



UHASSELT

KNOWLEDGE IN ACTION

Faculteit Bedrijfseconomische Wetenschappen

master in de toegepaste economische
wetenschappen: handelsingenieur

Masterthesis

**Analyse van product- en procesinnovatie binnen het domein van organische
fotovoltaïsche technologieën: bibliometrische literatuurstudie**

Pieter Fonteyn

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de toegepaste economische wetenschappen:
handelsingenieur, afstudeerrichting technologie-, innovatie- en milieumanagement

PROMOTOR :

Prof. dr. Sebastien LIZIN



UHASSELT

KNOWLEDGE IN ACTION

www.uhasselt.be
Universiteit Hasselt
Campus Hasselt:
Martelarenlaan 42 | 3500 Hasselt
Campus Diepenbeek:
Agoralaan Gebouw D | 3590 Diepenbeek

2017
2018



Faculteit Bedrijfseconomische Wetenschappen

master in de toegepaste economische
wetenschappen: handelsingenieur

Masterthesis

***Analyse van product- en procesinnovatie binnen het domein van organische
fotovoltaïsche technologieën: bibliometrische literatuurstudie***

Pieter Fonteyn

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de toegepaste economische wetenschappen:
handelsingenieur, afstudeerrichting technologie-, innovatie- en milieumanagement

PROMOTOR :

Prof. dr. Sebastien LIZIN

Woord vooraf

"Finis coronat opus"

Het einde bekroont het werk. In de Zwitserse Alpen komt er in augustus 2018 een einde aan dit project, dat 21 maanden voordien in december 2016 aanving met het kiezen van een onderwerp, toen nog op Erasmus in Finland. Het tot stand brengen van deze masterproef heeft tot de laatst mogelijke dag geduurd, maar dat is de vloek van het perfectionist-zijn – een opdracht is nooit volledig af, er is altijd ruimte voor verbetering. Daarom ben ik dankbaar dat er deadlines bestaan, die me helpen om af te ronden en tevreden te zijn met het bereikte resultaat.

Terugdenkend aan het begin, toen ik nog niets af wist van organische fotonvoltaïsche zonnecellen of bibliometrische literatuurstudies en het werk dat voor me lag onoverkomelijk veel leek te zijn, ben ik op dit moment ook oprecht tevreden. Ik heb namelijk veel bijgeleerd en dat is waar het uiteindelijk om draait. Zaken zoals het hebben van een goede aanpak voor de eerste fases van een onderzoek en het kunnen werken met verschillende soorten software en bestandstypes, gaan zeker nog van pas komen. Wie weet voer ik later nog wel eens een bibliometrische literatuurstudie uit, misschien zelfs voor de fun.

Natuurlijk ben ik niet de enige die tijd en energie gestoken heeft in het realiseren van deze masterproef. Ik wil mijn promotor Prof. dr. Sebastien Lizin graag bedanken voor zijn waardevolle input, de snelle reacties op e-mails, zijn geduld met mijn manier van werken en de aangename samenwerking tout court. Ook wil ik Prof. dr. Wouter Maes bedanken voor zijn bijdrage bij het valideren van de zoekopdracht voor het verzamelen van de benodigde bibliografische gegevens en dr. Dries Maes voor zijn feedback tijdens het masterproefseminarie. Ten slotte wil ik graag mijn ouders en broer bedanken voor hun begrip en steun tijdens deze stressvolle periode.

De lezer van dit werk wens ik een even leerrijke ervaring toe als de mijne.

Veel leesplezier.

Samenvatting

Het doel van deze masterproef was om met behulp van kwantitatieve methoden de product- en procesinnovatie binnen het onderzoeksdomein van organische fotonvoltaïsche technologieën in kaart te brengen voor de periode van 2008 tot 2017. Het onderzoeksdomein van organische fotonvoltaïsche technologieën (*organic photovoltaics*, of OPVs) werd onder andere gekozen omwille van de maatschappelijke relevantie. OPVs beloven namelijk een goedkoop, licht en flexibel alternatief te bieden voor de traditionele zonnecellen die op de markt zijn en kunnen een belangrijke rol spelen bij het verwezenlijken van de energietransitie van fossiele brandstoffen en kernenergie naar hernieuwbare energie. Een andere reden was dat de resultaten van dit onderzoek mogelijk van strategische waarde kunnen zijn voor het IMO-IMOMEC, een onderzoeksinstituting verbonden aan de Universiteit Hasselt die onder andere inzet op onderzoek naar OPV-technologieën.

De centrale onderzoeksvraag die aan de basis lag van dit werk, luidde als volgt: "Hoe zijn de belangrijke onderwerpen binnen het onderzoeksdomein van organische fotonvoltaïsche technologieën geëvolueerd gedurende de periode 2008-2017?" Om deze vraag te kunnen beantwoorden, werd eerst nader onderzocht wat OPVs zijn en hoe de evolutie van een onderzoeksdomein op een kwantitatieve manier geanalyseerd kan worden. Daarna werd overgegaan op het uitvoeren van de bibliometrische literatuurstudie.

