

DIN EN 12390-11

ICS 91.100.30

Ersatz für
DIN SPEC 1176
(DIN CEN/TS 12390-11):2010-05

**Prüfung von Festbeton –
Teil 11: Bestimmung des Chloridwiderstandes von Beton –
Einseitig gerichtete Diffusion;
Deutsche Fassung EN 12390-11:2015**

Testing hardened concrete –

Part 11: Determination of the chloride resistance of concrete, unidirectional diffusion;
German version EN 12390-11:2015

Essais pour béton durci –

Partie 11: Détermination de la résistance du béton à la pénétration des chlorures, diffusion unidirectionnelle;

Version allemande EN 12390-11:2015

Gesamtumfang 36 Seiten

DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau)

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (EN 12390-11:2015) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 104 „Beton und zugehörige Produkte“ erarbeitet, dessen Sekretariat vom DIN (Deutschland) gehalten wird.

Im DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau) war hierfür der Arbeitsausschuss NA 005-07-05 AA „Prüfverfahren für Beton (SpA CEN/TC 104/SC 1/TG 8 und CEN/TC 104/SC 1/TG 11 sowie CEN/TC 51/WG 12)“ zuständig.

Änderungen

Gegenüber DIN CEN/TS 12390-11 (DIN SPEC 1176):2010-05 wurden die folgenden Änderungen vorgenommen:

- a) im Abschnitt 2 wurden die normativen Verweisungen aktualisiert;
- b) im Abschnitt 8 wurde ein Mindestwert des Bestimmtheitsmaßes aufgenommen; weitere Hinweise zu den Berechnungen wurden ebenfalls aufgenommen;
- c) im Abschnitt 9 wurden Angaben zur Grafik und zu den aufgenommenen und gestrichenen Punkten hinzugefügt; ferner wurden Angaben zum Bestimmtheitsmaß aufgenommen;
- d) im Abschnitt 10 wurde die Tabelle 3 hinzugefügt;
- e) ein neuer Anhang, Anhang E (informativ) „Hinweise zum Prüfverfahren“, wurde aufgenommen;
- f) ein neuer Anhang, Anhang F (informativ) „Beispiele für die Kalibrierung des Berechnungsverfahrens für die Regressionsanalyse“, wurde aufgenommen;
- g) die Literaturhinweise wurden überarbeitet;
- h) die Norm wurde redaktionell überarbeitet.

Frühere Ausgaben

DIN CEN/TS 12390-11 (DIN SPEC 1176): 2010-05

Deutsche Fassung

Prüfung von Festbeton —
Teil 11: Bestimmung des Chloridwiderstandes von Beton —
Einseitig gerichtete Diffusion

Testing hardened concrete —
Part 11: Determination of the chloride resistance
of concrete, unidirectional diffusion

Essais pour béton durci —
Partie 11: Détermination de la résistance du béton à la
pénétration des chlorures, diffusion unidirectionnelle

Diese Europäische Norm wurde vom CEN am 19. Juni 2015 angenommen.

Die CEN-Mitglieder sind gehalten, die CEN/CENELEC-Geschäftsordnung zu erfüllen, in der die Bedingungen festgelegt sind, unter denen dieser Europäischen Norm ohne jede Änderung der Status einer nationalen Norm zu geben ist. Auf dem letzten Stand befindliche Listen dieser nationalen Normen mit ihren bibliographischen Angaben sind beim Management-Zentrum des CEN-CENELEC oder bei jedem CEN-Mitglied auf Anfrage erhältlich.

Diese Europäische Norm besteht in drei offiziellen Fassungen (Deutsch, Englisch, Französisch). Eine Fassung in einer anderen Sprache, die von einem CEN-Mitglied in eigener Verantwortung durch Übersetzung in seine Landessprache gemacht und dem Management-Zentrum mitgeteilt worden ist, hat den gleichen Status wie die offiziellen Fassungen.

