

2 Grundlagen

2.1 Einwirkungen

2.1.1 Allgemeines

Das mechanische Verhalten von Verbundglas ist aufgrund der Zwischenschichten aus Kunststoff abhängig von Temperatur und Belastungsdauer. Darüber hinaus zeigt die Festigkeit von Glas ebenfalls eine Abhängigkeit von der zeitlichen Belastungshistorie. Aus diesem Grund sollen zu Beginn dieser Arbeit die Einwirkungen, denen Verglasungen ausgesetzt sein können, betrachtet werden. Daraus lassen sich für die Widerstandsseite die baupraktisch relevanten Temperatur- und Zeitbereiche eingrenzen.

Abbildung 2.1 veranschaulicht das breite Zeitspektrum der Einwirkungen auf Verglasungen. In Tabelle 2.1 sind alle Einwirkungen, die bei der Bemessung von Verglasungen üblicherweise zu beachten sind, zusammengefasst. Neben einem Verweis auf die relevanten Regelwerke wird die der Bemessung zugrunde liegende Einwirkungsdauer genannt. Die Belastung durch eine Stoßwelle infolge einer Explosion (Detonation), welche hier einen Schwerpunkt darstellt, wird als Vergleich ebenfalls aufgeführt und in Abschnitt 2.1.2 ausführlich behandelt.

Angaben zum Temperaturbereich können DIN EN 1991-1-5 entnommen werden. Hierin sind für Deutschland Außenlufttemperaturen von $-24\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ anzunehmen. Im Bauteil selbst können jedoch durch Absorption der Sonnenstrahlung deutlich höhere Temperaturen auftreten. Ein Temperaturbereich von $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ist realistisch, wobei bisher nur wenige Forschungsergebnisse diesbezüglich veröffentlicht wurden. In klaren Verbundgläsern ohne Bedruckung, Färbung oder Kontakt zu opaken Flächen ist ei-

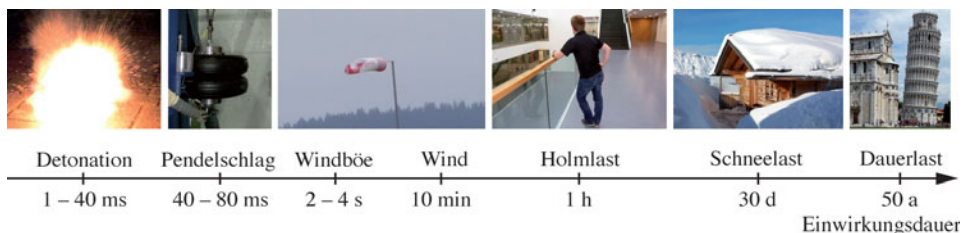


Abbildung 2.1 Zeitstrahl der Einwirkungsdauern für Verglasungen

Tabelle 2.1 Baupraktisch relevante Einwirkungen auf Verglasungen

Einwirkung	Einwirkungsdauer	Regelwerke
Detonation	1 ms bis 40 ms	DIN EN 13541
Pendelschlag	40 ms bis 80 ms	DIN 18008-4, DIN EN 12600
Wind	2 s bis 10 min	DIN EN 1991-1-4
Horizontale Nutzlast (Holmlast)	1 h ^a	DIN EN 1991-1-1
Klimalastanteile aus Temperatur- und Luftdruckunterschieden	keine Angaben	DIN 18008-1
Schnee	30 d ^b	DIN EN 1991-1-3
Dauerlast (z.B. Eigengewicht, Klimalastanteil aus Ortshöhendifferenz)	25 a bis 50 a	DIN EN 1991-1-1, DIN 18008-1

^a Festlegung der Fachkommission Bautechnik

^b nach CHRISTOFFER, 1990

ne maximale Temperatur von 50 °C eine zutreffende Annahme (DIBT, 2011). Wird die Verglasung im Innenbereich eingesetzt, ist ein Nachweis bei Raumtemperatur (23 °C) in der Regel ausreichend.

