

# Risikoanalyse von gekoppelten PV-Elektrolysesystemen - Bewertung von Standortfaktoren

Stefan Niederhofer<sup>1</sup>, Marcus Rennhofer<sup>1</sup>, René Hofmann<sup>2</sup>

<sup>1</sup>AIT Austrian Institute of Technology GmbH (AIT), Austria, Giefinggasse 4, 1210 Wien

<sup>2</sup>TU Wien, Austria, Institut für Energietechnik und Thermodynamik, Getreidemarkt 9, 1060 Wien

\* email: [stefan.niederhofer@ait.ac.at](mailto:stefan.niederhofer@ait.ac.at), Tel.: +43 676 9574611

## 1 Einleitung

Erneuerbarer Wasserstoff gilt als ein Wegbereiter für die Erreichung der Dekarbonisierungsziele 2030, 2050 und darüber hinaus. Da der Anteil erneuerbarer Wasserstoffherzeugung weltweit unter 1 % des produzierten Wasserstoffs liegt, ist die Produktion von erneuerbarem Wasserstoff in großem Maßstab durch PV-Kopplung ein notwendiger Weg [1]. Da der zuverlässige Betrieb von gekoppelten PV-Elektrolyseuren entscheidend ist, um eine großflächige Implementierung von Systemen zu gewährleisten, wurde dies in der vorliegenden Studie mittels einer Risikoanalyse untersucht. Dabei wurde unter anderem die Sensitivität von Risikoänderungen der Systemkomponenten hinsichtlich dem Gesamtausfallrisiko untersucht. Dies ermöglicht Rückschlüsse auf die Fehleranfälligkeit der untersuchten Systeme auf Grund von standortspezifischen Umwelteinflüssen auf die elektrischen Betriebsmittel und in weiterer Folge, Systemdesigns für verschiedene PV-Elektrolyse-Einsatzszenarien zu optimieren.

## 2 Methode

Basierend auf dem Stand der Technik und dem Stand der Wissenschaft wurden vier PV-Elektrolyseur-Direktkopplungsszenarien entworfen. Sie wurden auf Basis der Methode einer Risikoanalyse [2] auf die Wahrscheinlichkeit mittels Fehlerbaumanalyse hinsichtlich des Gesamtausfalls untersucht. Der Fokus lag dabei in der Untersuchung des Systemverhaltens im Bereich der zufällig verteilten Ausfallraten von elektrischen Betriebsmittel gemäß Badewannenkurve [3]. Früh- oder Spätausfälle (Verschleiß) wurden nicht untersucht. Um die Bewertung von Vor-Ort-Faktoren bezüglich Systemfehlern (wie z.B. extreme Einsatzorte, menschliche Fehler oder Wasserverschmutzung) zu ermöglichen, wurden Sensitivitätsanalysen für 11 Anwendungsfälle für Systeme in der Größe von 0,5 bis 5,0 MWp PV und 1 MW Elektrolyseurleistung durchgeführt. Die Ergebnisse werden in dieser Studie vorgestellt. Die Zuverlässigkeit wurde aus Eins minus der Ausfallwahrscheinlichkeit gebildet ( $R = 1 - P_f$ ).

<b>Photovoltaics</b>	failure rate [1/h]	failure probability [1/year]
PV modul	1,15E-07	1,01E-03
overvoltage protection	3,80E-07	3,23E-03
inverter	3,20E-05	1,00E-01
AC collector cabinet	7,64E-06	5,00E-04
DC-DC converter	3,03E-06	2,62E-02
battery	2,33E-05	1,85E-01
grid loss	1,14E-07	1,00E-03
<b>Electrolyser</b>		
watertreatment	2,29452E-12	2,01E-08
power electronics	1,14156E-09	1,00E-05
PEM stack	7,62472E-07	6,66E-03
gas treatment	1,14155E-10	1,00E-06
H2 tank	2,28311E-10	2,00E-06
compression	1,14155E-10	1,00E-06

Tabelle 1: Datengrundlage Fehlerraten [4, 5, 6, 7, 8]

Der Systemaufbau von Szenario eins „Common – PPA“ (Power Purchase Agreement) ist in nachfolgendem Einliniendiagramm in Stromflussrichtung (PV-Elektrolyse) und dem Blockdiagramm dargestellt.

