

Anwendung und Auswirkung der Geschwindigkeitsformel in der neuen EBO

Ergebnisse von Versuchsfahrten

ALLGEMEINES

Der scharfe Wettbewerb zwingt die Deutsche Bundesbahn (DB) dazu, ihr Leistungsangebot durch Modernisierung und durch Verkürzung der Reisezeiten laufend zu verbessern. Es wird daher mit allen wirtschaftlich vertretbaren Mitteln versucht, die Geschwindigkeiten der Reisezüge allgemein zu vergrößern. Es gilt insbesondere, die durch die ab 28. Mai 1967 gültige neue *Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO)* gebotenen Möglichkeiten des schnelleren Befahrens der Gleisbogen weitgehend auszuschöpfen. Dies bedeutet zugleich Anstrengungen auf betrieblichem, signal- und fahrzeugtechnischem Gebiet hinsichtlich Triebfahrzeug- und Bremsausnutzung. Es sollen insbesondere gezielt zusammenhängende Abschnitte geschaffen werden, die mit höherer Geschwindigkeit befahren werden können und die auch zugförderungsmaßig ausnutzbar sind. Die höheren Fahrgeschwindigkeiten in Gleisbögen und Übergangsbögen haben nicht zu unterschätzende Auswirkungen auf den Fahrkomfort, besonders im höheren Geschwindigkeitsbereich von 140 bis 200 km/h. Auch werden die Beanspruchung des Gleises sowie in gewissem Umfang der Unterhaltungsaufwand und der Verschleiß des Oberbaus etwas höher. Durch fahrdynamisch günstige Gestaltung der Übergangsbogen, insbesondere genügende Rampenlängen sowie Herstellung und Wahrung möglicher Gleisgüte gelingt es in Verbindung mit konstruktiven Maßnahmen am Fahrzeug dem Fahrkomfort Rechnung zu tragen. Aus Versuchsfahrten gewonnene Erfahrungen gestalten wertvolle Schlußfolgerungen über anzuwendende Maßnahmen.

ANWENDUNG DER NEUEN EBO-FORMEL

Nach der neuen EBO § 40 Absatz (7) „*darf*“, nicht „*muß*“, durch Anwendung der neuen Geschwindigkeitsformel eine höhere Fahrgeschwindigkeit in Gleisbogen erreicht werden.

Bei gleichmäßiger Belastung der Innen- und Außenschiene im Bogen, also ohne jeglichen Fliehkraftüber- oder -unterschub ist bekanntlich die anzuwendende Überhöhung $\ddot{u} = \frac{11,8 V^2}{R}$. Nun wird – übrigens bei fast allen Bahnen der Welt – im Regelfall nur etwa $\frac{2}{3}$ dieser theoretischen Überhöhung hergestellt, d. h. $\frac{8 V^2}{R}$. Diese Überhöhung trägt weitgehend sowohl den langsamer fahrenden Güterzügen als auch den schnellfahrenden Reisezügen

Anschrift des Verfassers: Prof. Dr.-Ing. Fritz Birmann, Bundesbahndirektor, Bundesdirektion Nürnberg.

Rechnung. Bei der größtzulässigen Überhöhung von 150 mm wird die zulässige Fahrgeschwindigkeit bei den schnellfahrenden Zügen dann

$$V = 4,33 \sqrt{R}$$

Ein Teil der Fliehkraft wird bei den schnellfahrenden Zügen durch die Regelüberhöhung aufgezehrt. Es verbleibt theoretisch ein geringer überschüssiger Fliehkraftanteil $b = 0,46 \text{ m/sec}^2$, der auf den Fahrgast wirkt.

