

DIN V 45673-4

DIN

ICS 17.160; 93.100

Vornorm

**Mechanische Schwingungen –
Elastische Elemente des Oberbaus von Schienenfahrwegen –
Teil 4: Rechnerische Ermittlung der Einfügungsdämmung im
eingebauten Zustand**

Mechanical vibration –
Resilient elements used in railway tracks –
Part 4: Analytical evaluation of insertion loss of mounted track systems

Vibrations mécaniques –
Éléments élastiques des voies ferrées –
Partie 4: Calcul de la perte d'insertion de voies ferrées montées

Gesamtumfang 32 Seiten

Normenausschuss Akustik, Lärminderung und Schwingungstechnik (NALS) im DIN und VDI

Inhalt

	Seite
Vorwort	3
1 Anwendungsbereich	3
2 Normative Verweisungen	4
3 Begriffe	4
4 Schwingungsfähiges System	5
4.1 Oberbauformen	5
4.2 Systemkomponenten	6
4.3 Schwingungserregung	6
4.4 Schwingungsantwort, Einfügungsdämm-Maß	7
4.5 Linearisierung	7
5 Rechnerische Abschätzung des Einfügungsdämm-Maßes mittels verschiedener Ersatzsysteme und Beschreibungsformen	7
5.1 Bildung eines Ersatzsystems	7
5.2 Ersatzsystem mit einem Freiheitsgrad: Beschreibungsform mittels Masse, Feder und Dämpfer	10
5.3 Ersatzsystem mit einem oder mehreren Freiheitsgraden: Beschreibungsform mittels Impedanzen	14
5.4 Ersatzsysteme mit mehreren Freiheitsgraden, Timoshenko-Balken und elastischer Halbraum	23
5.5 Ersatzsysteme mit Finiten Elementen	27
Literaturhinweise	31

Vorwort

Diese Vornorm ist im Gemeinschaftsausschuss NA 001-03-15 AA (NALS/VDI C 15) „Schwingungsminderung in der Umgebung von Verkehrswegen“ erarbeitet worden. Sie ergänzt zusammen mit DIN V 45673-3, die die messtechnische Ermittlung der Einfügungsdämmung im eingebauten Zustand bei Ersatzanregung behandelt, die Normen der Reihe DIN 45673.

Eine Vornorm ist das Ergebnis einer Normungsarbeit, das wegen bestimmter Vorbehalte zum Inhalt oder wegen des gegenüber einer Norm abweichenden Aufstellungsverfahrens vom DIN noch nicht als Norm herausgegeben wird.

Zu dieser Vornorm war der Entwurf DIN 45673 Beiblatt 2:2006-01 veröffentlicht worden.

Erfahrungen mit dieser Vornorm sind erbeten

- vorzugsweise als Datei per E-Mail an nals@din.de in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter <http://www.din.de/stellungnahme> abgerufen werden;
- oder in Papierform an den Normenausschuss Akustik, Lärminderung und Schwingungstechnik (NALS) im DIN und VDI, 10772 Berlin.

1 Anwendungsbereich

In dieser Vornorm werden Verfahren zur analytischen Abschätzung der Einfügungsdämmung angegeben. Der Zweck besteht in der rechnerischen Ermittlung der Einfügungsdämmung eines Oberbaus mit elastischen Elementen und gegebenenfalls Zusatzmassen (untersuchter Oberbau) gegenüber einer Ausgangssituation (Referenzoberbau).

Zur Charakterisierung der Einfügungsdämmung wird das Verhältnis der bei gleicher Anregungsart entstehenden Körperschalleistungen verwendet. Dabei wird bezüglich der Erschütterungsimmission derselbe Beurteilungsort betrachtet. Zur quantitativen Beschreibung der Einfügungsdämmung wird das Einfügungsdämm-Maß im Frequenzbereich von 4 Hz bis 250 Hz verwendet.