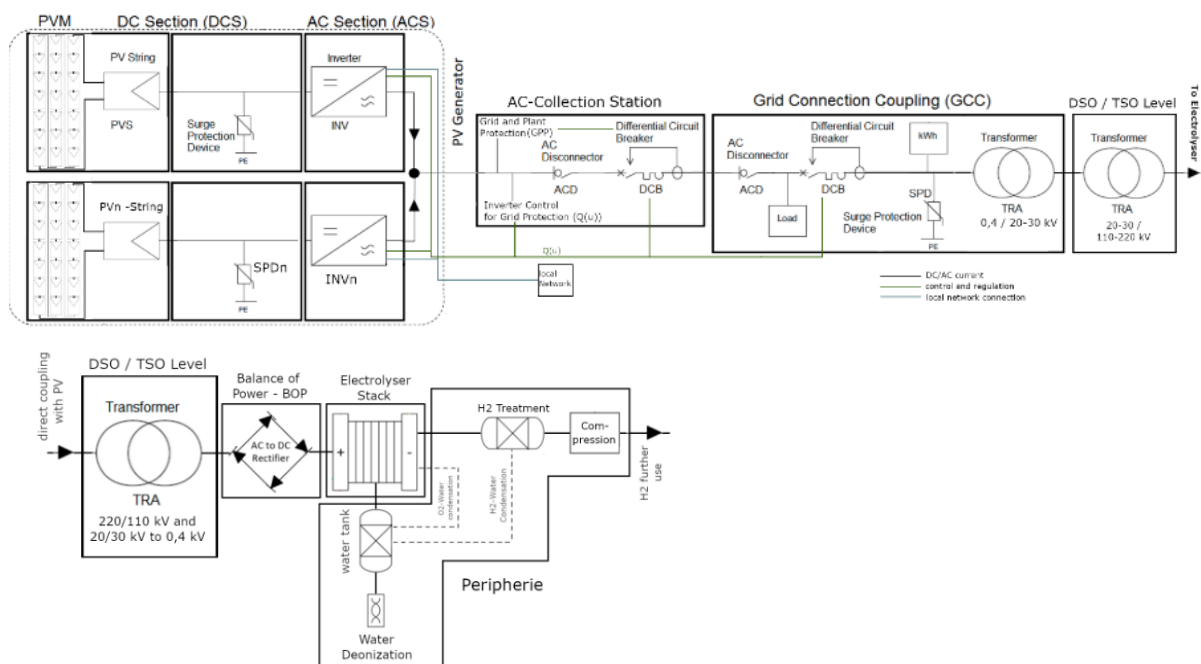


Abbildung 1: Einliniendiagramm PV-Elektrolysekopplung Szenario 1 "Direct coupling - PPA"

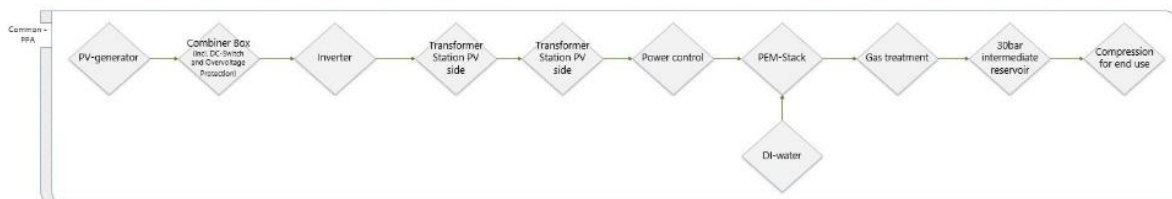


Abbildung 2: Blockdiagramm Szenario 1

Für alle Szenarien wurde ein Fehlerbaum entwickelt (siehe z.B. nachstehend Fehlerbaum Szenario 1 „Common PPA“). Beginnend von unten sind alle Fehlerevents bis hin zum sog. TopEvent dargestellt.

