Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 104 (1986)
Heft: 14

Artikel: Neue Wege zur Beschreibung des Versagens von Beton
Autor: Wittmann, F.H.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-76123

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 04.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Neue Wege zur Beschreibung des Versagens von Beton

Von F.H. Wittmann, Lausanne

Einleitend wird darauf hingewiesen, dass die Anwendung der linear elastischen Bruchmechnik auf Beton sehr begrenzt blieb. Ein neues Konzept, das auf der Bruchenergie und dem Dehnungserweichen des Werkstoffes beruht, wird kurz erläutert. Eine Testmethode zur Bestimmung der Kennwerte wird beschrieben. Es wird gezeigt, wie über Bohrkerne die Bruchenergie von beliebigen Betonsorten aus gefährdeten Tragwerken bestimmt werden kann. Einige Ergebnisse sind beispielhaft angegeben. Abschliessend wird noch erwähnt, dass weitere Studien nötig sind, bevor das neue Konzept völlig einsetzbar sein wird.

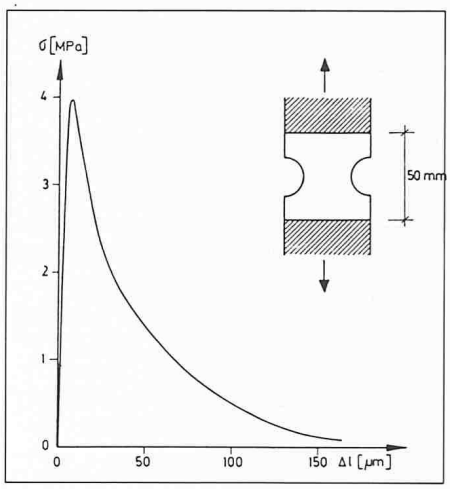


Bild 1. Spannungs-Dehnungs-Diagramm des Betons, gemessen im Zugversuch (nach [4])

Einleitung

Die klassische Bruchmechanik beschreibt den Bruchvorgang in Werkstoffen, die näherungsweise linear elastisch reagieren, zutreffend. Verhältnismässig früh wurde versucht, die Bruchmechanik auch auf zementgebundene zusammengesetzte Werkstoffe wie Beton anzuwenden [1]. Im Laufe der letzten zwanzig Jahre haben zahlreiche Autoren mit erheblichem Aufwand und unter Verwendung unterschiedlichster Methoden die Bruchzähigkeit des Betons bestimmt. Eine ausführliche Literaturzusammenstellung zu diesem Thema wurde vor kurzem veröffentlicht [2, 3]. Bis heute blieb jedoch die Anwendung dieser Materialkennwerte im Bauingenieurwesen und insbesondere im Massivbau eher bescheiden.

Es gibt mehrere Gründe dafür, dass die Bruchmechanik bei der Berechnung von Betontragwerken nicht im selben Masse wie etwa im Stahlbau eingeführt wurde. Ein ganz wesentlicher Grund hierfür ist die Tatsache, dass die fundamentalen Annahmen der linear elastischen Bruchmechanik für einen Werkstoff wie Beton auch nicht näherungsweise erfüllt sind.

Von *A. Hillerborg* und seinen Mitarbeitern wurde ein neues Konzept zur Beschreibung des Bruchvorganges in Beton entwickelt [4]. Die wichtigsten Elemente dieser numerischen Methode und die Messmethode zur Bestimmung der benötigten Materialkenngrössen werden im folgenden Abschnitt kurz beschrieben. Danach wird noch gezeigt werden, auf welche Weise Beton bestehender Tragwerke für eine entsprechende Analyse des Versagens charakterisiert werden kann.

