

Einfluss von Längsunebenheiten von Fahrbahnflächen auf die Straßenbeanspruchung

FA 4.179

Forschungsstelle: RWTH Aachen, Institut für Straßenwesen (Prof. Dr.-Ing. B. Steinauer)

Bearbeiter: Ueckermann, A.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bonn

Abschluss: Juni 2001

1. Aufgabenstellung

Straßen werden vor allem durch den Schwerlastverkehr geschädigt. Es ist das Fahrzeuggewicht, das einen maßgeblichen Einfluss auf die Zerstörung der Straßenoberfläche ausübt. Aber auch die Achsschwingungen tragen in nicht unerheblichem Maße zur Schädigung des Straßenoberbaus bei. Für das Management der Straßenerhaltung ist es daher interessant, aus den im Rahmen der Zustandserfassung vorliegenden Daten auch Rückschlüsse auf die momentane Straßenbeanspruchung oder deren mögliche zukünftige Entwicklung ziehen zu können. Im Rahmen dieser Arbeit sollten daher grundsätzliche Zusammenhänge zwischen Ebenheitsindikatoren, wie sie im Rahmen der Straßenzustandserfassung auf Bundesfernstraßen gebräuchlich sind, und der Straßenbeanspruchung ermittelt werden.

Als „statische“ Straßenbeanspruchung wird in diesem Zusammenhang die Straßenbeanspruchung verstanden, die ein idealisiertes Fahrzeug beim Befahren einer ideal ebenen Oberfläche auf die Fahrbahn ausüben würde, dahingehend, dass es lediglich sein statisches Gewicht auf die Straße aufbringt.

Als „dynamische“ Straßenbeanspruchung wird dagegen der Anteil der Straßenbeanspruchung verstanden, der sich aus dem Vorhandensein von Radlastschwankungen ergibt. Sie wird in dem hier vorliegenden Kontext als allein von der Unebenheit verursacht betrachtet.

2. Untersuchungsmethodik

In einem ersten Teil dieser Arbeit wurde der mathematische Bezug zwischen regellosen Längsunebenheiten in zwei Rollspuren und der Straßenbeanspruchung hergestellt. Dabei wurde angenommen, dass die Straßenbeanspruchung mit der vierten Potenz der Achslasten ansteigt. Dieses geschah durchaus in dem Bewusstsein, dass die Schädigung (hier: durch Ermüdung) sehr stark vom jeweils vorliegenden Straßenoberbau abhängt und längst nicht alle Straßen damit ausreichend charakterisiert sind [1]. Im Rahmen dieser Arbeit standen allerdings die Unebenheiten und die durch sie verursachten dynamischen Lasten im Vordergrund, sowie der Versuch, sie auf mathematischem Wege mit der Straßenbeanspruchung in Beziehung zu setzen. Eine Anpassung der gefundenen Zusammenhänge und Untersuchungsergebnisse an die unterschiedlichen Oberbaukonstruktionen ist zu einem späteren Zeitpunkt denkbar. Ein formelmäßiger Zusammenhang zwischen Ebenheit und Straßenbeanspruchung konnte hergestellt werden, der besagt, dass die unebenheitsbedingte zusätzliche Straßenbeanspruchung linear mit der Unebenheit (repräsentiert durch das Unebenheitsmaß, den „AUN-Wert“) ansteigt.

Im zweiten Teil wurden die Untersuchungen auf nicht-lineare Mehrkörper-Modelle ausgedehnt. Hierzu wurden Lkws modelliert. Sie berücksichtigen sowohl die tatsächliche Achskinematik dieser Fahrzeuge als auch nicht-lineare Feder- und Dämpferkennlinien inklusive deren Hystereseigenschaften. Blattgefederter wie auch luftgefederte Fahrwerke wurden modelliert.

Bei den Fahrzeugen handelt es sich um

- einen zweiachsigen parabelgefederten 18-Tonnen-Lkw,
- einen dreiachsigen rein luftgefederten 25-Tonnen-Lkw mit Nachlaufachse,
- einen fünfachsigem 40-Tonnen-Sattelzug, Vorderachse parabel- sonst luftgefedert, und
- einen fünfachsigem 40-Tonnen-Zug (dreiachsiger Lkw mit zweiachsigem Anhänger).