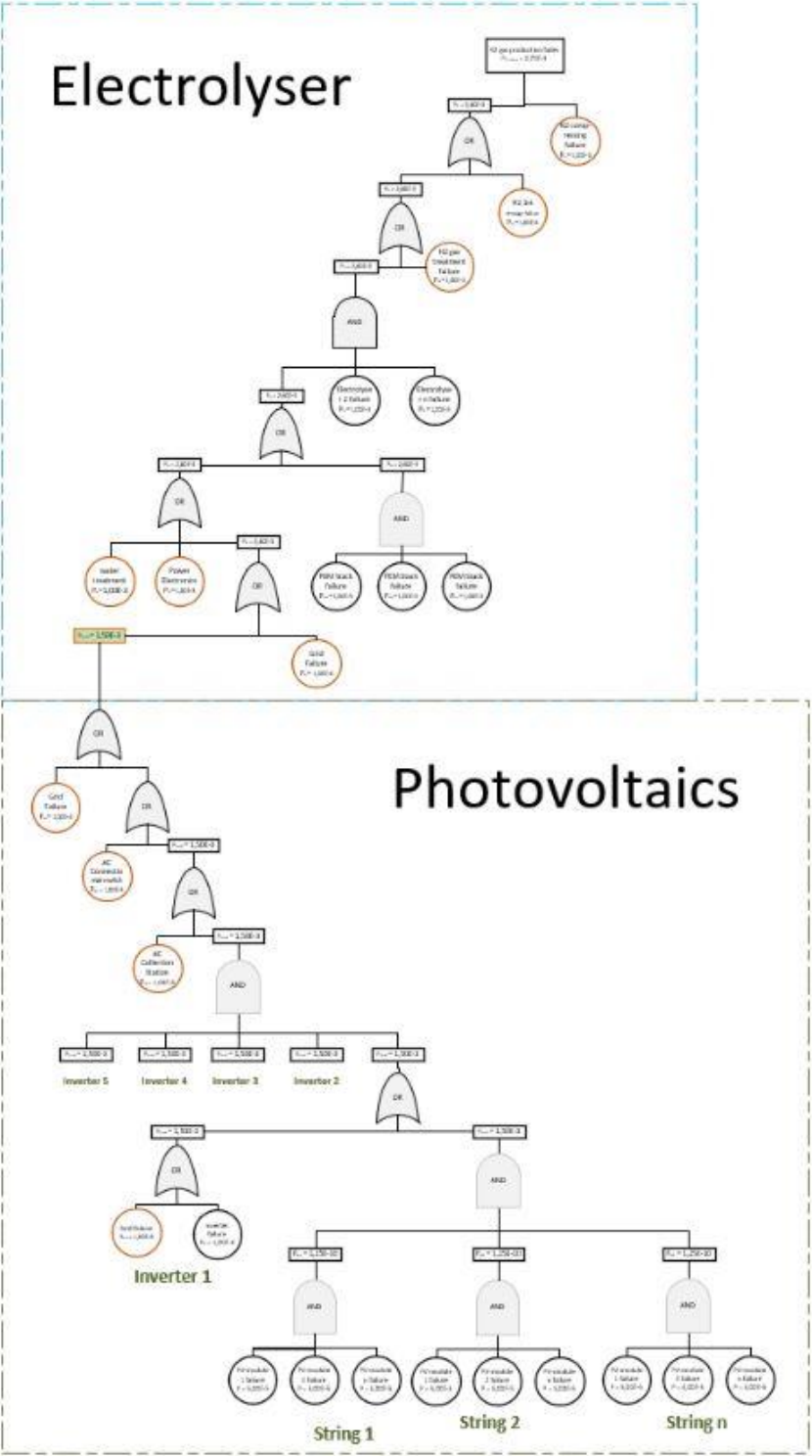


Abbildung 3: Fehlerbaum – Risiko-Analyse Szenario 1

### 3 Ergebnisse

Die quantitative Untersuchung zeigt jährliche Zuverlässigkeitsraten von 89,80 % bis 99,9996 % in den verschiedenen Anwendungsfällen der Szenarien. Die Komponente mit der höchsten Ausfallwahrscheinlichkeit ist der PV-Wechselrichter ( $p=10\%$ ), gefolgt von Ausfall Verteilnetz ( $p=0,1\%$ ). Beim Einsatz von einem PV-Wechselrichter (Szenario 1, Anwendungsfall 3 und Szenario 2 Anwendungsfall 3) beträgt die Zuverlässigkeit des Gesamtsystems 89,80 % und 89,90 %. Die Gesamtausfallwahrscheinlichkeit für die Wasserversorgung ist gering, ebenso wie die der Kompression und der Gastrocknung (jeweils  $p<0,004\%$ ).