Bild 2. Schematische Darstellung eines Gedankenexperimentes. Die Verformung des Zugstabes wird an zwei Stellen A und B gemessen. Die Bruchzone bildet sich zufällig zwischen den Messmarken der Messstelle A

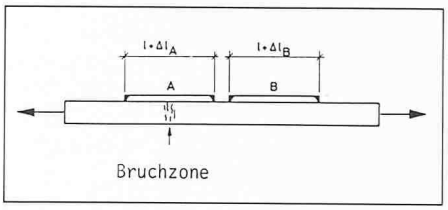
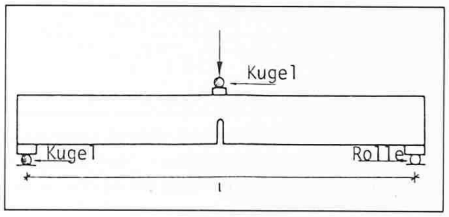


Bild 5. Probekörper und Belastungsschema zur Bestimmung der Bruchenergie nach [5]



Bruchenergie und der fiktive Riss

Betrachtet man ein mit der notwendigen Sorgfalt gemessenes Spannungs-Dehnungs-Diagramm, so erkennt man auf den ersten Blick, dass Beton nicht li-

Bild 3. Das Ergebnis des in Bild 2 skizzierten Gedankenexperimentes:
a) Längenänderung gemessen an den Messstellen A und B als Funktion der Zugspannung
b) Dehnungsverlauf in allen Bereichen der Probe ausserhalb der Bruchzone
c) Aufweiten der Bruchzone

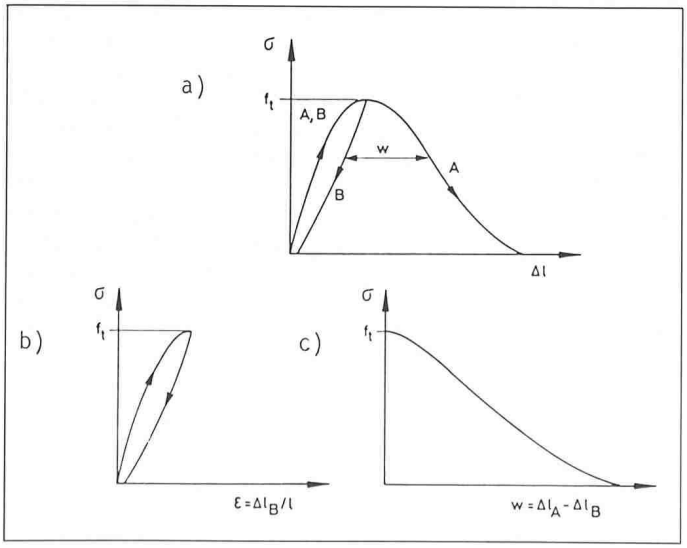
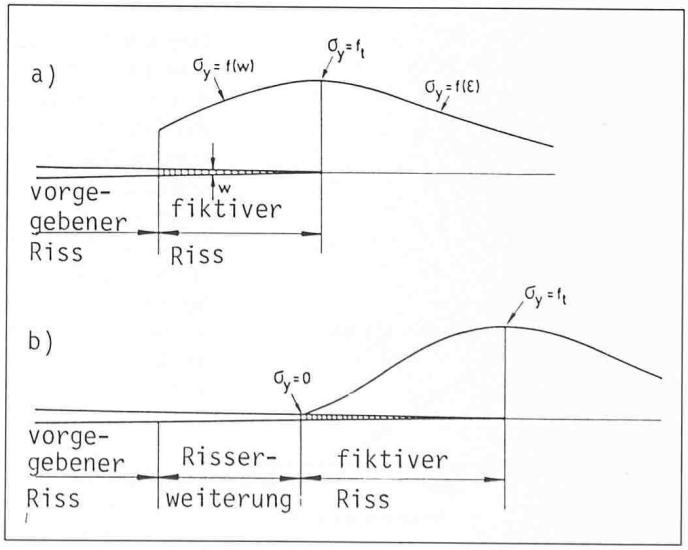


Bild 4. Zur Definition des Begriffes fiktiver Riss.
a) Situation bevor der Riss beginnt zu wachsen
b) Nachdem das Tragvermögen des Materials in der Rissspitze erschöpft ist, wächst der vorgegebene Riss