Es ist festzustellen, dass insbesondere bei der Verwendung von Kunststoffen im Baubereich ein dringender Forschungsbedarf bezüglich realistischer Lastkollektive mit zeitlichen Last- und Temperaturhistorien besteht. Derzeit müssen noch zu viele Annahmen getroffen werden, die häufig weit auf der sicheren Seite liegen. Dies führt zu unwirtschaftlichen Bemessungen oder sogar dazu, die Verwendung des Bauprodukts vollständig auszuschließen.

2.1.2 Lastfall Explosion

Einführung

Eine Explosion stellt eine plötzliche physikalische oder chemische Zustandsänderung dar, bei welcher eine hohe Menge an Energie in sehr kurzer Zeit freigesetzt wird. Dadurch entsteht eine Druckwelle, die sich räumlich und zeitlich ausbreitet.

Explosionsereignisse lassen sich durch Merkmale wie den Typ der Explosion (physikalische, chemische oder nukleare Explosion) oder durch das verbrannte Material charakterisieren.

Für die Bemessung von Bauteilen ist es zweckmäßig, eine makroskopische Differenzierung von Explosionen bezüglich der entstehenden Druckwelle vorzunehmen. Hierbei unterscheiden die Begriffe „Deflagration“ und „Detonation“ nach der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Druckwelle im verbrennenden Medium (COURANT et al., 1948).

Bei einer Deflagration breitet sich die Druckwelle mit einer Geschwindigkeit aus, die unterhalb der Schallgeschwindigkeit liegt. Die verbrannten Partikel bewegen sich dabei

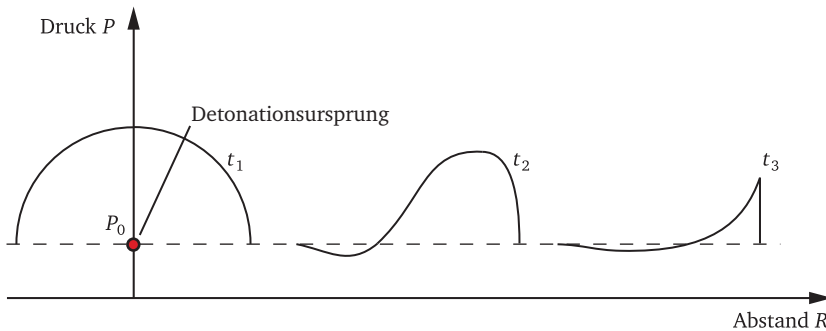


Abbildung 2.2 Aufsteilen einer Druckwelle zur Stoßwelle: Druck in Abhängigkeit des Abstands zu drei Zeitpunkten $t_1 < t_2 < t_3$

entgegen der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Druckwelle. Beispiele für Deflagrationen sind Staub- oder Gasexplosionen.

Bei Detonationen liegt die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Druckwelle oberhalb der Schallgeschwindigkeit des verbrennenden Mediums und die verbrannten Partikel bewegen sich in Richtung der Druckwelle. Beispiele hierfür sind Sprengstoffexplosionen oder nukleare Explosionen. Da sich die Druckwelle bei hohen Druckamplituden schneller ausbreitet, entsteht unabhängig von der ursprünglichen Form der Druckwelle in einem gewissen Abstand vom Detonationsursprung ein sprunghafter Anstieg des Luftdrucks (Abb. 2.2). Dieser Vorgang, der auf nichtlineare Zusammenhänge in der Wellenausbreitung zurückzuführen ist, wird als Aufsteilen bezeichnet (COURANT et al., 1948). Druckwellen, die sich mit Überschallgeschwindigkeit ausbreiten und eine derartige Form aufweisen, nennt man Stoßwellen oder Schockwellen.

Im Folgenden wird von dem baupraktischen Schutzszenario einer Stoßwelle infolge einer Detonation ausgegangen. Der Lastfall Explosion ist in dieser Arbeit synonym mit dieser Beanspruchung zu sehen.

Charakterisierung von Stoßwellen

Die charakteristische Form des einfallenden Druck-Zeit-Verlaufs in einem festen Abstand vom Detonationsursprung zeigt Abbildung 2.3. Der Luftdruck steigt sprunghaft vom Umgebungsdruck P_0 auf den maximalen Druck P_{\max} an. Die Differenz wird bei einer sich ungestört ausbreitenden Welle als maximaler einfallender Überdruck P_E bezeichnet. Anschließend folgt ein exponentieller Abfall, welcher auch unter den Umgebungsdruck fällt. Die Fläche unterhalb der Druck-Zeit-Kurve im Überdruckbereich wird als positiver Impuls i_+ , die Dauer der positiven Druckphase als t_+ bezeichnet.

