

Wo liegen sicherheitsrelevante Schwachpunkte von PV-Anlagen? Ergebnisse einer FMEA-Analyse

Heribert Schmidt¹, Robin Grab¹, Florian Reil², Willi Vaaßen²

¹Fraunhofer ISE, Heidenhofstrasse 2, 79110 Freiburg

²TÜV Rhld. Am Grauen Stein 20, 51105 Köln

0761 / 4588 5226

heribert.schmidt@ise.fraunhofer.de

www.ise.fraunhofer.de

1) Motivation und Methodik

Photovoltaik-Anlagen sind komplexe elektrotechnische Anlagen mit einer Vielzahl von Einzelkomponenten. Geht man von einer im Jahre 2013 in Deutschland insgesamt installierten Leistung von mehr als 30 GW aus, so entspricht das einer Anzahl von etwa 150 Mio. Modulen, ca. 450 Mio. Bypass-Dioden, ca. 10 Mrd. Solarzellen (3 Wp) und ca. 50 Mrd. Lötstellen. Hinzu kommen Leitungen, Verteiler, Strangdioden, DC-Sicherungen, DC-Schalter, Wechselrichter, AC-Sicherungen, IT-Schnittstellen etc. sowie mechanische Komponenten wie Aufständierungen oder auch Nachführsysteme. Wie bei jeder technischen Anlage besteht somit ein Risiko, dass durch Fehler in der Anlage Schäden auftreten können. Für Versicherungen wie auch für die Errichter und Betreiber von PV-Anlagen besteht daher der Bedarf nach einer Risikoanalyse. Hierzu sind einschlägige Verfahren in der Versicherungswirtschaft bekannt, ein Überblick hierzu findet sich in [1].

Einen Ansatz, mögliche Fehlerquellen bereits in der Entwicklungsphase eines Produktes oder eines Systems zu identifizieren und möglichst zu eliminieren, bietet die sogenannte FMEA (Failure Mode and Effects Analysis „Fehlermöglichkeits- und Einfluss-Analyse“ oder kurz „Auswirkungsanalyse“) [2]. Innerhalb des PV-Brandschutz-Projektes [3] wurde diese Methode auf ein vollständiges netzgekoppeltes PV-System (ohne Speicher) angewandt – die Vorgehensweise und die Ergebnisse werden im Folgenden dargestellt.

Die FMEA stellt in der Industrie, insbesondere bei Herstellern von Massenprodukten wie z.B. Automobilen, ein etabliertes und auch formal vorgegebenes Verfahren dar (DIN EN 60812 „Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse“), mit welchem bereits in der Entwicklungsphase eines Produktes mögliche Fehlerquellen identifiziert, bewertet und Abhilfemaßnahmen benannt werden. Hierzu kommt ein Team von ca. 10 Experten aus möglichst unterschiedlichen Fachbereichen zusammen, welches unter Anleitung eines Moderators die Komponenten eines Gesamtsystems oder auch nur eine einzelne Komponenten im Detail betrachtet. Die Bewertung des Risikos stellt dabei eine Mischung aus langjähriger Erfahrung, faktischem Wissen, aber auch „Bauchge-

fühl“ dar. Kontroverse Bewertungen werden ausdiskutiert, letztlich muss sich das Team auf einen gemeinsamen Risikowert einigen.

Das Risiko wird nach drei Kriterien beurteilt, die mit A, B und E bezeichnet werden. Jedes dieser Kriterien wird auf einer ganzzahligen Skala von 1 bis 10 anhand eines spezifischen Kataloges bewertet, wobei 10 das jeweils höchste Risiko bedeutet.

„A“ beschreibt die Auftrittswahrscheinlichkeit eines Fehlers,

„B“ beschreibt die Bedeutung eines Fehlers, also welche Konsequenzen er mit sich bringt, und

„E“ beschreibt die Entdeckungswahrscheinlichkeit, besser gesagt die „Nicht-Entdeckungswahrscheinlichkeit“ – mit dem Faktor 10 wird demnach ein nur mit erheblichem Aufwand oder evtl. sogar nicht detektierbarer Fehler bewertet.

