

Brandschutz für hinterlüftete Photovoltaikanlagen an Fassaden

Übergangsdokument für Planung und Brandschutznachweis

gültig bis 31.12.2024



Version 1.00

Zürich, 26.10.2023

Übergangsdokument für Planung und Brandschutznachweis

© Copyright Swissolar

Swissolar
Geschäftsstelle
Neugasse 6
CH-8005 Zürich

Tel +41 44 250 88 33

info@swissolar.ch

www.swissolar.ch

Inhaltsverzeichnis

1	Grundlagen	3
1.1	Einleitung	3
1.2	Ausgangslage	3
1.3	Geltungsbereich und Abgrenzung	4
2	Gefahren.....	5
2.1	Brandszenarien.....	5
2.2	Vertikale Brandausbreitung	5
2.3	Horizontale Brandausbreitung	5
2.4	Herunterfallen von Bauteilen	5
2.5	Naturgefahren	6
3	Systembeschreibung	7
3.1	Fassadentypen	7
3.2	Aussenwandkonstruktionen.....	8
3.3	Unterkonstruktion	8
3.4	PV- Module	9
4	Nachweisverfahren (gemäss VKF-BSR 27-15)	11
4.1	Systematik	11
4.2	Qualitätssicherung	11
4.3	Prozess	11
4.4	Systemkategorien	11
4.5	Nachweisbericht	12
4.6	Brandversuche	12
4.7	Gebäude geringer Höhe (bis 11m Gesamthöhe)	13
4.8	Gebäude mittlerer Höhe (bis 30m Gesamthöhe)	14
4.9	Hochhäuser (bis 100m Gesamthöhe)	16
5	Technische Schutzmassnahmen	18
5.1	Grundlagen	18
5.2	Anschlusskabel und Stecker	18
5.3	Kabelführung	18
5.4	Wechselrichterkonzept	20
6	Bauliche Schutzmassnahmen	21
6.1	Horizontale Brandschutzmassnahmen	21
6.2	Vertikale Brandschutzmassnahmen	22
7	Betrieb	23
7.1	Grundsatz.....	23
7.2	Anforderungen an den Betrieb	23
7.3	Ausserbetriebsetzung und Rückbau	23
8	Anhang	24
8.1	Glossar	24
8.2	Zeichnungserläuterung	25
8.3	Ergänzungen zu den baulichen Anforderungen.....	25
8.4	Ergänzungen Nachweisverfahren	30
8.5	Ergänzungen zum Unterhalt	32

1 Grundlagen

1.1 Einleitung

Das Dokument wurde als Übergangsdokument erstellt, da zum aktuellen Zeitpunkt kein Stand der Technik Papier zum Thema Brandschutz für Photovoltaikanlagen an Fassade verfügbar ist. Das Dokument dient vorübergehend als Leitfaden für die Planung von PV-Fassaden. Behördliche Auflagen sind in jedem Fall zusätzlich zu erfüllen.

Dieser Leitfaden ist als Ergänzung zum VKF-BSM «2001-15 Solaranlagen», sowie dem Swissolar Stand-der-Technik-Papier «STP zu VKF Merkblatt Solaranlagen» zu verstehen. Allgemein gültige Grundsätze wie beispielsweise Anforderungen an Verkabelung, Wechselrichterstandorte etc. werden hier nicht wiederholt aufgeführt.

Gebäudespezifische Massnahmenkonzepte sind gemeinsam mit dem «QS Verantwortlichen Brandschutz» vom jeweiligen Projekt zu definieren und abzustimmen.

1.2 Ausgangslage

Das VKF-BSM «2001-15 Solaranlagen» und das Swissolar Stand-der-Technik-Papier «STP zu VKF Merkblatt Solaranlagen» sind auf Solaranlagen, die auf oder in Dächern installiert werden, ausgerichtet.

Je nach Gebäudekategorie (Gebäude geringer Höhe, Gesamthöhe bis 11m / Gebäude mittlerer Höhe, Gesamthöhe bis 30m / Hochhäuser, Gesamthöhe bis 100m), werden gemäss VKF-BSR «14-15 Verwendung von Baustoffen», unterschiedliche Anforderungen an die Aussenwandbekleidung gestellt.

Für Gebäude bis zu einer Gesamthöhe von 30m dürfen für Aussenwandbekleidungs-systeme brennbare Bauprodukte verwendet werden.

Für Gebäude mittlerer Höhe sind brennbare Aussenwandbekleidungen und / oder Wärmedämmungen konstruktiv so zu unterteilen, dass sich ein Brand an der Aussenwand vor dem Löschangriff durch die Feuerwehr um nicht mehr als zwei Geschosse oberhalb des Brandgeschosses ausbreiten kann.

Gemäss VKF-BSR «14-15 Verwendung von Baustoffen» Ziffer 3.2.3 Abs. 1, müssen hinterlüftete Fassaden an Gebäuden mittlerer Höhe mit einer von der VKF anerkannten oder gleichwertigen Konstruktion ausgeführt werden, wenn die Aussenwandbekleidung und / oder im Hinterlüftungsbereich Dämmstoffe bzw. flächige Schichten aus brennbaren Baustoffen bestehen. Das gilt im Prinzip für alle vorgehängten hinterlüfteten PV-Fassaden.

Ab 30m Gesamthöhe dürfen gemäss VKF-BSR «14-15 Verwendung von Baustoffen» Ziffer 3.1.2 Abs. 1, für die Aussenwand und das Aussenwandbekleidungs-system nur nicht brennbare Baustoffe (Brandverhaltensgruppe RF1) eingesetzt werden. Photovoltaikmodule enthalten brennbare Baustoffe. Zudem sind in einer PV-Anlage zusätzliche Brandlasten und Aktivierungsgefahren vorhanden.

Grundsätzlich sind Photovoltaikanlagen daher ohne weitere Massnahmen resp. Nachweise an Fassaden von Hochhäusern sowie Gebäuden mittlerer Höhe nicht zulässig.

Die Brandschutzbehörden können der Installation einer Photovoltaikanlage an der Fassade für Gebäude mittlerer Höhe und Hochhäuser, nur zustimmen, wenn in einem Nachweisverfahren nach VKF-BSR «27-15 Nachweisverfahren im Brandschutz» gezeigt wird, dass die Schutzziele und Brandschutzanforderungen gewährleistet sind.

1.3 Geltungsbereich und Abgrenzung

Der Leitfaden gilt für neue und bestehende Gebäude, an deren Fassaden hinterlüftete Photovoltaikanlagen installiert werden.

Der Leitfaden richtet sich an Fachplaner, Unternehmer, Eigentümer-, Nutzer- und Bauherrschaften sowie an Behörden. Der Leitfaden zeigt auf an welchen Fassaden, unter welchen Bedingungen und mit welchem entsprechenden Nachweisverfahren für den Brandschutz, Photovoltaikanlagen geplant und wenn bewilligt umgesetzt werden können. Zudem werden Fassaden- spezifische technische Grundsätze als Ergänzung zum Swissolar Stand-der-Technik-Papier «STP zu VKF Merkblatt Solaranlagen» erläutert.

Damit erleichtert das Dokument Brandschutzfachplanenden die Planung und die Nachweisführung. Für Brandschutzbehörden wird die Beurteilung einfacher.

Aus dem Leitfaden kann keine automatische Genehmigung abgeleitet werden. Der Leitfaden ist kein Stand-der-Technik-Papier, sondern dient als Übergangsdokument bis ein solches vorliegt (gültig bis 31.12.2024).

Wenn sich neue Erkenntnisse aus Brandversuchen, technischen Regeln oder regulatorischen Vorgaben ergeben, kann der Leitfaden in Absprache mit der VKF nachgeführt werden.

2 Gefahren

2.1 Brandszenarien

2.1.1 Brandszenarien am oder im Gebäude

Die Hauptursachen für die thermische Beanspruchung einer Aussenwandkonstruktion wird von Lignum «7.1 Aussenwände – Konstruktion und Bekleidung» Ziff. 1.3.1, wie folgt beschrieben:

- Brand eines benachbarten Gebäudes mit Funkenflug oder Strahlung
- Brand ausserhalb des Gebäudes am Sockel oder auf einem Balkon
- Brand innerhalb des Gebäudes in einem an die Aussenwand angrenzenden Raum mit Öffnungen

2.1.2 Brandszenarium durch Lichtbögen

Im Vergleich zu den meisten anderen Fassadenmaterialien ergibt sich bei einer PV-Fassade die Gefahr einer Selbstentzündung durch Lichtbögen. Ausgelöst werden Lichtbögen z.B. durch schlechte Kontakte. Hier muss unterschieden werden zwischen seriellen Lichtbögen, welche typischerweise im Modul, in der Anschlussdose und bei Steckern auftreten können und parallelen Lichtbögen, welche durch Isolationsdefekte bei der Verkabelung auftreten können.

Lichtbögen erreichen Temperaturen von über 1'000 °C und können andere Bauteile entflammen.

2.2 Vertikale Brandausbreitung

Insbesondere für hohe Gebäude ist die vertikale Brandausbreitung ein hohes Risiko, da ab einer gewissen Gebäudehöhe die Feuerwehr von aussen keinen Löschangriff mehr ausführen kann. Die vertikale Brandausbreitung über die Fassade ist einzuschränken. Die zeitlich verzögerte Ausbreitung eines Brandes, auf das nächst höher gelegene Geschoss, kann ohne umfangreiche Brandschutzmassnahmen wie z.B. Sprinklervollschutz, Feuerwiderstand der Fassade inkl. der Fenstern nicht ausgeschlossen werden.

Die Brennbarkeit des Solarmoduls bzw. der Zwischenschicht kann zur vertikalen Brandausbreitung beitragen. Zudem besteht bei den vertikalen Steigzonen der Erschliessungsleitungen ein Potential zur Brandweiterleitung.

2.3 Horizontale Brandausbreitung

Brennbare Materialien können die horizontale Brandausbreitung in der Fassade verstärken.

Die horizontale Brandausbreitung wird durch das Modul und die horizontale Strangverkabelung beeinflusst und kann ebenfalls mit geeigneten Brandschutzmassnahmen und technischen Grundsätzen eingeschränkt bzw. verhindert werden.

2.4 Herunterfallen von Bauteilen

Gemäss VKF-BSR «14-15 Verwendung von Baustoffen» Ziff. 3.2.1 Abs. 1, müssen beim baulichen Standardkonzept geklebte Aussenwandbekleidungssysteme und / oder Fensterelemente (z. B. Structural-Glazing-Fassadenelemente), welche ohne eine mechanische Sicherung ausgeführt sind, mit einer von der VKF anerkannten oder gleichwertigen Konstruktion ausgeführt werden.

Photovoltaikmodule müssen ein sicheres Glasbruchverhalten, sowie je nach Anwendung eine ausreichende Resttragfähigkeit aufweisen. In Bezug auf die mechanische Sicherung können die Module gleich wie VSG-Glas behandelt werden.

2.5 Naturgefahren

2.5.1 Blitzschutz

Gemäss VKF-BSM «2001-15 Solaranlagen» führen Photovoltaikanlagen zu keiner Blitzschutzpflicht, sofern dies gemäss VKF-BSR «22-15 Blitzschutzsysteme» für dieses Gebäude nicht gefordert wird. Hochhäuser sind immer blitzschutzpflichtige Gebäude und verfügen mindestens über einen äusseren Blitzschutz. Ab einer Gebäudehöhe von 60m muss mit seitlichen Blitzeinschlägen gerechnet werden. Die nötigen Fangeinrichtungen sind beim Fassadenkonzept mit zu berücksichtigen.

