

Andrés López Pita

Qualität, Wirtschaftlichkeit und Finanzierung

Konstruktions- und Kostenoptimierung von Höchstgeschwindigkeitsgleisen in Spanien

Die neue Hochgeschwindigkeitsstrecke zwischen Madrid und Barcelona (Spanien) wurde für den Verkehr von kommerziellen Fahrzeugen für eine Höchstgeschwindigkeit von bis zu 350 km/h konzipiert. In diesem Beitrag werden die von den spanischen Bahnen erstellten Kriterien beschrieben um sicherzustellen, dass die Gleislageverschlechterung auf der neuen Strecke nicht höher ist als auf der Hochgeschwindigkeitsstrecke zwischen Madrid und Sevilla (300 km/h). Besonderes Augenmerk wurde dabei auf zwei primäre Faktoren gelegt: einerseits auf die Verringerung der Achslasten und der ungefederten Massen der Fahrzeuge, andererseits auf die Verringerung der vertikalen Steifigkeit der Untergrundplatten zwischen Schwellen und Schienen.

1. Einleitung

Es gibt keine allgemeine explizite Vereinbarung zwischen den Eisenbahnen zur praktischen Bedeutung des Begriffs „Hochgeschwindigkeit“. Obwohl diese Erklärung auf formaler Ebene nicht von großer Bedeutung sein mag, ist sie wichtig für die Analyse der wesentlichen Aspekte dieses Begriffs.

Die 1981 von den französischen Bahnen genannte Definition ist für uns jedenfalls interessant und ist nachstehend wiedergegeben. „Hochgeschwindigkeit ist der gesamte Verkehr mit einer höheren Geschwindigkeit als der maximalen Geschwindigkeit von 200 km/h, die auf herkömmlichen Strecken erzielt werden kann.“

Der Ausdruck „Hochgeschwindigkeit“ findet daher auf den Geschwindigkeitsbe-

Der Autor

Prof. Dr. Ing. **Andrés López Pita**, Director, Center for Innovation in Transport (CENIT), Universidad Politécnica de Cataluña, E-08034 Barcelona

reich zwischen 200 und 300 km/h Anwendung, während der Begriff „Höchstgeschwindigkeit“ Zügen vorbehalten ist, die mit mehr als 300 km/h verkehren.

Wenn man oben genannte Begriffe als Referenzen akzeptiert, kann man zu Recht sagen, dass der erste Hochgeschwindigkeitsbahnbetrieb in Japan mit der Eröffnung der neuen kommerziellen Strecke zwischen Tokio und Osaka im Jahr 1964 erfolgte. Die ursprünglich auf dieser Strecke gefahrene maximale Geschwindigkeit betrug 210 km/h.

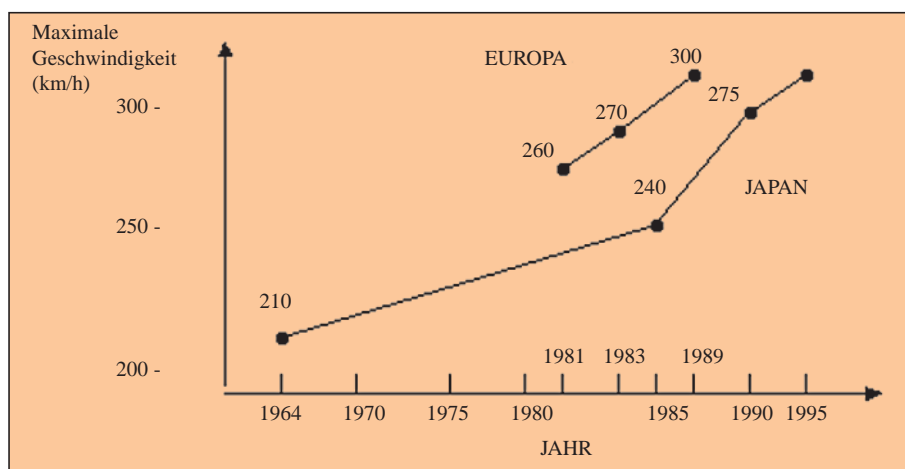


Abb. 1: Entwicklung der maximalen Geschwindigkeit im kommerziellen Betrieb auf europäischen und japanischen Neubaustrecken
Quelle: unabhängig erstellt

In Europa begann das Hochgeschwindigkeitszeitalter im September 1981, als die neue Strecke zwischen Paris und Lyon ihren kommerziellen Betrieb aufnahm. Die ursprüngliche maximale Geschwindigkeit der Züge von 260 km/h wurde schon bald danach auf 270 km/h erhöht.