ANMERKUNG In dieser Vornorm wird die Äquivalenz des Einfügungsdämm-Maßes $D_F(f)$ aus einer Betrachtung der Kraftpegel $L_F(f)$ entsprechend $D_F(f) = L_{F, \text{Referenzoberbau}}(f) - L_{F, \text{untersuchter Oberbau}}(f)$ mit dem Einfügungsdämm-Maß $D_e(f)$ aus der Betrachtung der Körperschallpegel $L_v(f)$ entsprechend $D_e(f) = L_{v,1}(f) - L_{v,2}(f)$ nach DIN 45672-2:1995-07, Anhang B, gezeigt; siehe Gleichungen (12c) und (23). Da in dieser Vornorm für lineare schwingungsfähige Systeme nachgewiesen wird, dass diese beiden Einfügungsdämm-Maße gleich sind, wird im Weiteren auf eine begriffliche Unterscheidung verzichtet.

Da lineare Systeme für die Erschütterungsemission vorausgesetzt werden, wird bei diesem relativen Vergleich der Einfluss der frequenzabhängigen Übertragungsfunktion zwischen dem Emissionsort der Erschütterungen und dem Immissionsort eliminiert. Somit ist die berechnete Einfügungsdämmung direkt mit der aus Messwerten ermittelten Einfügungsdämmung bei gleichen Oberbauformen und gleicher Zugüberfahrt an beliebigen Messorten vergleichbar. Diese Vornorm gilt ohne Einschränkung bezüglich des Emissionsortes (unterirdisch, oberirdisch, auf Brücken).

Zur Beschreibung der Verhältnisse von Körperschalleistungen wird in dieser Vornorm z. T. die auf den Unterbau (Tunnelsohle, Brücke, Planum) wirkende Kraft verwendet, wobei in diesem Fall bei der Berechnung der Emission von einer für beide Oberbauformen gleich großen Krafterregung ausgegangen wird. Bei der Nachbildung der Erregung und der Bildung eines Ersatzsystems für das betrachtete schwingungsfähige System ist eine dynamisch wirksame Masse zu berücksichtigen, die sich aus Anteilen des Fahrzeugs und des Oberbaus zusammensetzt.

In der Praxis werden verschiedene Verfahren zur rechnerischen Ermittlung des Einfügungsdämm-Maßes angewandt, wobei sich diese Verfahren in erster Linie durch die verwendeten Ersatzsysteme unterscheiden. Eine vergleichende Bewertung der verschiedenen Verfahren erfolgt in dieser Vornorm nicht.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden zitierten Dokumente sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

DIN 45673-1, *Mechanische Schwingungen — Elastische Elemente des Oberbaus von Schienenfahrwegen — Teil 1: Ermittlung statischer und dynamischer Kennwerte im Labor*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach DIN 45673-1 und die folgenden Begriffe.

3.1 dynamisch wirksame Fahrzeug- und Oberbaumasse

m_{Ers}

Ersatzmasse für ein mechanisches Ersatzsystem mit einem Freiheitsgrad, die die unabgefederte Fahrzeugmasse (dynamisch wirksame Fahrzeugmasse) und denjenigen Massenanteil des Oberbaus (dynamisch wirksame Oberbaumasse) umfasst, die bei der Überfahrt des rollenden Rades eine dominierende Schwingbewegung ausführen

ANMERKUNG 1 Die dynamisch wirksame Fahrzeug- und Oberbaumasse setzt sich aus Anteilen des Fahrzeugs (unterhalb der Primärfeder befindliche Massen, d. h. unabgefederte Radsatzmasse, und evtl. anteilige Drehgestellmasse) und aus Anteilen des Gleisoberbaus (Anteil Schiene, Schienenbefestigung, Schwelle, Schotter, evtl. Betonplatte) zusammen (siehe auch [7]). Zu Zahlenangaben siehe 5.1.2.

ANMERKUNG 2 Gelegentlich wird für den Ausdruck „dynamisch wirksame Fahrzeug- und Oberbaumasse“ auch „Radsatz-Oberbau-Masse“ benutzt.

