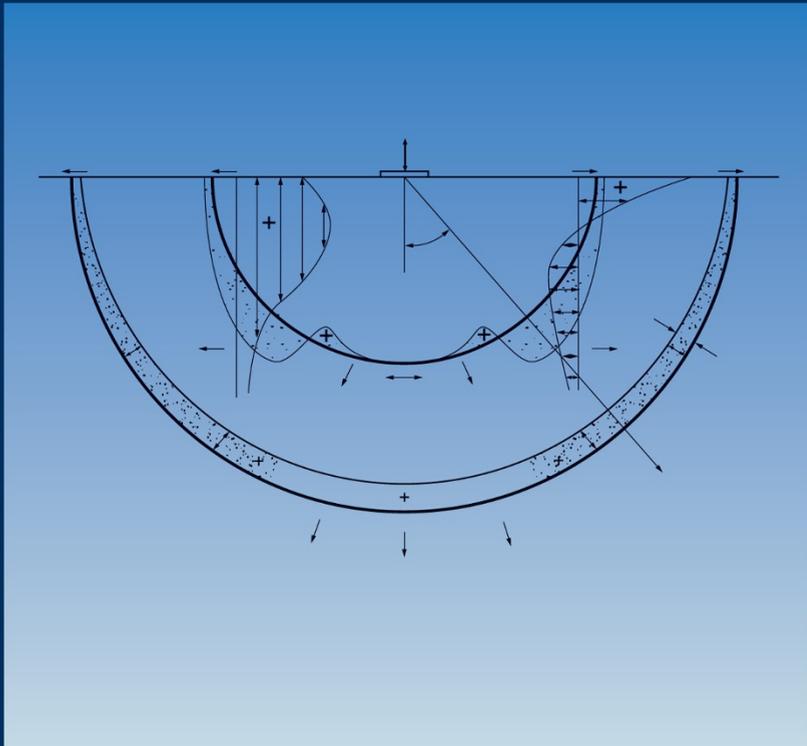




# Empfehlungen des Arbeitskreises „Baugrunddynamik“

2. Auflage





**Empfehlungen  
des Arbeitskreises  
Baugrunddynamik**



# Empfehlungen des Arbeitskreises Baugrunddynamik

*Herausgegeben von der  
Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT)*

Herausgegeben von der  
Deutschen Gesellschaft für Geotechnik  
Arbeitskreis 1.4 „Baugruddynamik“

*Obmann: Univ. Prof. Dr.-Ing. Stavros A. Savidis*  
Technische Universität Berlin  
Fachgebiet Grundbau und Bodenmechanik  
und  
GuD Geotechnik und Dynamik Consult  
GmbH  
Darwinstraße 13  
10589 Berlin

Alle Bücher von Ernst & Sohn werden sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Autoren, Herausgeber und Verlag in keinem Fall, einschließlich des vorliegenden Werkes, für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler irgendeine Haftung

**Bibliografische Information  
der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© 2019 Wilhelm Ernst & Sohn, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Rotherstraße 21, 10245 Berlin, Germany

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form – durch Photokopie, Mikroverfilmung oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden. Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie nicht eigens als solche markiert sind

**Umschlaggestaltung:** Design Pur GmbH, Berlin

**Satz:** Reemers Publishing Services GmbH, Krefeld

**Herstellung:**

pp030 – Produktionsbüro Heike Praetor, Berlin

**Druck und Bindung:**

**Print ISBN:** 978-3-433-03198-8

**ePDF ISBN:** 978-3-433-60861-6

**ePub ISBN:** 978-3-433-60859-3

**oBook ISBN:** 978-3-433-60858-6

## Vorwort des Obmanns des Arbeitskreises

Der Arbeitskreis „Baugrunddynamik“ der DGGT wurde im Jahr 1980 im Rahmen der Baugrundtagung konstituiert. Ergebnisse seiner Arbeit wurden als Empfehlungen in der Vergangenheit vorab 1992 in der Zeitschrift „Die Bautechnik“ veröffentlicht und später auch durch Anwendungsbeispiele ergänzt. Im Dezember 2002 wurde die erste Ausgabe der Empfehlungen im Eigenverlag des Grundbauinstituts der Technischen Universität Berlin herausgegeben.