Im September 2001 wurde das 20-jährige Jubiläum des ersten Hochgeschwindigkeitspersonenverkehrs in Europa gefeiert. Die maximale Geschwindigkeit ist in diesem Zeitraum (1981 bis 2001) von 260 auf 300 km/h gestiegen.

Ähnlich war es in Japan, wo im Oktober 2001 das 37. Jahr des Hochgeschwindigkeitsbetriebs gefeiert wurde und wo die maximale Geschwindigkeit des kommerziellen Betriebs von 210 km/h auf 300 km/h gestiegen ist.

Die *Abbildung 1* zeigt die Meilensteine der über die Jahre erfolgten Entwicklung in beiden Kontinenten.

Für dieses Jahrzehnt jedoch ist geplant, dass kommerzielle Züge, die mit Geschwindigkeiten von 320/350 km/h verkehren können, ihren Betrieb sowohl in Europa als auch in Japan aufnehmen: In Deutschland mit der dritten Generation des Intercity Express, in Spanien mit dem Talgo 350, in Frankreich mit der neuen Generation der TGV-Züge und schließlich in Japan, wo zu erwarten ist, dass die Züge der Baureihe 300 X ihren Betrieb aufnehmen werden.

Von einem praktischen Standpunkt aus gesehen wird die 630 km lange Strecke Madrid – Barcelona (Spanien) weltweit die erste Strecke sein, auf der der „Höchstgeschwindigkeitsverkehr“ mit einer maximalen Geschwindigkeit von 350 km/h Wirklichkeit wird.

Ausgehend von dieser Perspektive sollen in diesem Vortrag die Richtlinien skizziert werden, die gewählt wurden, um die möglichen Auswirkungen der Gleisgeometrieverschlechterungen zu verringern, die durch den Betrieb der neuen Höchstgeschwindigkeitszüge verursacht werden.

2. Gleisgeometrieverschlechterung auf den europäischen HGV-Strecken: Gleisstandhaltungskosten

Seit den allerersten Versuchen der Bahnverwaltungen, die maximale Geschwindigkeit für kommerzielle Züge anzuheben, hat man sich darauf konzentriert, die vertikalen Kräfte, die von den Fahrzeugen auf das Bahngleis ausgeübt werden, zu quantifi-

ROLLENDES MATERIAL	MAXIMALE GESCHWINDIGKEIT (km/h)	ACHSLAST (kN)	UNGEFEDERTE MASSEN PRO ACHSE (kN)
Herkömmliche Lokomotive	200	110	30
Hochgeschwindigkeitszug (AVE)	300	85	21

Tab. 1: Achslasten und ungefederte Massen bei herkömmlichem rollendem Material und Hochgeschwindigkeitsfahrzeugen

der Hochgeschwindigkeitsstrecke von Madrid nach Sevilla.

3. Erwartete Gleisverschlechterung auf „Höchstgeschwindigkeitsstrecke“ Madrid–Barcelona

Es ist wichtig, hier darauf hinzuweisen, dass der Wunsch, eine Höchstgeschwindigkeit von 350 km/h auf der neuen Hochgeschwindigkeitsstrecke Madrid – Barcelona zu erreichen, nicht auf das Bestreben zurückzuführen ist, bestehende Rekorde zu brechen, sondern auf die praktische Notwendigkeit, bestimmte kommerzielle Ziele zu erreichen.

Diese kommerziellen Zielsetzungen ergaben sich auf Grund einer unter den Fahrgästen durchgeführten Bedarfsstudie, die die Notwendigkeit einer ungefähren Fahrzeit von zwei Stunden und 15 Minuten zwischen Madrid und Barcelona erkennen ließ.