Gemäss VKF-BSM «2001-15 Solaranlagen» muss die Photovoltaikfassade in das Schutzkonzept miteinbezogen werden. Zusätzlich zum Schutzpotenzialausgleich sind die aussenliegenden metallischen Teile der Photovoltaikanlage in den äusseren Blitzschutz einzubinden. Für die Planung und Einbindung muss zusammen mit dem Blitzschutzplaner ein Konzept erstellt werden. Dieses muss zum Zeitpunkt der Nachweisführung vorliegen.

2.5.2 Hagelschutz

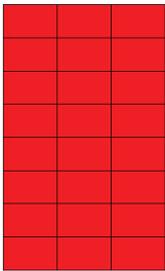
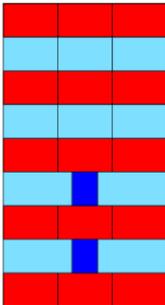
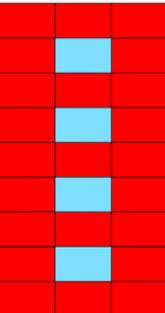
Photovoltaikfassaden an Hochhäusern können aufgrund ihrer Lage durch Hagel beschädigt werden. Gemäss VKF-BSM «2001-15 Solaranlagen» müssen Solarmodule mit einer nachgewiesenen Hagelwiderstandsklasse eingesetzt werden. Die Hagelwiderstandsklasse der Module muss gemäss SIA 261/1 unter Berücksichtigung der aktuellen Hagelkarte ausgelegt werden.

3 Systembeschreibung

3.1 Fassadentypen

Mit der folgenden Einteilung von Fassadentypen (in Anlehnung an Lignum «7.1 Aussenwände – Konstruktion und Bekleidung») können objektspezifische Massnahmen gruppiert und besser zugeordnet werden. An einem Gebäude können auch mehrere Fassadentypen auftreten, wobei im Bereich der Übergänge der einzelnen Fassadentypen allenfalls zusätzliche Massnahmen nötig werden. Eine wie in Kapitel 4.4 beschriebene vertikale Trennung der Flächen wird nötig, sobald die Teilflächen unterschiedlichen Systemkategorien zugeteilt werden können.

Tabelle 1: PV- Fassadentypen (Eigene Darstellung)

Bezeichnung	Prinzipbild	Merkmale
Fensterlose Fassade, feuerwiderstandsfähige Fenster		<ul style="list-style-type: none"> - geschlossene Fassade ohne Fenster - Fassade mit fest verschraubten Fenstern mit Feuerwiderstand - Anordnung der Fenster frei
Fensterband oder horizontaler Fassadenstreifen RF1		<p>Durchgehender horizontaler Unterbruch des Hinterlüftungsraums pro Geschoss durch:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Horizontal durchgehendes Fensterband RF1 - Horizontal durchgehender Fassadenstreifen RF1 - Seitlich angeordnete Kombination von Fensterband und Fassadenstreifen RF1
Lochfassade		<ul style="list-style-type: none"> - Einzelne Fensteröffnungen ohne Feuerwiderstand - Lokaler Unterbruch Hinterlüftungsraum durch Fenster - Fenstergrösse und -anordnung variabel - Offener Hinterlüftungsraum über die Gesamthöhe, wenn keine Massnahmen ergriffen werden

3.2 Aussenwandkonstruktionen

Die Aussenwandkonstruktion mit PV-Elementen entspricht grundsätzlich einer hinterlüfteten Fassade. Die primäre Unterkonstruktion wird auf die Aussenwand befestigt. Ab der primären Unterkonstruktion wird ein an die PV-Module angepasstes mechanisches Montagesystem verwendet. Bei ungedämmten oder von innen gedämmten Gebäuden kann die Wärmedämmung auch entfallen.

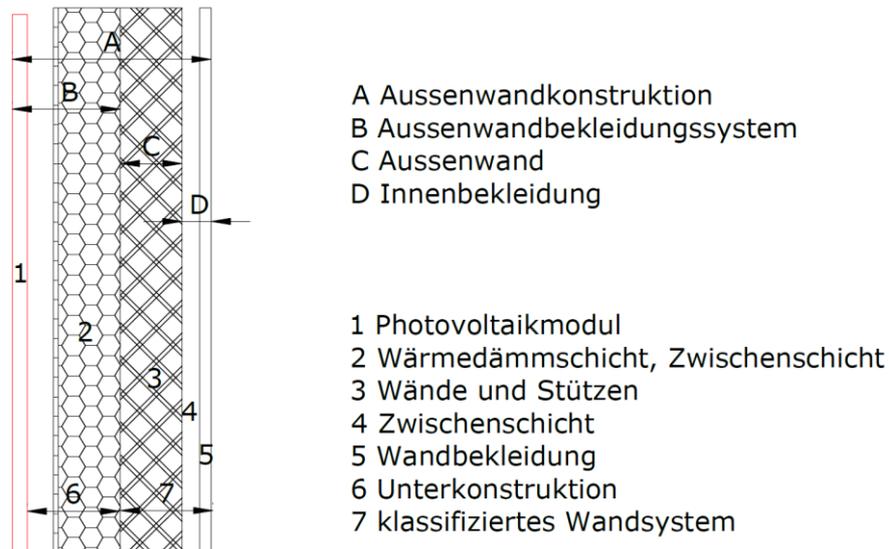


Abbildung 1: Prinzip Aussenwandkonstruktion PV- Fassade (Eigene Darstellung)

Das Aussenwandbekleidungssystem (B) ohne das Photovoltaikmodul (1) muss für die Montage einer PV-Anlage nach dem vorliegenden Leitfaden in eine der folgenden Kategorien eingeteilt werden können:

- Aufbau des Aussenwandbekleidungssystem (B) ohne das PV-Modul und Aussenwand (C) aus Baustoffen RF1
- Für Gebäude geringer und mittlerer Höhe sind auch Aussenwand (C) und Wärmedämmschicht, Zwischenschicht (2) gemäss Lignum «7.1 Aussenwände – Konstruktion und Bekleidung», Ziff. 2.4.3 möglich

Abweichende Anforderungen für spezifische Bauteile sind zulässig gemäss Beschreibungen aus den Kapiteln:

- 3.3 Unterkonstruktion
- 5.3 Kabelführung

Die Anforderungen an das Photovoltaikmodul werden in Kapitel 0 beschrieben.

3.3 Unterkonstruktion

Anforderungen gemäss VKF-BSR «14-15 Verwendung von Baustoffen» Ziff. 3.2.1 und 3.2.3 für hinterlüftete Fassaden mit Photovoltaikmodulen:

- Wenn die PV-Module auf die Montagekonstruktion geklebt sind, benötigt es für alle Gebäudekategorien eine mechanische Sicherung gem. VKF-BSR «14-15 Verwendung von Baustoffen» Ziffer 3.2.1 Abs. 1.
- lineare Unterkonstruktionen sind für Gebäude grösser 11m aus Baustoffen der RF1 zu erstellen.
- punktuelle Befestigungen / Rückverankerungen innerhalb der Wärmedämmung mindestens RF3 (cr) sind gemäss VKF-BSR «14-15 Verwendung von Baustoffen» Ziffer 3.2.3 Abs. 3 zulässig.

3.3.1 Mechanische Sicherung

Für geklebte Befestigung der Photovoltaikmodule müssen zur mechanischen Sicherung mindestens zwei Auflagewinkel pro Modul zur Abtragung der vertikalen Kräfte (Eigengewicht) vorgesehen werden. Unter Berücksichtigung dieser Anforderung können zum Beispiel geschuppte, geklemmte, eingehängte oder auf Montageschienen geklebte Modulbefestigungssysteme eingesetzt werden. Glasklötze oder punktuelle Gummieinlagen zum Schutz der Glaskante des Photovoltaikmoduls sind in der Befestigungstechnik zulässig.

3.3.2 Hinterlüftung

Die Hinterlüftungsebene zwischen Aussenwand resp. Wärmedämmung und den Photovoltaikmodulen muss zwischen 40 mm und 100 mm tief sein. Lokal kann der Lüftungsquerschnitt um maximal 50% reduziert werden (z.B. durch Insektenschutzgitter, oder Lüftungsöffnungen). Der Lüftungsquerschnitt kann anhand des minimal benötigten Hinterlüftungsraums dimensioniert werden, auch wenn die Hinterlüftungsebene konstruktiv bedingt grösser ist. Die Herstellerangaben der Photovoltaikmodule sind zu berücksichtigen.

3.4 PV- Module

3.4.1 Typen

Photovoltaikmodule können in zwei Hauptkategorien mit jeweils je zwei Unterkategorien aufgeteilt werden.

Tabelle 2: PV- Modultypen (Eigene Darstellung)

Hauptkategorie	Unterkategorie	Merkmale
Glas-Glas Module	Rahmenlos	<ul style="list-style-type: none"> Vorder- und Rückseite aus Glas (TVG oder ESG) RF1 Verzögertes brennen der Zwischenschicht Brandverhaltensgruppe RF2 erreichbar
	gerahmt	
Glas-Folien Module	Rahmenlos	<ul style="list-style-type: none"> Vorderseite aus Glas (TVG oder ESG) RF1 Rückseite Verbundfolie RF3 (cr) Brandverhaltensgruppe RF3 (cr) erreichbar
	gerahmt	

Die in der obigen Tabelle aufgeführten Brandverhaltensgruppen sind vom Hersteller zu belegen. Die Anforderungen an die Statik sind gemäss SIA 2057 «Glasbau» auszulegen.

3.4.2 Farbe

Für farbige Photovoltaikmodule werden unterschiedliche Technologien eingesetzt, welche sich unterschiedlich auf das Brandverhalten auswirken. Keramikfarben haben keinen Einfluss auf das Brandverhalten und die Baustoffklassifizierung der PV-Module. Alle anderen Farbtechnologien sind bei Modulbrandversuchen zu berücksichtigen.

3.4.3 Zertifizierungen

Die folgenden Zertifizierungen sind für das PV-Modul nötig:

Tabelle 3: Zertifizierungen PV- Module (Eigene Darstellung)

Komponente	Norm
Anschlussdose	SN EN 62790:2015-03 «Anschlussdosen für Photovoltaik-Module»
	SN EN 62979:2017-10 «Photovoltaik (PV)-Module - Bypass-Diode - Prüfung des thermischen Durchgehens»
Modul	SN EN IEC 61730-1+AC:2018-06 «Photovoltaik (PV) Module - Sicherheitsqualifikation - Teil 1: Anforderungen an den Aufbau»
	SN EN IEC 61730-2+AC:2018-06 «Photovoltaik (PV)-Module - Sicherheitsqualifikation - Teil 2: Anforderungen an die Prüfung»
	Bauartzulassung für die eingesetzten Moduldimensionen

4 Nachweisverfahren (gemäss VKF-BSR 27-15)

4.1 Systematik

Fehlt der Stand der Technik und/oder wird von den Anforderungen der Brandschutzvorschriften abgewichen, muss nachgewiesen werden, dass mit den geplanten Massnahmen oder Ausführungen die übergeordneten Schutzziele gleichwertig erreicht werden. Für diesen Nachweis müssen objektspezifische Schutzziele definiert werden, die mit den geplanten Massnahmen erreicht werden.

