



Universiteit  
Leiden

The Netherlands

## **Guiding safe and sustainable technological innovation under uncertainty: a case study of III-V/silicon photovoltaics**

Blanco Rocha, C.F.

### **Citation**

Blanco Rocha, C. F. (2022, September 8). *Guiding safe and sustainable technological innovation under uncertainty: a case study of III-V/silicon photovoltaics*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/3455392>

Version: Publisher's Version

License: [Leiden University Non-exclusive license](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/3455392>

**Note:** To cite this publication please use the final published version (if applicable).

## Samenvatting

Deze dissertatie had tot doel een antwoord te vinden op de belangrijkste uitdaging bij de milieubeoordeling van opkomende technologieën als leidraad voor veilige en duurzame innovatie: namelijk de onzekerheid over toekomstige ontwikkelingen die van invloed kunnen zijn op de milieuprestaties van de technologie. Hoewel onzekerheid kan worden beschouwd als een "ongemak" bij het uitvoeren van zinvolle beoordelingen, biedt dit werk een keerzijde aan het ongemak. Dit proefschrift kan dan ook een belangrijke bron worden van mogelijkheden voor veiliger en duurzamer ontwerpen. Dit werk is ingegeven door de opvatting dat veiligheids- en duurzaamheidsbeoordelingen niet achter mogen blijven bij technologische of economische aanjagers van innovaties, die al gebruik maken van verfijnde methoden om met onzekerheden op deze gebieden om te gaan. Het overkoepelende doel van dit werk was dan ook om de praktijk van ex-ante (een ander woord voor prospectieve) levenscyclusbeoordeling en risicobeoordeling van opkomende technologieën te verbeteren door aanpassingen van onzekerheidsanalyse en globale gevoeligheidsanalyse.

In hoofdstuk 1 introduceerden wij de dringende behoefte aan, en uitdagingen bij, het uitvoeren van milieubeoordelingen van technologieën terwijl deze zich nog in een vroeg stadium van onderzoek en ontwikkeling bevinden. We hebben laten zien hoe dit met name relevant is voor opkomende systemen voor fotovoltaïsche energie (PV) winning, die de afgelopen decennia een versnelde groei in toepassing en innovatie hebben doorgemaakt. We introduceerden ook de case study van multi-junctie III-V/silicium tandem zonnecellen, een veelbelovend zonnecelontwerp met hoog rendement waarvoor voorafgaand aan dit werk nog geen milieubeoordelingen waren uitgevoerd.

In hoofdstuk 2 hebben we het PV-innovatielandschap onderzocht om na te gaan of innovatie in de sector als geheel tot minder milieueffecten leidt, en om milieu-hotspots binnen de voorgestelde technologieën te identificeren. Hiertoe hebben we een systematische review en meta-analyse uitgevoerd van levenscyclusanalyse (LCA) studies van opkomende PV-technologieën in de periode 2010-2020. In de meeste gevallen waren de effecten van opkomende PV-technologieën gemiddeld gezien lager dan die van de gevestigde technologie in 2010, Al-BSF c-Si cellen. Door de grote variabiliteit en heterogeniteit vonden we echter geen waarneembare trend in de tijd of een statistisch significant effect van innovatie op de klimaatveranderings-impact-scores. Van de onderzochte technologieën werden de meeste hotspots gevonden in perovskieten ten opzichte van andere technologieën. Deze hotspots kunnen vooral worden toegeschreven aan de fluor-gedoteerd tinoxide (FTO) glascomponent. De levenscyclus-effecten van perovskietcellen waren groter vanwege de korte levensduur van de perovskietcellen.

In hoofdstuk 3 hebben we een uitgebreide LCA uitgevoerd van een laboratorium/proefschaalversie van de III V/Si tandem zonneceltechnologie. Op deze schaal bleek III-V/Si beter te presteren dan de Al-BSF c-Si cellen die tot 2015 de markt domineerden, maar iets slechter dan de PERC c-Si cellen die sindsdien hebben gedomineerd. Onze break-even analyse leidde echter tot de conclusie dat te voorziene optimalisaties in energiebeperking en/of verhoogde doorvoercapaciteit in het MOVPE-proces zouden kunnen leiden tot een voordeel in milieuprestaties van III-V/Si ten opzichte van state-of-the-art PERC c-Si cellen.