Da die Entfernung zwischen Madrid und Barcelona mit der Bahn ungefähr 630 km beträgt, ist eine kommerzielle Geschwindigkeit von 280 km/h erforderlich. Frühere Erfahrungen mit Hochgeschwindigkeitsbahnen in Europa ermöglichen es, das folgende ungefähre Verhältnis aufzustellen:

$$V_{\text{kommerziell}} \text{ (km/h)} \cong \lambda \cdot V_{\text{maximal}} \text{ (km/h)}$$

$$\lambda \cong 0,80 \text{ bis } 0,85$$

Ein Beispiel dafür ist die Strecke zwischen Paris und Marseille mit einer Entfernung von 750 km und einer Fahrdauer von drei Stunden bei einer Höchstgeschwindigkeit von 300 km/h, wobei $\lambda = 0,83$ ist. Um die angestrebte Beförderungsgeschwindigkeit von 280 km/h auf der Strecke Madrid–Barcelona zu erzielen, wird eine

zieren, da dieser Faktor als Hauptursache für Gleisgeometriever schlechterungen gilt.

In diesem Zusammenhang haben die von Prud'Homme (1970) durchgeführten sowohl theoretischen als auch empirischen Studien die große Bedeutung der gefederten und ungefederten Massen bei den vertikalen Lasten, die von den Fahrzeugen ausgeübt werden, hervorgehoben.

Mathematisch kann die vom Rad auf die Schiene ausgeübte vertikale Gesamtlast auf gerader Strecke wie folgt ausgedrückt werden:

$$Q_T = Q_E + 2 \sqrt{\sigma^2(\Delta Q_S) + \sigma^2(\Delta Q_{NS})}$$

wobei

Q_T = die gesamte vertikale Radlast auf die Schiene (kN)

Q_E = die statische Radlast auf die Schiene (kN)

$\sigma(\Delta Q_S)$ = Standardabweichung der dynamischen Mehrbelastungen, die auf gefederte Massen zurückzuführen sind (kN)

$\sigma(\Delta Q_{NS})$ = Standardabweichung der dynamischen Mehrbelastungen, die auf ungefederte Massen zurückzuführen sind (kN)

$\sigma(\Delta Q_S)$ und $\sigma(\Delta Q_{NS})$ werden mit Hilfe der folgenden Formeln bestimmt:

$$\sigma(\Delta Q_S) \cong (0,11 \text{ bis } 0,16)Q_E \quad (1)$$

$$\sigma(\Delta Q_{NS}) \cong a \cdot b \cdot \frac{V}{1000} \sqrt{mK} \quad (2)$$

wobei

a = ein von Radfehlern abhängiger Faktor ($\approx 0,42$)

b = ein von vertikalen Schienenfehlern abhängiger Faktor (≈ 1 bis 2)

V = die Laufgeschwindigkeit des Fahrzeugs (km/h)

m = die ungefederten Massen pro Rad (kN); Lokomotive (≈ 15 kN); Wagen (6 kN); AVE (10,7 kN)

K = die vertikale Steifigkeit des Gleises (kN/mm)

Wie wichtig es ist, die Achslasten und die ungefederten Massen des Fahrzeugs zu verringern, erschließt sich aus der Betrachtung von (1) und (2). Der AVE-Zug, der seit 1992 auf der Hochgeschwindigkeitsstrecke Madrid–Sevilla im Einsatz steht, unterscheidet sich – wie aus *Tabelle 1* ersichtlich – in gewissen Merkmalen vom herkömmlichen rollenden Material.

Es ist daher nicht überraschend, dass die vertikalen Kräfte, die von AVE-Hochgeschwindigkeitszügen bei 300 km/h ausgeübt werden, unter 120 kN/Rad liegen. Im Vergleich dazu betragen die von 200 km/h schnell fahrenden Lokomotiven ausgeübten Kräfte 160 kN/Rad.