Auftrittswahrscheinlichkeit		Brandauslösewahrscheinlichkeit <u>(der Komponente)</u>		Entdeckungswahrscheinlichkeit	
1	Vernachlässigbar <i>theoretisch denkbar, praktisch nie</i>	1	Vernachlässigbar <i>theoretisch ist eine Brandentstehung möglich, praktisch nie beobachtet</i>	1	Sehr hoch <i>z.B. Ausfall des Systems, sehr zuverlässige Systemüberwachung etc.</i>
2		2		2	
3	Entfernt vorstellbar <i>wurde bereits beobachtet, gilt aber als äusserste Ausnahme</i>	3	Entfernt vorstellbar <i>Brandentstehung ist unter bestimmten Bedingungen theoretisch möglich</i>	3	Hoch <i>Fehlererkennung ist vorhanden, kann aber gelegentlich unter bestimmten Bedingungen versagen</i>
4		4		4	
5	Niedrig, selten <i>selten zu beobachten, tritt eher sporadisch auf</i>	5	Niedrig, selten <i>Brandentstehung ist möglich, tritt aber selten auf</i>	5	Gelegentlich <i>Fehlermerkmal ist leicht zu erkennen z.B. sichtbar, wird aber nicht systematisch erfasst.</i>
6	Gelegentlich <i>tritt in regelmäßigen Abständen auf</i>	6	Gelegentlich <i>Brandentstehung ist möglich, tritt gelegentlich auf</i>	6	Niedrig, selten <i>Fehler kann durch Kontrollmaßnahmen oder an seinen Auswirkung erkannt werden</i>
7		7		7	
8	Hoch <i>wurde bereits oft beobachtet,</i>	8	Hoch <i>Auftritt des Fehlers konnte bereits oft zu einer Brandauslösung führen</i>	8	Entfernt vorstellbar <i>Fehler kann durch genau definierte Prüfungen festgestellt werden</i>
9		9		9	
10	Sehr hoch <i>es ist nahezu sicher, dass der Fehler in absehbarer Zeit</i>	10	Sehr hoch <i>Auftritt des Fehlers verursacht sehr häufig eine Brandauslösung</i>	10	Vernachlässigbar <i>Versteckte Fehlfunktion, Merkmal kann nicht geprüft werden</i>

Abbildung 1: Spezifischer Bewertungskatalog für die Analyse eines PV-Systems

Aus den drei Einzelkriterien wird nachfolgend durch Multiplikation die sog. Risiko-Prioritätszahl „RPZ“ berechnet, die entsprechend zwischen 1 und 1000 liegen kann. Die weitere Auswertung der RPZ kann unterschiedlich erfolgen – eine Möglichkeit besteht z. B. darin, einen Grenzwert festzulegen, oberhalb dessen das Risiko als kri-

tisch angesehen wird und Gegenmaßnahmen, z. B. konstruktive Änderungen, erforderlich sind. Bei der hier durchgeführten FMEA wurde eine RPZ von 150 als Grenzwert festgelegt - werden also alle drei Kriterien mit „5“ bewertet, ergibt sich die unkritische RPZ von 125. Diese rein formale Vorgehensweise ist umstritten und sollte immer noch „durch den gesunden Menschenverstand“ und die Ergebnisse der Team-Diskussion ergänzt werden [2].

2) Bewertung der Risikostellen in PV-Anlagen

Eine FMEA kann für ein einzelnes Bauteil, z. B. eine Modul-Anschlussdose, durchgeführt werden, oder wie in diesem Falle für ein vollständiges System - entsprechend unterschiedlich ist die Detailtiefe. Da innerhalb eines PV-Systems einzelne Funktionalitäten oder Technologien - wie z. B. Lötverbindungen - an mehreren Stellen zum Einsatz kommen, wurden diese soweit wie möglich zusammengefasst und bewertet. Folgende Gruppen wurden betrachtet:

- Steckverbinder (Modul, DC-Hauptleitung, Wechselrichter, AC-Seite)
- Klemmen (Feldverteiler, Wechselrichter DC- und AC-Seite)
- Lötverbindungen (Zellen/Strings, Anschlussdose, Wechselrichter)
- Dioden (Bypass-Dioden, Strangdioden)
- Modul (Zellen, Glas, Rückseitenfolie, Anschlusstechnik)
- Sicherungen (DC-Seite, AC-Seite)
- Kabel (DC-Seite, AC-Seite)
- Schalter (DC-Seite)
- Wechselrichter
- Planung und Installation

Insgesamt wurden daraus vom Moderator 39 Fragestellungen formuliert, woraus einschließlich der ggf. notwendigen Iterationen zur Reduzierung der RPZ ca. 140 Bewertungen resultierten.