Trifft die Druckwelle auf Hindernisse, so wird sie reflektiert. Das Hindernis erfährt dabei durch die Reflektion und das Aufstauen der Luftpartikel eine mindestens doppelt so

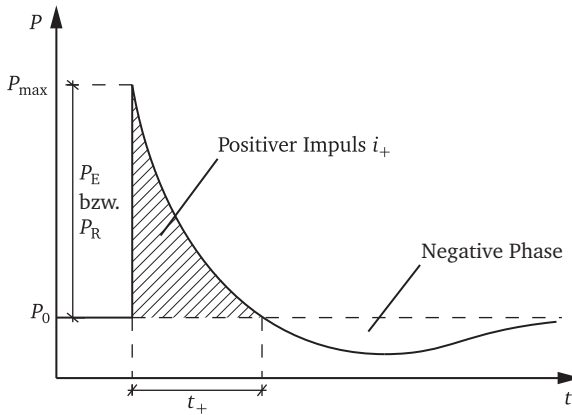


Abbildung 2.3 Friedlander-Kurve (FRIEDLANDER, 1946)

hohe Beanspruchung gegenüber dem einfallenden Druck. Diese Beanspruchung wird als reflektierter Überdruck P_R bezeichnet und ist bei einer Bauteilbemessung anzusetzen. Die charakteristische Form der Druck-Zeit-Kurve nach Abbildung 2.3 bleibt dabei erhalten.

Analytische Ermittlung der Beanspruchung

Für die einfachen Fälle einer sphärischen (kugelförmigen) und einer hemisphärischen (halbkugelförmigen) Ausbreitung der Druckwelle kann der maximale einfallende sowie reflektierte Überdruck, die Dauer der positiven Druckphase, der positive Impuls sowie auch die Parameter zur Beschreibung der Sogphase abgeschätzt werden.

Eingangsparameter für diese Berechnungen ist üblicherweise der skalierte Abstand

$$Z = \frac{R}{W^{1/3}} \left[\frac{\text{m}}{\text{kg TNT-Äquivalent}^{1/3}} \right], \quad (2.1)$$

welcher die Masse W der Sprengladung und den Abstand R zum Detonationsursprung berücksichtigt. Die Sprengmasse wird in der Einheit „kg TNT-Äquivalent“ angegeben, um die unterschiedlichen spezifischen Energien anderer explosiver Materialien erfassen zu können.

Für eine ungestörte sphärische Ausbreitung der Druckwelle hat BRODE, 1955 Differentialgleichungen zur Beschreibung der Gasbewegung numerisch ausgewertet. Damit kann der einfallende Überdruck zu

$$P_E = \frac{611}{Z^3} + \frac{150}{Z^2} + \frac{95}{Z} - 2 \quad \text{für } 10 < P_E < 1000 \quad [\text{kPa}] \quad (2.2)$$

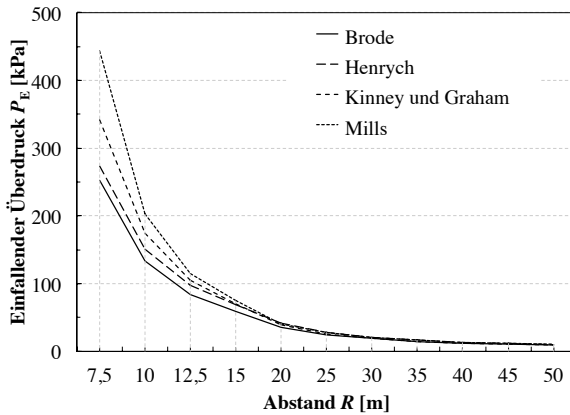


Abbildung 2.4 Vergleich des analytisch ermittelten einfallenden Überdrucks ($w = 100\text{kg TNT-Äquivalent}$)

abgeschätzt werden. Bei dieser nicht einheitengetreuen Gleichung ist der skalierte Abstand Z gemäß den Einheiten in Gleichung (2.1) einzusetzen.