In diesem Dokument werden PV- Fassaden in Systemkategorien eingeteilt, um die Anforderungen an das Nachweisverfahren zu klassifizieren.

4.2 Qualitätssicherung

Die Anforderungen an die Qualitätssicherung werden gemäss VKF-BSR «11-15 Qualitätssicherung im Brandschutz» festgelegt. Ist ein Nachweisverfahren nötig, muss dieses durch einen VKF-anerkannten Brandschutzexperten gemäss Qualitätssicherungsstufe QSS3 geführt werden. Entsprechende Fachpersonen sind im VKF-Register aufgeführt. Die QS-verantwortliche Person ist während des Projekts erste Ansprechperson der Brandschutzbehörden. Die Gesamtleitung übernimmt neben anderen Aufgaben die Koordination der Schnittstellen zwischen den Gewerken.

4.3 Prozess

In den Prozess des Nachweisverfahrens sind die Eigentümerschaft, PV-Planer, Fassadenplaner, der QS Verantwortliche Brandschutz und die Brandschutzbehörden involviert. Eine frühe Abstimmung mit den einzelnen Instanzen beschleunigt den Nachweisprozess. Das Grobkonzept kann unter Rücksprache mit den beteiligten zu einem Nachweis ausgearbeitet werden.

4.4 Systemkategorien

Zur Definition des nötigen Nachweisverfahrens werden Photovoltaikanlagen an Fassaden in drei Systemkategorien eingeteilt:

- Systemkategorie 0: kein Nachweisverfahren erforderlich
- Systemkategorie 1: Nachweisverfahren mit argumentativen Nachweisen möglich
- Systemkategorie 2: Nachweisverfahren nur mit Nachweisen mittels Brandversuchen

Können Teilflächen am selben Gebäude unterschiedlichen Systemkategorien zugeordnet werden, müssen die einzelnen Teilflächen separat und in Kombination beurteilt werden.

Werden die einzelnen Teilflächen a, b, und c unterschiedlichen Systemkategorien zugeordnet, müssen sie mit horizontalen und vertikalen Brandschutzmassnahmen nach Ziff. 6 untereinander und zu anderen Fassadenteilen abgegrenzt werden.

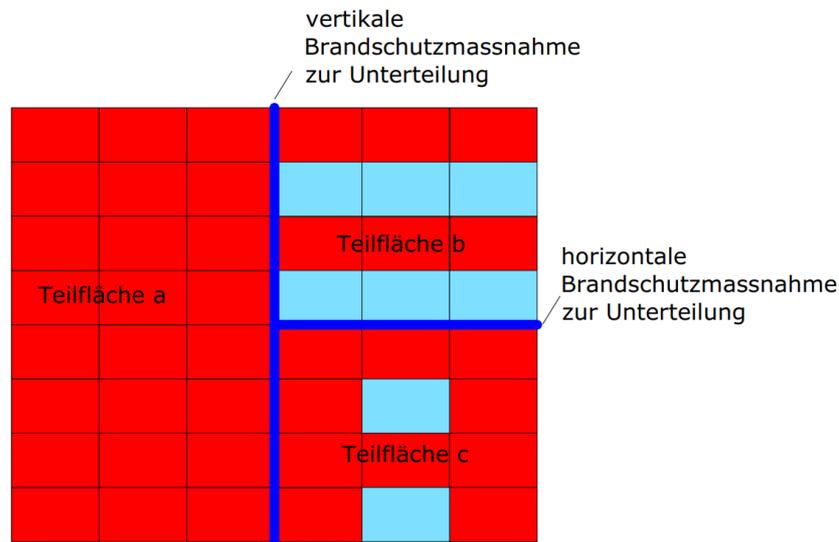


Abbildung 2: Unterteilung von Teilflächen und Systemkategorien (Eigene Darstellung)

Die Personensicherheit ist in jedem Fall zu gewährleisten. Wenn die Anforderungen der entsprechenden Systemkategorien erfüllt sind, ist die Anlage genehmigungsfähig, aber nicht automatisch genehmigt.

4.5 Nachweisbericht

Vor der Nachweisführung sind die Randbedingungen und die Schutzzielkriterien zwingend mit Brandschutzbehörden abzustimmen. Damit die Brandschutzbehörden die Gleichwertigkeit der Schutzzielenerreichung beurteilen kann, muss ein Nachweisbericht vorliegen. Der Bericht ist mit einem Änderungsindex zu versehen.

Bei Anlageprojekten der Systemkategorie 2 müssen zusätzlich die Prüfberichte der Brandversuche eingereicht werden. Die Nachweisführenden müssen durch Interpretation der Prüfberichte aufzeigen, dass die Schutzziele erfüllt sind.

4.6 Brandversuche

Im Nachweisverfahren werden Schutzziele definiert, die der Brandschutzbehörde zur Genehmigung einzureichen sind. Da kein Stand der Technik vorhanden ist, muss die Einhaltung dieser Schutzziele für die Systemkategorie 2 mit Brandversuchen nachgewiesen werden.

Die Brandversuche müssen, in Abstimmung mit den Brandschutzbehörden, in einem VKF-anerkannten Prüflabor, einer Stelle (notified body) des NANDO-Informationssystems der Europäischen Union, oder in einem mit den Brandschutzbehörden abgesprochenen Versuchsaufbau durchgeführt werden.

4.7 Gebäude geringer Höhe (bis 11m Gesamthöhe)

4.7.1 Schutzziele

In den VKF-BSR «14-15 Verwendung von Baustoffen» wird für Gebäude geringer Höhe (Gesamthöhe bis 11m) kein Schutzziel, sondern nur Materialanforderungen definiert, da die Intervention der Feuerwehr von aussen gewährleistet ist.

4.7.2 Nachweisverfahren

Gemäss VKF-BSR «14-15 Verwendung von Baustoffen» ist für hinterlüftete Fassaden an Gebäuden geringer Höhe (Gesamthöhe bis 11m) lediglich der Nachweis der Brandverhaltensgruppe zu erbringen.

4.7.3 Systemkategorien

Systemkategorie 0

In diese Kategorie fallen alle PV-Anlagen unabhängig vom Fassadentyp. Die Photovoltaikanlage ist ohne Nachweisverfahren genehmigungsfähig.

Allgemein ist die Voraussetzung, dass alle folgenden Bedingungen erfüllt sind:

- Die Aussenwand ist gemäss der Beschreibung in Ziffer 3.2 ausgeführt.
- Alle PV- Modultypen können eingesetzt werden (min. RF3 (cr)).
- Es sind keine horizontalen Brandschutzmassnahmen gegen eine Brandausbreitung in der Hinterlüftungsebene und bei der Kabelführung gemäss Ziff. 6.1 nötig.
- Die technischen Schutzmassnahmen der Photovoltaikanlage sind gemäss Ziffer 5 ausgeführt.
- Modulwechselrichter und Optimierer können eingesetzt werden

Systemkategorie 1 - 2

Für Gebäude geringer Höhe (Gesamthöhe bis 11m) ist keine Systemkategorie 1 oder 2 vorgesehen.

4.7.4 Qualitätssicherung

Grundsätzlich ist gemäss VKF-BSR «11-15 Qualitätssicherung im Brandschutz» Ziff. 3.3.1 für Gebäude bis 11m eine Qualitätssicherung Stufe QSS 1 oder 2 je nach Nutzung gefordert.

4.8 Gebäude mittlerer Höhe (bis 30m Gesamthöhe)

4.8.1 Schutzziele

In der VKF-BSR «14-15 Verwendung von Baustoffen» Ziff. 3.1.1 wird für die Gebäudekategorie «Gebäude mittlerer Höhe» folgendes Schutzziel formuliert:

Brennbare Aussenwandbekleidungen und / oder Wärmedämmungen sind konstruktiv so zu unterteilen, dass sich ein Brand an der Aussenwand vor dem Löschangriff durch die Feuerwehr um nicht mehr als zwei Geschosse oberhalb des Brandgeschosses ausbreiten kann.

4.8.2 Nachweisverfahren

Gemäss VKF-BSR «14-15 Verwendung von Baustoffen» Ziff. 3.2.3 gilt für hinterlüftete Fassaden an Gebäuden mittlerer Höhe, dass diese mit einer von der VKF anerkannten oder gleichwertigen Konstruktion ausgeführt werden müssen, wenn die Aussenwandbekleidungen und / oder im Hinterlüftungsbereich Dämmstoffe bzw. flächige Schichten aus brennbaren Baustoffen bestehen.

Sofern keine VKF-anerkannte oder gleichwertige Konstruktion verwendet wird, ist ein Nachweisverfahren durchzuführen.

4.8.3 Systemkategorien

Systemkategorie 0

VKF-anerkannte oder gleichwertige Konstruktion sind der Systemkategorie 0 zuordenbar.

Systemkategorie 1

Die Photovoltaikanlage ist genehmigungsfähig, wenn der Nachweisbericht gemäss Ziffer 4.5:

- die unter Ziffer 4.8.1 aufgeführten Schutzziele und
- die Massnahmen zu deren Einhaltung vollständig, plausibel und nachvollziehbar beschreibt.

In diese Kategorie fallen alle Anlagen unabhängig vom Fassadentyp, welche nicht in Systemkategorie 2 fallen.

Allgemein ist die Voraussetzung, dass alle folgenden Bedingungen erfüllt sind:

- Die Aussenwand ist gemäss der Beschreibung in Ziffer 3.2 ausgeführt.
- Es werden geschossweise horizontale Brandschutzmassnahmen gegen eine vertikale Brandausbreitung in der Hinterlüftungsebene und bei der Kabelführung gemäss Ziffer 6.1 umgesetzt.
- Das Brandschutzkonzept des Gebäudes weist keine relevanten Abweichungen von den aktuellen VKF-Brandschutzvorschriften auf. Über die Einstufung der Abweichungen entscheidet die Brandschutzbehörde.
- Die Photovoltaikmodule haben einen Glas-Glas-Aufbau von min. 2 x 4 mm und weisen eine Klassifizierung von mindestens B-s3,d1 gemäss SN EN 13501-1 auf.
- Die Glasstärke des Glas-Glas-Aufbaus kann auf minimal 2 x 1.6 mm reduziert werden, wenn die Kante des PV-Moduls von einem Material der Brennbarkeitsklasse RF1 mit einer Stärke ≥ 1.5 mm umfasst (gerahmt) ist. Eine Klassifizierung von min. B-s3,d1 gemäss SN EN 13501-1 ist nachzuweisen.
- Die technischen Schutzmassnahmen der PV-Anlage sind gemäss Ziffer 5 ausgeführt.
- Es werden keine Modulwechselrichter und Optimierer in der Hinterlüftungsebene verbaut.

Die Bedingungen für die folgenden Gebäudekategorien können wie folgt vereinfacht werden:

- Gebäude mit Löschanlagenkonzept oder Aussenwand mit Feuerwiderstand (inkl. Fenster): Horizontale Brandschutzmassnahmen gemäss Ziff. 6.1 müssen nur bei jedem zweiten Geschoss umgesetzt werden. Details sind im Nachweisbericht zu erläutern.
- Aussenwand mit Feuerwiderstand (inkl. Fenster): Die Photovoltaikmodule können einen Glas-Folien Aufbau mit einer Klassifizierung von RF2 (cr) haben.