CEN-Mitglieder sind die nationalen Normungsinstitute von Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, der ehemaligen jugoslawischen Republik Mazedonien, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Kroatien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, den Niederlanden, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, der Schweiz, der Slowakei, Slowenien, Spanien, der Tschechischen Republik, der Türkei, Ungarn, dem Vereinigten Königreich und Zypern.



EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG
EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION
COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION

CEN-CENELEC Management-Zentrum: Avenue Marnix 17, B-1000 Brüssel

Inhalt

	Seite
Europäisches Vorwort.....	3
Einleitung.....	5
1 Anwendungsbereich.....	6
2 Normative Verweisungen	6
3 Begriffe, Symbole und Abkürzungen	6
3.1 Begriffe	6
3.2 Symbole und Abkürzungen	7
4 Kurzbeschreibung.....	8
5 Reagenzien und Geräte.....	9
5.1 Reagenzien	9
5.2 Geräte.....	9
6 Vorbereitung der Probekörper	10
6.1 Vorbereitung der Teilprobekörper.....	10
6.2 Klimatisierung und Vorbereitung des Probekörpers für die Chloridprüfung	11
7 Durchführung.....	14
7.1 Prüfbedingungen.....	14
7.2 Einwirkungsverfahren	14
7.3 Einwirkungsdauer	15
7.4 Bestimmung des anfänglichen Chloridgehaltes (C_i)	15
7.5 Profilschleifen	15
7.6 Chloridanalyse	17
8 Regressionsverfahren und Angabe der Ergebnisse	17
9 Prüfbericht	19
10 Präzision	20
Anhang A (informativ) Diffusionskoeffizienten.....	21
Anhang B (informativ) Bohrkern-Probekörper.....	22
Anhang C (informativ) Typische Geräte und Verfahren für die Vakuumsättigung	23
Anhang D (normativ) Untertauchverfahren für große Probekörper	25
Anhang E (informativ) Hinweise zum Prüfverfahren	26
Anhang F (informativ) Beispiele für die Kalibrierung des Berechnungsverfahrens für die Regressionsanalyse	29
Literaturhinweise	34

Europäisches Vorwort

Dieses Dokument (EN 12390-11:2015) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 104 „Beton und zugehörige Produkte“ erarbeitet, dessen Sekretariat vom DIN gehalten wird.

Diese Europäische Norm muss den Status einer nationalen Norm erhalten, entweder durch Veröffentlichung eines identischen Textes oder durch Anerkennung bis Februar 2016, und etwaige entgegenstehende nationale Normen müssen bis Februar 2016 zurückgezogen werden.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. CEN [und/oder CENELEC] sind nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Dieses Dokument ersetzt CEN/TS 12390-11:2010.

Gegenüber CEN/TS 12390-11:2010 wurden die folgenden Änderungen vorgenommen:

- im Abschnitt 2 wurden die normativen Verweisungen aktualisiert;
- im Abschnitt 8 wurde ein Mindestwert des Bestimmtheitsmaßes aufgenommen; weitere Hinweise zu den Berechnungen wurden ebenfalls aufgenommen;
- im Abschnitt 9 wurden Angaben zur Grafik und zu den aufgenommenen und gestrichenen Punkten hinzugefügt; ferner wurden Angaben zum Bestimmtheitsmaß aufgenommen;
- im Abschnitt 10 wurde die Tabelle 3 hinzugefügt;
- ein neuer Anhang, Anhang E (informativ) „Hinweise zum Prüfverfahren“, wurde aufgenommen;
- ein neuer Anhang, Anhang F (informativ) „Beispiele für die Kalibrierung des Berechnungsverfahrens für die Regressionsanalyse“, wurde aufgenommen;
- die Literaturhinweise wurden überarbeitet;
- die Norm wurde redaktionell überarbeitet.

Die Ausarbeitung dieser Europäischen Norm wurde der CEN/TC 51(CEN/TC 104)/JWG 12/TG 5 übertragen.