Die bislang in den Oberbauvorschriften der DB verankerte Mindestüberhöhung $\ddot{u}_{\text{min}} = \frac{11,8 V^2}{R} - 100$ nach der alten Bau- und Betriebsordnung (BO) ermöglicht bei 150 mm größter Überhöhung eine etwa 4 bis 10 km/h höhere Fahrgeschwindigkeit nach der Formel

$$V = 4,6 \sqrt{R} \text{ (Tafel, Spalte 4)}$$

Die unausgeglichene theoretische Fliehbeschleunigung ist dann bei einem Fehlbetrag an Überhöhung

$$\Delta \ddot{u} = 100 \text{ mm} \quad b = \frac{\ddot{u}}{153} = 0,65 \text{ m/sec}^2.$$

Nach der neuen EBO-Formel soll mit einem größeren Fehlbetrag an Überhöhung, nämlich $\Delta \ddot{u} = 130 \text{ mm}$ die dem Fahrgast zumutbare theoretische Seitenbeschleunigung $0,85 \text{ m/sec}^2$ betragen, die damit 30 % höher ist als bisher.

Die zulässige Fahrgeschwindigkeit steigt bei 150 mm Überhöhung auf $4,87 \sqrt{R}$ an. Gegenüber der bisherigen Mindestüberhöhung wird eine abermals um etwa 6 bis 9 km/h höhere Geschwindigkeit möglich (Tafel, Spalte 6).

Als besonders kritisch wird bei der Einfahrt in den Bogen die Rampenlänge der Übergangsbogen betrachtet. Das bogenäußere Fahrzeugrad soll sich, um Wankbewegungen aus zu steilem Anstieg des Rades zu vermeiden, in einer ausreichend bemessenen Zeiteinheit auf die Soll-Überhöhung der bogenäußeren Schiene anheben. Bei der DB werden die Längen gerader Rampen (geradlinige Zunahme der Überhöhung und geradlinige Zunahme der Krümmung bei der Klothoide) in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit und der Überhöhung \ddot{u} mit $l = 10 \cdot V \cdot \ddot{u}$ bemessen, was einer Änderung der Überhöhung von 28 mm/sec entspricht, ausnahmsweise mit $l = 8 \cdot V \cdot \ddot{u}$ (35 mm/sec). Diese Werte gelten auch für die sogenannten s-förmig geschwungenen Rampen, wo Überhöhung und Krümmung die Form von zwei aneinandergesetzten quadratischen Parabeln haben. Die Form der Ruck- sowie der Hublinie sprechen auch theoretisch für vermehrte Anwendung des s-förmig geschwungenen Übergangsbogens (Bild 1). Außerdem ist hierbei die Seitenverschiebung f gegenüber geraden Rampen nur halb so groß. Auch mit Oberbaumaschinen ist sie gut herstellbar und zu unterhalten.

1	2	3	4	5	6
Bogenhalbmesser R (m)	Regelüberhöhung $\frac{8 V^2}{R}$ $V = 4,33 \sqrt{R}$ $b = 0,46 \text{ m/sec}^2$	Mindestüberhöhung $\frac{11,8 V^2}{R} - 100$ $V = 4,60 \sqrt{R}$ $b = 0,65 \text{ m/sec}^2$	Geschwindigkeits- erhöhung ΔV (km/h) Spalte 2/3	Minimalüberhöhung nach EBO $\frac{11,8 V^2}{R} - 130$ $V = 4,87 \sqrt{R}$ $b = 0,85 \text{ m/sec}^2$	Geschwindigkeits- erhöhung ΔV (km/h) Spalte 3/5
300	75	79	4	85	5
500	97	101	4	109	8
1000	137	146	9	154	8
1200	150	160	10	169	9