Diese Ergebnisse konnten auch in Frankreich beobachtet werden. Zehn Jahre nach Aufnahme des Hochgeschwindigkeitsverkehrs auf der Strecke Paris–Lyon machte Shaer (1993) folgende Angaben:

„Die Kosten der Gleisstandhaltung auf der Hochgeschwindigkeitsstrecke Paris–Lyon ($\approx 50\,000$ frz. Francs/km Gleis) machen ungefähr 50 Prozent der Instandhaltungskosten auf herkömmlichen Strecken mit Geschwindigkeiten von 160/200 km/h aus. Vorausgesetzt werden natürlich ähnliche Bruttotonnagen auf beiden Strecken.“

Betrachtet man die Kosten in absoluten Zahlen für das Jahr 2000, so ist auffallend, dass die durchschnittlichen Kosten für die Instandhaltung der europäischen Hochgeschwindigkeitsstrecken sich in einer Bandbreite von 9000 bis 15 000 EUR pro Kilometer Gleis bewegten. Die niedrigere Zahl gilt für die französischen Hochgeschwindigkeitsstrecken, die höhere für die deutschen Hochgeschwindigkeitsstrecken und letztendlich der Durchschnitt daraus, nämlich 12 000 EUR pro Gleiskilometer, entspricht den Gleisstandhaltungskosten auf

ROLLENDES MATERIAL (Strecke)	MAXIMALE GESCHWINDIGKEIT (km/h)	MAXIMALE ACHSLAST (kN)	DURCHSCHNITTLICHE ACHSLAST (kN)	ANZAHL ACHSEN PRO ZUG-EINHEIT	DURCHSCHNITTLICHE UNGEFEDERTE MASSEN (kN)
AVE (Madrid–Seville)	300	171.8	161.7	26	21.3
TALGO 350 (Madrid–Barcelona)	350	170	158.8	21	20.2

Tab. 2: Unterschiede zwischen den auf der Strecke Madrid–Sevilla derzeit und auf der Neubaustrecke Madrid–Barcelona zukünftig verkehrenden Fahrzeugen Quelle: unabhängig erstellt

ROLLENDES MATERIAL	MAXIMALE STATISCHE ACHSLAST (kN)	UNGEFEDERTE MASSE PRO RAD (kN)	MAXIMALE VERTIKALE KRÄFTE (kN) PRO RAD GEMESSEN BEI:	
			300 km/h	350 km/h
Erste Hochgeschwindigkeitszuggeneration (AVE)	85,9	10,52	123	---
Jüngste Hochgeschwindigkeitszuggeneration (Talgo 350)	85,0	8,95	104	117

Tab. 3: Maximale vertikale Kräfte der jeweils ersten und jüngsten Generation der Hochgeschwindigkeitszüge Quelle: unabhängig erstellt aus mehreren Quellen

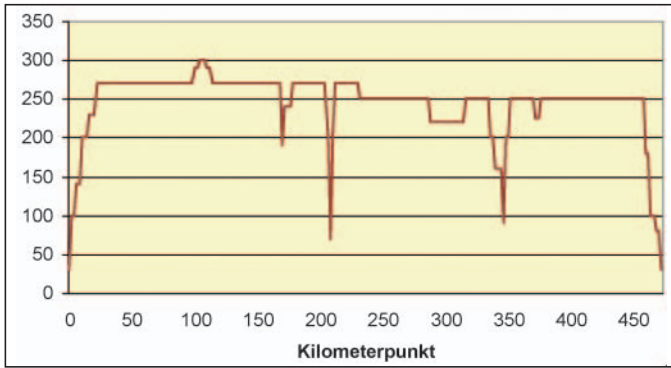


Abb. 2: Geschwindigkeitsdiagramm für den Hochgeschwindigkeitszug Madrid-Sevilla Quelle: Ministerium für Öffentliche Arbeiten (Spanien)