Ziel der „Empfehlungen des Arbeitskreises 1.4 Baugrunddynamik“ ist es, das Vorgehen bei baugrunddynamischen Aufgaben zu vereinheitlichen und Hinweise zu geben, wie durch angemessene baugrunddynamische Untersuchungen die Beeinträchtigung von Einrichtungen, Schäden an Bauwerken und Anlagen sowie störende Umwelteinwirkungen auf Menschen und Geräte vermieden werden können.

Die vorliegenden Empfehlungen stellen den neuesten Stand von Wissenschaft und Technik auf dem Gebiet der Baugrunddynamik dar. Sie beruhen auf gesicherten Erkenntnissen, die einen empirischen Nachweis einschließen, d. h. es liegen für diese Empfehlungen auch praktische Erprobungen vor. Sie sind daher Bestandteil der „allgemein anerkannten Regeln der Technik“.

Für die vorliegende zweite Ausgabe wurden die Empfehlungen erneut umfangreich überarbeitet und um zwei Teile ergänzt. Sie gliedern sich wie folgt:

- E1 Wellenausbreitung im Baugrund
- E2 Bodendynamische Kennwerte (Kapitel 3 neu)
- E3 Dynamisch belastete Fundamente (Überarbeitet und erweitert mit eingebetteten Fundamenten)
- E4 Bleibende Verformungen (neu)
- E5 Dynamisch belastete Pfahlgründungen (neu)

Der Arbeitskreis ist an kritischen und anregenden Stellungnahmen aus dem Kollegenkreis sehr interessiert, um die vorliegenden Empfehlungen fortschreiben zu können.

Berlin, Mai 2018

Prof. Dr.-Ing. habil. Stavros A. Savidis  
(Obmann des Arbeitskreises)



## Mitglieder des Arbeitskreises

Zum Zeitpunkt der Herausgabe der vorliegenden Veröffentlichung setzte sich der Arbeitskreis „Baugrunddynamik“ wie folgt zusammen:

Dr.-Ing. Silke Appel, Berlin  
Prof. Dr.-Ing. Ingomar Belz, Stuttgart  
Dr.-Ing. Klaus Friedrich, Essen  
Dr.-Ing. Hans-Georg Hartmann, Frankfurt  
Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Haupt, Schwabach  
Dr.-Ing. Kira Holtzendorff, Hamburg  
Prof. Dr.-Ing. Helmut Kramer (Obmann von 1980 bis 1992), Hamburg  
Dr.-Ing. Peter Rangelow, Zürich  
Dipl.-Ing. Marc Oliver Rosenquist, Hamburg  
Prof. Dr.-Ing. Werner Rücker, Berlin  
Prof. Dr.-Ing. Stavros Savidis (Obmann seit 1992), Berlin  
Dr.-Ing. Winfried Schepers, Berlin  
Dr.-Ing. Hans-Gottfried Schmidt, Weimar  
Prof. Dr.-Ing. Joachim Stahlmann, Braunschweig  
Prof. Dr.-Ing. Theodor Triantafyllidis, Karlsruhe  
Prof. Dr.-Ing. Christos Vrettos, Kaiserslautern  
Dr.-Ing. Dirk Wegener, Dresden  
Dr.-Ing. M. Sc. Jimmy Wehr, Erfurt  
Dipl.-Ing. Bernd Worms, Leverkusen  
Prof. Dr.-Ing. Frank Wuttke, Kiel  
Dr.-Ing. Uwe Zerrenthin, Berlin

Weitere Mitglieder bzw. Mitwirkende waren:

