harten Schnellzugwagen eine untergeordnete Rolle. Die Schnellzugwagen

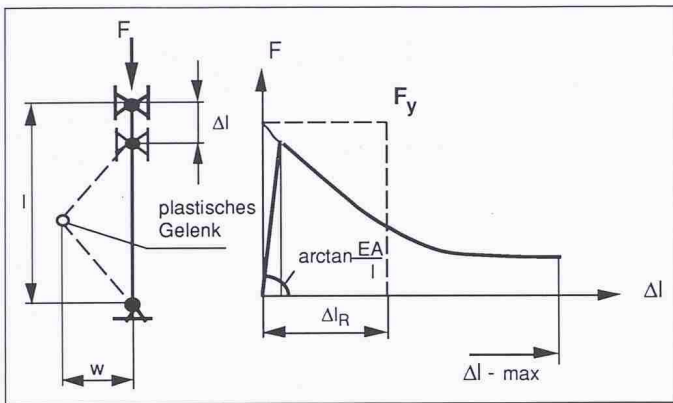


Bild 6. Tragverhalten im postkritischen Bereich

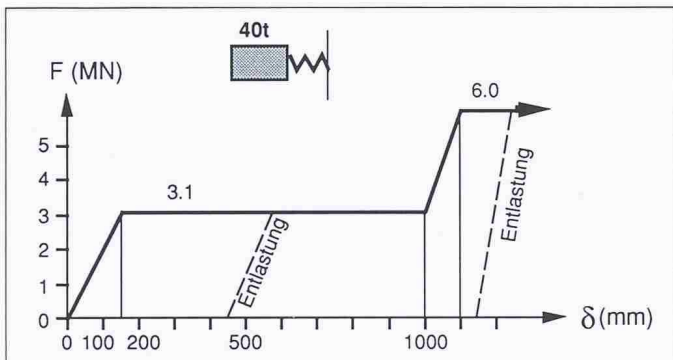


Bild 8. Federkennlinien für den Waggon EW IV

Bild 7. Federkennlinien für die Lokomotive Re 6/6

werden durch ein Einmassen-Feder-Modell simuliert. Die Masse eines mit Reisenden vollbesetzten Waggons beträgt 43 Tonnen. Für die dynamische Berechnung wurde eine Masse von 40 Tonnen inklusive Reisende angenommen.

Eine zur Analyse der Lokomotive Re 6/6 analoge Untersuchung ergibt die in Bild 8 dargestellte Federkennlinie für den Waggon EW IV. Die dafür erforderlichen Unterlagen wurden von Herrn Kummer, Firma Schindler Waggon Pratteln AG, zusammengestellt.

Anprallkraft-Zeit-Funktionen

Die numerische Berechnung der Anprallkraft-Zeit-Funktionen kann nach der früher beschriebenen Theorie mit Hilfe des Computerprogramms ADINA durchgeführt werden. Dabei erfolgt die Berechnung für verschiedene Anprallgeschwindigkeiten unter Verwendung der in Bild 7 und 8 dargestellten Federkennlinien. Die Ergebnisse dieser dynamischen Berechnung sind in den Bildern 9 bis 12 für Schnellzüge mit einer bzw. zwei Lokomotiven Re 6/6 für Anprallgeschwindigkeiten bis 15 m/sec dargestellt.

Für Anprallgeschwindigkeiten über 15 m/sec oder 54 km/h kommt die erste

Masse (bis zum vollständigen Ausnutzen der Federkennlinie von Bild 7) nicht mehr zum Stillstand. Die aufgrund der Analyse der Lokomotivkonstruktionen erhaltenen Federkennlinien gewährleisten keine vollständige «Vernichtung» der kinetischen Energie für Anprallgeschwindigkeiten über 15 m/sec.

Ein Zugsanprall führt bei höheren Geschwindigkeiten zu weiteren Verformungen der Lokomotive (mit vorläufig noch unbekanntem Verlauf der Federkennlinie) und/oder zu grösseren Verformungen der gestossenen Konstruktion. Mit den letztgenannten Verformungen entsteht zwischen dem anprallenden Zug und der gestossenen Konstruktion eine Interaktion, die rechnerisch durch ein erweitertes Modell erfasst werden kann. In einem solchen Modell (Bild 13) wird die gestossene Trag- bzw. Knautschkonstruktion durch eine konzentrierte Masse m_k und eine elastoplastische Feder E_k dargestellt.