3.2 Teilsysteme

Zur rechnerischen Ermittlung der Einfügungsdämmung wird der Oberbau zusammen mit Teilen des Fahrzeugs in Teilsysteme (oberes Teilsystem, elastisches Element, unteres Teilsystem) unterteilt.

3.2.1 oberes Teilsystem

System, bestehend aus dynamisch wirksamer Fahrzeugmasse, Schienen und allen Bauelementen oberhalb des betrachteten elastischen Elements

ANMERKUNG Das obere Teilsystem wird durch den Index o gekennzeichnet.

3.2.2 elastisches Element

Bauteil, dessen Wirkung auf die Einfügungsdämmung des Oberbaus ermittelt wird

ANMERKUNG Das elastische Element wird durch den Index el gekennzeichnet.

BEISPIELE Elastische Schienenlagerung, Zwischenplatte, Einzellager, Unterschottermatte.

3.2.3 unteres Teilsystem

System, bestehend aus allen Bauelementen unterhalb des betrachteten elastischen Elements

ANMERKUNG Das untere Teilsystem wird durch den Index u gekennzeichnet.

3.3

komplexe Steifigkeit

$k_k(i f)$

komplexes Verhältnis der in Verformungsrichtung wirkenden harmonischen Kraft mit der Amplitude $\hat{F}_E$ zur entstehenden Verformungsamplitude $\hat{z}(i f)$ bei Frequenzen zwischen 1 Hz und (30 bis 40) Hz

$$k_k(i f) = \frac{\hat{F}_E}{\hat{z}(i f)} \quad (1)$$

ANMERKUNG 1 Die (im Allgemeinen frequenzabhängige) komplexe Steifigkeit wird in kN/mm angegeben.

ANMERKUNG 2 Die komplexe Steifigkeit erfasst neben den elastischen Eigenschaften auch die Dämpfung eines elastischen Elements. Bei einem linearen Ansatz für die dämpfenden Eigenschaften des oberen und unteren Teilsystems sowie des elastischen Elements kommen folgende komplexe Steifigkeiten in Betracht:

a) Bei viskoser Dämpfung eines Teilsystems oder des elastischen Elements:

$$k_{k_v}(i f) = k_{\text{kin}} + i 2\pi f d \quad (2)$$

mit der kinetischen Steifigkeit k_{kin} und dem frequenzunabhängigen Dämpfungskoeffizienten d . Der Betrag davon ist:

$$k_{k_v}(f) = \sqrt{k_{\text{kin}}^2 + (2\pi f d)^2} \quad (3)$$

b) Bei hysteretischer (struktureller) Dämpfung eines Teilsystems oder des elastischen Elements:

$$k_{k_h}(i f) = k_{\text{kin}} (1 + i \eta) \quad (4)$$

mit der kinetischen Steifigkeit k_{kin} und dem frequenzproportionalen Verlustfaktor η . Der Betrag davon ist:

$$k_{k_h}(f) = k_{\text{kin}} \sqrt{1 + \eta^2} \quad (5)$$

Mit dynamischen Versuchen wird festgestellt, welcher Ansatz die Dämpfungseigenschaften eines Teilsystems oder des elastischen Elements am besten beschreibt. Ein Mischansatz ist zwar optimal, wegen des erheblichen Auswertungsaufwands bei den Versuchen wird aber im Allgemeinen darauf verzichtet. Die komplexe Steifigkeit von Schotter und diejenige von Unterschottermatten wird am besten durch eine hysteretische Dämpfung beschrieben.

ANMERKUNG 3 Die beiden Komponenten Elastizität und Dämpfung der komplexen Steifigkeit eines Teilsystems oder des elastischen Elements werden durch die Eigenschaften der Werkstoffe, das Beanspruchungsverhalten der Bauteile bei Verformung (charakterisiert durch den Formfaktor) und insbesondere durch die Art der Auflagerflächen bei den dynamischen Untersuchungen bestimmt, die daher den realen Verhältnissen beim Einsatz der Elemente entsprechen sollte.