Dr. Hans-Joachim Alheid, Hannover  
Dr.-Ing. Hansgeorg Balhaus, Düsseldorf  
Dipl.-Ing. Stefan Bergmann, Berlin  
Dr.-Ing. Jörg Gattermann, Braunschweig  
Dr.-Ing. habil. Ingeborg Göbel Hannover  
Prof. Dr.-Ing. Jürgen Grabe, Hamburg  
Dr.-Ing. Ulrich Güttler, Essen  
Dipl.-Ing. Reinhold Hirschauer, Berlin  
Dr. rer. nat. Hans-Werner Kebe, Hamburg

Prof. Dr.-Ing. Günter Klein, Hannover (†)  
Dr.-Ing. Jan Laue, Lulea, Schweden  
Prof. Dr.-Ing. Thomas Neidhart, Regensburg  
Dipl.-Geophys. Werner Palloks, Berlin  
Prof. Dr.-Ing. Hamid Sadegh-Azar, Kaiserslautern  
Prof. Dr. Günther Schmid, Bochum  
Dipl.-Ing. Werner Schütz, Offenbach  
Dipl.-Ing. Heinz Schwab, Darmstadt  
Dr. Günter Waas, Frankfurt  
Dr.-Ing. Thomas Weber, Zürich

## Inhaltsverzeichnis

	<b>Vorwort des Obmanns des Arbeitskreises</b>	<i>v</i>
	<b>Mitglieder des Arbeitskreises</b>	<i>vii</i>
	<b>E1 Wellenausbreitung im Baugrund</b>	<i>1</i>
<b>1</b>	<b>Grundlagen</b>	<i>1</i>
<b>2</b>	<b>Wellenarten in homogenen, inhomogenen und geschichteten Medien</b>	<i>1</i>
2.1	Vorbemerkungen	<i>1</i>
2.2	Raumwellen	<i>2</i>
2.3	Oberflächenwellen	<i>3</i>
<b>3</b>	<b>Lage der Schwingungsquelle</b>	<i>4</i>
3.1	Quelle an der Oberfläche	<i>4</i>
3.2	Quelle im Untergrund	<i>6</i>
<b>4</b>	<b>Weitere Einflüsse</b>	<i>6</i>
4.1	Materialdämpfung	<i>6</i>
4.2	Inhomogenitäten	<i>7</i>
4.3	Einschlüsse und Oberflächenmorphologie	<i>12</i>
	<b>Literatur</b>	<i>13</i>
	<b>E2 Bodendynamische Kennwerte</b>	<i>15</i>
<b>1</b>	<b>Baugrundmodell</b>	<i>15</i>
1.1	Voraussetzungen und Anwendungsgrenzen	<i>15</i>
1.2	Kenngößen	<i>15</i>
<b>2</b>	<b>Ermittlung der bodendynamischen Kennwerte</b>	<i>16</i>
2.1	Ermittlung aus bodenmechanischen und bodenphysikalischen Kennwerten	<i>16</i>
2.1.1	Schubmodul bei dynamischer Beanspruchung $G_d$	<i>16</i>
2.1.2	Dichte des Bodens	<i>21</i>

2.1.3	Querdehnzahl	21
2.1.4	Materialdämpfung	22
2.2	Bestimmung aus bodendynamischen Versuchen	23
2.2.1	Vorbemerkungen	23
2.2.2	Feldversuche	24
2.2.2.1	Allgemeines	24
2.2.2.2	Wellengeschwindigkeiten	24
2.2.2.3	Refraktionsseismik	25
2.2.2.4	Bohrloch-Messungen	25
2.2.2.5	Seismische Drucksonden-Messungen (S-CPT)	26
2.2.2.6	Rayleighwellen-Dispensionsmessung	26
2.2.2.7	Seismische Analyse von Oberflächenwellen (SASW)	28
2.2.2.8	Korrelationen aus statischen Feldversuchen	28
2.2.3	Laborversuche	28
2.2.3.1	Allgemeines	28
2.2.3.2	Zyklische Versuche	28
2.2.3.3	Dynamische Versuche	30
2.2.3.4	Durchschallungsmessungen und Piezo-Biegeelement-Messungen (bender elements)	30
2.2.4	Anwendungsbereiche der Versuchsverfahren	31
2.2.5	Mindestanforderungen	31