3. Untersuchungsergebnisse

Die Untersuchungen haben ergeben, dass die Straßenbeanspruchung mathematisch ausgedrückt werden kann als eine Funktion der „statischen“ Straßenbeanspruchung ϑ_{stat} (abhängig von der 4. Potenz der statischen Achslasten $F_{z,stat}$), der Fahrzeuggeschwindigkeit v , der Unebenheit (ausgedrückt durch zwei das Unebenheitsspektrum der Straße charakterisierende Kenngrößen AUN und w) und den Schwingungseigenschaften des Fahrzeugs, repräsentiert durch den Fahrzeugwert F . Die Gleichung, deren Auswertung maximal +/- 8 % von dem Simulationsergebnis abweicht, lautet ausgedrückt in äquivalenten 10-Tonnen-Achsen:

$$\vartheta = \vartheta_{stat} \cdot (1 + 6 \cdot v \cdot AUN \cdot F(w)), \quad \text{mit} \quad (1.1)$$

$$\vartheta_{stat} = \sum_{i=1}^N \left[\eta_{I,i} \cdot \eta_{II,i} \cdot \frac{F_{z,stat,i}}{10t} \right]^4 ;$$

i ist die Anzahl der Achsen und η_I und η_{II} sind Einflussfaktoren, die die Radanordnung (Einzel- oder Zwillingbereifung), sowie den Kontaktdruck Reifen-Fahrbahn berücksichtigen.

Der Einflussfaktor von Mehrfachachsaggregaten kann nach Daten aus [1] unter bestimmten klimatischen und konstruktiven Bedingungen des Straßenoberbaus mit knapp 1 angesetzt und für die Zwecke dieser Untersuchungen vernachlässigt werden. Der Fahrzeugwert hängt von der Welligkeit der Straße ab und gibt an, wie straßenschädigend das Lkw-Fahrwerk ausgelegt ist. Tabelle 1 fasst die beiden Kennzahlen für die vier Fahrzeuge zusammen.

Beide Einflussgrößen können zu einem Schädigungsindikator für die Straßenbeanspruchung zusammengefasst werden. Der absolute Schädigungsindex SI_a gibt an, wie sehr das Fahrzeug eine Straße mittlerer Ebenheit beansprucht, und der relative SI_r (das ist der auf die Anzahl N der Achsen bezogene absolute) ist ein Maß dafür, wie straßenschonend der Fahrzeugtyp konzipiert ist.

Tabelle 1: Statische Straßenbeanspruchungen und Fahrzeugwerte der verwendeten Fahrzeuge für AUN-Werte kleiner als 9 cm³ und eine Fahrgeschwindigkeit von 86 km/h

| Fahrzeug (v = 86 km/h) | ϑ_{stat} in ZTA | F in s/m ⁴ |
|---------------------------|------------------------------|--------------------------|
| Lkw, 18 t | 1,0 | 100 |
| Lkw, 25 t | 1,5 | 95 |
| Lkw-Zug, 40 t | 2,15 | 77 |
| Sattelzug, 40 t | 2,15 | 70 |

Die Definitionen sind:

$$SI_a = \vartheta_{\text{stat}} \left(1 + \frac{F}{1000 \cdot s / \text{m}^4} \right) \quad \text{und} \quad (1.2)$$

$$SI_r = \frac{\vartheta_{\text{stat}}}{N} \left(1 + \frac{F}{1000 \cdot s / \text{m}^4} \right)$$

Absolut gesehen beansprucht von den hier betrachteten vier Lkws der 18 t-Lkw aufgrund seines geringsten Gewichtes die Straße am wenigsten, relativ gesehen – also auf die einzelne Achse bezogen – stellt sich jedoch der 40 t- Sattelzug als das straßenschonendste Fahrzeug heraus.