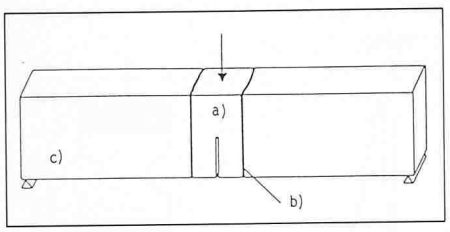


Bild 6. Probe zur Bestimmung der Bruchenergie an Bohrkernen:
a) Aus dem Bohrkern herausgesägtes Stück
b) Grenzfläche zu den anbetonierten Teilen (eventuell mit Kleber)
c) Anbetonierte Teile

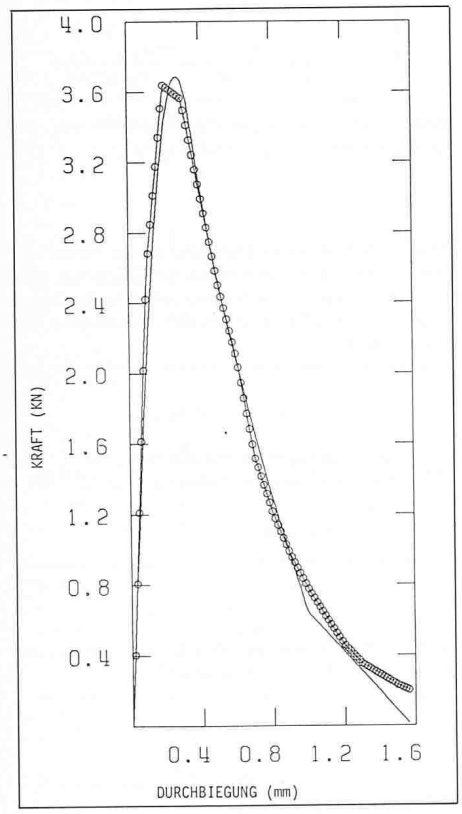
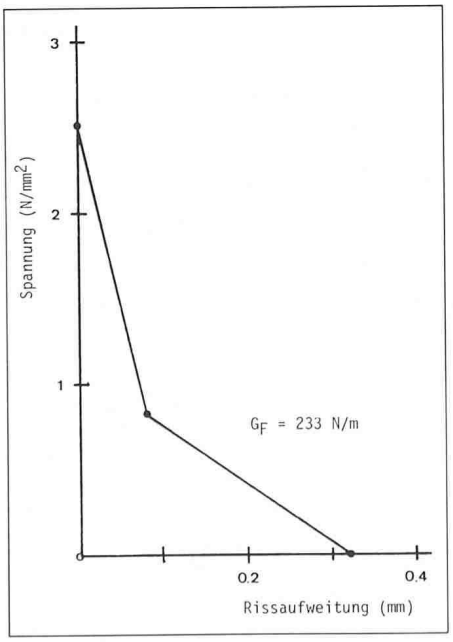


Bild 7. An einer Probe nach Bild 6 gemessenes Kraft-Durchbiegungs-Diagramm (durchgezogene Linie) und der nach Optimierung der Kennwerte berechnete Verlauf (Kreise)

Bild 8. Spannungs-Rissaufweitungs-Diagramm ermittelt aus dem in Bild 7 dargestellten Messergebnis



near elastisch und auch nicht spröde reagiert. Nach Erreichen einer Maximallast folgt, wie in Bild 1 dargestellt, ein stetig abfallender Ast. Dieses Verhalten wird heute häufig Dehnungserweichung (strain softening) genannt, d.h. mit fortschreitender Verformung nimmt die Verformbarkeit zu. Um die Vorgänge, die in einem Werkstoff wie Beton zum Bruch führen, beschreiben zu können, machen wir, dem Hillerborgschen Konzept folgend, einen idealisierten Versuch.