Überprüfung der Stützen

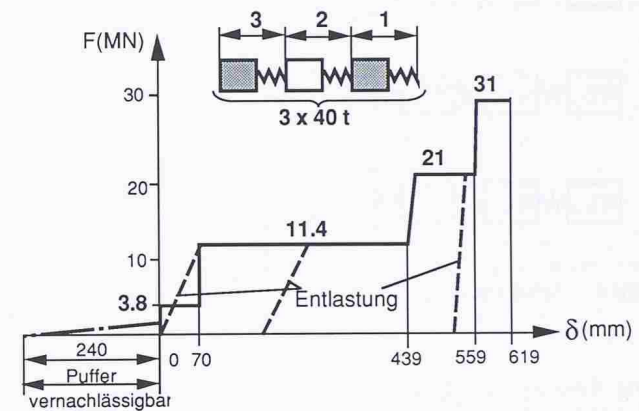
Nachdem bisher Anprallkraft-Zeit-Funktionen für starre gestossene Kör-

per ermittelt wurden, geht es nun um die Untersuchung der gestossenen Körper, d.h. der Stützen im Geleisebereich des Hauptbahnhof Südwest. Die am meisten exponierten Randstützen werden dabei mittels einer dynamischen Berechnung für die nach Bild 9 bis 12 in Grösse und zeitlichem Verlauf gegebenen Anprallkräfte überprüft.

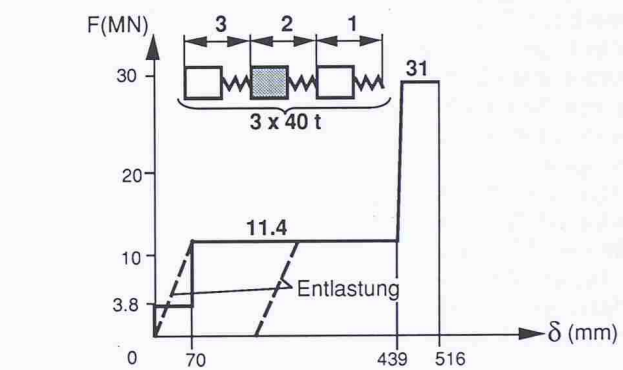
Es ist vorgesehen, die Stützen in Baustahl Fe 510 auszuführen und zwecks Aussteifung und Verbesserung des Brandverhaltens auszubetonieren. Für die Überprüfung wird gemäss Norm SIA-161 (1979) eine rechnerische Fließgrenze des Stahls von 355 N/mm² angenommen und um den Widerstandsfaktor 1,15 reduziert. Diese Fließgrenze definiert zusammen mit den bekannten Fließbedingungen nach von Mises und mit den Abmessungen die rechnerischen Querschnittswiderstände der Stützen. Der relativ geringe Widerstand der Betonfüllung wird nicht berücksichtigt. Das Tragverhalten der Randstützen bezüglich frontalem Anprall ist in Bild 14 dargestellt.

Die dynamische Untersuchung der Randstütze wird vereinfachend am Einmassenmodell (gemäss Bild 15) durchgeführt. Als Federkennlinie wird die in Bild 14 dargestellte Kraft-Ver-schiebungs-Funktion angenommen.