In hoofdstuk 4 hebben we twee belangrijke verbeteringen in de modellering voorgesteld en met succes gedemonstreerd. Deze verbeteringen zijn nodig om technologieën die voorbij de laboratorium-/proefschaal zijn, te beoordelen in een ex-ante LCA-kader. Ten eerste werden onopgeloste keuzes van materialen of verwerkingsmethoden (aangeduid als technologische paden) gemodelleerd met behulp van binomiale verdelingen die de paden stochastisch in werking stellen, afhankelijk van hun kans op succes. Ten tweede werd een nieuw screeningalgoritme ontwikkeld om een globale gevoeligheidsanalyse (GSA) te kunnen uitvoeren op grootschalige LCA-modellen met een ongekend aantal onzekere modelinputs, waaronder onopgeloste technologische paden. De gezamenlijke toepassing van beide verbeteringen op opkomende frontmetaalontwerpen voor PV-cellen stelde ons in staat om te bepalen welke onopgeloste technologische paden de meeste invloed zouden hebben op de toekomstige milieuprestaties van de cellen. In dit geval waren de keuze tussen laser- en chemische sintermethoden voor de koperinkt, en de keuze tussen zilver- en koperinkt aanzienlijk invloedrijker dan alle andere keuzes.

In hoofdstuk 5 hebben we een prospectieve ecologische risicobeoordeling uitgevoerd van de III-V/Si PV-technologie voor scenario's met hoge elektrificatie/hoge vraag naar PV op drie geografische schalen: Europa, de regio Amsterdam, en een lokale utiliteitscentrale. De emissies en risico's van III-V/Si PV-cellen bleken laag te zijn in worst-case situaties, en verwaarloosbaar in andere gevallen. Een GSA identificeerde operationele parameters in de eindfase van het storttraject als de meest invloedrijke factoren (verdeling afval/percolaat en diepte van de stortcel). Op basis van deze factoren zijn aanbevelingen gedaan voor een veilig ontwerp van III-V/Si PV-panelen en aanverwante systemen, zoals een grotere scheiding voor hergebruik van de III-V lagen, vervanging van de ethylvinylacetaat (EVA) inkapseling door minder zuurvormende materialen, en meer verticale ontwerpen van stortplaatscellen

Hoofdstuk 6 bouwde voort op de ervaringen en inzichten uit de vorige hoofdstukken om een gegeneraliseerd kader voor ex-ante/prospectieve beoordelingen voor te stellen om veilige en duurzame innovatie te begeleiden. We toonden aan dat GSA kan worden gebruikt als een screeningsinstrument om de meest invloedrijke factoren over verschillende domeinen (bv. economisch, sociaal, technologisch, milieu) te identificeren. Er werd een hiërarchie van risicobeperkingsstrategieën voorgesteld om deze invloedrijke factoren in de ontwerpfase aan te pakken. Voor de III-V/Si-cellen hebben we vastgesteld dat, zodra alle te verwachten verbeteringen in celontwerp en -fabricage zijn toegepast, het verlengen van de nuttige levensduur van de panelen en/of het vermijden van vroegtijdige veroudering de meest doeltreffende strategie voor het beperken van de effecten kan bieden. In dit hoofdstuk hebben we ook voor het eerst laten zien hoe de Bayesiaanse benadering van waarschijnlijkheid kan worden toegepast en wellicht beter geschikt is dan de stochastische benadering om met onzekerheden in ex ante/prospectieve beoordelingen om te gaan. We hebben ook laten zien hoe eenvoudige analytische oplossingen kunnen worden gebruikt om Bayesiaanse inferentie uit te voeren en de onzekerheid over de geïdentificeerde invloedrijke factoren verder te verminderen.

In hoofdstuk 7 bespreken we tot slot de sterke punten van de in dit werk ontwikkelde ex ante/prospectieve benadering, in die zin dat zij de middelen veel doeltreffender kan concentreren dan benaderingen die uitsluitend berusten op een potentieel vertekende

scenario-analyse. We belichten ook hoe deze benadering een transparantere manier biedt om ontwerpkeuzen te maken in het licht van talrijke onderliggende veronderstellingen en resterende onzekerheden.