Systemkategorie 2

In diese Kategorie fallen Anlagen, die einzelne Anforderungen der Systemkategorie 1 nicht erfüllen (z.B. Abweichungen von den baulichen und technischen Lösungsvorschlägen der Ziffern 5 oder alternative Konzepte verfolgen).

Voraussetzung ist jedoch, dass das Brandschutzkonzept des Gebäudes keine relevanten Abweichungen von den aktuellen Brandschutzvorschriften aufweist. Ob die Abweichungen relevant sind, entscheidet die Brandschutzbehörde.

Die Photovoltaikanlage ist genehmigungsfähig, wenn:

- die Aussenwand gemäss der Beschreibung in Ziffer 3.2 ausgeführt ist.
- mit Brandversuchen (Ziffer 4.6) nachgewiesen wird, dass die Schutzziele erfüllt sind und
- der Nachweisbericht gemäss Ziffer 4.5
 - die unter Ziffer 4.8.1 aufgeführten Schutzziele und
 - die Massnahmen zu deren Einhaltung vollständig, plausibel und nachvollziehbar beschreibt.

4.8.4 Qualitätssicherung

Ist gemäss 4.8.2 ein Nachweisverfahren erforderlich wird das Projekt gemäss den VKF-BSR «11-15 Qualitätssicherung im Brandschutz» Ziff. 3.4.1 der Qualitätssicherungsstufe QSS 3 zugeordnet. Das Nachweisverfahren muss durch einen VKF-anerkannten Brandschutzexperten durchgeführt werden.

Für PV-Fassadenprojekte an Gebäuden mittlerer Höhe kann in Abstimmung mit den Brandschutzbehörden die Qualitätssicherungsstufe auf QSS 2 reduziert werden.

4.9 Hochhäuser (bis 100m Gesamthöhe)

4.9.1 Schutzziele

In der VKF-BSR «14-15 Verwendung von Baustoffen» wurde für die Gebäudekategorie Hochhäuser für die Fassade bisher kein explizites Schutzziel formuliert, da die Materialanforderungen grundsätzlich RF1 sind. Abgeleitet aus der Anforderung an die Baustoffe der Fassade (RF1) wird an Hochhäusern eine Brandausbreitung über die Fassade – hier über die Photovoltaikanlage – nach den Brandschutzvorschriften nicht akzeptiert.

Die VKF hat mittlerweile Schutzziele für Aussenwandbekleidungssysteme an Hochhäusern definiert und die Technische Kommission Brandschutz hat diese am 12. September 2023 verabschiedet. Die Schutzziele sind wie folgt in zwei Bereiche unterteilt:

Schutzziel Brandüberschlag

Bei einem Brand darf es vor dem Löschangriff der Feuerwehr nicht zu einer Brandübertragung über die Aussenwand über mehr als zwei Geschosse oberhalb der Brandetage kommen (Schutzgut: Personenschutz).

Schutzziel Aussenwandbekleidungssystem

Ein Brand im Bereich des Aussenwandbekleidungssystems darf sich nach der Entzündung des Aussenwandbekleidungssystems in vertikaler Richtung nur bis zur nächsten Geschossebene selbstständig ausbreiten (Schutzgut: Gebäudeschutz und Personenschutz).

Die Funktion des vertikalen Fluchtwegs darf nicht beeinträchtigt werden (Schutzgut: Personenschutz).

Das Aussenwandbekleidungssystem ist so zu konstruieren, dass die Feuerwehr keine Intervention von aussen vornehmen muss (Schutzgut: Gebäudeschutz).

4.9.2 Nachweisverfahren

Da vom Grundsatz der VKF-BSR «14-15 Verwendung von Baustoffen» nur Materialien der Brandverhaltensgruppe RF1 in der Fassade einzusetzen abgewichen werden muss, ist immer ein Nachweisverfahren durchzuführen.

4.9.3 Systemkategorien

Systemkategorie 0

Kein Gebäude bzw. keine Anlage ist der Systemkategorie 0 zuordenbar.

Systemkategorie 1

Die Photovoltaikanlage ist genehmigungsfähig, wenn der Nachweisbericht gemäss Ziffer 4.5:

- die unter Ziffer 4.9.1 aufgeführten Schutzziele und
- die Massnahmen zu deren Einhaltung vollständig, plausibel und nachvollziehbar beschreibt.

In diese Kategorie fallen Anlagen an:

- Gebäuden mit Löschanlagenkonzept
- Aussenwänden mit Feuerwiderstand (inkl. Fenster)
- Fassaden mit Fensterbändern oder horizontalen Streifen der Brandverhaltensgruppe RF1 pro Stockwerk die mindestens 1.3 m hoch sind und
 - mit einer reduzierten horizontalen Brandschutzmassnahme oberhalb des PV-Moduls
 - und einer horizontalen Brandschutzmassnahme unterhalb des PV-Modulskombiniert werden.

Allgemein ist die Voraussetzung, dass alle der folgenden Bedingungen erfüllt sind:

- Die Aussenwand und das Aussenwandbekleidungssystem exklusive der Photovoltaikanlage bestehen aus Baustoffen der Brandverhaltensgruppe RF1 oder einem gekapselten System. Ausnahmen gemäss VKF-BSR «14-15 Verwendung von Baustoffen» Ziff. 2 Abs. 8, Ziffer 3.2.3 Abs. 3 und Ziffer 3.2.8 Fussnote [3].
- Es werden geschossweise horizontale Brandschutzmassnahmen gegen eine vertikale Brandausbreitung in der Hinterlüftungsebene und bei der Kabelführung gemäss Ziffer 6.1 umgesetzt.
- Das Brandschutzkonzept des Hochhauses weist keine relevanten Abweichungen von den aktuellen VKF-Brandschutzvorschriften auf. Über die Einstufung der Abweichungen entscheidet die Brandschutzbehörde.
- Die Photovoltaikmodule haben einen Glas-Glas-Aufbau von mind. 2 x 6 mm und weisen eine Klassifizierung von mindestens B-s3,d1 gemäss SN EN 13501-1 auf.
- Für Aussenwände mit Feuerwiderstand (inkl. Fenster) kann die Glasstärke des Glas-Glas-Aufbaus auf minimal 2 x 1.6 mm reduziert werden, wenn die Kante des PV-Moduls von einem Material der Brennbarkeitsklasse RF1 mit einer Stärke ≥ 1.5 mm umfasst (gerahmt) ist. Eine Klassifizierung von min. B-s3,d1 gemäss SN EN 13501-1 ist nachzuweisen.
- Die technischen Schutzmassnahmen der Photovoltaikanlage sind gemäss Ziffer 5 ausgeführt.
- Es werden keine Modulwechselrichter und Optimierer in der Hinterlüftungsebene verbaut.

Wenn die genannten Anforderungen erfüllt sind, ist die Anlage genehmigungsfähig, aber nicht automatisch genehmigt.

Systemkategorie 2

Voraussetzung ist, dass das Brandschutzkonzept des Hochhauses keine relevanten Abweichungen von den aktuellen Brandschutzvorschriften aufweist. Ob die Abweichungen relevant sind, entscheidet die Brandschutzbehörde.

In diese Kategorie fallen Anlagen:

- die einzelnen Anforderungen der Systemkategorie 1 nicht erfüllen z.B.:
 - Abweichungen von den technischen und baulichen Lösungsvorschlägen der Ziffern 5 und 6
 - alternative Konzepte verfolgen (z.B. Fassadenlöschanlage)
- mit auskragender Montage der PV- Module

Die Photovoltaikanlage ist genehmigungsfähig, wenn:

- mit Brandversuchen (Ziffer 4.6) nachgewiesen wird, dass die Schutzziele erfüllt sind und
- der Nachweisbericht gemäss Ziffer 4.5
 - die unter Ziffer 4.9.1 aufgeführten Schutzziele und
 - die Massnahmen zu deren Einhaltung vollständig, plausibel und nachvollziehbar beschreibt.

4.9.4 Qualitätssicherung

Aufgrund des Nachweisverfahrens wird das Projekt gemäss den VKF-BSR «11-15 Qualitätssicherung im Brandschutz» Ziff. 3.4.1 der Qualitätssicherungsstufe QSS 3 zugeordnet. Das Nachweisverfahren muss durch einen VKF-anerkannten Brandschutzexperten durchgeführt werden.

5 Technische Schutzmassnahmen

5.1 Grundlagen

Als Grundlage für die Installation der einzelnen Komponenten der PV- Anlage, sowie für die Dokumentationspflicht gilt das aktuelle STP-Solaranlagen von Swissolar. In diesem Kapitel werden spezifische Ergänzungen für PV- Fassaden gemacht.

5.2 Anschlusskabel und Stecker

Es sind Kabel und Anschlussstecker mit entsprechender Zertifizierung zu verwenden.

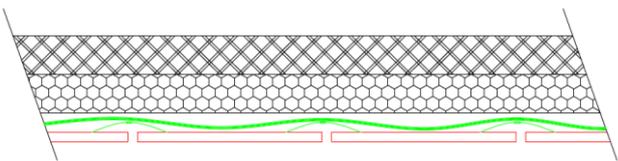
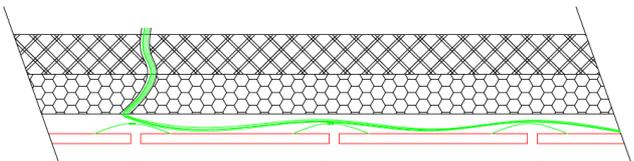
Tabelle 4: Merkmale Anschlusskabel und Stecker (Eigene Darstellung)

Bauteil	Norm	Anforderungen
DC- Kabel	SN EN 50618:2014-12 «Kabel und Leitungen - Leitungen für Photovoltaik Systeme»	<ul style="list-style-type: none"> • Brandverhaltensgruppe RF3 (cr) • halogenfrei • brandgehemmt • Geringe Brandlast: <0.8 MJ/m
Stecker	SN EN 62852:2015-03 «Steckverbinder für Gleichspannungsanwendungen in Photovoltaik-Systemen - Sicherheitsanforderungen und Prüfungen»	<ul style="list-style-type: none"> • Brandverhaltensgruppe RF3 (cr) • Flammwidrig • nur kompatible Stecker vom gleichen Hersteller (NIN)

5.3 Kabelführung

5.3.1 Horizontale Kabelführung

Tabelle 5: Verlegearten horizontale Kabelführung (Eigene Darstellung)