Die folgende Abbildung zeigt beispielhaft die Bewertung der drei Kriterien anhand eines verschmorten DC-Steckers aufgrund einer nicht vollständigen Steckung. Die „Auftrittswahrscheinlichkeit“ wurde mit „4“ als relativ gering angesehen. Die „Brandauslösewahrscheinlichkeit“, dass nämlich der Stecker verschmort, wird mit einer „7“ als recht wahrscheinlich angesehen. Die „Brandauslösewahrscheinlichkeit“ bezieht sich dabei immer nur auf die betrachtete Komponente, da eine Ausbreitung des Brandes auf andere Komponenten oder das Gebäude von vielen, hier nicht abschätzbaren Randbedingungen abhängig ist. Eine hohe Brandauslösewahrscheinlichkeit muss also nicht zwangsläufig bedeuten, dass ein Gebäudebrand entsteht. Als Beispiel hierfür könnte ein verschmorter Steckverbinder zwischen zwei Modulen oberhalb einer harten Bedachung (Dachziegel) angesehen werden, der i. A. keinen Brand auslöst.

Das dritte Kriterium, dass nämlich der Fehler (mangelhafte Steckung) bereits vor dem Auftreten der Verschmörung entdeckt wird, wurde als eher unwahrscheinlich, also mit dem Faktor „8“ bewertet. Insgesamt ergibt sich daraus durch eine Multiplikation eine RPZ von 224 – also deutlich über dem gewählten Grenzwert der RPZ von 150.

			Ist-Zustand			
Beteiligte Komponente/ Ort	Potentielle Fehler	potentielle Ursachen	Auftritts-wahrscheinlichkeit	Brandauslösungs-wahrscheinlichkeit	Entdeckungs-wahrscheinlichkeit	RPZ
DC-Stecker						
DC-Steckverbinder	Steckverbinder verschmort	Stecker nicht vollständig gesteckt	4	7	8	224

Abbildung 2: Beispielhafte Bewertung des Ist-Zustandes eines unvollständig gesteckten DC-Steckers

Gemäß Abbildung 3 erreichten von den 39 betrachteten Gruppen 21 eine RPZ oberhalb des Grenzwertes von 150, die übrigen 18 unterhalb des Grenzwertes sind in der Abbildung 4 aufgeführt.

Als besonders kritisch wurde von der Expertenrunde die (unerlaubte!) Kombination von Steckverbindern unterschiedlicher Hersteller angesehen und mit einer RPZ von ca. 450 bewertet. Weiterhin werden neben Fehlern in der Komponentenfertigung überwiegend Installations- und Planungsfehler als kritisch angesehen.