### **3 Anwendungsbeispiele** 33

3.1	Bestimmung dynamischer Bodenkennwerte aus einem geotechnischen Bericht	33
3.2	Feldversuche	35
3.2.1	Beispiel für seismische Drucksondenmessungen (S-CPT)	35
3.2.2	Beispiel für eine Korrelation aus Drucksondenmessungen (CPT)	37
3.3	Laborversuche	37
3.3.1	Beispiel für einen zyklischen Triaxialversuch	37
3.3.2	Beispiel für einen zyklischen Einfach-Scherversuch	38
3.3.3	Beispiel für einen Resonant-Column-Versuch	39
3.3.4	Beispiel für Piezoelement-Messungen	40

### **Literatur** 42

## **E3 Dynamisch belastete starre Fundamente** 45

### **1 Allgemeines** 45

### **2 Voraussetzungen und Berechnungsverfahren** 47

2.1	Annahmen	47
2.2	Direkte Erregung	47
2.3	Indirekte Erregung	51
2.3.1	Oberflächenfundamente	51
2.3.2	Eingebettete Fundamente	52
2.4	Notation und Bezugsgrößen	52

<b>3</b>	<b>Homogener Baugrund</b>	<b>53</b>
3.1	Frequenzunabhängige Federsteifigkeiten und Dämpfungen	53
3.1.1	Kreisförmige Oberflächenfundamente	53
3.1.2	Kreisförmige eingebettete Fundamente	55
3.1.3	Rechteckförmige Oberflächenfundamente	55
3.1.4	Rechteckförmige eingebettete Fundamente	57
3.2	Frequenzabhängige Federsteifigkeiten und Dämpfungen	59
3.2.1	Kreisförmige Fundamente	59
3.2.2	Rechteckförmige Fundamente	62
<b>4</b>	<b>Inhomogener Baugrund</b>	<b>72</b>
4.1	Einfluss der Gründungslasten	73
4.2	Kontinuierliche Steifigkeitszunahme und Steifigkeitssprünge	73
<b>5</b>	<b>Abschätzung des Einflusses weiterer Parameter</b>	<b>77</b>
5.1	Querdehnzahl	77
5.2	Streifenfundamente	78
<b>6</b>	<b>Sensitivität der Fundamentalschwingungen</b>	<b>78</b>
<b>7</b>	<b>Berechnungsbeispiele</b>	<b>79</b>
7.1	Vorbemerkungen	79
7.2	Vertikale Schwingungen am starren Rechteckfundament	79
7.3	Gekoppelte Horizontal- und Kippschwingungen eines starren Rechteckfundamentes	86
7.3.1	Berechnung mit Berücksichtigung der Einbettung	86
7.3.2	Berechnung ohne Berücksichtigung der Einbettung	96
7.3.3	Vergleich der Berechnungen mit und ohne Berücksichtigung der Einbettung	101
7.4	Durch Bodenschwingungen erregtes Rechteckfundament (Indirekte Erregung)	101
	<b>Literatur</b>	<b>104</b>
<b>E4</b>	<b>Bleibende Verformungen</b>	<b>107</b>
<b>1</b>	<b>Grundlagen der Akkumulation bleibender Verformungen</b>	<b>107</b>
<b>2</b>	<b>Näherungsweise Ermittlung bleibender Verformungen im Boden</b>	<b>109</b>
2.1	Allgemeiner Überblick	109
2.2	Ermittlung der zyklischen Schubspannungen und Scherdehnungen	111
2.3	Labor- und Feldversuche	112
2.4	Ermittlung bleibender Dehnungen in feinkörnigen, bindigen Böden	113
2.5	Ermittlung bleibender Dehnungen in nicht-bindigen Böden	114
2.6	Ermittlung bleibender Dehnungen mit dem HCA-Modell für Sand	115
2.7	Ermittlung der Setzungen von Flachfundamenten infolge zyklischer Einwirkungen	118