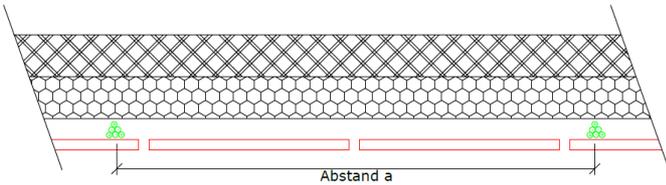
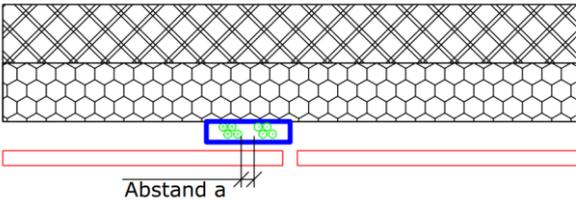
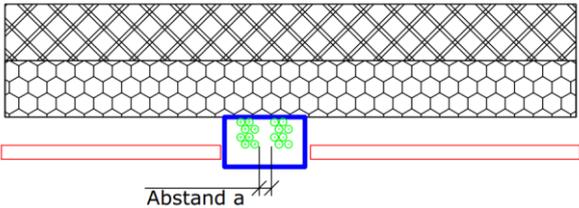
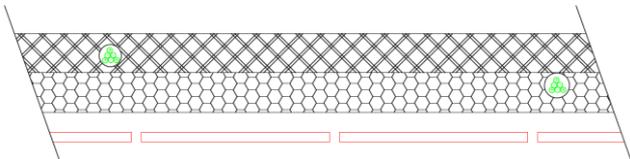
Verlegungsart	Anforderungen
Offene Kabelführung im Hinterlüftungsraum 	<ul style="list-style-type: none"> • Nicht mehr als 3 Stränge (6 DC-Kabel) parallel geführt • Modulverbinder kurz halten • Abstand zwischen horizontalen Kabelführungen ≥ 1 m
Kabelführung in RF1 Material 	<ul style="list-style-type: none"> • Schutzleiter muss mitgeführt werden • Belegung gemäss NIN

5.3.2 Vertikale Kabelführungen

Folgende Punkte müssen bei der vertikalen Kabelführung grundsätzlich beachtet werden:

- Zwischen den horizontalen und vertikalen Brandschutzmassnahmen dürfen die Kabel frei verlegt werden.
- Baustoffe der Brandverhaltensgruppe RF3 (cr) zur Befestigung zulässig
- Auf gute Zugentlastung muss geachtet werden
- Aufteilung in mehrere vertikale Steigzonen reduziert lokales Brandrisiko
- keine DC- Stecker in der vertikalen Steigzone
- Öffnungen für den Ein- und Austritt von Kabeln müssen im Durchmesser so klein wie möglich gewählt werden. Es ist auf den Kabelschutz zu achten, wobei Baustoffe mindestens der Brandverhaltensgruppe RF3 (cr) eingesetzt werden dürfen.

Tabelle 6: Verlegearten vertikale Kabelführung (Eigene Darstellung)

Verlegungsart	Anforderungen
offene Kabelführung im Hinterlüftungsraum 	<ul style="list-style-type: none"> • max. 3 Stränge pro Steigzone • DC+ und DC- gemischt möglich • min. 3m Abstand der vertikalen Steigzonen (Abstand a) • Nagetierschutz vorsehen
geschlossene Kabelführung im Hinterlüftungsraum 	<ul style="list-style-type: none"> • Aufteilung auf mehrere Steigzonen zu bevorzugen • DC + und DC- sind ab 3 Strängen sortiert und mit einem Abstand von 10 cm (Abstand a) zu führen • Metallischer geschlossener und geerdeter Kanal zur Abschirmung • Nagetierschutz vorsehen
geschlossene separate Kabelführung 	<ul style="list-style-type: none"> • Aufteilung auf mehrere Steigzonen zu bevorzugen • DC + und DC- sind ab 3 Strängen sortiert und mit einem Abstand von 10 cm (Abstand a) zu führen • Metallischer geschlossener und geerdeter Kanal zur Abschirmung • Nagetierschutz vorsehen
Kabelführung in RF1 Material (z.B. Beton) 	<ul style="list-style-type: none"> • Schutzleiter muss mitgeführt werden • Belegung gemäss NIN

5.4 Wechselrichterkonzept

Die Wechselrichter müssen den einschlägigen Normen entsprechen. Bezüglich Brandschutzes sind dies insbesondere:

Tabelle 7: Anforderungen Wechselrichtersysteme (Eigene Darstellung)

Funktion	Norm
Gerätesicherheit	SN EN 62109-1:2010-07 «Sicherheit von Wechselrichtern zur Anwendung in photovoltaischen Energiesystemen - Teil 1: Allgemeine Anforderungen» SN EN 62109-2:2011-09 «Sicherheit von Leistungsumrichtern zur Anwendung in photovoltaischen Energiesystemen - Teil 2: Besondere Anforderungen an Wechselrichter»

Folgende Punkte sind im Wechselrichterkonzept zu beachten:

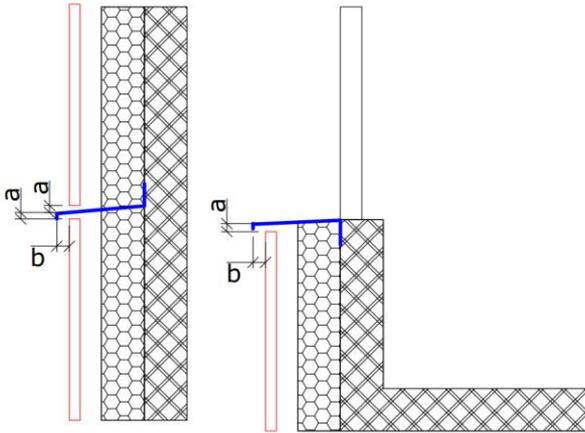
- Anforderungen Wechselrichterstandort gemäss Swissolar Stand-der-Technik-Papier «STP zu VKF Brandschutzmerkblatt Solaranlagen»
- Einsatz von Wechselrichter mit Lichtbogendetektoren und automatischer Unterbrechung sind zu bevorzugen. Im europäischen Markt ist die Funktion der Lichtbogendetektion in vielen Geräten noch nicht verfügbar. Zudem gibt es nur begrenzte Informationen zu irrtümlichen Lichtbogentrennungen, was die Bewertung der tatsächlichen Lichtbogenerkennung erschwert. Unter diesen Voraussetzungen wird der Einsatz von Wechselrichtern mit Lichtbogendetektion für PV-Anlagen an Fassaden zwar empfohlen, jedoch nicht vorausgesetzt.

6 Bauliche Schutzmassnahmen

6.1 Horizontale Brandschutzmassnahmen

Tabelle 8: horizontale Brandschutzmassnahmen (Eigene Darstellung)

Horizontale Unterbrechung Hinterlüftungsraum



Materialien mit den folgenden Eigenschaften können als Brandschutzmassnahme zur Unterbrechung/Unterteilung des Hinterlüftungsraums eingesetzt werden:

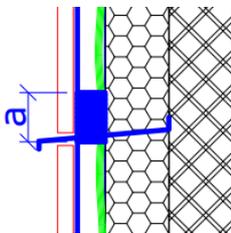
- Baustoffe der Brandverhaltensgruppe RF1
- Schmelzpunkt $\geq 1'000\text{ °C}$
- Materialstärke $\geq 1.5\text{mm}$
- Witterungsbeständig

Die Abstände sind wie folgt auszulegen:

- $a \leq 20\text{ mm}$
- $b \geq 10\text{ mm}$

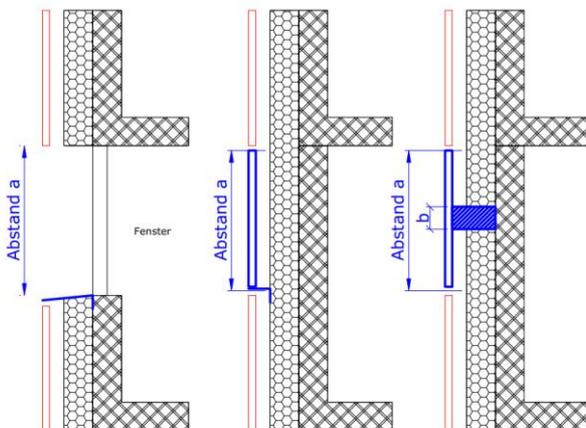
Anordnungen der horizontalen Brandschutzmassnahme unter- und oberhalb vom Fenster möglich vertikale Fugen aus brennbaren Baustoffen dürfen die horizontale Brandschutzmassnahme nicht unterlaufen.

Horizontale Unterbrechung Kabelführung



Geschossübergreifend müssen die Kabelkanäle im Bereich der horizontalen Brandschutzmassnahmen mit Baustoffen der Brandverhaltensgruppe RF1 unterteilt werden. Die Baustoffe der Brandverhaltensgruppe RF1 müssen einen Schmelzpunkt von mindestens $1'000\text{ °C}$ und eine Dichte von mindestens 60 kg/m^3 aufweisen und in der Stärke (a) mindestens 15 cm betragen.

Horizontale Fensterbänder / durchgehende Bekleidungsbereiche



Fensterbänder und/oder durchgehenden Aussenwandbekleidungen RF1, welche die Hinterlüftungsebene horizontal unterbrechen werden ab Abstand (a) 1.3 m Höhe als Brandschutzmassnahme zur Einschränkung der Brandausbreitung gewertet, wenn diese mit einer reduzierten horizontalen Brandschutzmassnahme kombiniert werden (reduzierte Brandschutzmassnahme kann über oder unter Fensterband positioniert werden). Dies sind:

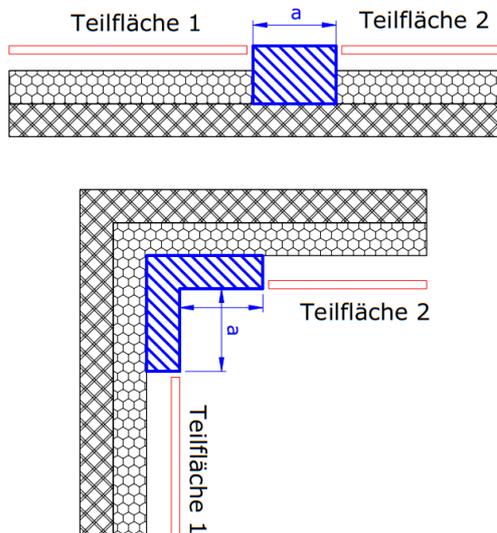
- Baustoffe der Brandverhaltensgruppe RF1
- Schmelzpunkt $\geq 1'000\text{ °C}$
- Materialstärke $\geq 1.5\text{mm}$
- Witterungsbeständig

Eine Auskrägung der horizontalen Brandschutzmassnahme ist nicht nötig. Alternativ zu einem Blech kann auch eine Brandschutzmassnahme aus Mineralwolle mit einer Stärke (b) $\geq 15\text{ cm}$ verwendet werden.

6.2 Vertikale Brandschutzmassnahmen

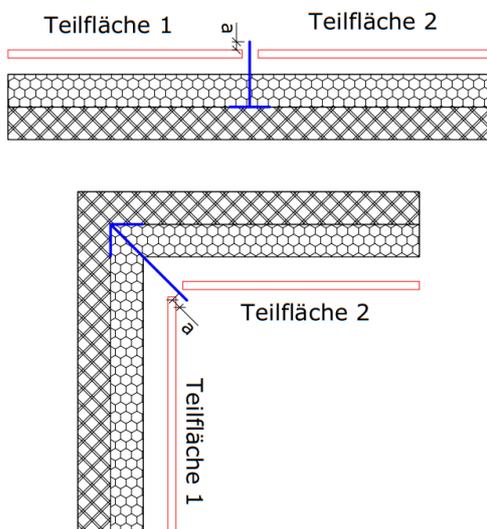
Tabelle 9 vertikale Brandschutzmassnahmen (Eigene Darstellung)

Vertikale Trennung / Abstand
Hinterlüftungsraum



Vertikal durchgehenden Bekleidungsbereichen RF1, welche die Hinterlüftungsebene unterteilen, werden ab einer Breite (a) von 150mm als Brandschutzmassnahme gewertet.