ANMERKUNG 4 Bei der dynamischen Steifigkeit $k_d(f)$ (siehe DIN 45673-1) ist der Einfluss der Trägheitskräfte erst bei Frequenzen über (30 bis 40) Hz deutlich. Daher wird in der Praxis bei Frequenzen zwischen 1 Hz und (30 bis 40) Hz näherungsweise verwendet: $k_d(f) \approx k_k(f)$.

4 Schwingungsfähiges System

4.1 Oberbauformen

Es existieren verschiedene Oberbauformen mit elastischen Elementen und gegebenenfalls Zusatzmassen, die im Schienenverkehrswegebau eingesetzt werden. In DIN 45673-1 sind diese Oberbauformen im Einzelnen beschrieben und einige davon dargestellt.

4.2 Systemkomponenten

Zur rechnerischen Ermittlung der Einfügungsdämmung ist die Bildung eines Ersatzsystems für das untersuchte schwingungsfähige System (Fahrzeuganteil, Oberbau, Unterbau) erforderlich, das beispielsweise aus folgenden Komponenten besteht:

- a) Fahrzeug
 - unabgefederte Radsatzmasse;
- b) Oberbau
 - Schiene,
 - Schienenbefestigungsmittel, Spurstangen,
 - Schwellen,
 - Schotter,
 - Betontragplatte;
- c) elastisches Element, dessen Wirkung im Zusammenwirken mit den anderen Oberbaukomponenten zu berechnen ist
 - Zwischenlage, Zwischenplatte,
 - Schwellenbesohlung,
 - Unterschottermatte,
 - elastische Elemente bei Masse-Feder-Systemen;
- d) Unterbau
 - Tunnelsohle, Brücke, Planum.

4.3 Schwingungserregung

Bei der Berechnung der Einfügungsdämmung kann für die Schwingungserregung angesetzt werden

- eine Wegerregung oder
- eine Krafterregung.

Die Krafterregung entsteht primär aus einer Wegerregung, denn bei der Fahrt des Zuges über eine diskret gelagerte Schiene bildet sich durch das rollende Rad eine Einsenkung der Schiene (Sekundärdurchbiegung), die im Bereich der Auflagerung der Schienen auf den Schwellen eine andere Größe als im Bereich zwischen den Auflagerungen hat. Die diskret gelagerte Schiene wirkt daher neben der breitbandigen Erregung als zusätzliche periodische Wegerregung; bei nicht diskret gelagerter Schiene liegen keine periodischen, sondern nur die breitbandigen Erregungen vor. Außerdem stellen Gleislagefehler, Unrundheiten und Flachstellen der Räder sowie Laufflächenunebenheiten weitere Komponenten der Wegerregung dar, wobei auch Unwuchten der Räder durch eine Wegerregung abgebildet werden können.

Die Krafterregung entsteht als Massenkraft aus der Wegerregung infolge der Bewegung der Ersatzmasse nach 3.1. Diese Darstellungen zeigen, dass bei linearen Systemen die Wegerregung und die Krafterregung Synonyme sind, sodass im Weiteren für die Berechnung des Einfügungsdämm-Maßes nur die Krafterregung betrachtet wird. Zur Beschreibung der Verhältnisse von Körperschalleistungen wird damit die auf den Unterbau (Tunnelsohle, Brücke, Planum) wirkende Kraft verwendet, wobei bei der Berechnung der Emission von einer für beide Oberbauformen (mit und ohne das eingefügte elastische Element) gleich großen Krafterregung ausgegangen wird.

Infolge der Wegerregung entstehen an der Ersatzmasse Massenkkräfte, die zur Nachbildung der Erregung angesetzt werden können. Für die Ermittlung der Einfügungsdämmung wird dann allerdings bei den Berechnungen meist eine Ersatzanregung verwendet, die als Einheitsstoß, als Breitbanderregung, als Gleitsinuserregung oder als harmonische Erregung realisiert sein kann. Da die Einfügungsdämmung den Quotienten zwischen zwei Kräften als Schwingungsantwort darstellt, ist die quantitative Kenntnis dieser Krafterregung nicht erforderlich.

