

Technische und wirtschaftliche Kriterien für die Bauartfestlegung von Strahlenschutzkabinen für die ZfP

Uwe SILBERBERG, Pontax, Lennestadt

Kurzfassung. Die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung nutzt die Durchstrahlung zur Prüfung der Qualität und Maßhaltigkeit von Werkstoffen aus einem breiten Werkstoffspektrum, u.a. Stahl, Aluminium und Kunststoff.

Eingesetzt werden derzeit Röntgenstrahler bis 450 kV, Linearbeschleuniger bis 6 MV oder Isotopenstrahler bis 120 Ci (u.a. Ir 192, Se 75, Co 60).

Röntgenstrahler über 450 kV befinden sich in der technischen Erprobung.

Die Abschirmung der umhausenden Strahlenschutzkabinen und -bunker variiert in Abhängigkeit von der Art der Strahlenquelle und der individuell nach Nutzeranforderung zu definierenden Strahlgeometrie (Strahlrichtung, Strahlentfernung). Die Abschirmungsdimensionen zur Einhaltung der Grenzwerte gem. StrlSchV oder RöV werden festgelegt in mm Bleiäquivalent und betragen zwischen 2 und 300 mm Pb.

Im Regelfall erfolgt die Durchstrahlung im Herstellwerk oder beim Dienstleister ortsfest in Strahlenschutzkabinen aus Stahl-Blei-Sandwich-Konstruktionen, Barytbauteilen oder -mauerwerk oder in Mischbauweise.

Der Vortrag beschreibt die technischen und wirtschaftlichen Kriterien zur Bauartfestlegung dieser Strahlenschutzkabinen und gibt Hinweise zur Gestaltung, Dimensionierung und Materialauswahl

Einführung

Die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung nutzt die Durchstrahlung zur Prüfung der Qualität und Maßhaltigkeit von Werkstoffen aus einem breiten Werkstoffspektrum, u.a. Stahl, Aluminium und Kunststoff. Eingesetzt werden derzeit Röntgenstrahler bis 450 kV, Linearbeschleuniger bis 6 MV oder Isotopenstrahler bis 120 Ci (u.a. Ir 192, Se 75, Co 60). Röntgenstrahler über 450 kV befinden sich in der technischen Erprobung.

1. Allgemeines

1.1 Grenzwertdefinition (Grenzwerte für Deutschland)

Die gesetzliche Definition der einzuhaltenden Grenzwerte erfolgt in Abhängigkeit von der Art der Strahlenquelle

- für Röntgenstrahler gemäß Röntgenverordnung §32/31a/31 (Stand 2003)
- für Isotopenstrahler gemäß Strahlenschutzverordnung §54/46 (Stand 2001)

Die Grenzwerte sind definiert in Millisievert pro Jahr (mSv/a), die Strahlenschutzabnahme erfolgt auf Basis einer Messung der Ortsdosisleistung in Microsievert pro Stunde ($\mu\text{Sv/h}$), entsprechend ist die zulässige Ortsdosisleistung abhängig von der Netto-Strahlzeit (h/a).

Die Grenzwerte sind für die Strahlerarten Röntgenstrahler und Isotopenstrahler in Abhängigkeit von den zu betrachtenden Personengruppen wie folgt festgelegt:

Kategorie A (Beruflich Strahlenexponiert) $< 20 \text{ mSv/a}$

Kategorie B (Beruflich Strahlenexponiert) $< 6 \text{ mSv/a}$

Einzelpersonen der Bevölkerung $< 1 \text{ mSv/a}$

1.2 Strahlenschutzauslegung

Die Strahlenschutzauslegung, also die Dimensionierung der Abschirmstärken, erfolgt im Vorlauf zur baulichen Planung von Strahlenschutzkabinen /-bunkern.

Nach den geltenden DIN-Normen wird zunächst nach Erfassung der potentiellen Strahlenquellen eine Strahlenschutzberechnung mit rechnerischer Dimensionierung aller Abschirmwerte erstellt.

Das Ergebnis, ergänzt durch eine zeichnerische Darstellung des Berechnungsergebnisses und der Strahlgeometrie, wird den genehmigenden Behörden vorgelegt. Zu diesem Zeitpunkt erfolgt mit der Behörde eine Abstimmung, eine Betriebsgenehmigung setzt die Messung nach Ausführung voraus.