Vertikale Unterbrechung
Hinterlüftungsraum



Materialien mit den folgenden Eigenschaften können als Brandschutzmassnahme zur vertikalen Unterbrechung des Hinterlüftungsraums eingesetzt werden:

- Baustoffe der Brandverhaltensgruppe RF1
- Schmelzpunkt $\geq 1'000$ °C
- Materialstärke ≥ 1.5 mm
- Witterungsbeständig

Die Abstände sind wie folgt auszulegen:

- $a \geq 10$ mm

(Angelehnt an die vertikalen Brandschutzmassnahmen bei brandabschnittsbildenden Wänden aus Lignum «7.1 Aussenwände – Konstruktion und Bekleidung» Ziff. 4.2).

7 Betrieb

7.1 Grundsatz

PV-Anlagen müssen kontrolliert und gewartet werden. Bereits bei im Planungsstadium sind diese Aspekte zu berücksichtigen, um Wartung und Unterhalt effizient zu ermöglichen. Insbesondere bei Fassadenanlagen ist Wartung und Unterhalt einzuplanen, da die Zugänglichkeit eingeschränkt ist.

Die Kontrolle erfolgt aus der Ferne über ein cloudbasiertes Überwachungssystem, welches die Erträge erfasst, Fehlermeldungen registriert und weiterleitet. Mit regelmässigen Kontrollgängen vor Ort wird der Zustand der Anlagen überprüft und bei Bedarf Massnahmen eingeleitet.

Für eine ordnungsgemäss Wartung muss der installierende Unternehmer der Eigentümerschaft mit der Übergabe der Photovoltaikanlage eine Dokumentation, gemäss SN EN 62446-1:2016-04 «Photovoltaik (PV) Systeme - Anforderungen an Prüfung, Dokumentation und Instandhaltung - Teil 1: Netzgekoppelte Systeme - Dokumentation, Inbetriebnahmeprüfung und Prüfanforderungen», übergeben. Diese Dokumentation muss bei den Wechselrichtern, beim AC-Elektrotabelleau und im Hauptinterventionsweg der Feuerwehr hinterlegt werden.

Bezüglich Zugänglichkeit, Konstruktion und Verschmutzung unterscheiden sich PV-Anlagen auf Dächern und in Fassaden. Beim Begehen der Objekte sind die Sicherheitskonzepte basierend auf den Vorschriften der SUVA einzuhalten und wo vorgeschrieben Massnahmen gegen Absturz zu ergreifen. Kontrolle und Wartung dieser Vorrichtungen gegen Absturz führen vom Hersteller zertifizierte Firmen durch.

7.2 Anforderungen an den Betrieb

Für Fassadenanlagen ist ein Unterhaltskonzept zu erstellen. Dabei gelten folgende Mindestanforderungen:

Tabelle 10: Anforderungen Anlagenbetrieb (Eigene Darstellung)

	Gebäude geringer Höhe	Gebäude mittlerer Höhe	Hochhäuser
Überwachung	Empfohlen	Pflicht	Pflicht
Inspektion mindestens alle	5 Jahre (empfohlen)	3 Jahre	2 Jahre

Nach aussergewöhnlichen Ereignissen wie Gewitter, Hagel, Sturm oder Erdbeben kann eine Überprüfung notwendig sein. Auf Grund von Überwachungs-Daten und Empfehlungen von Fachpersonen wird Art und Umfang der Kontrolle festgelegt.

Unterhalt wie Reinigung, sowie Reparatur von defekten Komponenten erfolgt gemäss den branchenüblichen Grundsätzen.

7.3 Ausserbetriebsetzung und Rückbau

Treten an der PV-Anlage Mängel auf, welche die Sicherheit gefährden und nicht wirtschaftlich behoben werden können, sind Teile oder die ganze Anlage stillzulegen und gegebenenfalls abzubauen. PV-Module in Fassaden, welche eine Doppelfunktion erfüllen, sind stillzulegen und können als Witterungsschutz belassen werden, sofern sie keine Gefahr darstellen.

Bei mechanischen Defekten an PV-Fassaden sind die beschädigten Teile zu ersetzen oder zu entfernen.

8 Anhang

8.1 Glossar

Als Grundlage dieses Dokuments dienen insbesondere nachfolgende Normen und Richtlinien. Der Inhalt dieser Richtlinien wird nicht gänzlich im Dokument wiedergegeben, sondern lediglich dort, wo es sinnvoll erscheint, zusammengefasst dargelegt.

Tabelle 11: Dokumente (Eigene Darstellung)

Abkürzung	Dokument	Kurzbeschreibung
VKF-BSR 14-15	Brandschutzrichtlinie Verwendung von Baustoffen	Kapitel 3 der Brandschutzrichtlinie stellt Anforderungen an die Materialisierung der Gebäudehülle.
VKF-BSR 13-15	Brandschutzrichtlinie Baustoffe und Bauteile	Definiert die Anforderungen an die Brandklassifizierung von Baustoffen.
VKF-BSR 11-15	Brandschutzrichtlinie Qualitätssicherung im Brandschutz	Definiert die Anforderungen an die Qualitätssicherung im Brandschutz.
VKF-BSR 22-15	Brandschutzrichtlinie Blitzschutzsysteme	Definiert die Anforderungen an Blitzschutzsysteme.
VKF-BSR 27-15	Brandschutzrichtlinie Nachweisverfahren im Brandschutz	Regelt die Anwendung von Nachweisverfahren im Brandschutz unter Berücksichtigung der Schutzziele der Brandschutznorm und einer ganzheitlichen Betrachtungsweise.
VKF-BSM 2001-15	Brandschutzmerkblatt Solaranlagen	Grundlage vom Stand-der-Technik-Papier von Swissolar. Ohne spezifischen Anforderungen an die PV- Fassade.
STP-Solaranlagen	Stand-der-Technik-Papier zu VKF Brandschutzmerkblatt Solaranlagen (Swissolar)	Stand der Technik Papier für die Installation von PV- Anlagen ohne spezifische Anforderungen an PV- Fassaden.
Lignum 7.1	7.1 Aussenwände - Konstruktion und Bekleidung (Lignum 2015)	Stand-der-Technik-Papier für Holz Aussenwandbekleidungen. Erfahrung zu Brandschutzmassnahmen mit brennbaren Fassadenbauteilen werden für PV- Anlagen beigezogen.
NIN	Niederspannungs-Installations- Norm (SN 411000:2020)	Regelt die Grundlagen für die Sicherheit von elektrischen Installationen in der Schweiz.
MB VHF	Brandschutz bei vorgehängten hinterlüfteten Fassaden (Gebäudehülle Schweiz FA 5/12)	Merkblatt der technischen Kommission von Gebäudehülle Schweiz zum Thema Brandschutz in hinterlüfteten Fassaden.
SIA 260	Norm: SIA 260 «Grundlagen zur Projektierung von Tragwerken»	Norm zur Projektierung von Tragwerken
SIA 261	Norm: SIA 261 Einwirkungen auf Tragwerke	Norm zur Berechnung der Einwirkungen auf Tragwerke
SIA 261/1	Norm: SIA 261/1 Einwirkungen auf Tragwerke – ergänzende Festlegungen	Ergänzende Festlegungen zur Norm SIA 261 «Einwirkungen auf Tragwerke»
SIA 2057	Merkblatt: SIA 2057 Glasbau Fachbuch Photovoltaikanlagen (Christof Bucher)	Merkblatt zur Auslegung von Glasbauteilen. Theoretische Grundlagen zur Photovoltaiktechnik und deren Umsetzung im Gebäude.

8.2 Zeichnungserläuterung

Für alle Zeichnungen gilt folgende Legende:

- PV- Module
- Fenster
- Brandschutzmassnahme
- Verkabelung
-  Tragwerk
-  Dämmung

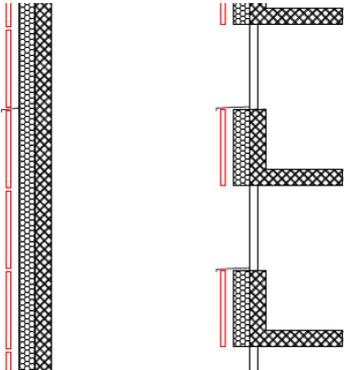
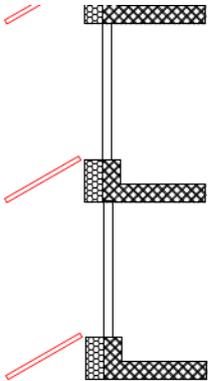
Abbildung 3: Legende Zeichnungen (Eigene Darstellung)

8.3 Ergänzungen zu den baulichen Anforderungen

8.3.1 Montagearten

Hier werden die zwei häufigsten Montageprinzipien kurz beschrieben, welche sich bezüglich des Brandschutzes wesentlich unterscheiden. Es können auch mehrere Montageprinzipien an einem Objekt vorkommen.

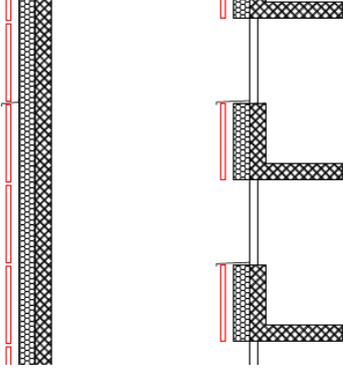
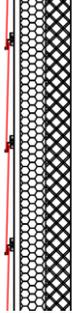
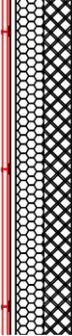
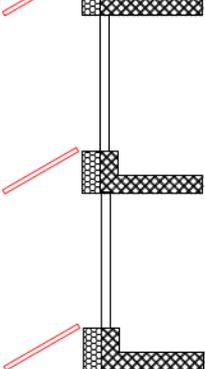
Tabelle 12: PV- Montagearten (Eigene Darstellung)

Bezeichnung	Prinzipbild	Merkmale:
flächenbündige Montage		<ul style="list-style-type: none"> • Montage vom Photovoltaikmodul vor die Wärmedämmschicht • Montage vom Photovoltaikmodul mit einer Hinterlüftung • Häufig eingesetzte Montagearten gemäss Anhang Ziff. 8.3.2.
Auskragende Montage		<ul style="list-style-type: none"> • Additiv zur Aussenwandkonstruktion • Auskragende Konstruktion • nicht Teil der Aussenwandkonstruktion • Photovoltaikmodul bildet keine Hinterlüftungsebene

8.3.2 Montagesysteme

Hier werden die am häufigsten eingesetzten Montagesysteme für PV- Fassaden grob beschrieben:

Tabelle 13: Montagesysteme (Eigene Darstellung)

Bezeichnung	Prinzipbild	Merkmale:
Flächenbündige Montage		<ul style="list-style-type: none"> • Unterkonstruktion aus Aluminium • SSG (Structural Silicon Glazing) verklebte Unterkonstruktion mit Lastabtragungswinkel an der untern Modulkante • Eingehängte Modulbefestigung • Modulbefestigung mit geschraubten oder genieteten Haltern
Geschuppte Montage		<ul style="list-style-type: none"> • geschuppte Modulmontage • vertikales Montageprofil • Montagehaken • Module werden in die Haken eingelegt
Einlegesystem mit gerahmtem Modul		<ul style="list-style-type: none"> • Kreuzverbund Montagesystem • Horizontales Profil für die Befestigung vom Modul im Einlegesystem • Meist mit gerahmten Solarmodulen eingesetzt • Konstruktion aus Aluminium
Auskragende Montage		<ul style="list-style-type: none"> • Modul muss gemäss SIA 2057 für Horizontalverglasung geeignet sein. • Auskragende Konstruktion (z.B. aus Stahl) • Modulbefestigung aus Aluminium

8.3.3 PV-Module

Aufbau:

Der Glasverbund besteht aus zwei monolithischen Einzelscheiben und aus der Verbund-Zwischenschicht mit den Solarzellen. Der Verbund kann aus einer Kombination unterschiedlicher Glastypen bestehen, wie Floatglas, Einscheibensicherheitsglas (ESG) oder teilvorgespanntes Glas (TVG). Oft eingesetzte Glaskombinationen für Photovoltaikmodule sind:

- ESG/Floatglas für Dünnschichtmodule, wie CIGS-Technologie. Um Spannungsrisse im Floatglas zu vermeiden, müssen Dünnschichtmodule rückseitig flächig mechanisch gehalten werden.
- ESG/TVG ist eine typische Glaskombination für Photovoltaikmodule, die eine hohe Biege-, Schlag- und Stossfestigkeit erreicht und eine ausreichende Resttragfähigkeit gewährleistet.
- TVG/TVG ist eine typische Glaskombination für Verbundsicherheitsglas und kommt als Alternative zu ESG/TVG infrage. Mit dem Verbund wird die beste Resttragfähigkeit erreicht.