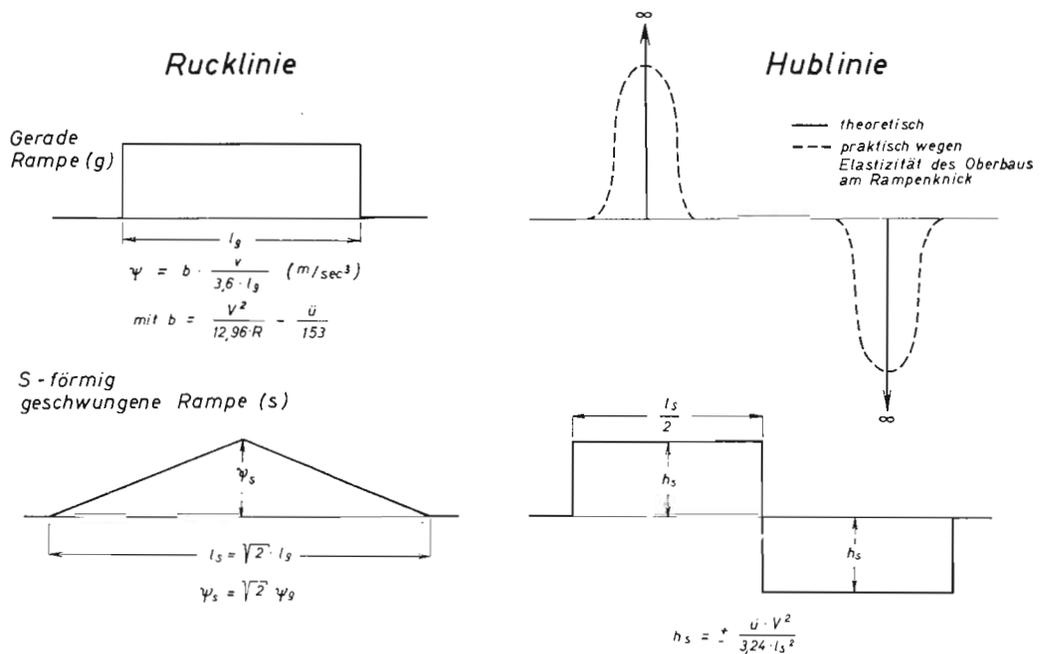


Bild 1
Rucklinie und Hublinie der geraden Rampe (Klothoide) und der S-förmig geschwungenen Rampe

Angeordnet sind nunmehr folgende Rampenlängen

$$\begin{aligned}
 V \leq 100 \text{ km/h,} & \quad l = 8 \cdot V \cdot \ddot{u} \\
 V = 100 \text{ bis } 120 \text{ km/h,} & \quad l = 10 \cdot V \cdot \ddot{u} \\
 & \quad \text{gegebenenfalls mit } 10\% \text{ Abminderung} \\
 & \quad \text{d. h. auf } 9 \cdot V \cdot \ddot{u} \\
 V > 120 \text{ km/h,} & \quad l = 10 \cdot V \cdot \ddot{u}
 \end{aligned}$$

Es laufen indes Fahrversuche, ob nicht für Schnelltriebwagen auch steilere Rampen zugelassen werden können.

Nachstehend folgen die Ergebnisse von Fahrversuchen, die im Bezirk der Bundesbahndirektion Nürnberg durchgeführt wurden. Die TEE-, F- und internationalen D-Zuggleise im fränkischen Bereich sind sehr bogenreich, zum Teil auch steigungsreich. Auf der 254 km langen Strecke Treuchtlingen-Nürnberg-Würzburg-Aschaffenburg liegen beispielsweise über 70% der Gleise in Bögen. Einer Verkürzung der Fahrzeit in diesem Bereich kommt daher bei der Vielzahl schnellfahrender Züge besondere Bedeutung zu.