Ähnliche Ergebnisse zeigen die experimentellen Untersuchungen von HENRYCH, 1979 und Untersuchungen von KINNEY et al., 1985 oder MILLS, 1987. Abbildung 2.4 zeigt einen Vergleich des ermittelten Überdrucks in Abhängigkeit des Abstands vom Detonationsursprung für ein Beispielszenario von 100 kg TNT. Insbesondere im Nahbereich zeigen die verschiedenen Ansätze deutliche Unterschiede.

Der Erhöhungsfaktor für senkrechte Reflektionen an starren Oberflächen lässt sich nach HENRYCH, 1979 zu

$$C_R = \frac{P_R}{P_E} = 2 + \frac{6P_E}{P_E + 7P_0} \quad [-] \quad (2.3)$$

bestimmen. Es ergeben sich theoretische Erhöhungsfaktoren gegenüber dem einfallenden Druck von 2 bis 8. Diese Formeln gehen von der Annahme eines idealen Gases aus. Bei hohen Drücken ist diese Annahme nicht mehr korrekt, weswegen tatsächlich auch höhere Reflektionsfaktoren auftreten können.

Auch für nichtsenkrechte Reflektionen können Reflektionsfaktoren ermittelt werden. Hierfür sowie für eine detaillierte Zusammenfassung der analytischen Ermittlung der Belastungsparameter sei an dieser Stelle auf RUTNER et al., 2008 verwiesen.

Sind die Parameter bekannt, kann der Druck-Zeit-Verlauf für den reflektierten Druck (Abb. 2.3) mittels der Friedlander-Gleichung (2.4) (FRIEDLANDER, 1946) bestimmt wer-

den. Der dimensionslose Zerfallkoeffizient A_Z steuert dabei die Form des exponentiellen Abfalls und kann Werte zwischen 0 und 4 annehmen (DIN EN 13123-2):

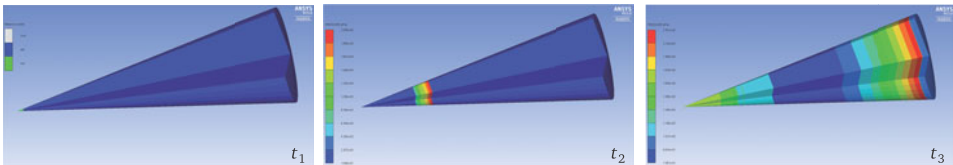
$$P(t) = P_0 + P_R \left(1 - \frac{t}{t_+} \right) e^{-A_Z \frac{t}{t_+}}. \quad (2.4)$$

Computerprogrammen wie beispielsweise *A.T.-Blast* (ARA, 2010), welche aus der Angabe von Sprengmasse und Abstand zum Detonationsursprung die Parameter der reflektierten Druckwelle bestimmen, liegen die vorgestellten oder vergleichbare analytische Zusammenhänge zugrunde.

Numerische Ermittlung der Beanspruchung

Mithilfe von expliziten Finite-Elemente-Programmen (Hydrocodes, siehe z.B. BENSON, 1992) ist eine computergestützte Simulation der Druckwellenausbreitung möglich. Dabei können Reflexionen an starren Wänden sowie an elastischen Strukturen mittels Fluid-Struktur-Interaktion berücksichtigt werden. Während die analytische Ermittlung der Druckwellenparameter auf einfache Situationen beschränkt ist, können mithilfe der FEM beliebige Bauwerksumgebungen berücksichtigt werden.