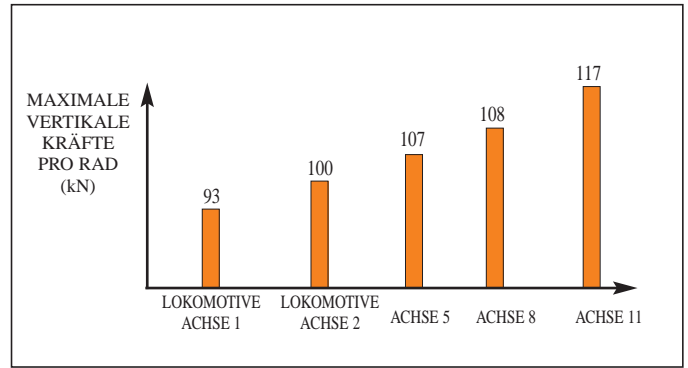


Abb. 3: Von den Rädern des Talgo 350 ausgeübte maximale vertikale Kräfte Quelle: TALGO (2001)

Höchstgeschwindigkeit von ca. 350 km/h erforderlich sein.

Angesichts dessen stellt sich unausweichlich die Frage, ob sich eine vorhersehbare Verschlechterung der Gleisgeometrie auf Grund dieser Fahrzeuggeschwindigkeiten abschätzen lässt. Betrachtet man die Formel (2) so könnte man zuerst einmal daraus folgern, dass eine Erhöhung von 300 km/h auf 350 km/h, wie für andere Parameter, einen Anstieg der dynamischen Überlastung um 16 Prozent in Folge der ungefederten Massen bedeutet.

Da die geplante Höchstgeschwindigkeit auf der Strecke Madrid-Barcelona um 30 Prozent höher liegt als die am häufigsten gefahrene Höchstgeschwindigkeit von 270 km/h auf der Strecke Madrid-Sevilla (Abbildung 2), könnte man annehmen, dass die vertikalen Gleiskräfte auf der neuen Strecke Madrid-Barcelona ebenfalls um 30 Prozent höher sein könnten. In diesem Fall würden die Kosten für die Instandhaltung der Gleisgeometrie sehr stark ansteigen.

Beim folgenden Versuch, die von 350 km/h fahrenden Fahrzeugen verursachte vertikale Belastung des Gleises zu senken, hat sich die spanische Bahnverwaltung dafür entschieden, Fahrzeuge mit einem niedrigeren Achsgewicht und einer niedrigeren ungefederten Masse einzusetzen als

auf der Hochgeschwindigkeitsstrecke Madrid-Sevilla. In Tabelle 2 werden die Merkmale der neuen Generation der Talgo 350-Züge im Vergleich zu den derzeit betriebenen AVE-Zügen gezeigt.

Ausgehend von den in Tabelle 2 enthaltenen Informationen und unter Berücksichtigung der Formeln (1) und (2) ist anzunehmen, dass die vom Talgo 350 auf die Schiene ausgeübten vertikalen Kräfte geringer sein werden als diejenigen, die von den AVE-Fahrzeugen ausgeübt werden. Und dies, obwohl die Höchstgeschwindigkeit um 50 km/h erhöht wird.

Messungen mit dem Talgo 350 bei Geschwindigkeiten zwischen 300 und 359 km/h haben zu den in Abbildung 3 dargestellten Ergebnissen geführt. Betrachtet man die Angaben von Abbildung 3, so ist ersichtlich, dass selbst bei 359 km/h die maximalen vertikalen Kräfte pro Rad von 120 kN nicht erreicht werden. In dieser Hinsicht ist es wichtiger, die vertikalen Kräfte in Erinnerung zu rufen, die bei den Zügen der ersten AVE-Generation mit 300 km/h gemessen wurden. Eine vergleichende Analyse wird in Tabelle 3 gezeigt.

Es kann daraus geschlossen werden, dass die maximale vertikale Belastung pro Rad, die von der jüngsten Generation der Hochgeschwindigkeitszüge bei einer Ge-

schwindigkeit von 350 km/h ausgeübt wird, geringer oder zumindest von der gleichen Größenordnung ist wie die Belastung, die von den Zügen der ersten Generation bei einer Geschwindigkeit von 300 km/h ausgeübt wurden.

Hervorzukehren ist, dass die bei den japanischen Bahnen durchgeführten Untersuchungen auch andeuten, dass die vertikale Belastung der Räder durch eine Reduzierung der ungefederten Massen verringert werden kann.