Federelemente 1 und 3



Federelement 2



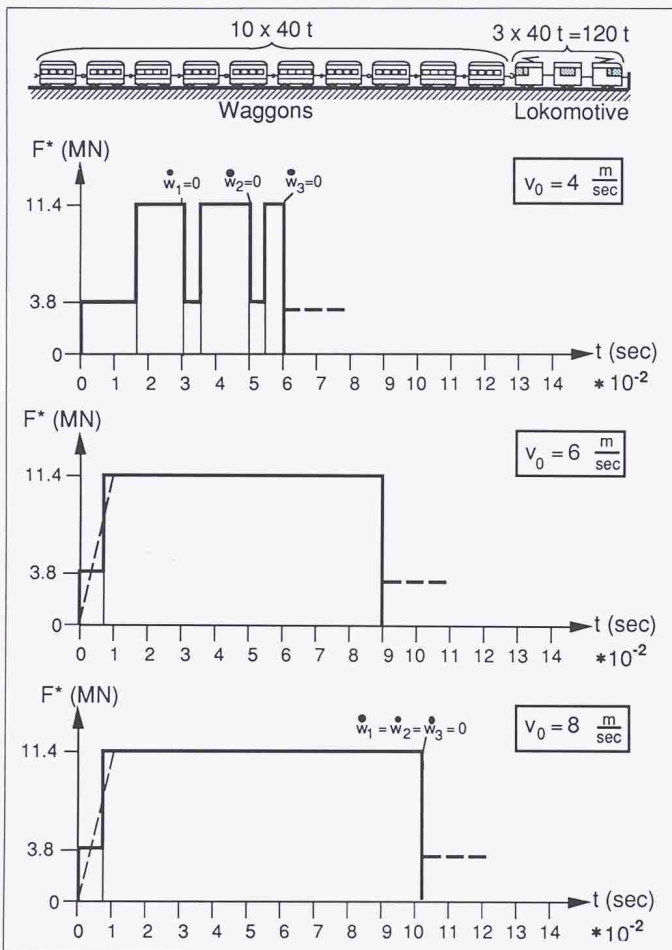


Bild 9. Anprallkraft-Zeit-Funktion (1 Lokomotive; $v_0 \leq 8 \text{ m/sec}$)

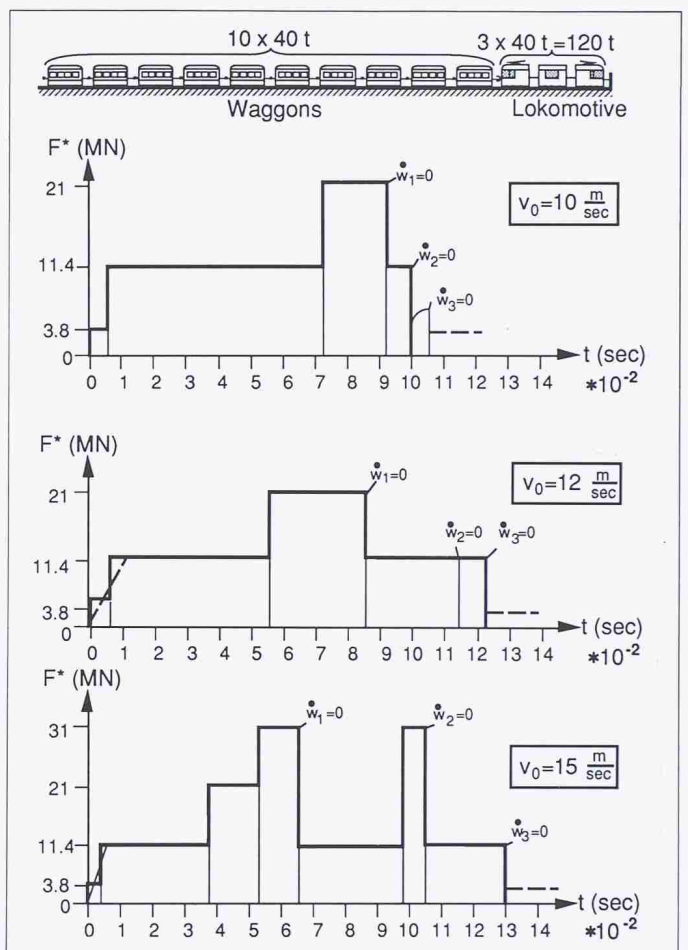


Bild 10. Anprallkraft-Zeit-Funktion (1 Lokomotive; $v_0 > 8 \text{ m/sec}$)