Das beschriebene Prüfverfahren ist Bestandteil einer Reihe von Verfahren zur Prüfung von Beton. Im Auftrag von CEN hat RILEM Chloridprüfverfahren untersucht [1]. Diese Europäische Norm basiert auf den sich daraus ergebenden Empfehlungen. Darüber hinaus nimmt sie Bezug auf Empfehlungen aus dem EU-Projekt „Chlortest“ 5. Rahmenprogramm (GRD 1-2002-71808/G6RD CT-2002-00855) [2] zur Eintauchprüfung sowie auf das Nordtest-Dokument „Method NT Build 443 Concrete hardened: Accelerated Chloride penetration“ [3].

Die Normenreihe EN 12390, *Prüfung von Festbeton*, umfasst die folgenden Teile:

- *Teil 1: Form, Maße und andere Anforderungen für Probekörper und Formen*
- *Teil 2: Herstellung und Lagerung von Probekörpern für Festigkeitsprüfungen*
- *Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern*

- *Teil 4: Bestimmung der Druckfestigkeit — Anforderungen an Prüfmaschinen*
- *Teil 5: Biegezugfestigkeit von Probekörpern*
- *Teil 6: Spaltzugfestigkeit von Probekörpern*
- *Teil 7: Dichte von Festbeton*
- *Teil 8: Wassereindringtiefe unter Druck*
- *Teil 9: Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand — Abwitterung (Technische Spezifikation)*
- *Teil 10: Bestimmung des relativen Karbonatisierungswiderstandes von Beton (Technische Spezifikation)*
- *Teil 11: Bestimmung des Chloridwiderstandes von Beton — Einseitig gerichtete Diffusion*
- *Teil 13: Bestimmung des Elastizitätsmoduls unter Druckbelastung (Sekantenmodul)*

Entsprechend der CEN-CENELEC-Geschäftsordnung sind die nationalen Normungsinstitute der folgenden Länder gehalten, diese Europäische Norm zu übernehmen: Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, die ehemalige jugoslawische Republik Mazedonien, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Kroatien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, Niederlande, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, Schweiz, Slowakei, Slowenien, Spanien, Tschechische Republik, Türkei, Ungarn, Vereinigtes Königreich und Zypern.

Einleitung

Tragwerke aus Stahlbeton, die der Einwirkung von Chloriden aus Meerwasser oder aus sonstigen Quellen ausgesetzt sind, müssen mindestens für ihre vorgesehene Nutzungsdauer gegenüber dieser Exposition beständig sein. Die Wahrscheinlichkeit der Korrosion der Bewehrung wächst signifikant mit steigendem Chloridgehalt des Betons am eingebetteten Bewehrungsstahl. Aus diesem Grund ist das Chloriddiffusionsvermögen bzw. die Durchlässigkeit des Betons für Chlorid eine wichtige zu messende Eigenschaft. Die vorliegende Europäische Norm beschreibt ein Verfahren, das für die Prüfung von Probekörpern oder Bohrkernen, die für die Beurteilung des potentiellen Chloridwiderstandes von Beton gesondert hergestellt bzw. entnommen werden, geeignet ist.

Festlegungen zur Durchführung des Prüfverfahrens mit Bohrkern-Probekörpern sind Anhang B zu entnehmen.

ANMERKUNG Dieses Prüfverfahren dauert mindestens 119 Tage, wobei diese Zeitspanne die mindestens 28-tägige Lagerung des Probekörpers vor der Prüfung, die mindestens einen Tag dauernde Vorbereitung und Konditionierung des Probekörpers und die 90-tägige Einwirkung der Chloridlösung umfasst.

1 Anwendungsbereich

Diese Europäische Norm legt ein Verfahren zur Bestimmung der einseitig gerichteten instationären Diffusion und der Oberflächenkonzentration von Chlorid bei konditionierten Probekörpern aus Festbeton fest. Dieses Prüfverfahren ermöglicht die Bestimmung des Chlorideindringens bei einer bestimmten Altersstufe, um z. B. die Betonqualität durch Vergleichsprüfungen einzustufen. Da der Widerstand gegen Chlorideindringen von der Alterung einschließlich der Auswirkungen fortschreitender Hydratation abhängt, kann sich auch die entsprechende Einstufung mit dem Alter ändern.