Die auf der Grundlage der von Tanaka (2001) veröffentlichten Ergebnisse erstellte Abbildung 4 zeigt, dass bei Geschwindigkeiten von mehr als 300 km/h keine weiteren Gleisgeometrieverschlechterungen zu erwarten sind, wenn die Züge der jüngsten Generation eingesetzt werden. Die 1992 hergestellten japanischen Züge der Baureihe 300 haben eine maximale Achslast von 111 kN, also wesentlich mehr als die maximale Achslast von 85 kN der neuen Baureihe 300 X. Die ungefederten Massen der Fahrzeuge der Baureihe 300 X sind außerdem um 30 Prozent geringer als die der Baureihe 300.

Bei einer Geschwindigkeit von 350 km/h verursachen die Fahrzeuge der neuen Baureihe 300 X weniger vertikale Kräfte auf die Schiene als die Fahrzeuge der Baureihe

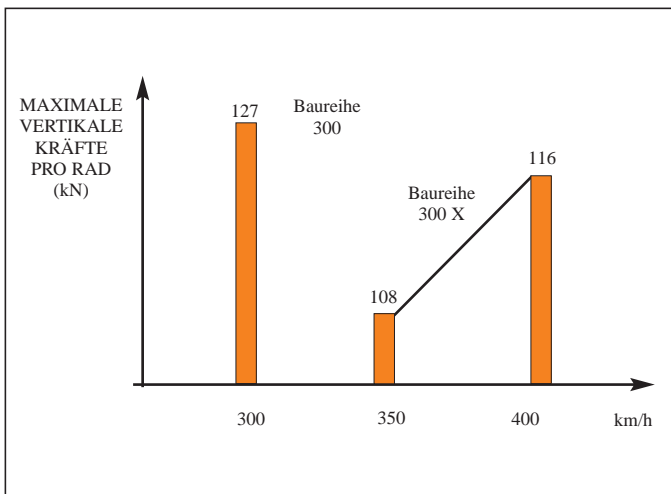


Abb. 4: Maximale vertikale Kräfte der japanischen Hochgeschwindigkeitszüge der Baureihen 300 und 300 X Quelle: Unabhängig erstellt auf der Grundlage der Daten von Tanaka (2001)

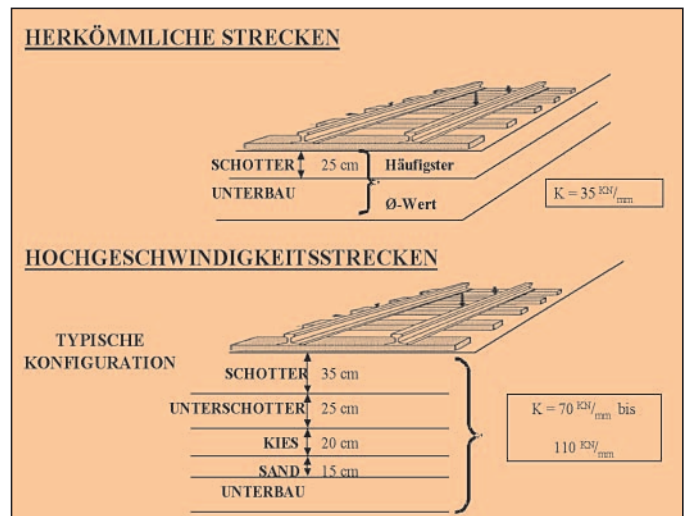


Abb. 5: Charakteristische Merkmale der vertikalen Steifigkeit des Schotterunterbaus Quelle: A. López Pita (2001)