Nach dem Ergebnis von Vorversuchen vom Jahre 1965 auf der Strecke Nürnberg - Regensburg liegen die mit Schwingungsmessern am Fußboden der D-Zugwagen ermittelten unausgeglichene Fliehbeschleunigungen bei der Regelgeschwindigkeit zwischen 0,70 bis 0,90 m/sec² und bei der erhöhten Geschwindigkeit nach EBO (8% kürzere Fahrzeit) größtenteils zwischen 0,85 bis 1,20 m/sec². Diese von den theoretischen Grenzwerten nach Tafel (0,46 m/sec²; 0,65 m/sec²; 0,85 m/sec²) stark abweichenden viel höheren Fliehbeschleunigungen beruhen auf der Neigung des Wagenkastens bei der Bogenfahrt nach außen. Der entstehende „Wankwinkel“ (Bild 2) setzt sich bekanntlich beim gut laufenden und daher zweifach weich gefederten Reisezugwagen oder Schnelltriebwagen aus den Anteilen der Achsfederung (Primärfederung) und den Anteilen der Wiegenfederung (Sekundärfederung) zusammen. Der Wankwinkel erhöht die effektiv wirksame Gleisüberhöhung \ddot{u} um beispielsweise

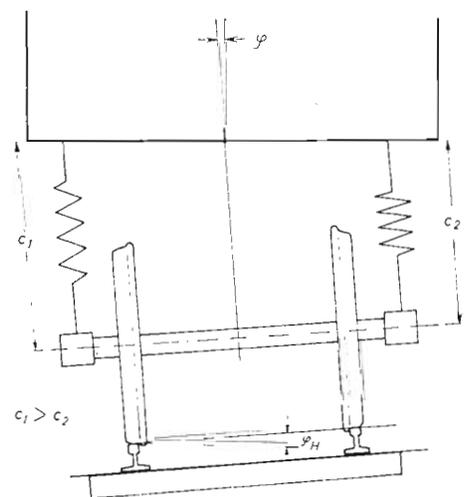
$$\begin{aligned}
 & 153 \cdot \text{Meßwert minus theoretischen Wert} \\
 & = 153 \cdot (1,25 - 0,85) = 60 \text{ mm.}
 \end{aligned}$$

Dies kommt einer Erniedrigung der Gleisüberhöhung gleich und bedeutet mit anderen Worten, daß der effektive Überhöhungsfehlbetrag $\Delta \ddot{u}_{\text{eff}}$ dann auf $130 + 60 = 190 \text{ mm}$ erhöht wird. Dabei stehen die praktischen (gemessenen) unausgeglichene Fliehbeschleunigungen und die theoretischen Fehlbeträge an Überhöhung $\Delta \ddot{u}$ auch bei $V = 200 \text{ km/h}$ in einer relativ guten geradlinigen Ab-

hängigkeit (Bild 3). Die theoretischen Fliehbeschleunigungen b stehen ohnehin in linearer Abhängigkeit von den theoretischen Fehlbeträgen an Überhöhung $\left(b = \frac{\Delta \ddot{u}}{153}\right)$. Sie sind im Bereich großer Überhöhungsfehlbeträge um etwa 30% geringer, im Bereich kleiner Überhöhungsfehlbeträge um etwa 50% geringer als die gemessenen. Auf den Reisenden wirken also bei der DB künftig höhere Seitenbeschleunigungen als bisher ein.

Aufschlußreich ist die Betrachtung des Zusammenhangs zwischen waagerechter Schwingung des Wagenkastens, ausgedrückt im Schwingungsmaßstreifen bei Regelgeschwindigkeit und bei erhöhter Fahrgeschwindigkeit einerseits und der Gleislage, widerspiegelt im Gleismaßstreifen andererseits. Bei einem Fehlbetrag an Überhöhung $\Delta \ddot{u} = 110 \text{ mm}$ ($b_{\text{theor.}} = 0,72 \text{ m/sec}^2$) steigt die gemessene mittlere Fliehbeschleunigung (Bild 4) im F-Zugwagen auf $1,12 \text{ m/sec}^2$, bei versuchsweise gefahrenem $\Delta \ddot{u} = 155 \text{ mm}$ im TEE-Schnelltriebwagen VT 11 auf $1,3 \text{ m/sec}^2$ ($b_{\text{theor.}} = 1,0 \text{ m/sec}^2$). Die gut liegenden geraden Rampen dieses Bogens auf acht Jahre altem K-Oberbau sind auch bei $I = 7,8 V \cdot \ddot{u}$ oder $I = 7,2 V \cdot \ddot{u}$ noch erträglich befahrbar. Allgemein gültige Feststellungen sollten auf keinen Fall hieraus abgeleitet werden, weil mit Gleislageverschlechterungen gerechnet werden muß.