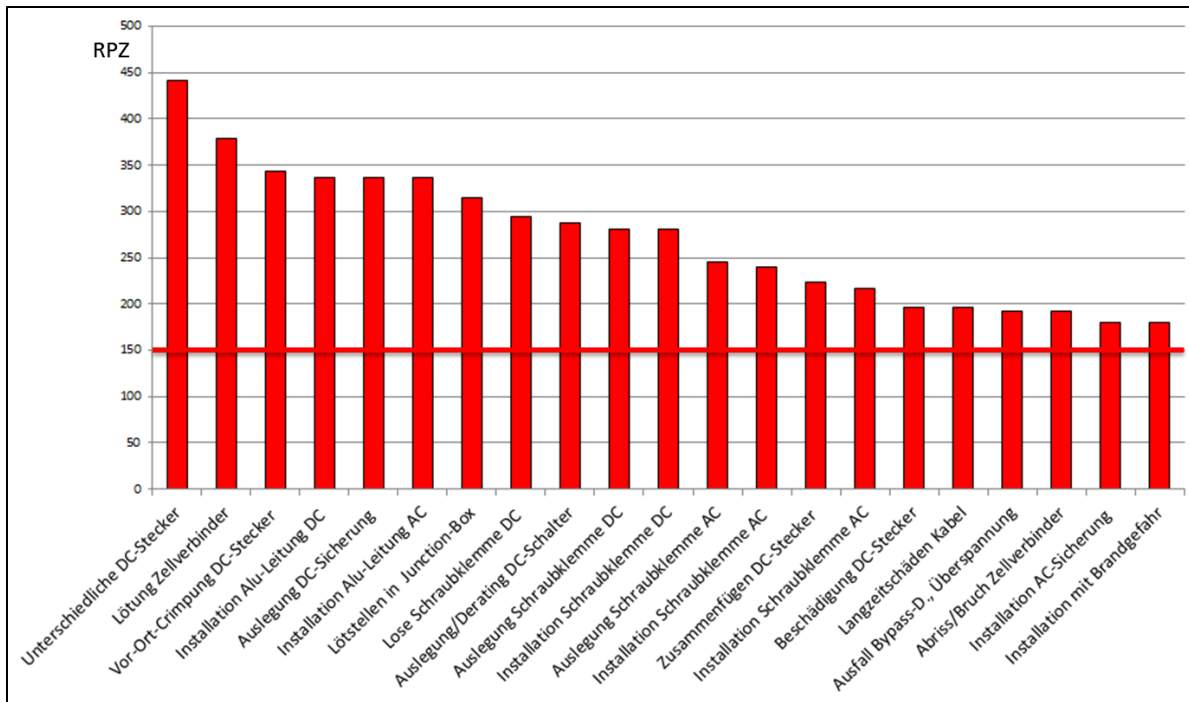


Abbildung 3: Baugruppen/Funktionen mit einer RPZ > 150

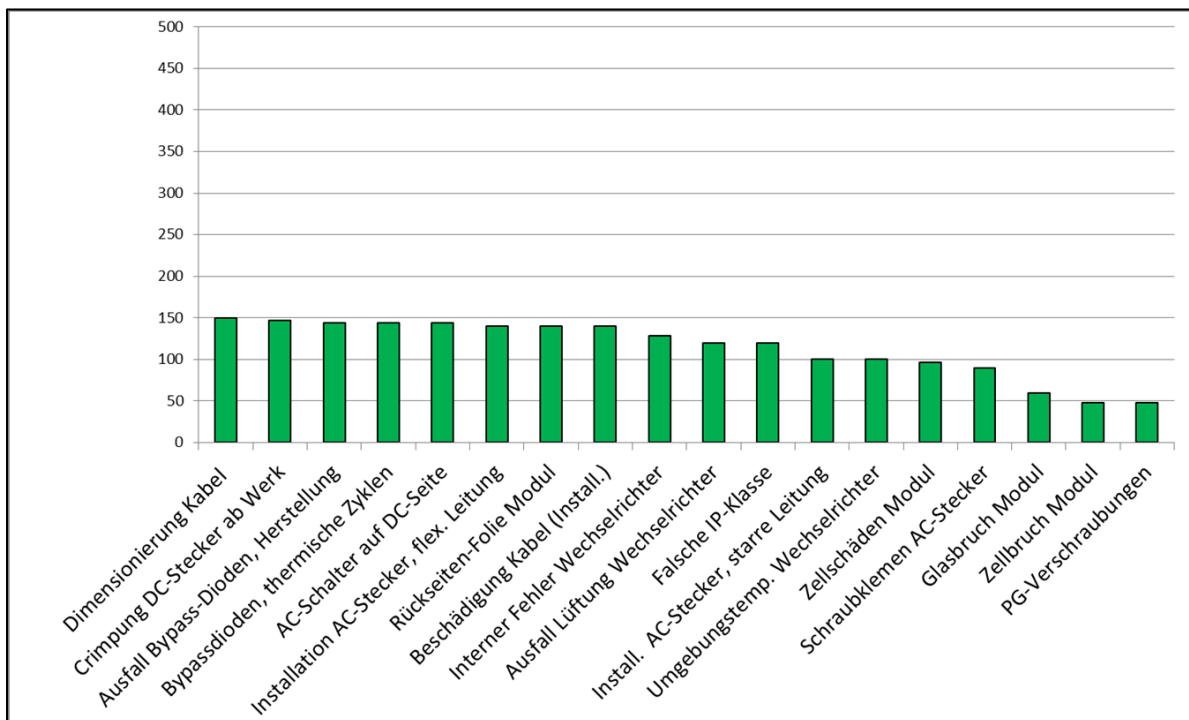


Abbildung 4: Baugruppen/Funktionen mit einer RPZ <= 150

In dem in der Abbildung 2 gezeigten Beispiel eines nicht vollständig gesteckten DC-Steckers wurde der RPZ-Grenzwert überschritten, es sind also Verbesserungsmaßnahmen erforderlich. Diese können an allen drei Kriterien ansetzen, wie das in Abbildung 5 gezeigt ist:

Verbesserter Zustand					Anmerkungen:
mögliche Abstellmaßnahmen <small>Hinzufügen</small>	Auftrittswahrscheinlichkeit	Brandauslösungswahrscheinlichkeit	Entdeckungswahrscheinlichkeit	RPZ	
Ausgangszustand	4	7	8	224	
Schulung der Installateure	3	7	8	168	Zeit- und Kostendruck
Stecker-Design: Rastnasen, Haptik, Farbring etc.	2	7	7	98	
Abnahmeprüfung (DIN 0126-23)	4	7	7	196	Reicht nicht aus!
Abnahmeprüfung (erweiterte Methoden, z.B. IR)	4	7	6	168	Ggf. neue Messmethoden
Regelmäßige Wiederholungsprüfung (DIN 0126-23)	4	7	7	196	Reicht nicht aus!
Regelmäßige Wiederholungsprüfung (erweiterte Methode, z.B. IR)	4	7	5	140	Ggf. neue Messmethoden
Lichtbogen-Detektor	4	4	7	112	Wenn zuverlässig!

Abbildung 5: Beispielhafte Bewertung unterschiedlicher Verbesserungsmaßnahmen bei einem nicht vollständig gesteckten DC-Stecker nebst Kommentaren des FMEA-Teams

Durch eine Schulung/Sensibilisierung der Installateure lässt sich die Qualität der Installation verbessern, wodurch das Kriterium „Auftrittswahrscheinlichkeit“ verbessert wird. Vom FMEA-Team wurde aber das Verbesserungspotenzial aufgrund des Zeit- und Kostendrucks während der Installation als nicht ausreichend angesehen.

Zielführend könnten Verbesserungen am Stecker selber sein (Rastnasen, Haptik, auffälliger Farbring bei falscher Steckung etc.), weiterhin regelmäßige Wiederholungsprüfungen mit erweiterten Methoden (Infrarot-Kamera) oder auch ein Lichtbogen-Detektor, wenn dieser auch solche Probleme (Verschmörung, aber kein Lichtbogen) frühzeitig und zuverlässig detektieren kann.

Erfreulicher Weise konnte gemäß Abbildung 6 für alle Gruppen/Funktionen mit einer RPZ größer als 150 praktikable Vorschläge gefunden werden, mit denen die RPZ unter den kritischen Grenzwert gebracht werden konnten.

Die vollständigen Ergebnisse der FMEA können unter [3] abgerufen werden.