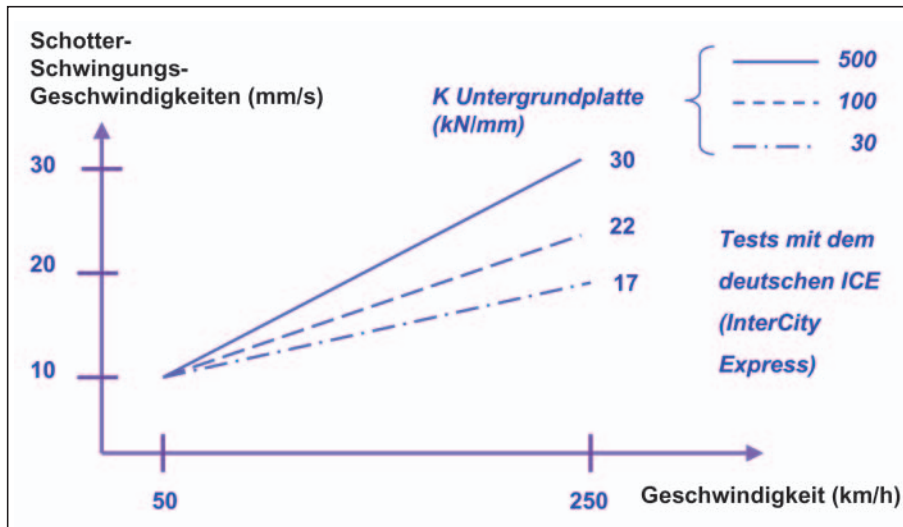


Abb. 6: Schotter-Schwingungsgeschwindigkeiten

300 mit einer Geschwindigkeit von 300 km/h. Tanaka betont, dass bei den vertikalen Kräften, die auf das Gleis ausgeübt werden, eine Verringerung der Achslast um 10 kN einer Reduzierung der ungefederten Massen um 1000 N entspricht. Dies bedeutet, dass die Verringerung der ungefederten Massen zehnfach wirksamer ist als eine Verringerung der Achslast.

Hervorgehoben werden sollte auch die bedeutende Verringerung der Gleisdurcharbeitungskosten, die auf der Hochgeschwindigkeitsstrecke Osaka – Okayama durch den Austausch der noch älteren Züge der Baureihe 100 ($V_{max}=220$ km/h, Achslast ≈ 160 kN) gegen die Züge der Baureihe 300 ($V_{max}\approx 270$ km/h, Achslast 111 kN) erzielt werden konnte. 1998 betrug die Instandhaltungskosten auf dieser Strecke nur noch 85 Prozent der Kosten des Jahres 1993. Und dies, obwohl die maximale Zuggeschwindigkeit von 220 km/h auf 270 km/h gestiegen war.

4. Vertikale Gleissteifigkeit auf „Höchstgeschwindigkeitsstrecken“

Formel (2) zeigt, wie wichtig es ist, die vertikale Steifigkeit zu reduzieren, um eine Verringerung der vertikalen Kräfte in Folge der ungefederten Massen zu erzielen. Die Dimensionierung des Schotterunterbaus kann auf Hochgeschwindigkeitsstrecken jedoch zu vertikalen Steifigkeitsniveaus führen, die wesentlich höher sind als diejenigen, die auf herkömmlichen Strecken existieren (siehe *Abbildung 5*).

Zu betonen sind die Untersuchungen, die in den vergangenen fünf Jahren von der Deutsche Bahn AG unternommen wurden, da diese gezeigt haben, welche bedeutende Wirkung der Verkehr auf den Oberbau, insbesondere die Schotter-schicht, hat.

Diesen Untersuchungen nach sollte die Schwingungsgeschwindigkeit im Schotter 15 bis 18 mm/s nicht überschreiten, um eine rasche Verschlechterung des Materials zu verhindern.

Die in diesem Artikel zu behandelnden Fragen sind daher erstens, ob eine strukturelle Gleisänderung zu einer Reduzierung

des im Schotter hervorgerufenen Schwingungsverhaltens führen würde, da sich diese Schwingungen bei hohen Fahrtgeschwindigkeiten besonders negativ auswirken, und zweitens, welche Rolle insbesondere die Untergrundplatten spielen.

Messungen der DB AG, die Untergrundplatten mit einer geringen vertikalen Steifigkeit verwendet, scheinen in diesem Zusammenhang auf eine wesentliche Reduzierung der Schwingungsgeschwindigkeit (*Abbildung 6*) hinzuweisen, die vom rollenden Material in der Schotter-schicht hervorgerufen wird.