ANMERKUNG Sollen in der Praxis mit den Einfügungsdämm-Maßen Immissionswerte quantitativ berechnet werden, wird vielfach eine Wegerregung zugrunde gelegt. Diese Aufgabenstellung wird in dieser Vornorm jedoch nicht behandelt.

4.4 Schwingungsantwort, Einfügungsdämm-Maß

Die Schwingungsantwort bei der jeweiligen Oberbauform (untersuchter Oberbau und Referenzoberbau) ist die berechnete Kraft auf das im Ersatzsystem verwendete untere Teilsystem (siehe Bild 1) oder die Schwinggeschwindigkeit an diesem unteren Teilsystem in Terzpegel-Darstellung. Die Differenz zwischen den Terzpegelspektren bei den beiden Oberbauformen ist das Einfügungsdämm-Maß.

Das Einfügungsdämm-Maß ist also eine relative Größe, die die zusätzliche Wirkung eines eingefügten elastischen Elements in einer gegebenen Situation von Fahrzeug, Oberbau und Unterbau beschreibt.

4.5 Linearisierung

Elastische Elemente zeigen im Allgemeinen stark nichtlineare Eigenschaften. Da im Folgenden nur lineare Ersatzsysteme behandelt werden, ist eine Linearisierung der Steifigkeits- und Dämpfungskennlinien der elastischen Elemente erforderlich. Diese Linearisierung muss im Arbeitspunkt erfolgen, d. h. für die statische Dauerlast oder statische Maximallast. Eine weitere Linearisierung bzgl. der Abhängigkeit der Steifigkeit von der Größe der Schwingungsamplituden, die ihre Ursache auch in Nichtlinearitäten hat, erfolgt nicht und ist auch nicht erforderlich, wie dies aus messtechnischen Untersuchungen hervorgeht.

5 Rechnerische Abschätzung des Einfügungsdämm-Maßes mittels verschiedener Ersatzsysteme und Beschreibungsformen

5.1 Bildung eines Ersatzsystems

5.1.1 Allgemeines

Die meisten Komponenten nach 4.2 sowie die elastischen Elemente des Oberbaus sind kontinuierliche Systeme und müssten deshalb generell bei einer rechnerischen Analyse als Kontinuum modelliert werden. Dazu eignet sich prinzipiell ein Ersatzsystem mit Finiten Elementen (FE), da mit dem FE-Verfahren alle geometrischen Merkmale und Werkstoffeigenschaften genügend genau beschrieben werden können.

In der Praxis haben sich zur Ermittlung des Einfügungsdämm-Maßes zwei andere, vereinfachte Ersatzsysteme in vielen Fällen als ausreichend erwiesen. Dabei werden jeweils Ersatzsysteme mit Teilsystemen des schwingungsfähigen Systems (Fahrzeuganteil, Oberbau, Unterbau) gebildet, die über die elastischen Elemente des Oberbaus gekoppelt sind. Die Teilsysteme können entweder als Mehrkörpersysteme mit diskreten Massen, Federn und Dämpfern oder durch ihre Impedanzen beschrieben werden (Beschreibungsformen; siehe Bild 1).

Eine weitere Vereinfachung bei der Ersatzsystembildung kann vorgenommen werden, indem das Teilsystem oberhalb des betrachteten elastischen Elements durch jeweils eine diskrete Masse, Feder und Dämpfer bzw. durch eine entsprechende Impedanz (Quellimpedanz) sowie das Teilsystem unterhalb des elastischen Elements durch eine Feder mit Dämpfer bzw. durch die zugehörige Impedanz (Abschlussimpedanz) abgebildet wird. Es handelt sich dann bei den beiden Beschreibungsformen mittels diskreter Massen, Federn und Dämpfer bzw. durch entsprechende Impedanzen um ein mechanisches System mit einem Freiheitsgrad.