<b>3</b>	<b>Bauwerksschäden durch indirekte Erregung – Weitere Phänomene</b>	<b>118</b>
<b>4</b>	<b>Berechnungsbeispiele</b>	<b>121</b>
4.1	Bleibende Setzung eines Maschinenfundamentes	121
4.2	Setzung eines durch Bodenschwingungen erregten Rechteckfundamentes	131
	<b>Literatur</b>	<b>141</b>
	<b>E5 Dynamisch belastete Pfahlgründungen</b>	<b>143</b>
<b>1</b>	<b>Vorbemerkungen</b>	<b>143</b>
<b>2</b>	<b>Einzelpfahl</b>	<b>144</b>
2.1	Definitionen und Annahmen	144
2.1.1	Dynamische Vertikal- und Torsionssteifigkeit	145
2.1.2	Dynamische Horizontal- und Kippsteifigkeit	152
<b>3</b>	<b>Pfahlgruppen</b>	<b>160</b>
<b>4</b>	<b>Bemerkungen zur Anwendung und weitere Näherungen</b>	<b>165</b>
<b>5</b>	<b>Beispielanwendungen</b>	<b>166</b>
5.1	Leitfaden für den Anwender für vertikale Anregung	166
5.2	Beispiel 1	167
5.3	Beispiel 2	168
	<b>Literatur</b>	<b>173</b>

## E1

## Wellenausbreitung im Baugrund

## 1 Grundlagen

Ein durch stationäre oder impulsförmige dynamische Kräfte belasteter Gründungskörper an der Erdoberfläche oder im Untergrund (Fundament, Pfahlgründung, unterirdisches Bauwerk) führt aufgrund der Interaktion mit dem Boden Schwingungen aus. Diese Schwingungen breiten sich von der Schwingungsquelle in Form von Wellen im umgebenden Untergrund aus.

Wenn das Material des Baugrunds sich entsprechend einem elastischen Spannungs-Verzerrungs-Gesetz verformt, pflanzen sich Schwingungen als elastische Wellen fort. Bei der Fortpflanzung von elastischen Wellen wird nur Energie transportiert, aber keine Masse. Im folgenden werden nur Wellen in einem linear-elastischen Material (Hookesches Gesetz) – in Abschnitt 4.1 auch mit Dämpfung – betrachtet.

## 2 Wellenarten in homogenen, inhomogenen und geschichteten Medien

## 2.1 Vorbemerkungen

Die einfachste Wellenart ist die so genannte eindimensionale, harmonische Welle. Sie wird mathematisch dargestellt durch die Beziehung:

$$a(x, t) = A \cdot \cos(\omega t - kx) \quad (\text{E1-1})$$

mit

$\omega = 2\pi \cdot f = 2\pi/T$	Kreisfrequenz, [1/s]
$f$	Frequenz, [Hz]
$T = 1/f$	Periode, [s]
$k = 2\pi/\lambda$	(Kreis-)Wellenzahl, [1/m]
$\lambda = 2\pi/k$	Wellenlänge, [m]
$c = f \cdot \lambda = \omega/k$	Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle (Wellengeschwindigkeit), [m/s]
$x$	Ortskoordinate, [m]
$t$	Zeit, [s]

Die Beziehung (E1-1) stellt die sich in der positiven  $x$ -Richtung fortpflanzende physikalische Größe  $a$  – z. B. Verschiebung, Geschwindigkeit, Beschleunigung, Verformung,

Spannung – dar.  $A$  ist die Amplitude (maximaler Ausschlag) der Größe  $a$ . Die Amplitude  $A$  bleibt konstant, sofern keine Dämpfung vorhanden ist.

Bild E1–1 gibt die Darstellung einer eindimensionalen Welle zu zwei verschiedenen Zeitpunkten  $t = 0$  und  $t = t_1$  an.