Nach der baulichen Ausführung und der Abnahme von elektrisch betriebenen Türen/Toren nach BGR 232 (Einklemmschutz) erfolgt die Strahlenschutzmessung durch einen Sachverständigen und, nach erfolgreicher Abnahme, die Erteilung der Betriebsgenehmigung durch die Behörde.

2. Strahlenquellen

2.1 Röntgenprüfsysteme und CT-Anlagen bis 450 kV

Röntgenprüfsysteme und CT-Anlagen werden für die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung derzeit mit Röhrenspannungen bis 450 kV eingesetzt.

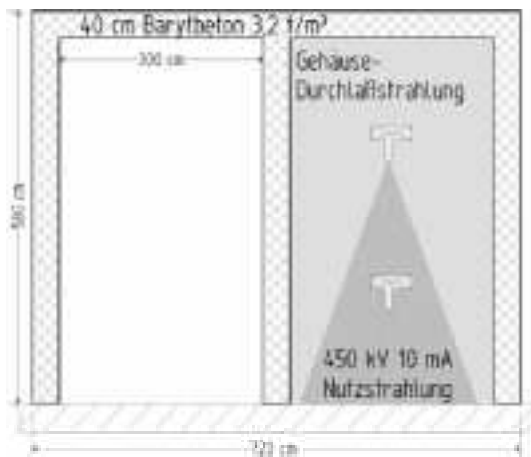


Bild 1: Röntgen 450 kV, Strahlgeometrie



Bild 2: Röntgen 450 kV, Rohrprüfung

Bild 1 zeigt an einem Ausführungsbeispiel die Strahlenschutzauslegung mit Strahlgeometrie eines Strahlenschutzbunkers für die Stahlrohrprüfung. Die Röntgenröhre ist an einem Deckenstativ montiert und strahlt vertikal zum Boden hin. Die Abschirmstärke gegen Gehäusedurchlaßstrahlung beträgt 42 mm Bleiäquivalent, hier ausgeführt mit

400 mm Barytbeton ($3,2 \text{ t/m}^3$). Bild 2 zeigt denselben Bunker nach Fertigstellung. Die Gesamterrichtungszeit in Fertigteilbauweise incl. Tormontagen betrug 3 Wochen.

2.2 Isotopenstrahler(Ir, Se, Co)

Isotopenstrahler (Iridium 192, Selen 75, Kobalt 60) mit Aktivitäten bis 120 Ci werden für die ZfP von Bauteilen mit großen Wandstärken eingesetzt.

Bild 3 zeigt an einem Ausführungsbeispiel die Strahlenschutzauslegung mit Strahlgeometrie eines Strahlenschutzbunkers für die Armaturenprüfung.

Im Bunker werden ergänzend Druckprüfungen durchgeführt, daher sind abgeschirmte Druckentlastungsöffnungen integriert. Die Abschirmstärke beträgt 83 mm Bleiäquivalent, hier ausgeführt mit 550 mm Strahlenschutz-Barytbeton ($3,2 \text{ t/m}^3$) bzw. in einer Wand und der Decke mit 760 mm Strahlenschutznormalbeton ($2,3 \text{ t/m}^3$). Das Tor ist gegen Streustrahlung abgeschirmt. Bild 4 zeigt denselben Bunker nach Fertigstellung. Die Gesamterrichtungszeit in Fertigteilbauweise incl. Tormontagen betrug 3 Wochen.



Bild 3: Iridium 192, Strahlgeometrie



Bild 4: Iridium 192, Innenansicht



Bild 5: Linearbeschleuniger, Strahlenschutztor

2.3 Linearbeschleuniger bis 6 MV

Linearbeschleuniger werden für die ZfP von Bauteilen mit großen Wandstärken eingesetzt. Bild 5 zeigt an einem Ausführungsbeispiel das Strahlenschutztor eines solchen Linearbeschleunigerbunkers. Das Tor schirmt den Nutzstrahl mit 330 mm Bleiäquivalent ab, ausgeführt wurden 2000 mm Strahlenschutzbeton.

3. Bauarten von Strahlenschutzbunkern

3.1 Ausführung in Beton

Strahlenschutzbunker in Betonbauweise werden für alle Strahlenquellen ausgeführt. Vorherrschend und aus wirtschaftlichen und technischen Aspekten von besonderer Bedeutung ist die Ausführung in Barytbeton ($3,2 \text{ t/m}^3$ gemäß DIN). Abhängig von den örtlichen Gegebenheiten im Bestand, der Transportlogistik und der Montage werden verschiedene Bauweisen gewählt.