Nachfolgend werden Einzelheiten zur Ermittlung des Einfügungsdämm-Maßes auf der Grundlage derart vereinfachter Ersatzsysteme und mittels verschiedener Beschreibungsformen angegeben.

5.1.2 Ermittlung oder Bestimmung der dynamisch wirksamen Massen und der Steifigkeiten

Für die Berechnung der Einfügungsdämmung mit den einfachen Modellen (siehe 5.2 und 5.3) ist es wichtig, die dynamisch wirksame Fahrzeug- und Oberbaumasse, die komplexe Steifigkeit der Teilsysteme sowie die komplexe Steifigkeit des elastischen Elements zu kennen.

In den Tabellen 1 und 2 sind Beispiele für dynamisch wirksame Massen von Fahrzeugen (je Achse) sowie Erfahrungswerte für dynamisch wirksame Massen von Oberbauformen zusammengestellt. Bei detaillierter Kenntnis von Fahrzeug und Oberbau lässt sich die dynamisch wirksame Fahrzeug- und Oberbaumasse genauer ermitteln.

ANMERKUNG Da das Einfügungsdämm-Maß primär zur Berechnung von Mittelungspegeln für Immissionsschutz-Untersuchungen verwendet wird, stellt sich die Frage, welche dynamisch wirksame Fahrzeugmasse für die Wahl der elastischen Elemente zur Körperschallisolierung anzusetzen ist. Bei einem aus Lok und Personenwagen bestehenden Zug ist die Verwendung der relativ großen Masse der Lok naheliegend. Dann ist aber die prognostizierte Dämmwirkung für die Körperschallemission der Wagen geringer als für die Lok.

Für die Beurteilung der Emission erfolgt vielfach eine zeitliche Mittelung, die dazu führen kann, dass der Körperschallpegel für die längere Vorbeifahrtzeit der Wagen kleiner wird als für das kurzzeitige Ereignis der Lokvorbeifahrt. Daher ist in diesem Fall eine Auslegung der elastischen Elemente auf Basis der dynamisch wirksamen Wagenmasse sinnvoller.

Die dynamisch wirksame Masse von Fahrzeugen ist vom Fahrwerk und vom Fahrzeugtyp abhängig. Bei Reisezugwagen ist aufgrund der tiefen Abstimmung (< 1 Hz) im Wesentlichen die Masse des Radsatzes anzusetzen. Hingegen muss z. B. bei Triebzügen zwischen Triebdrehgestellen, bei denen die Fahrmotoren direkt an der Achse befestigt sind, und Laufdrehgestellen unterschieden werden.

Tabelle 1 — Beispiele für dynamisch wirksame Massen von Fahrzeugen

Fahrzeugtyp	Radsatzlast kN	Zugeordnete dynamisch wirksame Masse je Achse kg
Straßenbahn, Stadtbahn	100	1 050
U-Bahn	130	1 550
S-Bahn		
alte Triebzüge (z. B. ET 420)	160	2 550
neue Triebzüge (z. B. ET 423)	160	1 550
Iokbespannter Wendezug (Wagen und Lok)	160 bzw. 250	1 050 bzw. 2 550
Vollbahn		
Lok	250	1 900 bis 2 300
Reisezugwagen	130	1 550 bis 1 700
Güterzugwagen	siehe Anmerkung	
Hochgeschwindigkeitszug (Mittelwagen und Triebkopf des ICE 1)	180 bzw. 250	1 760 bzw. 2 000
ANMERKUNG Die dynamisch wirksame Masse von Güterzugwagen setzt sich aus der Radsatzmasse und einem Anteil der Wagenkastenmasse zusammen, da Güterzüge im Allgemeinen nur <u>eine</u> Federebene aufweisen, die nur zu einer teilweisen dynamischen Entkopplung der Wagenkastenmasse führt.		