Bei einer dreidimensionalen Wellenausbreitung ist die mathematische Darstellung komplizierter, da die eindimensionale Koordinate  $x$  in Gleichung (E1–1) durch einen dreidimensionalen Ortsvektor zu ersetzen ist [1]. Statt der hier gewählten Schreibweise mit reellen Größen ist auch die Darstellung mit komplexen Größen möglich und oft vorteilhafter.

## 2.2 Raumwellen

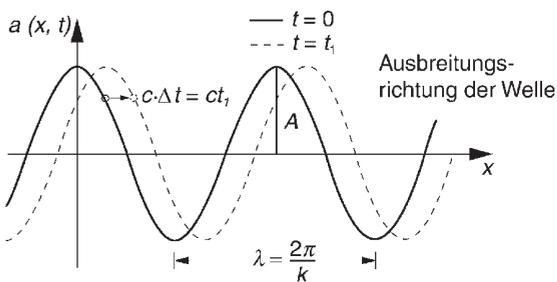
In einem unbegrenzten elastischen homogenen isotropen Körper (Vollraum) können lediglich zwei Typen von Wellen, die so genannten Raumwellen, unabhängig voneinander existieren (Bild E1–2):

- Kompressionswelle (P-Welle, Druckwelle, Longitudinalwelle),
- Scherwelle (S-Welle, Schubwelle, Transversalwelle).

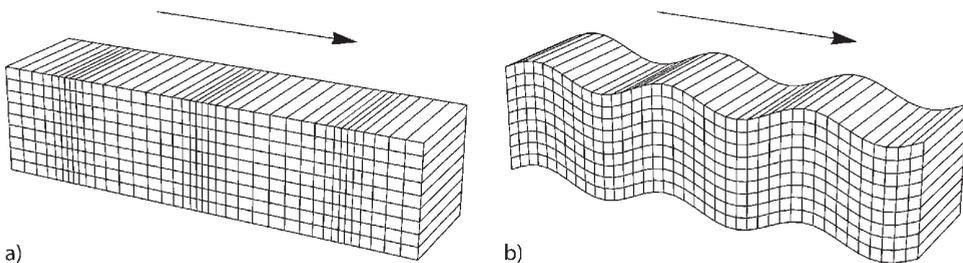
Die Wellengeschwindigkeiten ergeben sich entsprechend den Gleichungen (E1–2) und (E1–3).

Kompressionswelle

$$c_p = \sqrt{\frac{E_{sd}}{\rho}} = \sqrt{\frac{E_d}{\rho} \cdot \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}} = \sqrt{\frac{G_d}{\rho} \cdot \frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}} \quad (\text{E1-2})$$



**Bild E1-1** Eindimensionale Welle zu den Zeitpunkten  $t = 0$  und  $t = t_1$



a)

b)

**Bild E1-2** Raumwellentypen: Kompressionswelle (a), Scherwelle (b)

Scherwelle

$$c_S = \sqrt{\frac{G_d}{\rho}} = \sqrt{\frac{E_d}{\rho} \cdot \frac{1}{2(1+\nu)}} = \sqrt{\frac{E_{Sd}}{\rho} \cdot \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}} \quad (\text{E1-3})$$

mit

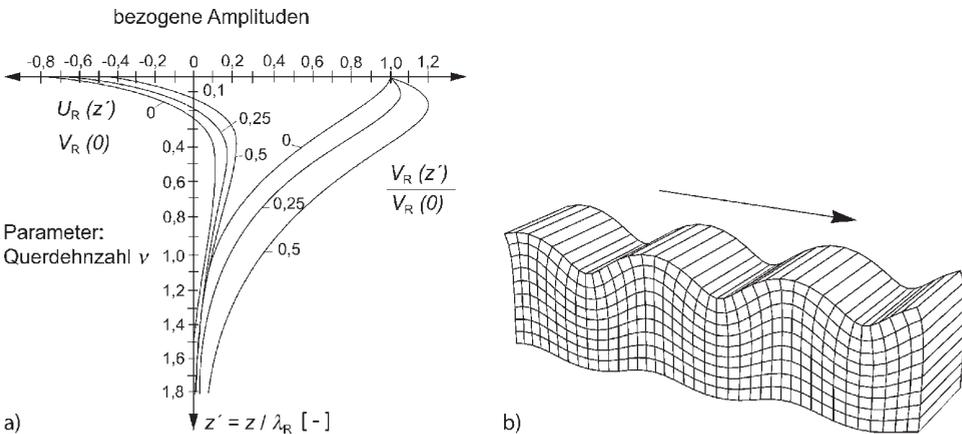
- $c_p$  Geschwindigkeit der Kompressionswelle
- $c_S$  Geschwindigkeit der Scherwelle
- $E_{Sd}$  dynamischer Steifemodul
- $E_d$  dynamischer Elastizitätsmodul
- $G_d$  dynamischer Schubmodul
- $\nu$  Querdehnzahl
- $\rho$  Materialdichte