3.1.1 Fertigteilbauweise

Wenn die örtlichen Gegebenheiten den Einsatz entsprechender Transport- und Montage-mittel (Autokran, Hallenkran) erlauben, werden Strahlenschutzbunker aus vorgefertigten, großflächigen, schweren Wand- und Deckenfertigteilen bis 20 to Einzelgewicht mit Wandstärken bis 40 cm erstellt. Örtliche Betonagen sind nur im geringen Umfang für Anpassungs- und Fugarbeiten erforderlich. Die Montage vor Ort erfolgt sehr schnell und staubarm. Bild 6 zeigt den Montagebeginn eines 8 m hohen, 16 m langen Bunkers für ein 450 kV- Röntgenprüfsystem.



Bild 6: Fertigteilbauweise



Bild 7: Sandwichbauweise

3.1.2 Sandwichbauweise

Die Sandwichbauweise wird für dickwandige Bunker (Isotopenstrahler, Linearbeschleuniger) ab ca. 50 cm Beton-Abschirmstärke gewählt, wenn der Einsatz entsprechender Montagemittel für die Einbringung der Wand- und Deckenelemente möglich ist. Die wesentlichen Vorteile gegenüber der Ortbetonbauweise liegen in der schnelleren und sauberen sowie wirtschaftlichen Ausführung. Bild 7 zeigt die Erstellung eines Bunkers für einen Isotopenstrahler mit einer Wandstärke (Barytbeton $3,2 \text{ t/m}^3$) von 55 cm.

3.1.3 Ortbetonbauweise

Strahlenschutz bunker werden dann in Ortbetonbauweise erstellt, wenn sehr hohe Wandstärken (100 bis 250 cm) auszuführen sind oder die örtlichen Gegebenheiten eine Ausführung in Fertigteil- oder Sandwichbauweise nicht erlauben. Bild 8 zeigt einen Linearbeschleunigerbunker mit einer Nutzstrahlabschirmdicke von 180 cm Barytbeton.



Bild 8: Ortbetonbauweise



Bild 9: Mauerwerksbauweise

3.1.4 Mauerwerk

Insbesondere für geringe Abschirmstärken (bis 24 cm) oder in räumlich beengten Montageverhältnissen wird die Ausführung der Bunker in Mauerwerksbauweise (Bild 9) gewählt, bei entsprechenden Abschirmerfordernissen in Kombination mit der Sandwichbauweise.

3.2 Ausführung in Blei-Sandwich-Bauweise

Strahlenschutzräume in Blei-Stahl-Sandwichbauweise werden für Röntgenprüfsysteme und CT-Anlagen ausgeführt. Kriterien für die Auswahl (siehe auch 4.) sind insbesondere statische Vorgaben aus dem Bestand, da das spezifische Abschirmgewicht bei gleichem Bleiäquivalent niedriger ist als bei Barytbeton. Bei beengten räumlichen Verhältnissen ist auch die geringere Wandstärke von Vorteil. Außerdem kann die Verarbeitung von Blei oder Blei-Sandwichelementen absolut trocken erfolgen.

3.2.1 Profile

Die Ausführung mit verzahnten Bleiprofilen wird für hohe Blei-Abschirmstärken ab 10 mm bis 60 mm gewählt. Die Verbleiung kann freistehend mit Stahlkonstruktion oder an einer Wand mit Auskippsicherung erfolgen. Etwa 95 % der Bleilast werden vertikal auf den Boden abgeleitet. Bild 10 zeigt eine teilweise freistehende, teilweise vor einer Wand errichtete Strahlenschutzkabine für eine 450 kV-CT-Anlage.



Bild 10: Ausführung mit Bleiprofilen



Bild 11: Sandwich-Fertigelemente

3.2.2 Sandwich-Fertigelemente

Strahlenschutzkabinen mit Abschirmstärken bis 8 mm Pb werden unter Verwendung von Sandwichfertigelementen mit Bleiabschirmung, tragendem Kern und Stahlblechoberflächen hergestellt. Die Elemente werden entweder frei tragend oder mit einer Stahlhilfskonstruktion montiert. Bild 11 zeigt eine Strahlenschutzkabine für eine 160 kV-CT-Anlage.