Als Folge davon wird die Wahl eines Steifigkeitswerts von ungefähr 100 kN/mm für die Untergrundplatten der Höchstgeschwindigkeitsstrecke sich sehr positiv auf die Verschlechterung des Schotteroberbaus auswirken, die eine Folge der vom Verkehr hervorgerufenen Schwingungen ist.

5. Schlussfolgerungen

Um den Bedürfnissen des Personenverkehrs nachkommen zu können, mussten die Bahnen die maximalen Geschwindigkeiten in den vergangenen Jahrzehnten anheben. Sie liegen derzeit sowohl in Japan als auch in Europa bei 300 km/h.

Aus wirtschaftlichen Gründen (Fahrzeitziel) und unter Berücksichtigung einer gegebenen Entfernung von 630 km, die Madrid von Barcelona auf der neuen sich im Bau befindlichen Strecke trennen, wird die spanische Bahn kommerzielle Geschwindigkeiten von ca. 280 km/h erreichen müssen. Dies bedingt die Notwendigkeit von maximalen Geschwindigkeiten von bis zu 350 km/h.

Mangels wirtschaftlicher Erfahrung beim Betrieb von Zügen mit Geschwindigkeiten von 300 bis 350 km/h wurde eine Reihe von Studien durchgeführt, um die mögliche Gleisgeometrieverschlechterung bei sehr hohen Geschwindigkeiten abschätzen zu können. Da die vertikale Kraft, die von den Rädern des Zugs auf die Schienen ausgeübt wird, die hauptsächliche Ursache für diese Gleisgeometrieverschlechterung ist, haben sich die meisten Analysen in erster Linie auf diesen Punkt gerichtet.

Studien haben die vertikalen Kräfte, die von Personenzügen der ersten Generation bei Geschwindigkeiten von 300 km/h ausgeübt wurden, verglichen mit denjenigen, die von den Zügen der jüngsten Generation bei Geschwindigkeiten bis zu 350 km/h hervorgerufen wurden. Im Rahmen einer dieser Studien wurden Messungen für die neue Strecke Madrid – Barcelona mit dem Talgo 350, einem Fahrzeug, das eine niedrigere Achslast und geringere ungefederte Massen als vorhergehende Modelle aufweist, durchgeführt. Es hat sich dabei erwiesen, dass sich die Gleisgeometrie im Vergleich zu der verzeichneten Verschlechterung auf der bestehenden Strecke Madrid–Sevilla mit einer max. Geschwindigkeit von 300 km/h nicht weiter verschlechterte.

Zusätzlich dazu werden sowohl zur Reduzierung der Gleis/Fahrzeug-Interaktion auf der neuen Strecke Madrid–Barcelona als auch zur weiteren Senkung der Gleisgeometrieverschlechterung die auf der Strecke Madrid–Sevilla verwendeten steiferen Untergrundplatten (500 kN/mm) gegen flexiblere Modelle (100 kN/mm) ausgetauscht.

Aus diesen Gründen ist zu erwarten, dass die Aufnahme des kommerziellen Betriebs auf der neuen Bahnstrecke Madrid – Barcelona zu keinem Anstieg der Gleisgeometrieverschlechterung, bedingt durch die erhöhte maximale Geschwindigkeit bis zu 350 km/h, führen wird.

Literatur

- A. Proud'Homme (1970): La Voie. Revue Générale des Chemins de Fer, no. 1, page 56-72.
- B. Shaer (1993): Implementation and maintenance of a TGV line. Proceedings of the first International Conference on High Speed Ground Transportation (HSGT), ISBN-0-87262-927-9, 608-617.
- A. López Pita and F. Robusté (2001a): Compatibility and constraints between high speed passenger trains and traditional freight train. Transportation Research Record. No. 1742, ISBN 0-309-07200-x, 17-24.
- Talgo (2001): High speed tests. Unpublished report.
- H. Tanaka (2001): High speed Rail Technology as Revealed by the Shinkansen. 5th World Congress of Railway Research, Cologne (Germany), November.
- A. López Pita (2001): The vertical stiffness of the track and the deterioration of high speed lines. Revista de Obras Publicas. November, 7-26.