Die Simulationen auf unterschiedlich unebenen regellosen Straßen erbringen einen dynamischen Beanspruchungsanteil, der – wenn man die einzelnen Achsen betrachtet – etwa 1 % (auf sehr ebenen Straßen) bis 200 % (auf sehr schlechten Straßen) des jeweiligen statischen Beanspruchungsanteils ausmacht – je nach Fahrzeug und Welligkeit der Straße. Wenn man das ganze Fahrzeug betrachtet, ergeben sich dynamische Straßenbeanspruchungen, die etwa 1 % (auf sehr ebenen Straßen) bis 40 % (auf sehr schlechten Straßen) des jeweiligen statischen Beanspruchungsanteils ausmachen. In [2] werden als typisch 10 bis 40 % genannt.

Die aus Gleichung 1.1 abgeleitete Faustformel lautet für die meisten Straßen:

$$\vartheta_{\text{dyn}} / \vartheta_{\text{stat}} \approx 1 \dots 2 \% \cdot \text{AUN} / \text{cm}^3 \quad (1.3)$$

Bei den Untersuchungen stellte sich heraus, dass der Anteil der durch Unebenheiten (Radlastdynamik) verursachten Straßenbeanspruchung deutlich von der Welligkeit der Straße abhängt. Sie kann die dynamische Straßenbeanspruchung um fast einen Faktor 2 und die Straßenbeanspruchung insgesamt (statisch plus dynamisch) um etwa 25 % vergrößern bzw. verkleinern. Da die Straßen im Mittel eine Welligkeit von etwa „2“ aufweisen, ist es denkbar, die Fahrwerke darauf abzustimmen.

Kommen zu den regellosen Unebenheiten noch Periodizitäten hinzu, so erhöhen sich die verursachten mittleren Straßenbeanspruchungen um einen Anteil, der in Gleichung 1.1 durch ein zusätzliches Glied (P-Wert) in der folgenden Weise berücksichtigt werden kann:

$$\vartheta = \vartheta_{\text{stat}} \cdot (1 + 6 \cdot v \cdot \text{AUN} \cdot F + P) \quad (1.4)$$

mit $P = p \cdot [\text{AUN}]^c$

Dieser P-Wert ist abhängig von der Amplitude und Frequenz der Periodizität und bei den hier betrachteten periodischen Unebenheiten entweder eine Konstante ($c = 0$) oder – in einem Fall (Achsrisonanz und sehr große Anregungsamplitude) – auch abhängig von der regellosen Grundunebenheit, repräsentiert durch den AUN-Wert. Die Differenz zu den Simulationsergebnissen betrug maximal +/- 30 %.

Untersucht wurden 5m-Periodizitäten, wie sie für Betonfahrbahnen durch Plattenversätze typisch sind, und Anregungen im Resonanzgebiet von Achse (10 Hz) und Aufbau (1-2 Hz).

Hinsichtlich der Straßenbeanspruchung wirken sich die Betonplattenversätze in etwa gleich aus wie die Anregungen im Bereich der Aufbauresonanz: im Mittel über alle Fahrzeuge ergeben sich bei 2,5 mm Anregungsamplitude etwa 1 %, bei 5 mm etwa 5 % und bei 10 mm 20 % höhere Straßenbeanspruchungen. Anregungen im Achsrisonanzbereich dagegen ergeben im Schnitt 7-mal höhere P-Werte. Es wurden hier im Mittel aller Fahrzeuge Anstiege von 9 % bei 2,5 mm Amplitude, 40 % bei 5 mm und 200 % bei 10 mm Amplitude festgestellt. Im Einzelfall traten Erhöhungen bis 400 % (25-Tonner) auf. Die Fahrzeuge

reagieren also auf Anregungen im Achsrisonanzbereich besonders stark.

Bei solch ausgeprägten periodischen Unebenheiten werden allerdings die ermittelten mittleren Straßenbeanspruchungen (etwa über 100 Meter Streckenlänge gemittelt) der wirklichen Beanspruchung der Straße nicht mehr gerecht. In der vorliegenden Arbeit wurden daher auch die Beanspruchungsspitzen (Maximalwerte der Beanspruchung = 95 %-Wert) untersucht und mit als Beanspruchungskriterium herangezogen.

Die Untersuchungen auf regellosen Unebenheiten ergeben, dass die lokalen Straßenbeanspruchungen (Beanspruchungsmaxima) auf sehr ebenen Straßen etwa 20 % höher, auf mittleren Ebenheiten doppelt und auf schlechten etwa dreimal so hoch sind wie die durchschnittliche Straßenbeanspruchung angibt.