Das Risiko von spontanem Glasbruch aufgrund Nickel-Sulfid-Einschlüssen im ESG kann durch einen zusätzlichen Heisslagerungsprozess (HST) auf ein Minimum reduziert werden.

Geeignete Materialien (nach SIA 2057) für die Zwischenschicht in Verbund-Sicherheitsglas sind unter anderem:

- Polyvinylbutyral (PVB)
- Ethylen-Vinylacetat (EVA)
- Ionomer

Glasart:

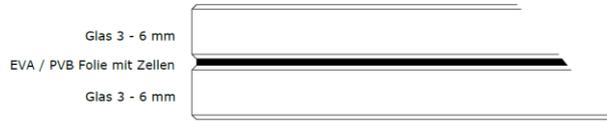
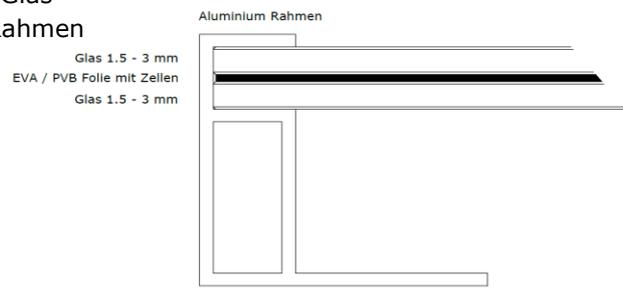
Für den Aufbau eines PV- Moduls werden meist eisenarme Weissgläser verwendet. Diese unterscheiden sich in folgenden Eigenschaften:

- Glasstärke
- Härtegrad
- Glasoberfläche (strukturiert, satiniert etc.)

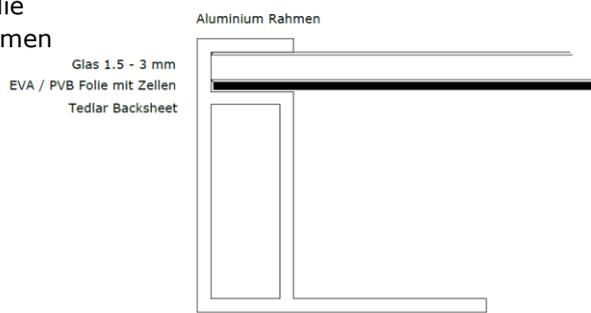
Die Glasart hat aufgrund des Bruchverhaltens einen indirekten Einfluss auf das Brandverhalten und somit auch auf die Klassifikation des Baustoffes.

Der Aufbau von PV- Modulen kann grob in 4 Kategorien aufgeteilt werden.

Tabelle 14: Aufbauten Solarmodule (Eigene Darstellung)

<p>Glas-Glas ohne Rahmen</p>  <p>Meist verwendeter Modulaufbau für PV- Fassaden. Die Solarzellen werden zwischen zwei Glasscheiben eingekapselt. Als Zwischenschicht werden zwei EVA oder PVB-Folien mit einer Schichtdicke von ca.2 x 0.76mm verwendet. Selten wird auch Silikon als Zwischenschicht verwendet. Die Glasscheiben bestehen aus TVG oder ESG-Glas. Die Glasdicke wird durch die Statik bestimmt.</p>	<p>Glas-Glas mit Rahmen</p>  <p>Um die Glasstärken zu reduzieren, wird der Glas-Glas Verbund mit den Zellen von einem Aluminiumrahmen umschlossen. Das Glas wird meist mit Silikon oder doppelseitigem Klebeband im Rahmen verklebt. Nebst der geringeren Glasstärke unterscheidet sich das Laminat nicht vom Aufbau ohne Rahmen. Die Glasscheiben bestehen aus TVG oder ESG-Glas. Die Glasdicke wird durch die Statik in Kombination mit dem Aluminiumrahmen bestimmt.</p>
---	--

Bei einem Glas-Glas Aufbau ist die brennbare EVA bzw. PVB-Folie durch ein nicht brennbares Glas abgedeckt. Die Schicht kann nur am Rand in direkte Berührung mit den Flammen kommen. Je nach Dauer der Brandeinwirkung kann ein Glas zerspringen, wodurch die Angriffsfläche für den Brand vergrössert wird. Entsprechend führt dieser Aufbau zu einem verzögernden Brennen der Folie. Module mit einem Glas-Glas Aufbau erreichen nach dem heutigen Wissensstand bestenfalls eine Baustoffklassifizierung nach SN EN 13501-1 von B-S1-d0 (RF2). Der Nachweis ist vom Hersteller einzufordern.

<p>Glas-Folie ohne Rahmen</p>  <p>Als günstigere Alternative wird das rückseitige Glas durch eine Aluminium Kunststoff Verbundfolie (Tedlar) ersetzt. Da dieser Aufbau wesentlich schlechtere statische Eigenschaften aufweist, wird er selten in der Fassade eingesetzt. Um die Statik zu verbessern, kommt meist ein dickeres Glas zum Einsatz.</p>	<p>Glas-Folie mit Rahmen</p>  <p>Am häufigsten verwendeter Modulaufbau für Standard Aufdachanlagen. Für PV-Fassaden wird diese Kombination jedoch nicht häufig verwendet. Der Glas-Folien Aufbau wird mit einem Aluminiumrahmen umschlossen.</p>
---	---

Bei diesem Aufbau ist eine Kunststoffschicht direkt gegen den Hinterlüftungsraum ausgerichtet. Eine Flamme im Hinterlüftungsraum führt zu einem Brennen der Folien.

Die Bemessung der Glasstärke hängt von der Abmessung des Photovoltaikmoduls und der Art der Befestigung ab. Der Systemaufbau wird gemäss SIA 260 «Grundlagen zur Projektierung von Tragwerken» dimensioniert. Es sind die standortabhängigen Werte gemäss SIA 261 «Einwirkungen auf Tragwerke» anzuwenden.

Im Bereich der Brandquelle ist nach ca. 10 Minuten mit dem Herunterfallen der Fassadenverkleidung zu rechnen.

Farbe:

Oft werden PV- Module in der Fassade für das optische Erscheinungsbild eingefärbt. Dazu gibt es unterschiedliche Technologien.

Bei Keramikdruck wird eine Keramikfarbe mittels Digitaldruck, Siebdruck oder Rolldruck Verfahren auf die Ebene 1 oder 2 vom Frontglas aufgetragen und während dem Härtingsprozess keramisch mit dem Glas verbunden.

Alternativ kann auch eine farbige oder bedruckte Folie verwendet werden. Entweder handelt es sich dabei direkt um eine eingefärbte Zwischenschicht (wie beim Modulaufbau beschrieben) oder um eine zusätzliche Folien-schicht.

Anschlussdose:

Die Anschlussdose hat zwei Aufgaben:

- Verbindung der Modulinternen Anschlussbänder an ein DC- Anschlusskabel mit Stecker
- Unterbringen der Bypassdioden zum Schutz der Module bei Teilverschattung

Die Anschlussdosen liefern zum einen ein Brandbeitrag, da diese normalerweise aus Kunststoff bestehen und zum andern sind sie auch eine potenzielle Zündquelle z.B. durch eine defekte Bypassdiode, welche zu einem Lichtbogen führen kann.

Aktuell gibt es zwei unterschiedliche Arten von Anschlussdosen

- Verteilte Anschlussdose: hier sind die Bypassdioden in kleinen Anschlussboxen entlang dem Modul verteilt. An der ersten und der letzten Anschlussbox werden die Kabel angeschlossen.



Abbildung 4: verteilte Anschlussdose

- Zentrale Anschlussdose: hier sind alle Bypassdioden inkl. den Anschlusskabeln zentral in einer grossen Anschlussbox zusammengefasst.



Abbildung 5: zentrale Anschlussdose

8.4 Ergänzungen Nachweisverfahren

8.4.1 Systematik

Im Standardfall werden die volkswirtschaftlichen Schutzziele gesetzlich vorgegeben. Die Anforderungen in den Brandschutzvorschriften zielen darauf ab, diese Schutzziele zu erfüllen. Dazu werden Massnahmen nach dem Stand der Technik detailliert beschrieben. Aufgabe der Brandschutzbehörde ist, Vollständigkeit, Plausibilität und Nachvollziehbarkeit von Brandschutzkonzepten und Nachweisen im Rahmen von Baueingaben zu beurteilen. Die Eigentümer- bzw. Nutzerschaft ist verantwortlich dafür, dass die Schutzziele erfüllt sind und dass der bauliche und technische Brandschutz jederzeit gewährleistet ist.