Start in 1D:



Remapping von 1D in 2D:



Remapping von 2D in 3D:

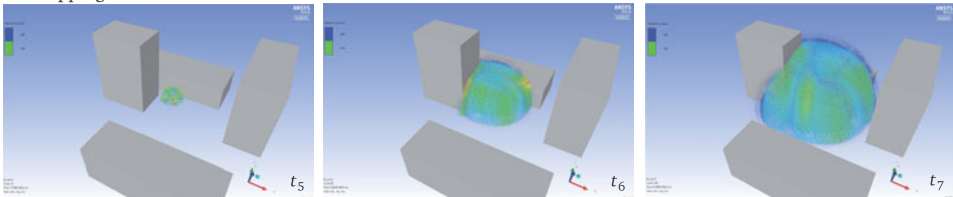


Abbildung 2.5 Numerische Simulation eines Explosionsereignisses in *Ansys Autodyn* (ANSYS INC., 2012b) mit Remapping

Wie in der Strömungsmechanik üblich, wird die Druckwellenausbreitung mittels einer Betrachtungsweise nach Euler simuliert, bei welcher sich das Material durch das raumfeste FE-Netz bewegt. Insbesondere im Bereich des Sprengstoffes ist eine sehr feine Diskretisierung erforderlich, um gute Prognosen zu erzielen (DU BOIS et al., 2012). Um die Rechenzeit möglichst gering zu halten, kann der Ansatz der Modellerweiterung („Remapping“) verfolgt werden, bei dem von einer eindimensionalen fein diskretisierten Modellierung die Ergebnisse der ersten Zeitschritte in zwei- und dreidimensionale Berechnungen mit einer größeren räumlichen Diskretisierung übernommen werden (Abb. 2.5).

Normative Umsetzung

Eine graphische Ermittlung der Beanspruchung durch Explosionen stellen verschiedene Regelwerke zur Verfügung. So bietet beispielsweise die US-amerikanische Norm ASTM F 1642 ein Diagramm zur Ermittlung von reflektiertem Druck und Impuls in Abhängigkeit des skalierten Abstands Z . Die Richtlinie des US-amerikanischen Verteidigungsministeriums UFC 3-340-02 ermöglicht die graphische Ermittlung der Druckwellenparameter für unterschiedlichste Szenarien.

Mit der Kenntnis des Druckwellenverlaufs kann anschließend eine Bemessung der Bauteile erfolgen, beispielsweise durch eine dynamische Berechnung. Eine übliche Vereinfachung stellt hierbei die Linearisierung der Friedlander-Kurve unter Beibehaltung des positiven Impulses dar, was gleichbedeutend ist mit der Wahl des Grenzfalls $A_z = 0$ nach Gleichung (2.4).

Da Explosionen als Einwirkung nicht bauaufsichtlich geregelt sind, definiert der Bauherr mit Sonderberatern mögliche Anforderungen an die zu widerstehende Beanspruchung für Bauwerk und Fassaden.

2.2 Werkstoff Glas

2.2.1 Allgemeines

Der Werkstoff Glas kann auf unterschiedlichste Weisen beschrieben werden. In DIN 1259-1 wird Glas definiert als ein „anorganisches nichtmetallisches Material, das durch völliges Aufschmelzen einer Mischung von Rohmaterialien bei hohen Temperaturen erhalten wird, wobei eine homogene Flüssigkeit entsteht, die dann bis zum festen Zustand abgekühlt wird, üblicherweise ohne Kristallisation“. Es handelt sich um einen amorphen (ungeordneten) und durchsichtigen Feststoff, dessen Hauptbestandteil das anorganische Siliziumdioxid (SiO_2) ist. Die weiteren Bestandteile variieren je nach Glasart (Tab. 2.2).

Beim Übergang von der Schmelze zum Festkörper gibt es keinen definierten Erstarungspunkt sondern analog den Kunststoffen einen Glasübergangsbereich (s. Abschn. 2.3.2). Dieser liegt bei Kalknatron-Silikatglas bei $T_g \approx 530^\circ\text{C}$, weswegen Glas oftmals auch als der erstarrte Zustand einer unterkühlten Flüssigkeit bezeichnet wird (TAMMANN, 1933).

Im festen Zustand ist ein nahezu ideales isotropes linear-elastisches Materialverhalten bis zum spröden Bruch zu beobachten. Der Zusammenhang zwischen Spannungen und Verzerrungen (Steifigkeit) lässt sich somit vollständig mit Angabe zweier Elastizitätsparameter beschreiben, beispielsweise Elastizitätsmodul E und Querkontraktionszahl ν . Die Abhängigkeit der Steifigkeit von Zeit und Temperatur ist in baupraktischen Anwendungen vernachlässigbar (SCHNEIDER, 2005) und auch bei hochdynamischen Lasten kann keine signifikante Änderung des Elastizitätsmoduls beobachtet werden (PERONI et al., 2011). Die Materialparameter von verschiedenen Glasarten sind in Tabelle 2.3 zusammengefasst.