In den Szenarien stand der Wissenschaft war zu erkennen, dass durch die (im Vergleich zu Szenario 1 und 2) geringere Anzahl an elektrischen Betriebsmitteln und geringerer technologischer Komplexität die Ausfallwahrscheinlichkeit allgemein gering ausfiel. Im Szenario 4, Anwendungsfall 1 und 2 lag bereits ab einer Größe von 10 kWp und 10 kW Elektrolyseleistung die Ausfallwahrscheinlichkeit unter 0,001 %. Weshalb die Ausfallwahrscheinlichkeit noch größerer Systeme nicht weiter untersucht wurde. Zusätzliche Redundanz der PV-Stränge/Generatoren und Elektrolyseeinheiten hätte zu weiterer Verringerung der Ausfallwahrscheinlichkeit geführt. Dies stellte den zuverlässigsten Teil der Systeme dar.

#### Sensitivitätsanalyse

Exemplarisch sind nachstehend die Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen von Szenario 1 gezeigt. Zu sehen ist in allen Anwendungsfällen aus Szenario 1, dass bei einer Erhöhung der Ausfallwahrscheinlichkeit des Wechselrichters um den Faktor 10, der Totalausfall des Systems mit  $p = 100\%$  zu erwarten ist. Netzausfall, PEM-Stack-Fehler und Photovoltaikmodulfelder führen bei Erhöhung um Faktor 100 bis 1.000 zu einem Gesamtsystemausfall. Der Wechselrichter wirkt sich somit am sensitivsten auf den Gesamtausfall aus (Erhöhung der Fehlerrate). Daraus lassen sich erste Maßnahmen zur Begrenzung oder Reduktion der Ausfallraten durch technisches Design ableiten (z.B. weitere Wechselrichterredundanz, Gewährleistung geringe Umwelteinflüsse am Wechselrichterstandort wie Vermeidung von Staub oder zu hoher Raumtemperaturen und regelmäßige Wartung). Zu erkennen ist zudem in Anwendungsfall 1, dass bei abnehmender Ausfallwahrscheinlichkeit des Netzausfalls, spricht zuverlässigerer Betrieb des Versorgungsnetzes, die Gesamtausfallwahrscheinlichkeit drastisch abnimmt. Das bedeutet einerseits, dass der Netzausfall in dem Beispiel den führenden Fehler bildet. Zudem resultiert daraus, dass über die Installation eines kurzfristigen elektrischen Energiespeichers in Form einer Ersatzstromversorgung die Systemzuverlässigkeit gewährleistet werden kann. In Anwendungsfall 2 liegen die Hauptursachen für den Gesamtausfall des Systems bei Wechselrichter und elektrischem Versorgungsnetz. Komponenten der Elektrolyse sind durchwegs resistent gegenüber der Erhöhung der Fehlerrate. Dies liegt einerseits darin, dass PEM Elektrolysestacks redundant ausgeführt sind und der Ausfall einer einzelnen Komponente nicht zum Ausfall des Gesamtsystems führt und andererseits weisen die Betriebsmittel der Elektrolyse eine geringe Fehlerwahrscheinlichkeit auf. In Anwendungsfall 1 ist zudem weiter zu sehen, dass bei Zunahme der Fehlerrate des Wechselrichters um den Faktor 10, der Wechselrichter zum führenden Fehler wird.