3.2.3 Kabine/Container

Mobiler Strahlenschutzkabinen, die vorgefertigt als vollständige Prüfeinheit an den Prüfort transportiert werden, können auch für hohe Strahlleistungen eingesetzt werden. In der Regel kommen hier aber CT-Anlagen bis 225 kV zum Einsatz. Bild 12 zeigt eine solche Kabine, die in Serienfertigung hergestellt wird.



Bild 12: Metrotom



Bild 13: Container mit Seetransportzulassung

Bild 13 zeigt einen Container mit Seetransportzulassung für den weltweiten Einsatz. Die CT-Scanner-Einheit wird hierbei demontiert und per Luftfracht zum Einsatzort gebracht.

4. Kriterien für die Bauartfestlegung

Für die Bauartfestlegung sind unterschiedliche Kriterien ausschlaggebend, die nachfolgend betrachtet werden sollen. Anhand der Kriterien bzw. deren Wichtung im Einzelfall kann eine Auswahl der Bauart im Hinblick auf das Abschirmmaterial (Beton oder Blei), die Bauweise (Fertigteile bzw. Sandwichelement oder örtliche Herstellung) und den Montageort (Werksfertigung oder Montage am Prüfort) getroffen werden.

4.1 Strahlenquelle

Für Röntgenprüfsysteme und CT-Anlagen bis 450 kV wird als Abschirmmaterial sowohl Beton als auch Blei eingesetzt. Isotopenstrahler und Linearbeschleuniger werden im Regelfall mit Beton (Barytbeton $3,2 \text{ t/m}^3$) hoher Wandstärken (Isotopenstrahler bis 80 cm, Linearbeschleuniger bis 250 cm) abgeschirmt.

4.2 Strahlgeometrie

Nutzstrahlung (Primärstrahl), Gehäusedurchlaßstrahlung und Streustrahlung (Sekundärstrahl) weisen unterschiedliche Abschirmerfordernisse auf. Im Regelfall werden die Unterschiede durch angepasste Abschirmstärken gleichen Materials realisiert, hier kann aber auch eine unterschiedliche Materialwahl oder Bauart von technischem und/oder wirtschaftlichem Vorteil sein. Bild 14 zeigt eine solche Strahlenschutzkabine für einen 450-kV-CT-Scanner. Die Nutz- und Gehäusedurchlaßstrahlabschirmung ist in Barytbetonmauerwerk, die Streustrahlabschirmung in Blei realisiert



Bild 14: Mischbauweise / Strahlgeometrie



Bild 15: Strahlenschutzbunker nach Umsetzung

4.3 Investitionskosten

Ein relevanter Herstellkostenunterschied ergibt sich aus der Materialauswahl für die Abschirmung. Auf Basis der aktuellen Material- bzw. Rohstoffkosten lässt sich feststellen, daß erfahrungsgemäß eine Strahlenschutzkabine mit Bleiabschirmung einen 1,3-fach höheren Herstellpreis hat im Vergleich zu einer Strahlenschutzkabine aus Beton mit gleichem Blei-Äquivalenzwert.

4.4 Bestandsvorgaben

Kriterium für die Abschirmmaterialauswahl ist insbesondere die Statik des Bestandes (Unterkellerung, Fundamentauslegung, Bodenplattenbelastbarkeit) und der zur Verfügung stehende Raum. Für einen 225-kV-CT-Scanner mit einer Nutzstrahlabschirmung von 14 mm Bleiäquivalent wiegt eine Nutzstrahlwand von $2 \times 3 \text{ m}$ bei Ausführung in Blei ca. 2 t bei einer Gesamtwandstärke von 10 cm. Bei Ausführung in Barytbeton ($3,2 \text{ t/m}^3$) wiegt die Wand 4 t bei einer Wandstärke von 21 cm. Bei Ausführung in Beton ($2,3 \text{ t/m}^3$) wiegt die Wand 8 t bei einer Wandstärke von 56 cm.

4.5 Mobilitätsanforderungen

Strahlenschutzkabinen können ortsfest, semi-mobil (mit hohem Montageaufwand demontierbar und an anderem Ort neu montiert) oder mobil (mit herkömmlichen Transportmitteln umsetzbar ausgeführt werden).