Dabei belasten wir einen Stab mit einer Zugspannung und messen die sich ergebende Verformung an zwei Stellen A und B. Schematisch ist dies in Bild 2 gezeigt. Solange die angelegte Spannung weit unterhalb der Bruchspannung bleibt und das Material noch näherungsweise elastisch reagiert, sind die bei A und B gemessenen Dehnungen, abgesehen von einer möglichen Streuung, gleich gross. Nehmen wir an, zwischen den Messmarken der Messstelle A bilde sich im verformungsgesteuerten Versuch eine Zone erhöhter Mikrorissbildung (fracture process zone), die schliesslich zum makroskopischen Reissen der Probe führen wird. Dann wächst nach Überschreiten einer kritischen Spannung die bei A gemessene Dehnung weiter an, während die Dehnung bei B mit dem Abfallen der Spannung wieder zurückgeht. Schematisch ist dieses Ergebnis in Bild 3 dargestellt.

Vereinfachend können wir also sagen, dass bei unserem Gedankenexperiment die Bruchenergie ausschliesslich in der Reaktionszone (auch Bruchzone genannt) verbraucht wird. Die anderen Teile des Prüfkörpers haben nach Ablauf des Zugversuches die einmal gespeicherte Energie wieder abgegeben. Gleichzeitig können wir festhalten, dass wir zur Deutung des Gedankenexperimentes im Gegensatz zu einem klassischen Versuch der linear elastischen Bruchmechanik keine Risslänge benötigen.

Betrachten wir nun noch den Fall, dass eine Probe vor Versuchsbeginn bereits durch einen Riss geschädigt ist. Nach der linear elastischen Bruchmechanik tritt im Material in der Nähe der Rissspitze eine hohe Spannungskonzentration auf. In einem Material mit einer Prozesszone werden diese Spannungen jedoch zur Rissspitze hin abgebaut. Das Spannungsmaximum tritt dann irgendwo vor der eigentlichen Rissspitze auf. In Bild 4 sind die gerade skizzierten Verhältnisse dargestellt. Man kann also das Verhalten des Materials in der Nähe einer Rissspitze auch so deuten, dass jede Schicht den in Bild 3 (c) gezeigten Zyklus bis zum Reissen durchläuft. Die Energie, die zum Risswachstum nötig ist, wird also in der Zone zwischen der Rissspitze und dem Spannungsmaximum verbraucht. Aus diesem Grund wird die um die Breite dieser Zone verlängerte Risslänge fiktive Risslänge genannt. Das Material in dieser Zone hat vom Spannungsmaximum beginnend ein abnehmendes Tragvermögen, und erst wo der wirkliche Riss beginnt, ist das Tragvermögen auf Null abgesunken.

Bestimmung der Bruchenergie

Die Energie, die zum Trennen eines Probekörpers nötig ist, kann im Prinzip im einfachen Zugversuch bestimmt werden. Die Bruchenergie ist dann gerade die unter der in Bild 3 (c) gezeigten Linie liegende Fläche. In Wirklichkeit ist dieser Versuch allerdings überhaupt nicht oder nur unter grösstem apparativem Aufwand durchführbar.

Kürzlich hat eine technische Kommission der RILEM (50-FMC) eine Empfehlung zur experimentellen Bestimmung der Bruchenergie erarbeitet und veröffentlicht [5]. Dabei wird ein Biegebalken, wie in Bild 5 gezeigt, zentrisch belastet. Die Bruchenergie ergibt sich aus dem Last-Durchbiegungs-Diagramm. In der Empfehlung wird noch eine Formel angegeben, mit der der Beitrag des Eigengewichtes der Probe und etwa aufliegender Messeinrichtungen zur gemessenen Bruchenergie G_F berücksichtigt wird:

$$G_F = (W_0 + M\delta_0)\, A_{lig}$$

Darin bedeuten W_0 die Fläche unter dem Kraft-Durchbiegungsdiagramm, M die Masse des Balkens zwischen den Auflagern und allenfalls lose aufliegender Teile der Messeinrichtung, δ_0 die Durchbiegung beim Versagen des Balkens und A_{lig} die Fläche, die durchtrennt werden muss.