Die Bemessung von Bauteilen aus Glas wird in Deutschland in der DIN 18008-Reihe geregelt, die im Jahr 2013 die alten Regelwerke TRLV (DIBT, 2006b), TRPV (DIBT, 2006a) und TRAV (DIBT, 2003) in der Musterliste der Technischen Baubestimmungen (MLTB) abgelöst hat (DIBT, 2013c) und damit den aktuellen Stand der Technik darstellt. An einer europäischen Bemessungsnorm wird derzeit gearbeitet (SAT-REPORT, 2013).

Tabelle 2.2 Glasarten im Bauwesen und deren Zusammensetzung in Massen-%

Glasart	SiO_2	CaO	Na_2O	MgO	Al_2O_3	B_2O_3	K_2O	andere
Kalknatron-Silikatglas (DIN EN 572-1)	69-74	5-14	10-16	0-6	0-3	-	-	0-5
Borosilikatglas (DIN EN 1748-1-1)	70-87	-	0-8	-	0-8	7-15	0-8	0-8
Aluminosilikatglas (PANZNER et al., 2014)	63-68	-	8-16	0-9	10-14	0-7	0-4	0-19

Tabelle 2.3 Materialkenngrößen von Baugläsern bei Raumtemperatur

Eigenschaften	Einheit	Kalknatron-Silikatglas (DIN EN 572-1)	Borosilikatglas (DIN EN 1748-1-1)
Dichte ρ	kg m^{-3}	2500	2200 - 2500
Elastizitätsmodul E	MPa	70 000	60 000 - 70 000
Querkontraktionszahl ν	-	0,2	0,2
Charakteristische Biegezugfestigkeit f_k	MPa	45	45
Temperaturausdehnungs- koeffizient α_T	K^{-1}	$9,0 \cdot 10^{-6}$	$3,1 - 6,0 \cdot 10^{-6}$
Temperaturwechsel- beständigkeit	K	40	80

Ausführliche Beschreibungen für den Werkstoff Glas, dessen Eigenschaften und die Grundlagen des Glasbaus finden sich beispielsweise in WÖRNER et al., 2001, SCHITTICH et al., 2006 und SIEBERT et al., 2012.

Im Folgenden werden die Grundlagen zur Festigkeit von Glas allgemein und unter kurzzeitiger Beanspruchung erläutert. Anschließend werden die Glasprodukte, welche im Bauwesen eingesetzt werden, beschrieben. Auf Verbundglas wird in Abschnitt 2.4 ausführlich eingegangen.

2.2.2 Festigkeit von Glas

Bruchmechanische Grundlagen

Die Bemessung von Bauteilen aus Glas erfolgt üblicherweise nach der Hauptnormalspannungshypothese (Rankine-Kriterium (RANKINE, 1857)). Dabei werden die maximalen unter den Bemessungslasten im Bauteil auftretenden Hauptzugspannungen mit Widerstandswerten verglichen, welche normativ angegeben sind (s. Tab. 2.3) (DIN 18008-1; DIN EN 572-1; DIN EN 12150-1) oder anhand von experimentellen Untersuchungen gewonnen werden (DIN EN 1288-1).

Dieser Ansatz ist ein in der Praxis gängiges Hilfsmittel. Tatsächlich wird das Versagen von Glas durch Spannungskonzentrationen an Oberflächendefekten bestimmt. Sollen die Vorgänge, die zum Bruch führen, und deren Einflüsse studiert werden, bedarf es einer Betrachtung auf bruchmechanischer Ebene. Für den spröden Werkstoff Glas ist die Anwendung der linear-elastischen Bruchmechanik gerechtfertigt. Die folgende Einführung beschränkt sich auf das Konzept des Spannungsintensitätsfaktors (K -Konzept), welcher die „Stärke“ der Spannungssingularität an der Risspitze beschreibt. Bei der linear-elastischen Bruchmechanik ist das K -Konzept gleichwertig dem Konzept der Energiefreisetzungsrates (G -Konzept) oder dem J -Integral. Da die Oberflächendefekte in Glas im baupraktischen