Bild 2
Wankwinkel der Fahrzeugeinstellung im überhöhten Gleisbogen



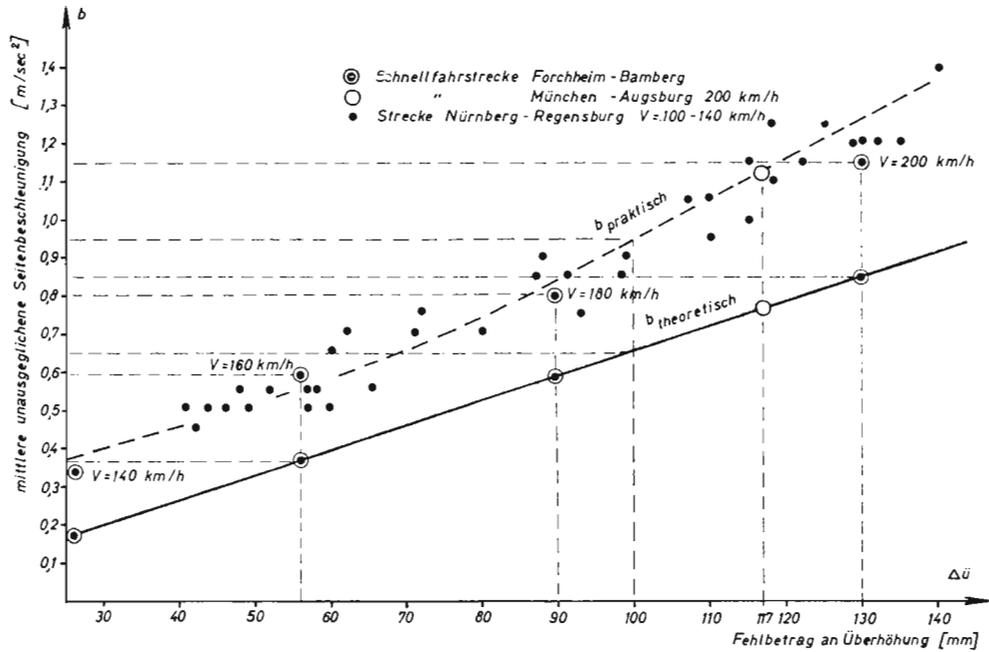
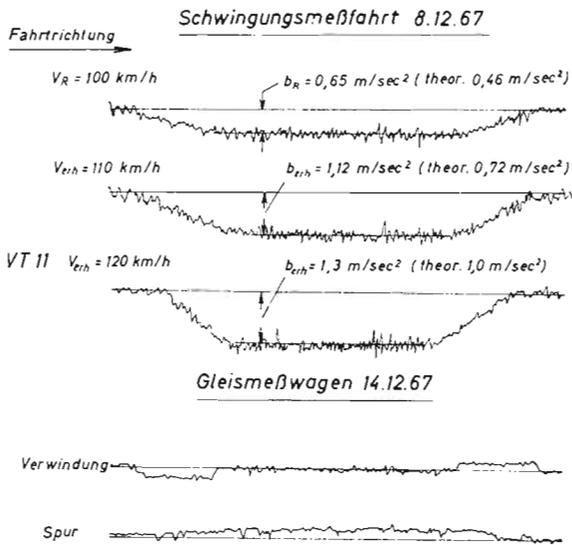


Bild 3 Theoretische und gemessene unausgeglichene Fliehbeschleunigungen bei Versuchsfahrten

Gleis Nürnberg - Würzburg
km 19,7 - 20,5



K 49 (1959)