Es konnte inzwischen gezeigt werden, dass der Wert für die Bruchenergie allein nicht ausreicht, das Versagen eines Werkstoffes realistisch zu beschreiben [6]. Die gleiche Bruchenergie kann abhängig von der Form des abfallenden Astes, dargestellt in Diagramm 3 (c), stark unterschiedliche Festigkeiten liefern. Mit Hilfe eines entsprechenden Moduls, der Teil eines umfangreichen Programmsystems ist, ist es *Roelfstra* gelungen, aus dem gemessenen Kraft-Durchbiegungs-Diagramm gleichzeitig G_F und einen dazugehörenden bilinearen (oder multilinearen) abfallenden Ast zu ermitteln [7] (siehe auch [8]). Damit stehen alle Daten, die zu einer wirklichkeitsnahen Analyse mit Hilfe finiter Elemente benötigt werden, zur Verfügung.

Bestimmung der Bruchenergie des Betons eines gefährdeten Tragwerkes

Die im obigen Abschnitt skizzierte und in [5] ausführlich beschriebene Methode ist in erster Linie dafür gedacht, charakteristische Werte für Beton beliebiger Zusammensetzung zu liefern. In der Praxis kann es vorkommen, dass die Bruchenergie und der abfallende Ast der Dehnungserweichungsfunktion für einen Beton eines zu analysierenden Tragwerkes benötigt wird, dessen Zusammensetzung und Lagerungsbedingungen gar nicht hinreichend genau bekannt sind. Ein willkürlich herausgegriffenes Beispiel hierfür ist eine Talsperre, die durch Setzungen oder Erdbeben beschädigt wurde.

In diesem Fall können aus dem betreffenden Tragwerk Bohrkerne entnommen werden. Aus den Bohrkernen können im Labor Teile gesägt werden, die durch Anbetonieren zu dem im vorherigen Abschnitt gezeigten Biegebalken ergänzt werden können. Dieses Verfahren ist in Bild 6 verdeutlicht. Da in der gewählten Probengeometrie nur die Prozesszone hoch belastet ist, spielt die Qualität der anbetonierten Teile nur eine untergeordnete Rolle.

Auf diese Weise konnten bereits die notwendigen Materialkennwerte für wirklichkeitsnahe Analysen ermittelt werden. Ein Beispiel für einen Talsperrenbeton ist in Bild 7 gezeigt. Der Balken hatte in diesem Falle eine Höhe von 300 mm, eine Breite von 100 mm und eine Länge zwischen den Auflagern von 1450 mm.

Um die in Bild 7 mit Kreisen markierte Funktion berechnen zu können, ist es notwendig, aus dem gemessenen Kraft-Durchbiegungs-Diagramm (durchgezogene Linie) die Materialkennwerte zu ermitteln. Im gewählten Beispiel wurde die Bruchenergie mit Hilfe des oben erwähnten Moduls zu 233 N/m bestimmt. Das zugehörige Spannungs-Rissaufweitungs-Diagramm ist in Bild 8 gezeigt. Mit den in Bild 8 dargestellten Ergebnissen kann das Versagen eines Bauteiles wirklichkeitsnah vorhergesagt werden. Der so berechnete Verlauf ist zum Vergleich in Bild 7 mit Kreisen markiert eingetragen.

Folgerungen

Das neue Konzept zur Beschreibung des Bruchvorganges im Beton ist dem Werkstoff angepasster als die linear elastische Bruchmechanik. Bis heute sind allerdings noch nicht alle Einflüsse auf die Bruchenergie und die Dehnungserweichung hinreichend experimentell untersucht. Ausserdem können die Kennwerte noch nicht im voraus abgeschätzt werden, wenn etwa die Betonzusammensetzung bekannt ist. Die Daten können sinnvoll nur im Rahmen einer Tragwerksanalyse mit Hilfe finiter Elemente verwendet werden. Der neue Weg ist erfolgversprechend. Mehrere Einzelheiten müssen jedoch noch näher untersucht werden, bevor eine breitere Anwendung in Frage kommt.

Adresse des Verfassers: Prof. Dr. *F.H. Wittmann*, Institut für Werkstoffe des Bauwesens, ETH Lausanne.