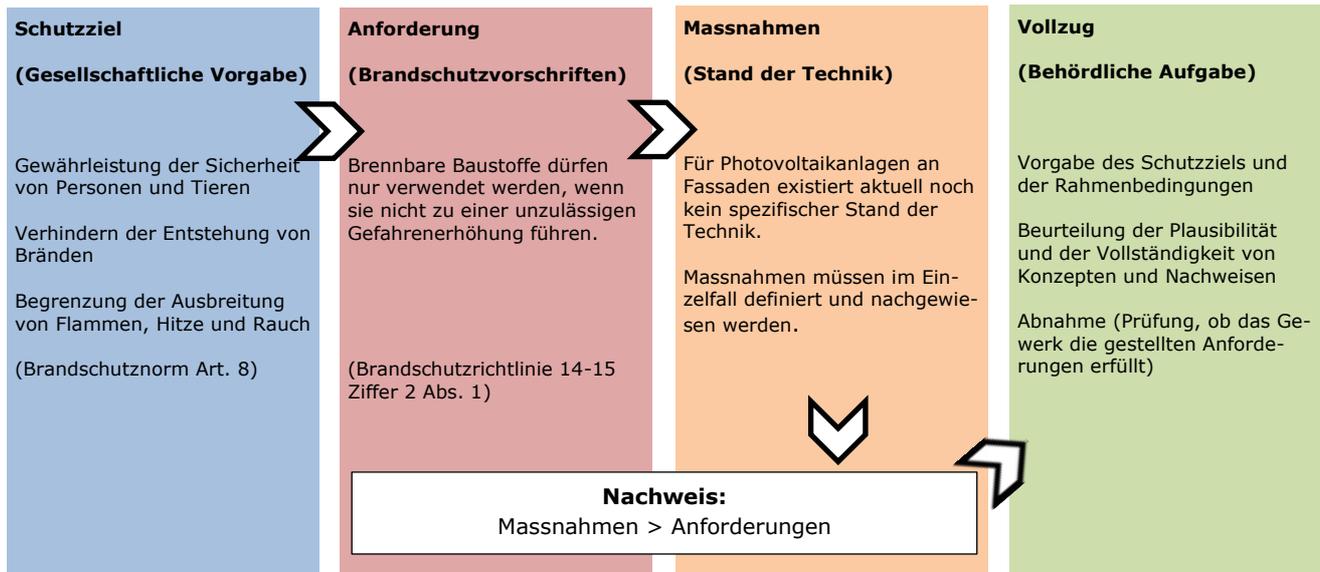


Abbildung 6: Systematik Brandschutz (Darstellung von Gebäudeversicherung Bern)

8.4.2 Qualitätssicherung

Je nach Gebäude- und Systemkategorie werden Anforderungen an die Qualitätssicherungsstufe im Brandschutz gestellt. Das Projekt muss dabei über alle Phasen von der Planung bis zur Übergabe an die Eigentümerschaft durch eine QS-verantwortliche Person begleitet werden. Die Installation einer Photovoltaikanlage in der Fassade hat weitreichende Auswirkungen auf die Fassade und je nach Fall auf das gesamte Brandschutzkonzept des Gebäudes. Eine Begrenzung der Qualitätssicherung auf die Photovoltaikfassade ist deshalb ausgeschlossen. Die Projektorganisation muss gemäss VKF-BSR «11-15 Qualitätssicherung im Brandschutz» Ziffer 5.3.2 aufgebaut werden. Damit wird insbesondere die fachgerechte Planung, die Koordination der verschiedenen Beteiligten und die Dokumentation für die Eigentümerschaft sichergestellt.

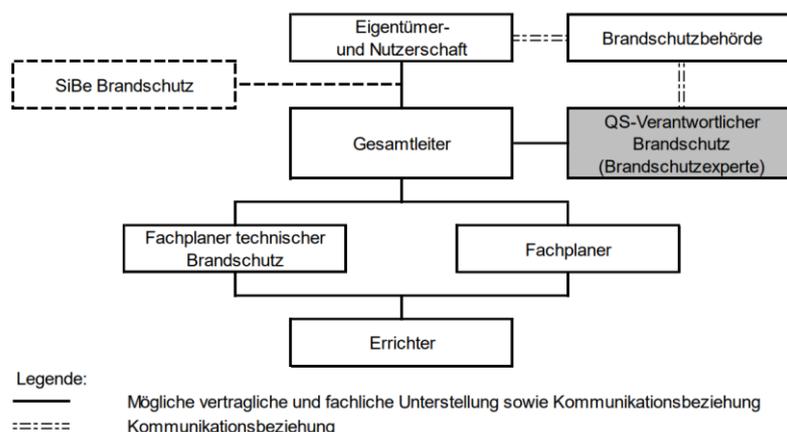


Abbildung 7: Projektorganisation QSS 3 (Darstellung von VKF-BSR «11-15 Qualitätssicherung im Brandschutz» Ziff. 5.3.2)

8.4.3 Nachweisbericht

Der Nachweisbericht muss zu untenstehenden Punkten vollständig, plausibel und nachvollziehbar Auskunft geben. Kann aufgrund des Projektstands zu einzelnen Punkten keine konkrete Aussage gemacht werden, müssen diese Punkte aufgelistet und die Mindestanforderungen definiert werden (z. B. Positionierung Wechselrichter, Materialisierung Module).

Objektdaten

- Objektbezeichnung, Strasse und Hausnummer, PLZ und Ort
- Auftraggeber, Bauherrschaft, Verfasser

Verbindlichkeitserklärung

Mit der Verbindlichkeitserklärung verpflichten sich die Unterzeichnenden, die Ergebnisse, Anforderungen und Einschränkungen aus dem Nachweisbericht in der Planung und Ausführung, beim Betrieb, Unterhalt und Rückbau zu beachten und umzusetzen. Die Verbindlichkeitserklärung muss mindestens von folgenden Parteien unterzeichnet sein:

- Eigentümerschaft (Anlagenbetreiber)
- Gesamtprojektleitung
- QS-verantwortliche Person Brandschutz
- PV-Fachplaner

Grundlagen

Die verwendeten Grundlagen sind mit Titel, Verfasser und Version/Datum aufzuführen. Mögliche Grundlagen für das Nachweisverfahren sind:

- Brandschutzkonzept inklusive Brandschutzpläne
- Nutzungskonzept
- Situationsplan
- Fassadenplan
- Brandschutzkonzept Fassade (inkl. baulichen Schutzmassnahmen wie horizontalen Unterteilungen oder dergleichen)
- Prinzipschema Photovoltaikanlage
- Detailpläne Fassadenaufbau und Photovoltaikanlage
- Layout Photovoltaikmodule mit Beschattungstoleranz der Photovoltaikmodule (Bypass-Dioden, etc.)
- Stringplan
- Dispositionsplan von Wechselrichtern, Anschlusskästen, sonstige aktive Komponenten und Freischalt-einrichtungen
- Konzeptunterlagen für den inneren und äusseren Blitzschutz

Die Auflistung ist nicht abschliessend.

8.5 Ergänzungen zum Unterhalt

8.5.1 Überwachung

Die Photovoltaikanlage muss mit einem Überwachungssystem kontinuierlich überwacht werden. Spannung, Strom, Leistung und Energieertrag müssen laufend erfasst und dokumentiert werden. Weitere Parameter wie die Temperatur sind optional.

8.5.2 Inspektion

Aufgrund der Komplexität der Anlage in der Fassade, soll die PV- Anlage durch Fachpersonal inspiziert werden.

Optische Kontrolle: Auf dem Kontrollgang wird die ganze Anlage angeschaut und auf Unregelmässigkeiten und Verschmutzungen geprüft. Für hohe Gebäude müssen für die optische Kontrolle allenfalls Hilfsmittel wie Drohnen mit Kameras eingesetzt werden.

Mechanische Kontrolle: stichprobenartig ist die Festigkeit der Unterkonstruktion und die Montage der PV-Module manuell zu prüfen. Ebenso weitere Elemente wie Kabelkanäle (insbesondere Abdeckungen), Anschlüsse von Blitzschutz- und Potentialausgleichsleitern. Der eingeschränkte Zugang zu den Elementen kann dabei berücksichtigt werden.

Kontrolle elektrische Geräte: Bei diesem Kontrollgang sind die Wechselrichter und die Zugehörige AC-Installation zu kontrollieren, dabei ist auf Erwärmung zu achten: sind Elemente ungewöhnlich warm/ heiss sind Verfärbungen sichtbar. Die Geräte werden auf Spuren von Korrosion kontrolliert.

Elektrische Messungen: Die Strangspannungen und -Ströme sind zu messen. Der Widerstand der Isolation ist mit geeigneten Instrumenten zu messen.

Der Zustand der Anlage, insbesondere Unregelmässigkeiten, werden in einem Protokoll schriftlich festgehalten, mit Fotos dokumentiert und mit den vorausgehenden Messungen verglichen.

Die Verordnung über elektrische Niederspannungsinstallationen (NIV) legt abhängig der Gebäudekategorie fest, wie häufig die elektrische Anlage von einem unabhängigen Kontrollorgan oder einer akkreditierten Inspektionsstelle geprüft werden muss.

Werden Mängel festgestellt sind diese zeitnah zu beheben. Bei potentieller Gefährdung muss die Anlage ausser Betrieb gesetzt und allfällige zusätzliche notwendige Massnahmen getroffen werden.

8.5.3 Kontrolle nach Ereignissen

Thermographie Aufnahmen und Kennlinienmessungen können zur Inspektion nach Ereignissen helfen den Fehler zu finden. Der PV-Generator wird dabei bei genügend Sonneneinstrahlung (mind. 500W/m²) mit IR-Kameras fotografiert und die Bilder werden anschliessend ausgewertet.

8.5.4 Ersatz Überspannungsableiter

Überspannungsableiter können beim Ableiten grosser Energien zerstört werden. Damit haben sie Ihre Aufgabe erfüllt, die Anlage ist nun nicht mehr vor Überspannungen geschützt. Deshalb müssen sie zeitnah ersetzt werden, um die Schutzfunktion wiederherzustellen.

8.5.5 Reinigung PV-Module

Verschmutzte PV-Module dürfen ausschliesslich mit Wasser gereinigt werden.

Ein Unterhaltskonzept (nötiges Material und Zugänglichkeit) erleichtern die Reinigung und den Einsatz von Reinigungsmaschinen. Beim Einsatz von Reinigungsgeräten müssen diese für die Reinigung von PV-Modulen geeignet sein. Die PV-Module, deren Gläser und Beschichtungen dürfen nicht zerkratzt oder andersartig beschädigt werden. Reinigungsmaschinen müssen ausdrücklich für die Reinigung von PV-Modulen geeignet sein.

8.5.6 Wechselrichterersatz

Die Lebensdauer der Wechselrichter (WR) beträgt rund 10 bis 15 Jahre. Sie ist damit kürzer als die der PV-Module. Während der Betriebsdauer der PV-Anlage ist mit dem Ersatz der Wechselrichter zu rechnen. Defekte Wechselrichter sind nach Möglichkeit mit einem gleichen Gerät des gleichen Herstellers zu ersetzen. Vor der Montage des neuen Gerätes ist der PV-Generator auf allfällige Schäden zu prüfen. Bei der Inbetriebnahme des neuen Gerätes sind die gleichen Parameter wie beim alten einzustellen. Das neue Gerät ist in das Überwachungssystem einzubinden. Ist kein gleiches Gerät verfügbar ist ein passendes Gerät auszuwählen, dabei müssen die Strangauslegung und der AC-Anschluss überprüft und bei Bedarf angepasst werden. Die defekten Geräte sind fachgerecht zu reparieren oder zu entsorgen. Der WR-Ersatz ist in den Unterlagen zu dokumentieren, insbesondere die neue Serien-Nummer ist festzuhalten.

8.5.7 Reparaturen PV-Generator

Module dürfen bei einem Schaden des Glases reduziert belastet werden und müssen innerhalb von 48 Stunden gesichert oder ausgewechselt werden. Defekte PV-Module sind durch gleiche PV-Module zu ersetzen und fachgerecht zu entsorgen. Weitere Informationen zum Thema Modulersatz können dem Swissolar Merkblatt Nr. 16 „Kompatibilitätsbereich von PV-Modulen mit unterschiedlichem Strom im MPP“ entnommen werden. Bei Anlagen über 100kWp wird empfohlen ca. 5% PV-Module in Reserve zu halten. Sind keine baugleichen PV-Module erhältlich kann ein etwas leistungsfähigeres PV-Modul eingebaut werden. Dabei ist auf die Gleichheit der Stecker am Strangkabel zu achten. Das Modul muss fest an der Unterkonstruktion montiert werden.

Wird ein PV-Modul stillgelegt, d.h. im Strang befinden sich weniger Module, sind alle Stränge am gleichen MPP-Tracker des Wechselrichters entsprechend zu verkürzen.