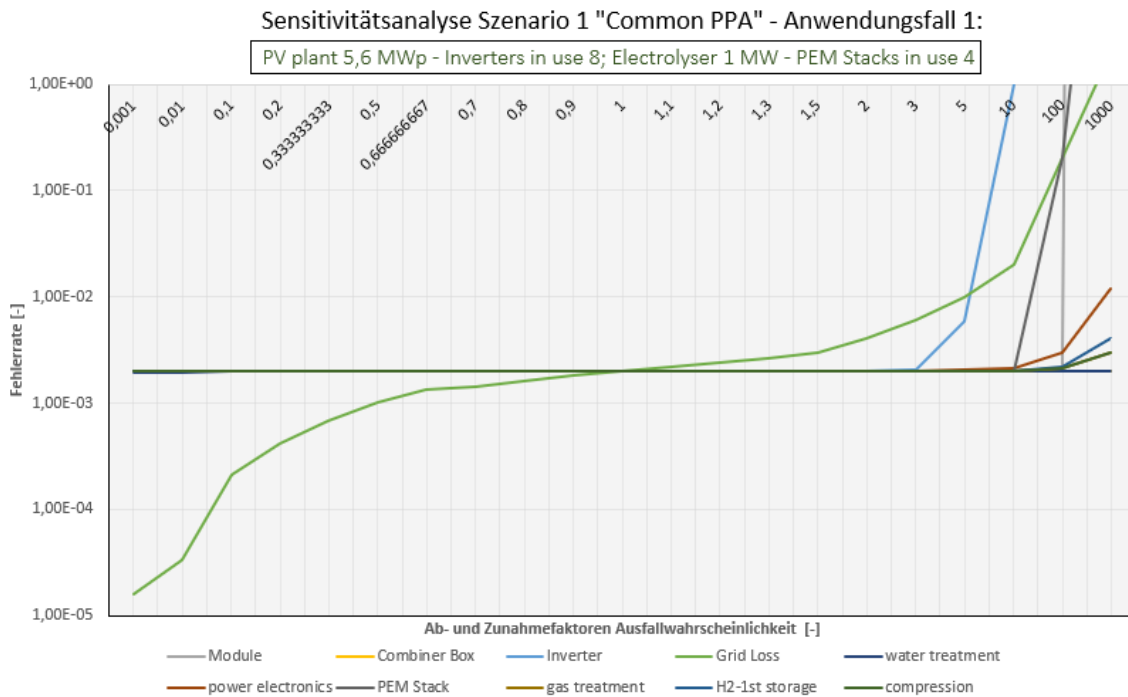


Abbildung 4: Sensitivitätsanalyse Szenario 1 – Anwendungsfall 1

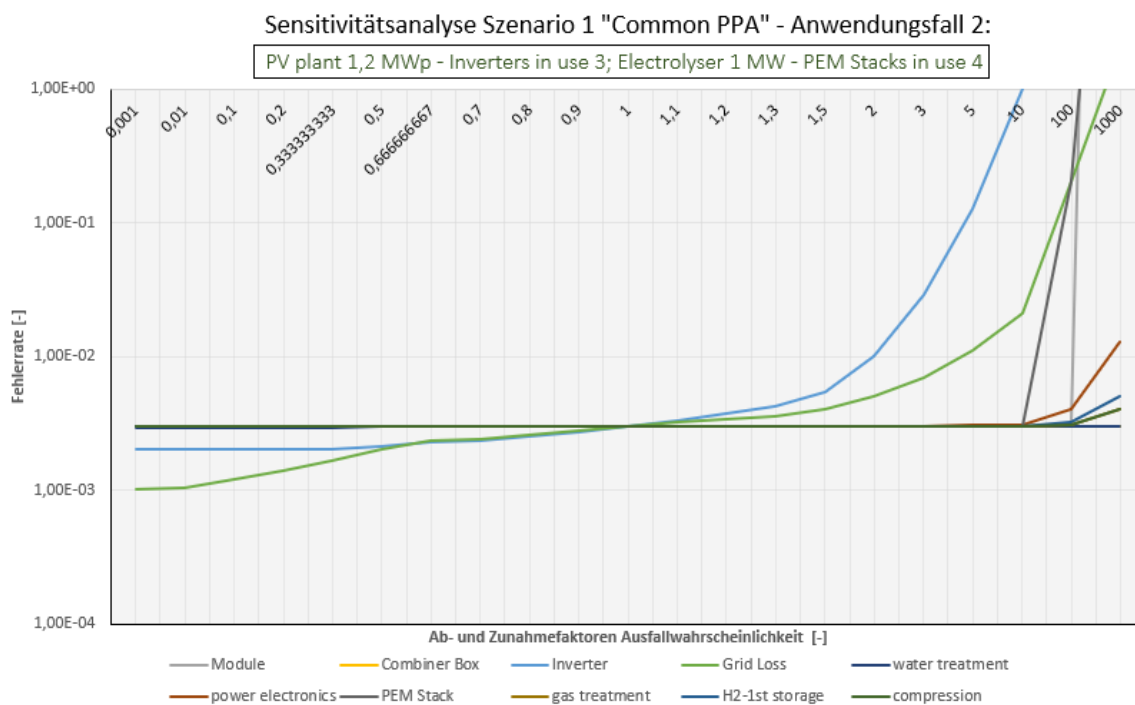


Abbildung 5: Sensitivitätsanalyse Szenario 1 – Anwendungsfall 2

Zusammenfassend ist zu sagen, dass die Reduktion der Fehlerrate von Wechselrichter und elektrisches Versorgungsnetz die Gesamtausfallwahrscheinlichkeiten drastisch reduzieren könnten.