Dieses Prüfverfahren gilt nicht für Beton mit Oberflächenbehandlungen, z. B. mit Silanen, und ist unter Umständen nicht auf Beton, der Fasern enthält, anwendbar (siehe E.1).

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente, die in diesem Dokument teilweise oder als Ganzes zitiert werden, 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).

EN 12390-2, *Prüfung von Festbeton — Teil 2: Herstellung und Lagerung von Probekörpern für Festigkeitsprüfungen*

EN 14629, *Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken — Prüfverfahren — Bestimmung des Chloridgehaltes in Festbeton*

3 Begriffe, Symbole und Abkürzungen

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die folgenden Begriffe, Symbole und Abkürzungen.

3.1 Begriffe

3.1.1

unbehandelte Oberfläche

Oberfläche eines Betonbauteils, die während der Bauarbeiten bzw. im fertigen Bauwerk einer Chlorideinwirkung ausgesetzt ist

3.1.2

Chloridgehalt

Gehalt an säurelöslichem Chlorid, angegeben als Massenanteil in Prozent des Betons

3.1.3

Chlorideindringen

Eindringen von Chloriden in den Beton aufgrund der Einwirkung von Chloriden aus externen Quellen

3.1.4

Diffusion

Bewegung von Molekülen oder Ionen entlang eines Konzentrationsgradienten, d. h. aus einem Bereich hoher Konzentration in einen Bereich niedrigerer Konzentration

3.1.5

Diffusionskoeffizient

Proportionalität zwischen dem molekularen Fluss (z. B. der Durchflussrate von Chloridionen) und dem Konzentrationsgradienten in der Diffusionsgleichung

Anmerkung 1 zum Begriff: Der vorliegenden Europäischen Norm liegt das Ficksche Gesetz zugrunde.

Anmerkung 2 zum Begriff: Siehe Anhang A.

3.1.6 anfänglicher Chloridgehalt

C_i

Chloridgehalt des Betons in einem hinreichend großen Abstand zur beanspruchten Oberfläche, wo eine Beeinflussung durch das Eindringen von Chloriden aus der Lösung ausgeschlossen werden kann

Anmerkung 1 zum Begriff: Er gibt den ursprünglichen, nach dem Anmischen vorhandenen Gehalt an Chloriden wieder, die aus den Bestandteilen des Betons stammen.

3.1.7 Diffusionskoeffizient im instationären Zustand

D_{nss}

Diffusionskoeffizient, der die Chloridbindung im Beton berücksichtigt

Anmerkung 1 zum Begriff: Der Chloriddiffusionskoeffizient im stationären Zustand wird an wassergesättigten Probekörpern gemessen, bei denen Chloride durch einen dünnen Probekörper diffundieren, der sich zwischen zwei Chloridlösungen unterschiedlicher Konzentration befindet. Die Chloriddiffusion im stationären Zustand wird im vorliegenden Prüfverfahren nicht behandelt. Der Chloriddiffusionskoeffizient im stationären Zustand gibt nur die durch Ionentransport verursachte Diffusion im Beton wieder, da der Beton keine zusätzlichen Chloridionen einzubinden vermag.

Anmerkung 2 zum Begriff: Siehe Anhang A.

3.1.8 Profilschleifen

trockenes Schleifen zum Abtrag dünner aufeinander folgender Schichten eines Betonprobekörpers