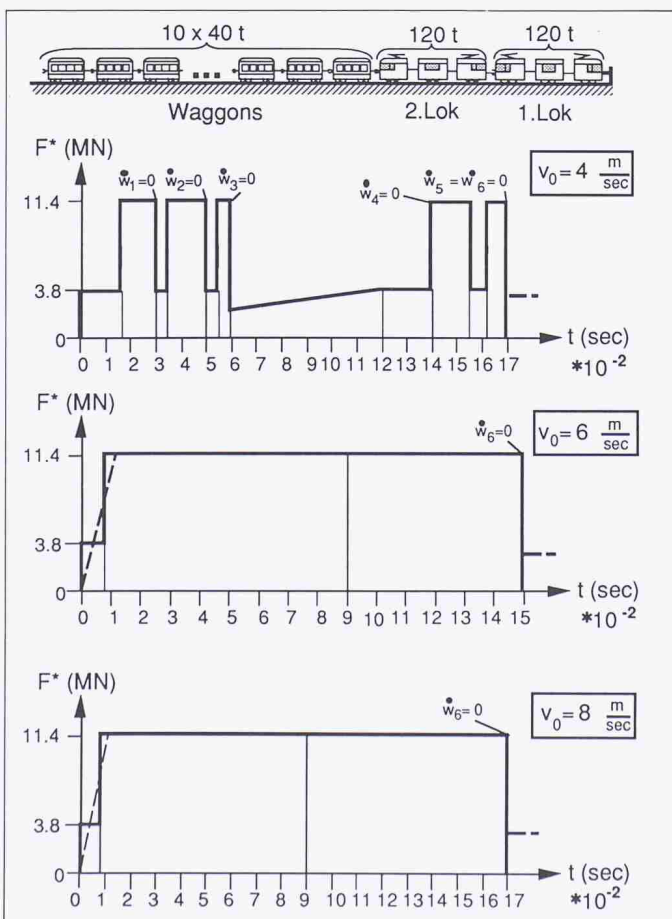


Bild 11. Anprallkraft-Zeit-Funktion (2 Lokomotiven; $v_0 \leq 8 \text{ m/sec}$)

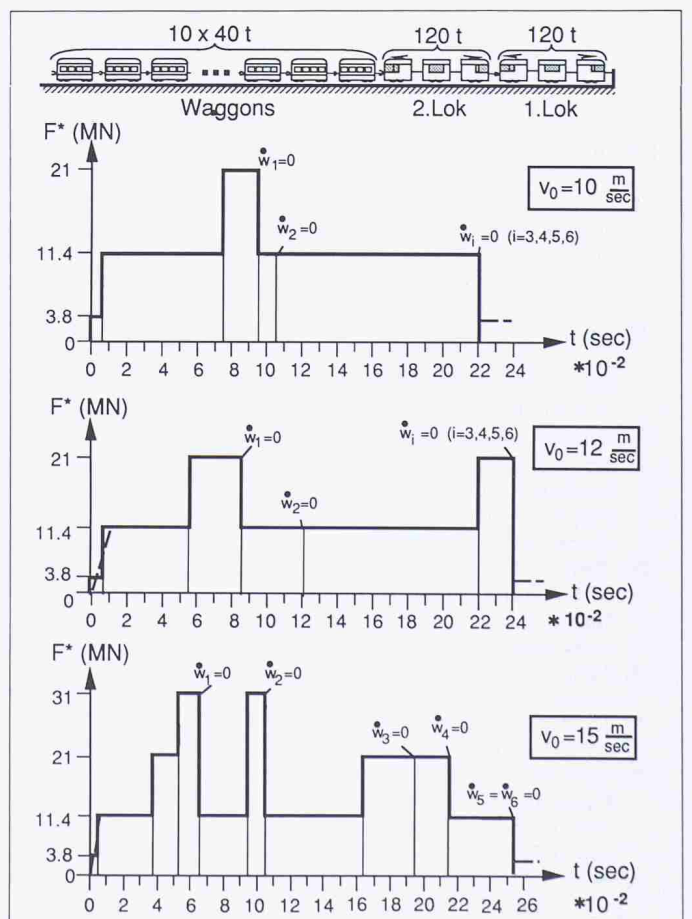


Bild 12. Anprallkraft-Zeit-Funktion (2 Lokomotiven; $v_0 > 8 \text{ m/sec}$)

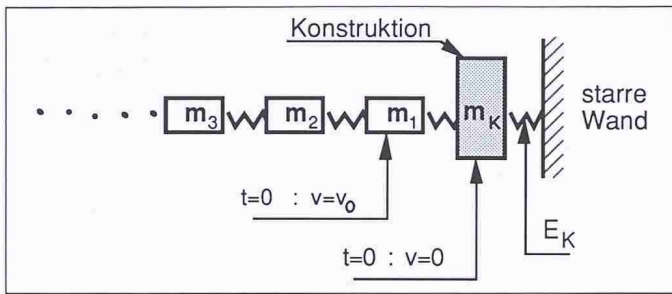


Bild 13. Dynamisches Modell für verformbare gestossene Konstruktion

Bild 14. Tragverhalten der Randstützen (Stosskraft/Verschiebungs-Funktion)