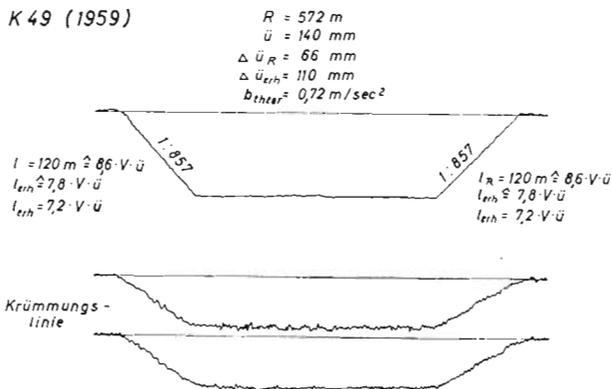


Bild 4 Schwingungsmeßstreifen (oben) des Reisezugwagens bei Regelgeschwindigkeit und erhöhter Geschwindigkeit im Vergleich zu VT 11 und zum Gleismeßstreifen (gute Gleislage)

Gleis Nürnberg - Würzburg
km 57,6 - 59,1

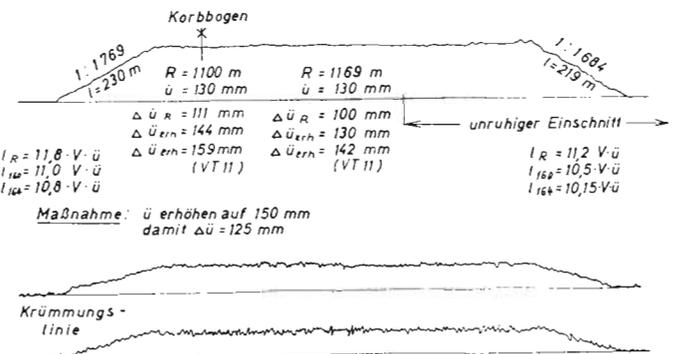
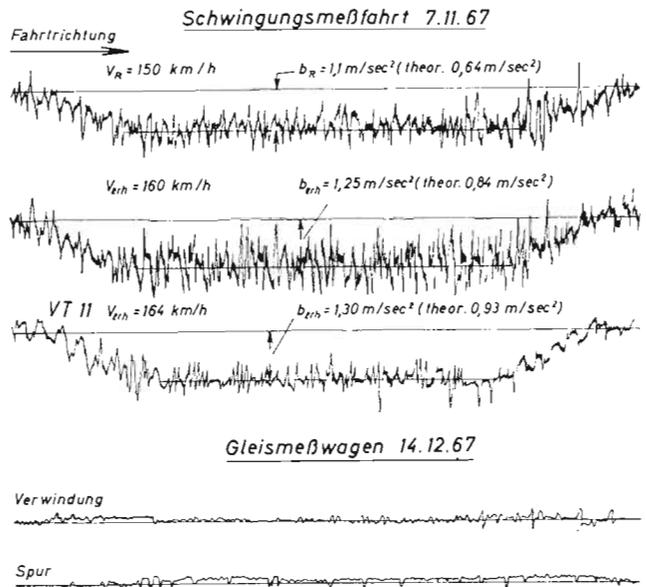


Bild 5 Einfluß der Geschwindigkeitssteigerung von 150 km/h auf 160 km/h und 164 km/h bei mäßiger Gleislage

An gleichfalls acht Jahre allem K-Oberbau der gleichen Strecke (Nürnberg-Würzburg) wird der Einfluß mäßiger Gleislage auf einem unruhigen Einschnitt ersichtlich, wenn die Geschwindigkeit von 150 km/h auf 160 km/h und 164 km/h gesteigert wird (Bild 5). Dieser Einfluß ist hier wesentlicher als der von langen Rampen. Die gemessene Fliehbeschleunigung steigt hier von 1,1 m/sec² auf 1,25 m/sec² und auf 1,30 m/sec² beim VT 11 bei 164 km/h. Dabei weist der VT 11, bedingt durch ähnliche Federhärten gegenüber dem Reisezugwagen ähnliche Wankwinkel auf. Das gleiche gilt für das Fahrverhalten des Dieseltriebwagens VT 24, der auf der Strecke Nürnberg-Bayreuth (93 km) untersucht wurde und im bogenreichen Pegnitztal eine Fahrzeitverkürzung um acht Minuten bei der EBO-Geschwindigkeit erzielte.