#### 4. Zusammenfassung

Die Arbeit zeigte, dass gekoppelte PV-Elektrolysesysteme je nach Betriebsmitteleinsatz unterschiedlichen Grad an Zuverlässigkeit aufweisen. Zu

beachten ist, dass die Systeme Stand der Wissenschaft auf Grund eines geringeren Betriebsmitteleinsatzes eine höhere Zuverlässigkeit des Gesamtsystems aufweisen. Die kritischsten Komponenten sind Wechselrichter und Netzanschluss auf Seiten des Photovoltaiksystems sowie Wasserversorgung, Gastrocknung, Kompression und Zwischenspeicher auf Seiten des Elektrolysesystems. Anhand der Sensitivitätsanalysen ist zu sehen, dass für einen zuverlässigen Systembetrieb unter gegebenen Standortfaktoren (1) Eine stark zunehmende Zuverlässigkeit bei zuverlässigerem Netzbetrieb und im Einsatz von 2 oder mehr Wechselrichtern eintritt (90 % höhere Versorgungssicherheit führt zu 10-fachem Anstieg der Gesamtsystemzuverlässigkeit) (2) In den Anwendungsfällen, in denen das elektrische Netz den führenden Fehler bildet, führt die Investition in einen Speicher als Ersatzstromversorgung zu einer drastischen Erhöhung der Gesamtzuverlässigkeit und (3) Der Anteil der Betriebsmittel des Elektrolysesystems an der Gesamtausfallwahrscheinlichkeit gering ist. Eine Erhöhung der Ausfallwahrscheinlichkeit um Faktor 100 bis teilweise 1000 verschiedener Teilsysteme (Wasseraufbereitung, Kompression, Gastrocknung, Zwischenspeicher), zeigt kaum Veränderungen in der Gesamtausfallwahrscheinlichkeit. Die Elektrolyse ist somit als ausfallsicherer zu sehen als das Photovoltaiksystem.

So kann weiter schlussgefolgert werden, dass das Elektrolysesystem gegenüber Umwelteinflüssen resilienter als das Photovoltaiksystem ist. Die Schwachstelle im Photovoltaiksystem bildet der Wechselrichter und die elektrische Energieversorgung. Dem kann am Anlagenstandort z.B. über regelmäßige Betriebsmittelwartung, lüfterlos ausgeführte Wechselrichter, den Umwelteinflüssen entsprechender Wechselrichtersituierung oder redundanter Ausführung von Wechselrichtern begegnet werden. Eine zusätzliche Ersatzstromversorgung, auf Basis der durchschnittlichen Ausfallzeit des elektrischen Netzes, verringert das Risiko des Gesamtausfalls bedingt durch den Ausfall des elektrischen Netzes.

## **Danksagung**

This work was supported by the TU Wien Doctoral School "NextGeneration Smart Industrial Concept"!

## Referenzen:

- [1] Agency, I.E., 2022. Hydrogen. URL: <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/hydrogen>
- [2] Stamatelatos, M., Vesely, W., Dugan, J., Fragola, J., Minarick, J., Railsback, J., NASA, 2002. Fault tree handbook with aerospace applications .
- [3] U.S. Department of Commerce (N.I.o.S.a.T.), 2023, <https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/apr/section1/apr124.htm>
- [4] Chiacchio, F., Famoso, F., D'Urso, D., Brusca, S., Aizpurua, J., I., Cedola, L., 2018, Dynamic Performance Evaluation of Photovoltaic Power Plant by Stochastic Hybrid Fault Tree Automaton Model
- [5] Spertino, F., Chiodo, E., Ciocia, A., Malgaroli, G., Ratclif, A., 2020, Maintenance Activity, Reliability, Availability, and Related Energy Losses in Ten Operating Photovoltaic Systems up to 1.8 MW
- [6] Tariq, M.S., Butt, S.A., Khan, H.A., 2018, Impact of module and inverter failures on the performance of central-, string-, and micro-inverter PV systems
- [7] Anderson, E., Proton OnSite, 2016, [https://www.sintef.no/globalassets/project/novel/pdf/presentations/03-05\\_proton\\_anderson\\_public.pdf](https://www.sintef.no/globalassets/project/novel/pdf/presentations/03-05_proton_anderson_public.pdf)
- [8] Effah, F., 2018, Reliability Assessment of Battery-Assisted and Electrolyser-Battery Integrated PV Systems for off-Grid Applications