In einem Halbraum treten zusätzlich Oberflächenwellen auf.

### 2.3 Oberflächenwellen

Ein Baugrund mit einer annähernd ebenen Oberfläche kann auf einen unendlich ausgedehnten, mit einer freien Fläche begrenzten Körper (Halbraum) abgebildet werden. In einem solchen System pflanzen sich Schwingungen entlang der Oberfläche als Oberflächenwellen fort. Im Spezialfall des homogenen Halbraums werden sie Rayleighwellen genannt. Diese Wellen haben u. a. folgende Eigenschaften:

- Sie breiten sich parallel zur Oberfläche mit der Wellengeschwindigkeit  $c_R$  aus.
- Die Teilchenbewegung besteht aus einer Kombination von Vertikal- und Horizontalschwingungen, die eine Ellipsenbahn bildet (Bild E1-3).
- Die Amplitude der Vertikal- bzw. der Horizontalschwingung nimmt mit der Tiefe rasch ab (Bild E1-3).



**Bild E1-3** Verlauf der horizontalen und vertikalen Schwingamplituden  $U_R(z')$  und  $V_R(z')$  der freien Rayleighwelle über die Tiefe  $z' = z/\lambda_R$  bezogen auf die vertikale Schwingamplitude an der Oberfläche  $V_R(0)$

- Für die effektive Eindringtiefe der Wellen in den Halbraum wird rund eine Wellenlänge  $\lambda_R = c_R / f$  angesetzt (Bild E1-3).
- Die Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c_R$  der Rayleighwellen hängt von der Querdehnzahl  $\nu$  ab und entspricht näherungsweise 90 % der Scherwellengeschwindigkeit. Eine etwas genauere Näherung erhält man nach [21] zu

$$c_R \approx c_S \cdot \frac{0,87 + 1,12 \nu}{1 + \nu} \quad (E1-4)$$

- Grundwasser beeinflusst die Ausbreitung der Wellen nur in geringem Maß.

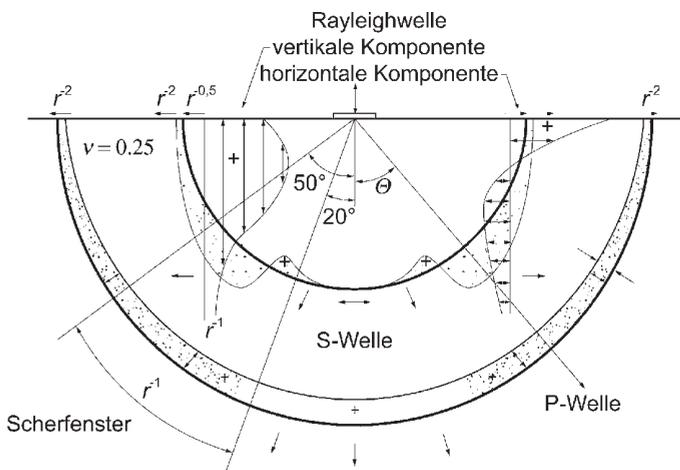
In geschichteten Medien können weitere Typen von Oberflächenwellen, z. B. Love-Wellen, auftreten.