OBERBAUTECHNISCHE MÖGLICHKEITEN DER EINFÜHRUNG HOHERER GESCHWINDIGKEITEN

Bei zu kurzen Rampen ist zwecks Erniedrigung der Hubgeschwindigkeit (mm/sec) auf erträgliche Maße (entsprechend den Forderungen $l = 10 \cdot V \cdot \ddot{u}$ oder $l = 8 \cdot V \cdot \ddot{u}$) die entsprechende Rampenlänge anlässlich fälliger oder zeitlich vorgezogener Gleisarbeiten herzustellen. Voraus gehen jeweils eingehende Untersuchungen, um an Hand der Geschwindigkeitswegebänder störende geschwindigkeitshemmende Engpässe herauszufinden.

Wie schon erwähnt, sind in erster Linie solche Geschwindigkeitssteigerungen lohnend, wo wenigstens 4 km lange zusammenhängende Abschnitte geschaffen werden können.

S-förmig geschwungene Rampen sollten vor allem auch dort eingelegt werden, wo Bauwerke, Stützmauern, Fahrleitungsmaste wegen nötiger Verschiebung des Hauptbogens die Verlängerungen gerader Rampen erschweren. Die Rampenneigung ist bei der geschwungenen Rampe parabelförmig veränderlich. Die größte Neigung, theoretisch nur in einem Punkt vorkommend, ist doppelt so steil wie in der geraden Rampe. Bei gleichem Verschiebungsmaß f ist ohne Veränderungen im Hauptbogen die Länge l_s der geschwungenen Rampe mit $l_s = \sqrt{2} \cdot l_g = 1,41 l_g$ herzustellen, wenn l_g die Länge der geraden Rampe ist (vgl. Bild 1).

Betriebserprobungen mit anderen Formen von Übergangsbögen mit theoretisch noch günstigeren Formen sind im Zusammenhang mit Schnellfahrten von 200 km/h im Gange. Zu gegebener Zeit wird hierüber zu berichten sein.

Die Möglichkeiten der Geschwindigkeitserhöhung durch Vergrößerung der Überhöhung in Bogen sind begrenzt. Sie sind durch vermehrten Schotterbedarf und nötige Nacharbeiten am erstmalig aufgehöhten Gleis aufwendig, sie werden aber in manchen Fällen nicht zu umgehen sein (siehe Bild 6). Auch werden hierbei die Schienen am Innenstrang bei den großen Geschwindigkeitsunterschieden zwischen den Güterzügen und schnellfahrenden Reisezügen u. U. geringfügig stärker beansprucht. Theoretisch wird beispielsweise bei $V = 75$ km/h in einem Bogen mit $R = 1290$ m und $\ddot{u} = 85$ mm der Innenstrang wegen der Achslastverlagerung ΔQ um 5% stärker belastet, bei der