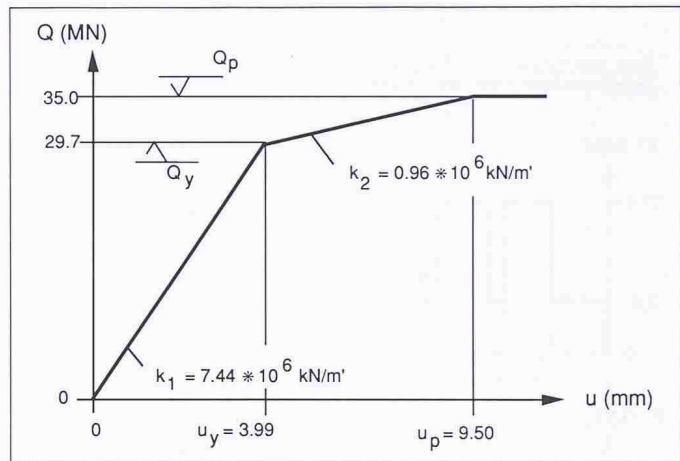
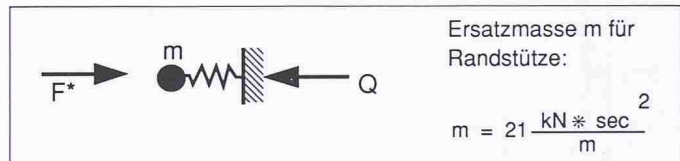


Bild 15. Dynamisches Modell der Randstütze



Die für die Stosskraft massgebende Ersatzmasse m der Randstütze ergibt sich als Anteil ihrer Gesamtmasse inklusive Betonfüllung.

Ein Vergleich der in den Bildern 9 bis 12 dargestellten Anprallkraft-Zeit-Funktionen zeigt, dass der Zugsanprall mit zwei Lokomotiven gegenüber dem Anprall mit einer Lokomotive zwar zu einer Verlängerung der Stoszeit aber nicht zu grösseren Anprallkräften führt. Ausserdem ist der erste entscheidende Bereich der Anprallkraft-Zeit-

Funktionen (mit den Maximalkräften) in beiden Fällen identisch. Daraus folgt, dass man sich hier bei der dynamischen Berechnung der Stütze auf den Zugsanprall mit einer Lokomotive beschränken kann.

Die Ergebnisse der dynamischen Berechnung sind in den Bildern 16 und 17 für Anprallgeschwindigkeiten von 10 m/sec und 15 m/sec dargestellt. Bei einem Anprall mit 10 m/sec wird die Fliesskraft der Stütze nicht erreicht.

Die Beanspruchungen der Stützen liegen im elastischen Bereich; somit sind die Stosskraft $Q(t)$ und die Verschiebung $u(t)$ in diesem Fall miteinander gekoppelt (Bild 16 oben).

Bei einem Anprall mit 15 m/sec erreichen die Beanspruchungen der Stütze den elasto-plastischen Bereich. Bild 16 unten zeigt die Stosskraft $Q(t)$, während Bild 17 die Verschiebung $u(t)$ und den Zusammenhang zwischen dieser Verschiebung und der Stosskraft (Bild 17 oben) wiedergibt.

Die Ergebnisse der dynamischen Berechnung lassen folgende Schlussfolgerungen zu:

- Für Anprallgeschwindigkeiten bis 10 m/sec (36 km/h) bleibt die Stütze unbeschädigt, d.h. ohne bleibende Deformationen.
- Bei einer Anprallgeschwindigkeit von 15 m/sec (54 km/h) wird die Stütze leicht beschädigt. Die bleibende rechnerische Verschiebung liegt bei 4,90 mm. Beim Zugsanprall treten rechnerische Verschiebungen bis maximal 9,60 mm auf, und die zugehörigen Stahldehnungen liegen weit unterhalb der Duktilitätsgrenze des Stahles.