3.1.9 vakuumgesättigter Zustand

Probekörper, der im Vakuum mit Wasser gesättigt wurde

3.2 Symbole und Abkürzungen

C_i	Anfänglicher Chloridgehalt, in % Massenanteil des Betons
$C_{m,j}$	Gemessener Chloridgehalt der Betonschicht j, in % Massenanteil des Betons
$C_{r,j}$	Chloridgehalt der Schicht j, berechnet nach Gleichung (1) unter Anwendung der am besten geeigneten Kombination von C_s und D_{nss} , in % Massenanteil des Betons
C_s	Berechneter Chloridgehalt an der beanspruchten Betonoberfläche, in % Massenanteil des Betons
C_x	Der bei einer durchschnittlichen Tiefe x und der Beaufschlagungszeit t gemessene Chloridgehalt, in % Massenanteil des Betons
D_{nss}	Chloriddiffusionskoeffizient im instationären Zustand, in $m^2 s^{-1}$
F	Summe der Quadrate der Restgrößen
FR	Durchflussrate (Fluss), in $mol m^{-2} s$
j1 bis jn	Abgezogene Schicht, bezogen auf die Anzahl der abgezogenen Schichten, wobei die oberste Schicht (die beaufschlagte Oberfläche) als j1 definiert wird
r	Wiederholpräzision
R	Vergleichpräzision

R^2	Bestimmtheitsmaß
sr	Wiederholstandardabweichung
sR	Vergleichstandardabweichung
S	Summe der Quadrate
t	Beaufschlagungszeit, in Sekunden
u	Variable des Integrals ohne Einheiten
x	Tiefe unterhalb der beaufschlagten Oberfläche bis zum Mittelpunkt der geschliffenen Schicht j, in m
z	Adimensionalparameter ohne Einheiten
$\partial c/\partial x$	Konzentrationsgradient, wobei die Konzentration in mol/m ³ angegeben wird

4 Kurzbeschreibung

Ein zylindrischer oder würfelförmiger Probekörper ist nach EN 12390-2 herzustellen und zu lagern, wobei die Lagerungsdauer mindestens 28 Tage betragen muss.

Anhang B enthält eine Anleitung zur Prüfung von Probekörpern, die als Bohrkerne entnommen wurden, wobei der Kern aus einem Prüfelement, einem vorgefertigten Betonbauteil oder einem Bauwerk entnommen werden kann.

Der Probekörper wird in zwei Teilprobekörper zerteilt – in einen Probekörper, der zur Ermittlung des Chloridprofils aufgrund der einseitig gerichteten Einwirkung von Chloriden verwendet wird, und einen Vergleichsprobekörper, der zur Bestimmung des anfänglichen Chloridgehaltes C_i verwendet wird. Dieser Ausgangswert wird als der ursprüngliche Chloridgehalt des Betons angesetzt.

Der Probekörper wird im Vakuum mit destilliertem oder entmineralisiertem Wasser gesättigt und bis auf eine Seitenfläche versiegelt; anschließend wird die unversiegelte Fläche mit einer Chloridlösung beaufschlagt. Die Beaufschlagung erfolgt entweder durch vollständiges Eintauchen in die Chloridlösung, durch das Aufbringen eines zylindrischen Aufsatzes mit anstehender Chloridlösung auf der unversiegelten Seite oder durch das Eintauchen des Probekörpers in die Chloridlösung, wobei die unbeschichtete Seite nach unten weist. Die Referenzlösung ist eine 3 %ige Natriumchlorid(NaCl)-Lösung (Massenanteil) und die Einwirkungsdauer beträgt 90 Tage. (Andere Konzentrationen oder Lösungen, wie z.B. künstlich hergestelltes Meerwasser, und andere Einwirkungsauern sind zulässig.) Die Verwendung von großen, vollständig eingetauchten Probekörpern ist in Anhang D beschrieben.

Nach 90 Tagen Chlorideinwirkung werden mindestens acht parallele Schichten der chloridbeaufschlagten Oberfläche des Probekörpers durch Schleifen abgetragen. Der Gehalt an säurelöslichen Chloriden jeder Schicht und die durchschnittliche Tiefe der betreffenden Schicht, gemessen von der mit der Chloridlösung beaufschlagten Oberfläche des Betons, werden bestimmt. Der anfängliche Chloridgehalt wird durch Abschleifen einer Probe des Vergleichsprobekörpers und Bestimmung des Gehaltes an säurelöslichen Chloriden ermittelt.