Tabelle 2 — Erfahrungswerte für dynamisch wirksame Massen von Oberbauformen

Oberbauform	Dynamisch wirksame Masse	Bemerkung
Schotteroberbau mit Unterschottermatte	600 kg	30 cm Schotter, Betonschwellen
Schotteroberbau mit Schwellenbesohlung	400 kg	Schwelle: B 70 w Schiene: UIC 60
Feste Fahrbahn	50 kg je Stützpunkt	Schienenbefestigung mit Rippenplatte und Schienenklemme
stützpunktgelagertes Masse-Feder-System mit Fester Fahrbahn	8 700 kg je Federpunkt (mindestens 2 Federelemente)	Plattendicke: 0,8 m Plattenbreite: 3,0 m Lagerabstand: 1,5 m
flächig gelagertes Masse-Feder-System mit Rillenschiene	550 kg je laufender Meter	Plattendicke: 0,2 m Plattenbreite: 3,0 m vollflächige Elastomermatte
ANMERKUNG Bei detaillierter Kenntnis des Oberbaus lässt sich die dynamisch wirksame Masse einer Oberbauform genauer ermitteln.		

Die komplexe Steifigkeit des elastischen Elements ist nach DIN 45673-1 zu ermitteln, wobei im Allgemeinen eine hysteretische Dämpfung zugrunde gelegt werden kann. Für die komplexe Steifigkeit k_E des Schotters kann als Erfahrungswert $k_E = k_{\text{kin},S} (1 + i \eta_S) = (2 \text{ bis } 5) \cdot 10^8 [1 + i (0,35 \text{ bis } 0,5)] \text{ N/m}$ mit der kinetischen Steifigkeit $k_{\text{kin},S}$ und dem Verlustfaktor η_S verwendet werden. Weitergehende Hinweise finden sich in 5.3.4 und in der Literatur (z. B. [7]).

Bei Brücken liegt häufig ein Messwert der niedrigsten vertikalen Biegeeigenfrequenz f_0 vor. Wenn die Brücke mit der Gesamtmasse m_B (einschließlich dem Oberbau) als beidseitig gelenkig gelagerter Einfeldträger angenommen wird, kann die dynamische Steifigkeit k_E der Brücke bei Ansatz eines Ersatzsystems mit einem Freiheitsgrad und der Ersatzmasse m_{BE} in Brückenmitte berechnet werden zu