### 3 Lage der Schwingungsquelle

#### 3.1 Quelle an der Oberfläche

Bei einer Wellenquelle an der Oberfläche – z. B. einem schwingenden Fundament (Bild E1-4 aus [2]) – bestimmen im Nahfeld überwiegend Raumwellen (P-, S-Wellen) die Ausbreitungscharakteristik, wohingegen ab einer Entfernung von rund einer Wellenlänge  $\lambda_R$  von der Quelle (Fernfeld) sich die Schwingungen an der Oberfläche hauptsächlich in Form von Oberflächenwellen ausbreiten. Diese Zusammenhänge gelten bei impulsförmiger Erregung für die der vorherrschenden Frequenz entsprechenden Wellenlänge. Bei breitbandigem Frequenzspektrum eines Impulses kann ein solcher Zusammenhang nicht angegeben werden.

Die Abnahme der Amplitude an der freien Oberfläche mit der Entfernung  $r$  von der Wellenquelle aufgrund der Ausbreitung – auch geometrische Dämpfung oder Abstrahlungsdämpfung genannt – kann näherungsweise mit der Beziehung



**Bild E1-4** Wellentypen an einem stationär harmonisch schwingenden Fundament (Punktquelle); die Entfernung zur Quelle gibt die relative Wellengeschwindigkeit an [2]

$$A(r) = A_0(r_0) \left( \frac{r}{r_0} \right)^{-n} \quad (\text{E1-5})$$

beschrieben werden. Darin sind  $r$  und  $r_0$  die Entfernungen des betrachteten Punktes (Amplitude  $A$ ) bzw. eines Referenzpunktes (Amplitude  $A_0$ ) von der Wellenquelle.

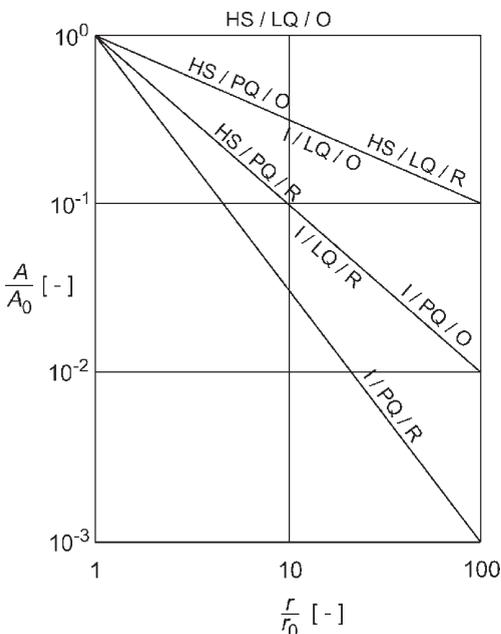
In Tabelle E1-1 sind die Exponenten angegeben, in Bild E1-5 die entsprechenden Ausbreitungsgesetze. Der Exponent  $n$  ist abhängig von:

- dem Typ der Schwingungen: harmonisch/stationär (HS), impulsförmig (I),
- der Form der Wellenquelle: Punktquelle (PQ), Linienquelle (LQ),
- dem Wellentyp: Raumwellen (R), Oberflächenwellen (O)

**Tabelle E1-1** Exponent  $n$  zu Gleichung (E1-5)

Schwingungstyp	Wellenquelle	Wellentyp	
		R	O
HS	PQ	1,0	0,5
	LQ	0,5	0
I	PQ	1,5	1,0
	LQ	1,0	0,5

Die Erhöhung der Exponenten bei impulsförmiger Erregung ergibt sich aus den frequenzabhängigen Eigenschaften des natürlichen Baugrunds (Dispersion). Es handelt sich um experimentell ermittelte Näherungswerte. Bei Gewinnungssprengungen wur-



**Bild E1-5** Amplitudenabnahme bei der Wellenausbreitung an der Oberfläche entsprechend Gleichung (E1-5) und Tabelle E1-1