Durch nichtlineare Regressionsanalyse mit Hilfe einer Kurvenanpassung nach der Methode der kleinsten Quadrate werden der Chloridgehalt der Oberfläche (C_s) und der Chloriddiffusionskoeffizient im instationären Zustand (D_{nss}) bestimmt.

Da der Variationskoeffizient der Ergebnisse dieses Prüfverfahrens mit $\sim 15\% - 30\%$ für D_{nss} hoch ist, sollte die Anzahl der geprüften Probekörper erhöht werden, bis die erforderliche Präzision erreicht ist. Die Ergebnisse sowie der Mittelwert sind im Prüfbericht gesondert anzugeben.

ANMERKUNG 1 Der Chloriddiffusionskoeffizient verändert sich mit dem Alter des Betons und der Beaufschlagungs-dauer.

ANMERKUNG 2 Die in der vorliegenden Europäischen Norm beschriebene Diffusionsprüfung gilt nur für einen konstanten anfänglichen Chloridgehalt.

5 Reagenzien und Geräte

5.1 Reagenzien

Die verwendeten Reagenzien müssen analysenrein sein.

ANMERKUNG Sofern nichts anderes angegeben ist, bedeutet „%“ hier Massenanteil in %.

5.1.1 Calciumhydroxid, $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

5.1.2 Chloridlösung zur Beaufschlagung

5.1.2.1 Referenzlösung

30 g analysenreines NaCl ist in 970 g destilliertem oder entmineralisiertem Wasser mit einer elektrischen Leitfähigkeit von $\leq 0,5 \text{ mSm}^{-1}$ bei 20 °C aufzulösen, um eine 3 %ige NaCl-Lösung (Massenanteil) zu erhalten. Diese Lösung ist in einem sauberen Behälter aufzubewahren.

ANMERKUNG Die Chloridkonzentration dieser NaCl-Lösung entspricht in etwa der von Meerwasser aus dem Atlantischen Ozean.

5.1.2.2 Andere Prüflösungen

Soll eine andere Konzentration der Chloridlösung für die Prüfung verwendet werden als in 5.1.2.1 angegeben, so muss diese dokumentiert und im Prüfbericht angegeben werden. Falls eine andere Lösung verwendet wird, muss deren Zusammensetzung dokumentiert und im Prüfbericht angegeben werden.

ANMERKUNG 1 Für die Wiedergabe der Beanspruchung der Bauwerke wurden Prüflösungen aus natürlichem und aus künstlich hergestelltem Meerwasser verwendet.

ANMERKUNG 2 Zur Beschleunigung der Entwicklung eines Chloridprofils werden auch höhere NaCl-Konzentrationen, wie z. B. 16,5 %, und kürzere Einwirkungsauern (z. B. 35 Tage) verwendet.

5.1.3 Zweikomponentige polyurethan- oder epoxidharzbasierte Beschichtungen oder gleichwertige Sperrsysteme, die gegenüber Chloridionen-Diffusion beständig sind.

5.1.4 Chemikalien für die Chloridanalyse nach EN 14629.

5.1.5 Destilliertes oder entmineralisiertes Wasser mit einer elektrischen Leitfähigkeit $\leq 0,5 \text{ mSm}^{-1}$.

5.2 Geräte

5.2.1 Wassergekühlte Diamantsäge.

5.2.2 Waage zum Wiegen von NaCl und Wasser mit einer Fehlergrenze von $\pm 0,1 \text{ g}$.

5.2.3 Thermometer mit einer Fehlergrenze von $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$.

5.2.4 Temperaturregelte Kammer, die eine Temperatur von $(20 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$ sicherstellt.

5.2.5 Bei Bedarf, ein **Polyethylenbehälter mit luftdicht schließendem Deckel zum Eintauchen des Probekörpers**. Das Volumen der verwendeten Prüflösung muss um mindestens 12,5 ml je cm^2 beaufschlagter Oberfläche größer sein als das Volumen des Probekörpers. Ein Behälter darf mehr als einen Probekörper enthalten, vorausgesetzt, der Mindestwert des Verhältnisses des Volumens der verwendeten