$$k_E = m_{BE} (2\pi f_0)^2 \quad (6)$$

mit

$$m_{BE} = \frac{48}{\pi^4} m_B \quad (7)$$

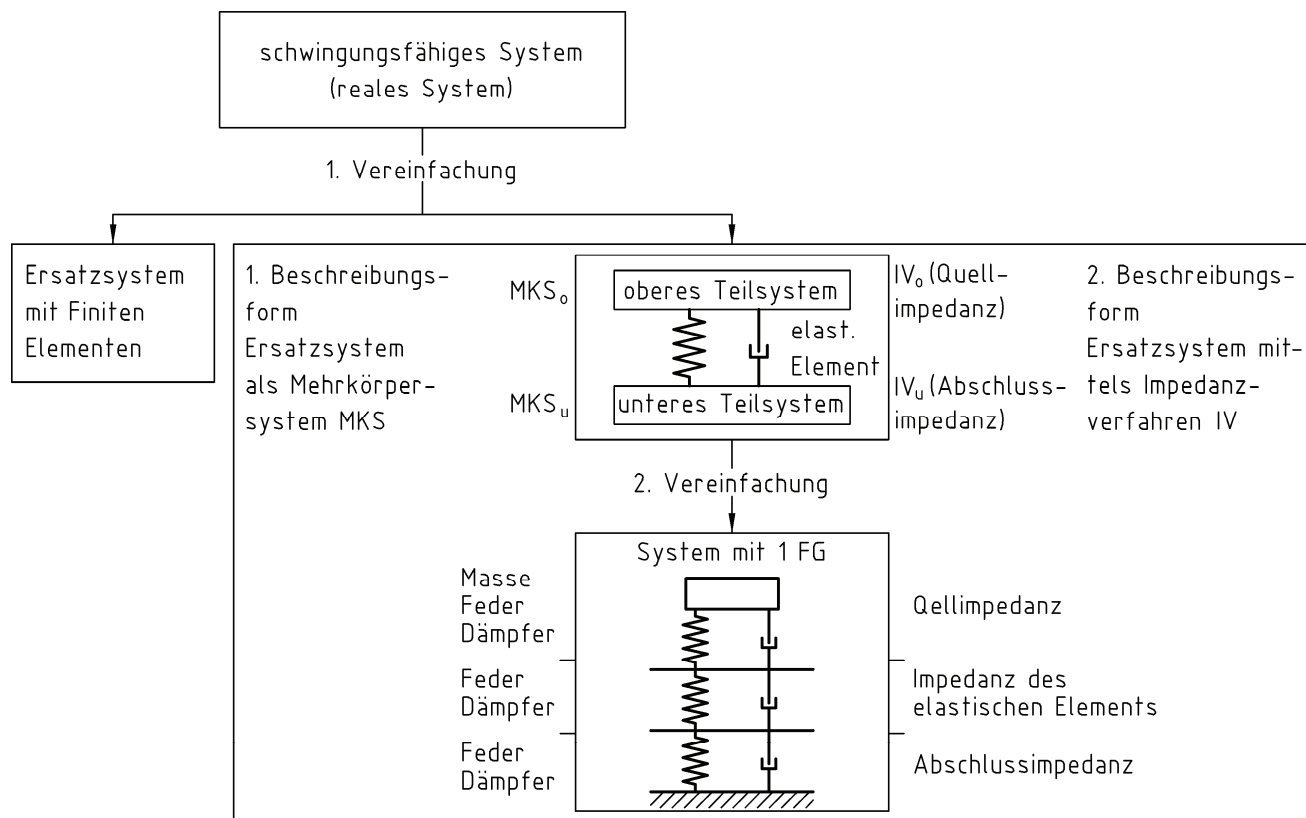


Bild 1 — Bildung von Ersatzsystemen für die Berechnung des Einfügungsdämm-Maßes

5.2 Ersatzsystem mit einem Freiheitsgrad: Beschreibungsform mittels Masse, Feder und Dämpfer

5.2.1 Allgemeine Herleitung

Nachfolgend ist zunächst für das **Referenzsystem ohne das elastische Element** die Gleichung zur Berechnung der Übertragungsfunktion $H_{\text{Ref}}(if)$ zwischen der auf das untere Teilsystem wirkenden Kraftamplitude $\hat{F}_{\text{uRef}}(if)$ und der Amplitude $\hat{F}_{\text{E}}$ der harmonischen Erregerkraft mit der Frequenz f angegeben [siehe Bild 2 a)]:

$$H_{\text{Ref}}(if) = \frac{\hat{F}_{\text{uRef}}(if)}{\hat{F}_{\text{E}}} = \frac{k_{\text{Ref}}(if)}{k_{\text{Ref}}(if) - (2\pi f)^2 m_{\text{Ers}}} \quad (8)$$

Dabei ist

m_{Ers} die dynamisch wirksame Fahrzeug- und Oberbaumasse;

$$k_{\text{Ref}}(if) = \left(\frac{1}{k_{\text{k,o}}(if)} + \frac{1}{k_{\text{k,u}}(if)} \right)^{-1} = \frac{k_{\text{k,o}}(if) \cdot k_{\text{k,u}}(if)}{k_{\text{k,o}}(if) + k_{\text{k,u}}(if)} \quad (9)$$

$k_{\text{k,o}}$ die komplexe Steifigkeit des oberen Teilsystems;

$k_{\text{k,u}}$ die komplexe Steifigkeit des unteren Teilsystems.