Literatur

[1] Roos P., Berchtold A., Müller J.: Ausserordentliche Einwirkungen auf Tragwerke aus dem Bahnbetrieb. Schweizer Ingenieur und Architekt, H. 20/1988

[2] Riera, J.D.: Basic Concepts and Load Characteristics in Impact Problems. Introductory Report RILEM-CEB-IABSE-IASS-Interassociation Symposium on «Concrete Structures under Impact and Impulsive Loading». Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM), Berlin, (Ed.: G. Plank), pp. 7-29, June 1982

[3] Riera, J.D.: On the Stress Analysis of Structures Subjected to Aircraft Impact Forces. Nuclear Engineering and Design, Vol 8, pp. 415-426, 1968

[4] Labra, J.J.: Protective Structure Response to Vehicle Impact. ASCE Journal of the Structural Division, pp. 991-1005, June 1979

[5] Campbell, K.L.: Energy Basis for Collision Severity; presented at the 3rd International Conference on Occupant Protection, July 1979

[6] Wolf J.P., Bucher K.M., Skrikerud P.E.: Response of Equipment to Aircraft Impact. Nuclear Engineering and Design, Vol 47, No. 1, pp. 160-193, May 1978

[7] Zorn, N.F.: Ein Ansatz zur Bestimmung der Versagenswahrscheinlichkeit von Stahlbetonbauteilen bei Impulsbelastung. Technische Universität München, Institut für Bauingenieurwesen III, Lehrstuhl für Massivbau, Dissertation, 1983

[8] Ammann, W.: Stahlbeton- und Spannbeton-Tragwerke unter stossartiger Belastung. Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, Bericht Nr. 142, Juni 1983

[9] Macaulay M.A., Redwood R.G.: Small Scale Model Railway Coaches under Impact. The Engineer, No. 218, Dec. 1964

[10] Redwood, R.G.: On the Buckling of Thin Walled Tubes under Axial Impact. Journal of the Royal Aeronautical Society, Vol 68, Technical Notes 1964

[11] Manjoine, M.J.: Influence of Rate of Strain and Temperature on Yield Stresses of Mild Steel. Journal of Applied Mechanics No. 11, Paper A 211-A 218, 1964

[12] Hajdin N., Grob J.: Studie Zugsanprall. Bericht für die HB-City-Immobilien AG Zürich, 1989

Schlussbemerkungen

Die Abschätzung der Einwirkungen aus Zugsanprall wird wegen der Erhöhung von Zugsdichten und Fahrgeschwindigkeiten und wegen der Zunahme von Bauwerken an oder über Bahnanlagen zusehends wichtiger.

Das knapper werdende Bauland und die zentrale Lage vieler auf Stadtgebiet

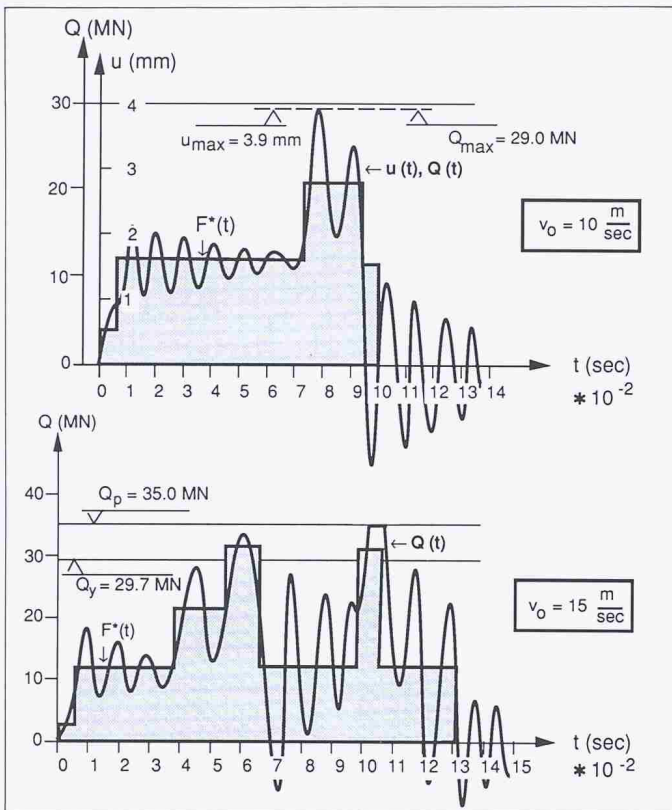


Bild 16. Frontaler Anprall: Stosskraft $Q(t)$ und Verschiebung $u(t)$ für $v_0 = 10 \text{ m/sec}$; Stosskraft $Q(t)$ für $v_0 = 15 \text{ m/sec}$