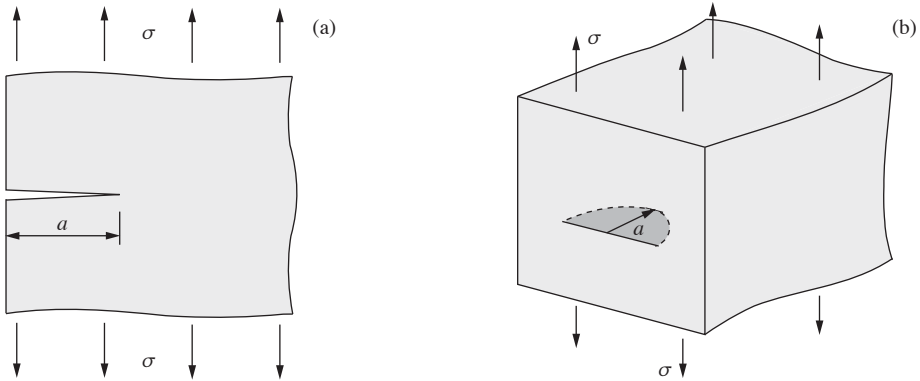


Abbildung 2.6 Gerader Oberflächenriss mit Risttiefe a im halben unendlichen Körper unter konstanter äußerer Zugspannung σ im Modus I (a), Half-Penny-Crack (b)

Einsatz vorwiegend durch Normalzugspannungen belastet werden, ist eine Beschreibung des Modus I (Abb. 2.6a) ausreichend.

Die am Riss mit der Risttiefe a vorherrschende Spannungsintensität

$$K_I = \sigma Y \sqrt{\pi a} \quad (2.5)$$

lässt sich bei konstanter äußerer Spannung σ bestimmen. Der Korrekturfaktor Y beschreibt die Geometrie des Oberflächendefekts. Die baupraktisch relevanten Rissgeometrien liegen zwischen den Grenzwerten des geraden Oberflächenrisses (Abb. 2.6a, $Y = 1,1215$) und des Half-Penny-Cracks (Abb. 2.6b, $Y = 0,7216$) (GROSS et al., 2011a).

Das Versagenskriterium (Irwinsches Bruchkriterium) stellt das Erreichen einer kritischen Spannungsintensität (Bruchzähigkeit K_{Ic}) dar:

$$K_I = K_{Ic}. \quad (2.6)$$

Sowohl für Kalknatron-Silikatglas als auch für Borosilikatglas schwanken die in der Literatur angegebenen Werte der Bruchzähigkeit zwischen $0,72 \text{ MPa m}^{1/2} \leq K_{Ic} \leq 0,82 \text{ MPa m}^{1/2}$ (MENCIK, 1992; SALEM et al., 2010).

Das Irwinsche Bruchkriterium besagt, dass erst Spannungsintensitäten oberhalb der Bruchzähigkeit zu instabilem Risswachstum und damit zum Glasbruch führen. Bei Glas kann aber auch unterhalb dieses Grenzwertes ein stabiles Risswachstum erfolgen. Dieses Phänomen wird statische Ermüdung, subkritisches Risswachstum oder Spannungsrissskorrosion genannt. Abbildung 2.7a veranschaulicht die Risswachstumsgeschwindigkeit v in Abhängigkeit der Spannungsintensität K_I und der Luftfeuchtigkeit. Die unterschiedlichen Bereiche (Abb. 2.7b) lassen sich mit empirisch hergeleiteten Gleichungen bereichsweise

<http://www.springer.com/978-3-662-48830-0>

Mechanisches Verhalten von Verbundglas unter
zeitabhängiger Belastung und
Explosionsbeanspruchung

Mechanical behaviour of laminated glass under
time-dependent and explosion loading

Kuntsche, J.K.

2015, XX, 254 S. 148 Abb., 95 Abb. in Farbe., Softcover

ISBN: 978-3-662-48830-0