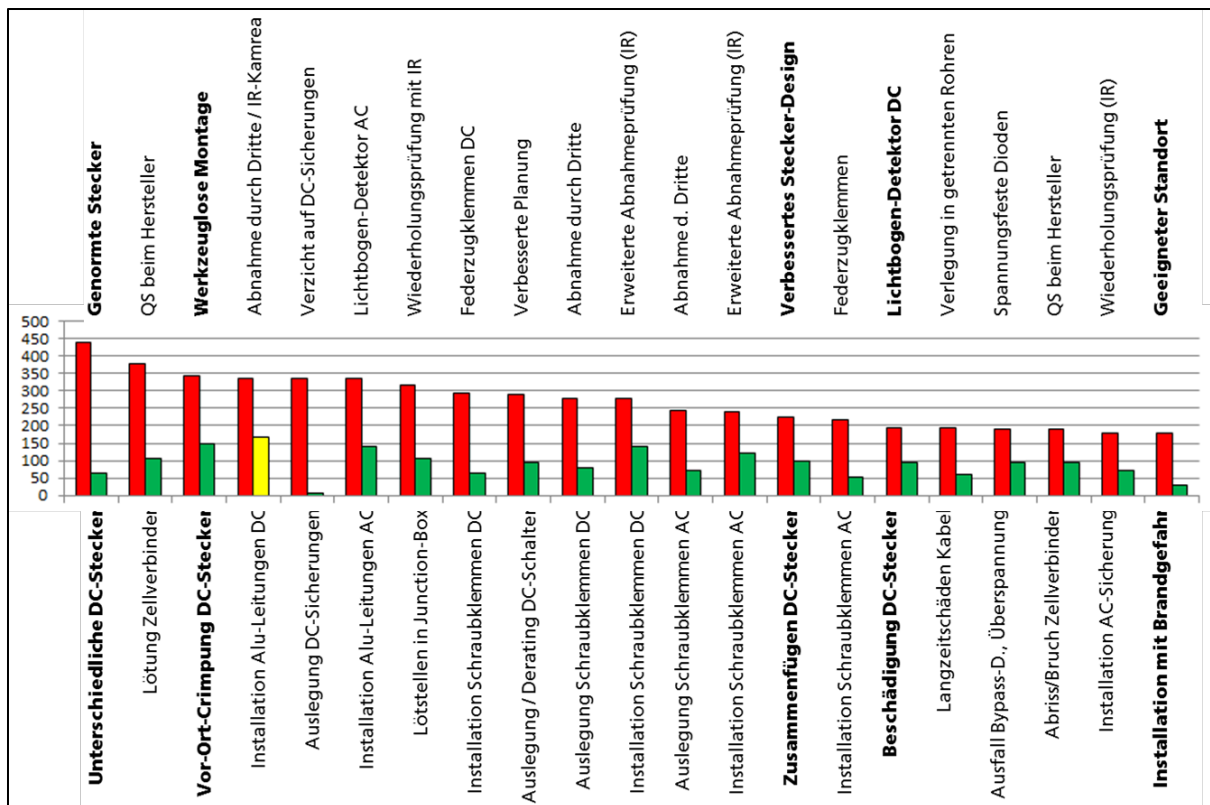


Abbildung 6: Baugruppen/Funktionen mit einer RPZ > 150 und Lösungsvorschlag mit jeweils kleinster RPZ. Andere Lösungen können auch zielführend sein, aber mit einer höheren RPZ.

3) Schlussfolgerungen

Fasst man die in den oben stehenden Abbildungen und in den Diskussionen während der FMEA überwiegend genannten Verbesserungsmaßnahmen zusammen, so ergibt sich dafür folgende Rangliste:

- Einhaltung der bestehenden Normen und Vorschriften
- Abnahme- und Wiederholungsprüfungen (A&W-Prüfung) durch unabhängige Dritte
- Erweiterte A&W-Prüfung (IR-Kamera, EL, neue Verfahren) durch unabhängige Dritte
- Schulung von Planern und Installateuren
- Qualitätssicherung beim Hersteller von Komponenten
- Federzugklemmen anstelle von Schraubklemmen
- Weltweite Normierung von Komponenten (insb. DC-Steckverbinder)
- Lichtbogen-Detektor und automatische Abschaltung
- Konstruktive Verbesserungen, z. B. an Steckverbindern
- „Schlankes“ Anlagendesign (Verzicht auf überflüssige Komponenten)
- Bauliche Maßnahmen (z. B. geschützte Verlegung von Leitungen)
- Viele weitere, größtenteils bereits bekannte Detaillösungen

Als hauptsächliche Fehlerquelle wurde leider der „Faktor Mensch“ benannt. Die vorgeschlagenen Verbesserungsmaßnahmen liegen daher hauptsächlich im Bereich der Qualitätssicherung sowohl bei den Komponenten als auch bei der Planung und Ausführung der Anlagen. Regelmäßige Prüfungen durch unabhängige Dritte wurden als sehr effektiv erachtet, jedoch muss der finanzielle Aufwand in einem sinnvollen Verhältnis zu dem Anlagenenertrag stehen. Zusätzliche Sicherheitskomponenten wie z. B. Lichtbogen-Detektoren können das Risiko weiter reduzieren, wurden aber erst an zweiter Stelle hinter einer fachmännischen Planung und Ausführung der Anlagen mit hochwertigen Bauteilen benannt.

Die Methode der FMEA wurde von den Beteiligten als zielführend erachtet. Es wird daher allen Komponentenherstellern empfohlen, eine FMEA für ihre Produkte durchzuführen. Planer und Installateure werden für Einzelanlagen i. A. eine solche formale Analyse nicht durchführen - sie sollen aber durch die oben gezeigten Ergebnisse sensibilisiert werden und ihre Anlagen kritisch betrachten, ggf. Schwachpunkte aufdecken und eliminieren!

4) Literaturverzeichnis

[1] <http://de.wikipedia.org/wiki/Risikoanalyse/>.

[2] <http://de.wikipedia.org/wiki/FMEA/>.

[3] <http://www.pv-brandsicherheit.de/freiburg2013/>.