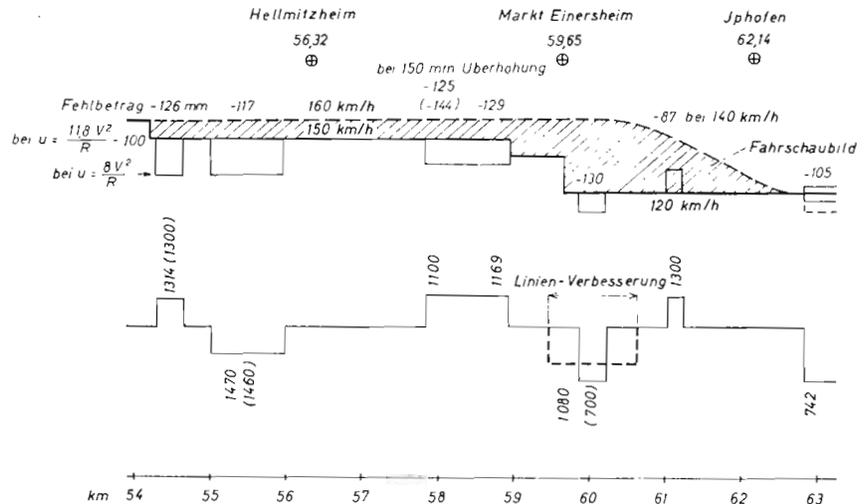


Bild 6 Ausschnitt aus dem Geschwindigkeitswegebänder bei Markt Einersheim (Strecke Nürnberg-Würzburg)

größeren Überhöhung $\ddot{u} = 110$ mm mit 7,7% kaum höher. Umgekehrt verringert sich bei $V = 130$ km/h im gleichen Bogen die Belastung des Außenstranges von 11% bei $\ddot{u} = 85$ mm geringfügig auf 7,7% bei $\ddot{u} = 110$ mm.

Auf weite Sicht gesehen sind allenthalben Verbesserungen der Linienführung der Bahnlinien anzustreben. Derartige Maßnahmen sind anzuraten, wenn damit wirkliche Engpässe auch in aufwendigerer Form beseitigt werden können. In Frage kommen hier Linienführungs-Bereinigungen im Zusammenhang mit Umgestaltungen und Spurplan-Rationalisierungen von Bahnhöfen, auch Umgehungs-kurven bei ungünstig trassierten und ungünstig liegenden Anlagen usw. Anlässlich der Schaffung eines 750-m-Überholungsgleises mit Entfall aufwendiger Bogenkreuzungs-weichen in den Hauptgleisen konnte beispielsweise durch Vergrößerung der Bogenhalbmesser von 700 m auf 1080 m (Bild 6) die Geschwindigkeit unter Inanspruchnahme der EBO-Formel auf 9 km Länge von 120 km/h, 140 und 150 km/h auf 160 km/h gebracht werden. Durch Aneinanderreihung derartiger Bereinigungen werden sich Zug um Zug Teilverbesserungen erzielen lassen, die insgesamt dann beträchtlichere Fahrzeitverkürzungen gestatten. An Hand von Fahrtafelbildern ist gegebenenfalls die tatsächliche Fahrgeschwindigkeit (z. B. bei km 61 in Bild 6) einzutragen, die dann den Untersuchungen zugrunde zu legen ist.

SCHLUSSBETRACHTUNG

Die durch die EBO gebotene Möglichkeit der Geschwindigkeitssteigerung sollte in bestehenden Bahnlinien systematisch ausgenutzt werden. In Schnellfahrgeleisen mit $V \geq 160$ km/h ist die Herstellung und Erhaltung einer guten Gleislage durch entsprechende Gleispflege eine Voraussetzung für den Fahrkomfort. Auch der Wagen- und Triebwagenbau hat sich auf die erhöhten Komfortbedingungen einzurichten. Die bei der DB in der Zukunft geplanten Höchstgeschwindigkeiten für

Personenzüge	= 120 km/h
Eilzüge	= 140 km/h
D-Züge	= 160 km/h
TEE- und F-Züge	= 200 km/h

werden dem gesamten Eisenbahnwesen neue lebenskräftige Impulse geben, wie sie auch international vom „Symposium Schnellverkehr“ im Juni 1968 in Wien ausgehen werden.

SILICITH FÜR HOCHWERTIGEN UND WASSERDICHTEN BETON



QUARZWERKE GMBH KÖLN