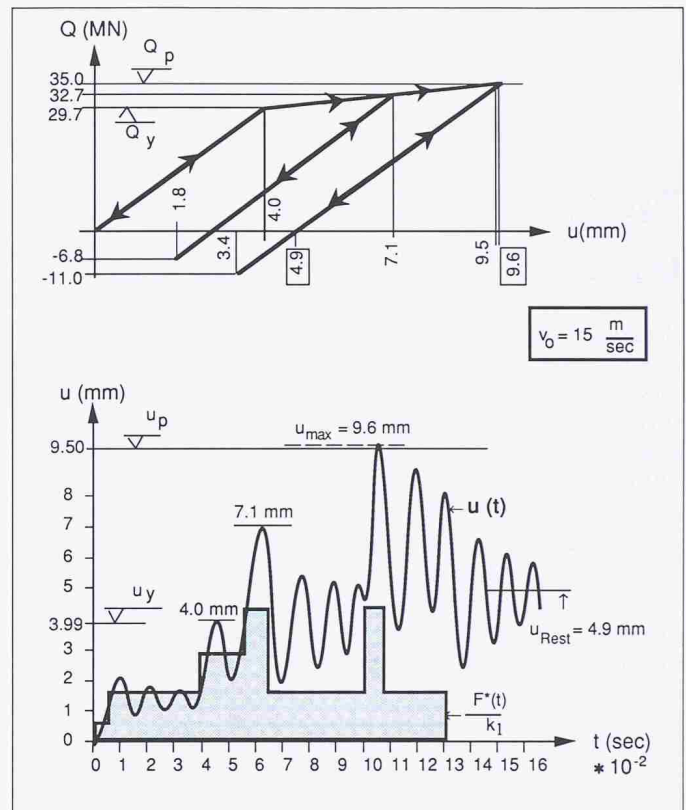


Bild 17. Frontaler Anprall: Zusammenhang zwischen Stosskraft $Q(t)$ und Verschiebung $u(t)$ für $v_0 = 15 \text{ m/sec}$; Verschiebung $u(t)$ für $v_0 = 15 \text{ m/sec}$

liegender Bahnanlagen wird zu vermehrten Geleiseüberbauungen führen. Beim Einsturz eines solchen Bauwerks müsste mit hohen Personen- und Sachschäden sowie einschneidenden Betriebsstörungen gerechnet werden. Die-

ses hohe Schadenpotential erfordert die Berücksichtigung des Gefährdungsbildes Zugsanprall mit direktem Anprall der Lokomotive(n). Für Bauwerke mit geringeren Schadenpotentialen kommen weniger extreme Gefährdungsbilder - z.B. Zugsanprall ohne direkten Anprall der Lokomotive(n) usw. - in Frage.

Beim vorliegenden Aufsatz handelt es sich um eine Kurzfassung der Studie [12] über den Zugsanprall im Hauptbahnhof Südwest. Sie beschreibt ein Verfahren zur rechnerischen Erfassung des Zugsanpralls und enthält Dimensionierungsgrundlagen für die Stützen des geplanten Bauwerks.

Die allgemeine Behandlung des Zugsanpralls verlangt noch umfangreiche Forschungsarbeit mit theoretischen und experimentellen Untersuchungen.

Wesentlichste Ziele einer solchen Forschung wären einfache, aber zuverlässige Verfahren zur Abschätzung der Einwirkungen aus Zugsanprall und gezielte Anstöße zur Verbesserung der Lokomotivkonstruktionen hinsichtlich Anprallverhalten.

Adressen der Verfasser: Dr. J. Grob, dipl. Bauing. ETH/SIA, Emch + Berger Zürich AG, Neumarkt 13, 8400 Winterthur und Prof. Dr. N. Hajdin, dipl. Bauing. TH, Teovska 72, 11000 Belgrad, Jugoslawien.

Bisherige Artikel dieser Reihe sind erschienen in «Schweizer Ingenieur und Architekt»

- Heft 15/88, Seiten 415-428
- Heft 18/88, Seiten 505-512
- Heft 35/88, Seiten 963-965
- Heft 39/88, Seiten 1069-1075
- Heft 4/89, Seiten 67-73
- Heft 8/89, Seiten 208-214
- Heft 10/89, Seiten 259-264
- Heft 20/89, Seiten 527-539
- Heft 35/89, Seiten 911-913
- Heft 39/89, Seiten 1035-1040
- Heft 10/90, Seiten 260-265