Literatur

[1] *M.F. Koplan:* Crack Propagation und Fracture of Concrete, "J. ACI" *58*, 591-610 (1961)

[2] *S. Mindess:* The Cracking and Fracture of Concrete: An Annotated Bibliography 1928-1981 in "Fracture Mechanics of Concrete", Herausgeb. F.H. Wittmann, Elsevier Science Publishers, Amsterdam (1983)

[3] *S. Mindess:* The Cracking and Fracture of Concrete: An Annotated Bibliography 1982-1985, erscheint in "Fracture Toughness and Fracture Energy", Herausgeb. F.H. Wittmann, Elsevier Science Publishers, Amsterdam (1986)

[4] *A. Hillerborg:* Analysis of one Simple Crack in "Fracture Mechanics of Concrete", Herausgeb. F.H. Wittmann, Elsevier Science Publishers, Amsterdam (1983)

[5] RILEM Draft Recommendation (50-FMC), Determination of the Fracture Energy of Mortar and Concrete by means of Three-Point Bend Tests on notched Beams, "Matériaux et Constructions" 18, 285-290 (1985)

[6] *P.E. Roelfstra* und *F.H. Wittmann:* Some Aspects of the Concept of Total Fracture Energy, in «Vorträge der 17. Sitzung des Arbeitskreises Bruchvorgänge», Herausgeb. Deutscher Verband für Materialprüfung, Berlin (1985)

[7] *P.E. Roelfstra* und *F.H. Wittmann:* Numerical Method to link Strain Softening with Failure of Concrete, erscheint in "Fracture Toughness and Fracture Energy", Herausgeb. F.H. Wittmann, Elsevier Science Publishers, Amsterdam (1986)

[8] *P.E. Roelfstra* und *H. Sadouki:* Fracture Process in Numerical Concrete, erscheint in "Fracture Toughness and Fracture Energey" (siehe Ref. [7])

[9] *F.H. Wittmann, Yiun-Yuan Huang, P.E. Roelfstra, H. Mihashi, N. Nomura* und *Xin-Hua Zhang:* Influence of Age, Water-Cement Ratio, and Rate of Loading on Fracture Energy and Strain Softening of Concrete, erscheint in "Matériaux et Constructions" (1986)

Zustandsuntersuchungen an Massivbauten – ein wichtiger Teil der Unterhaltsarbeiten

Von Marc Ladner, Dübendorf

Die Erfassung des Zustandes eines Tragwerkes ist eine sehr komplexe Tätigkeit und verlangt ein grosses Wissen auf den Gebieten des Bauwerksentwurfes, der Statik, der Ausführung und der Materialwissenschaften. Im vorliegenden Beitrag wird daher versucht, die einzelnen Tätigkeiten etwas zu gliedern und Beurteilungskriterien aus den Befunden aufzuzeigen. Ausserdem wird ein Gedankenmodell für den Entscheidungsvorgang vorgestellt, das die Vorgehensweise anschaulich und übersichtlich widergibt und es darüber hinaus erst noch gestattet, den optimalen Weg zu ermitteln.

Einleitung

Bauwerke werden im allgemeinen so bemessen, dass ihre Tragfähigkeit genügend gross ist, so dass unter normaler Nutzung kein Einsturz zu befürchten ist. Um dieses Ziel zu erreichen, wird sowohl für jeden Bauteil für sich allein als auch für das Bauwerk als ganzes der Tragfähigkeitsnachweis geführt, der in der allgemein gültigen Form lautet [1]:

$$\frac{R}{\gamma_R} \geq S_d$$

wobei R = Widerstand
S_d = Bemessungswert der Einwirkungen
γ_R = Widerstandsfaktor.

Damit die Bauwerke aber nicht nur sicher gegen Einsturz sind, sondern auch die ihnen zugedachte Aufgabe erfüllen können, wird bei ihrer Bemessung auch der Gebrauchszustand untersucht. Hierbei wird beispielsweise nachgewiesen, dass keine zu grossen Verformungen entstehen, oder dass keine unerwünschten Schwingungen angeregt werden.

Wie die Erfahrung lehrt, können bei Einhaltung der in den einschlägigen Normen verankerten Anforderungen