Periodizitäten in der Fahrbahn können die lokalen (maximalen) Beanspruchungen noch mal um ein Vielfaches erhöhen. Im Falle der 5m-Periodizitäten auf Betonfahrbahnen beispielsweise steigen sie bei 10 mm vertikalem Plattenversatz im Schnitt um 0,6 ZTA und bei 20 mm um 1,25 bis 2,5 ZTA (das ist das 1- bis 1,5-fache der jeweiligen statischen Straßenbeanspruchung) an. Im Falle der Anregung im Aufbauresonanzbereich werden bei 10 mm Amplitude zusätzlich Erhöhungen von 0,3 bis 3,5 ZTA und bei Anregung im Achsrisonanzbereich und sehr guten Ebenheiten zusätzliche Erhöhungen von 4,2 bis 19 ZTA (das ist das 4- bis 8-fache der jeweiligen statistischen Straßenbeanspruchung) ermittelt.

In der Literatur [2, 3] werden typische lokale Beanspruchungen auf das 2- bis 4-fache, in besonderen Fällen sogar auf das 14-fache der mittleren Straßenbeanspruchung beziffert.

Beanspruchungsspitzen können über die folgende Gleichung abgeschätzt werden:

$$\vartheta_{\text{max}} = \vartheta_{\text{stat}} \cdot (1 + \lambda (v \cdot \text{AUN} \cdot F + P / 6)^\alpha)^4 \quad (1.5)$$

Der Faktor λ liegt für den Fall, dass die Beanspruchungsspitzen als 95 %-Wert definiert werden, zwischen 1,2 und 4,1 – im Mittel bei 2. Der Exponent α nimmt Werte zwischen 0,46 und 0,95 an und liegt im Mittel bei 0,64. Die Differenz zu den Simulationsergebnissen beträgt in den meisten Fällen unter +/- 12,5 %, in Einzelfällen jedoch bis 25 %.

4. Folgerungen für die Praxis

Mit den in diesen Untersuchungen gefundenen Zusammenhängen wird es möglich sein, Ebenheitsdaten hinsichtlich ihrer Bedeutung für die Straßenbeanspruchung künftig besser einschätzen zu können. Die Ergebnisse können als eine Grundlage für die Abschätzung der Straßenbeanspruchung aus im Rahmen der Zustandserfassung vorliegenden Ebenheitsdaten angesehen werden. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass das „4. Potenz-Gesetz“ nur beschränkte Gültigkeit besitzt und längst nicht auf alle Straßenkonstruktionen angewandt werden kann und dass die Lebensdauer einer Straße neben der Radlast von vielen anderen Faktoren (Straßenoberbau, Klima, Verkehr, usw.) abhängt. Dennoch wird auf Basis dieser konkreten Annahme die vergleichende Bewertung des Einflusses verschiedener Nutzfahrzeuge bzw. Nutzfahrzeugkonzepte auf die Straßenbeanspruchung sowie die Darstellung des grundsätzlichen Zusammenhanges zwischen Ebenheit und Straßenbeanspruchung möglich.

Schrifttum

- [1] Litzka, J.; Molzer, C.; Blab, R.: Modifikation der österreichischen Methode zur Dimensionierung des Straßenoberbaus, veröffentlicht in der Reihe „Straßenforschung“ des Bundesministeriums für wirtschaftliche Angelegenheiten, Heft 465, Wien 1996
- [2] Dynamische Belastung des Straßenoberbaus, Bericht einer Arbeitsgruppe des Straßenforschungsprogramms der OECD 1992, veröffentlicht in der Reihe „Straßenforschung“ des Bundesministeriums für Wirtschaftliche Angelegenheiten, Heft 471, Wien 1997
- [3] Dynamic Interaction between Vehicles and Infrastructure Experiment (DEVINE), Technical Report, Scientific Expert Group IR6 on the „Dynamic Interaction between Vehicles and Infrastructure Experiment“ (DEVINE projekt), OECD, Paris Oct. 1998