In hoofdstuk 1 van deze masterproef wordt besproken wat organische fotonvoltaïsche technologieën zijn en welke grote thema's er voorkomen binnen dit onderzoeksdomein. Kippelen en Brédas (2009) omschrijven organische fotonvoltaïsche cellen als "technologieën om zonlicht om te zetten in elektriciteit, gebruik makend van dunne lagen van organische halfgeleiders". Het woord 'organisch' duidt in deze context dus niet op plantaardige of levende materie, maar op verbindingen uit de organische chemie. Belangrijke thema's binnen het onderzoek naar organische zonnecellen zijn het ontwikkelen van betere halfgeleidermaterialen voor de actieve laag, het optimaliseren van de morfologie van de actieve laag en het ontwerpen van een zo goed mogelijke zonnecelarchitectuur. Het onderzoek naar deze drie aspecten is erop gericht om te komen tot organische zonnecellen met een zo hoog mogelijke efficiëntie, een lange levensduur en lage productiekosten. Bovendien moet de productie van deze zonnecellen gemakkelijk opgeschaald kunnen worden tot op industrieel niveau en is het wenselijk dat ze een netto positieve milieu-impact hebben.

Hoofdstuk 2 geeft in veel detail weer hoe een kwantitatieve analyse van een onderzoeksdomein aangepakt kan worden. Er kunnen twee categorieën onderscheiden worden: enerzijds kunnen rechtstreekse kwantitatieve analyses op bibliografische gegevens van publicaties uitgevoerd worden om algemene statistieken te verkrijgen die de karakteristieken van het onderzoeksdomein cijfermatig uitdrukken, anderzijds kan gebruik gemaakt worden van netwerkanalysemethoden om inzicht te krijgen in de manier waarop de entiteiten die actief zijn binnen een onderzoeksdomein zich tot elkaar verhouden. Het gebruik van netwerkanalysemethoden biedt ruime mogelijkheden, van het opstellen van thematische kaarten van het onderzoeksdomein over het identificeren van belangrijke entiteiten tot het onderzoeken van samenwerkingsverbanden. Onafhankelijk van de gekozen analysecategorie, is de eerste stap van de analyse het verzamelen van bibliografische gegevens uit een databank. Na het verkennen en voorbereiden van de verzamelde data, kan bij het uitvoeren van rechtstreekse

kwantitatieve analyses meteen overgegaan worden tot het analyseren van de gegevens en het interpreteren van de resultaten. Wanneer netwerkanalysemethoden gebruikt worden, moet echter eerst een gepaste netwerkextractiemethode gekozen worden, moet beslist worden of de gegevens genormaliseerd moeten worden en moet een netwerkvisualisatiemethode gekozen worden. Dan pas volgt de analysestap. Nadat de netwerkstructuur ook visueel verduidelijkt is in een netwerkgrafiek met een gepaste opmaak, kan uiteindelijk overgegaan worden op het interpreteren van de bekomen resultaten.

Hoofdstuk 3 bevat de resultaten van de uitgevoerde bibliometrische literatuurstudie voor de periode van 2008 tot 2017. Qua materiaalgebruik werden de volgende belangrijke onderwerpen geïdentificeerd: het ontwikkelen van polymeren voor de actieve laag, het ontwikkelen van kleine organische moleculen voor de actieve laag, het ontwikkelen van fullereenafgeleiden als acceptormateriaal en het ontwikkelen van niet-fullerene acceptormaterialen. Het optimaliseren van de morfologie van de actieve laag vormde een onderwerp op zich. Wat de architectuur van organische zonnecellen betreft, werd veel onderzoek gedaan naar zonnecellen met een omgekeerde architectuur, zonnecellen met een tandemarchitectuur, het ontwikkelen van bufferlagen en zonnecellen met een enkele actieve laag bestaande uit drie-componentmengsels. Andere belangrijke onderwerpen waren het ontwikkelen van volledig-polymeerzonnecellen, het bestuderen van het ontstaan, transport en verlies van elektrische ladingen en het inzetten op een verbeterd lichtmanagement. Vier onderwerpen binnen het OPV-onderzoeksdomein werden in meer detail onderzocht: het gebruik van kleine organische moleculen, volledig-polymeerzonnecellen, het gebruik van de tandemarchitectuur en zonnecellen met een enkele actieve laag. Voor elk van deze onderwerpen werd de individuele evolutie bekeken en werden de belangrijkste publicaties geïdentificeerd.

Inhoudsopgave

Woord vooraf.....	1
Samenvatting	2
Probleemstelling.....	6
Maatschappelijk belang.....	6
Praktisch belang	8
Hoofdstuk 1: Organische fotonvoltaïsche technologieën	11
1.1 Situering ten opzichte van andere PV-technologieën	11
1.2 Werking OPVs	12
1.3 Evaluatie van OPV-prestaties	14
1.4 Kenmerken van OPV-toepassingen	15
1.5 Conclusie.....	17
Hoofdstuk 2: Kwantitatieve methodes voor literatuurstudie	19
2.1 Achtergrond.....	19
2.2 Bibliometrische analyse	21
Stap 1: Gegevens verzamelen.....	22
Stap 2: Voorbereiden van de gegevens	30
Stap 3: Netwerkextractie.....	32
Stap 4: Normalisatie	38
Stap 5: Keuze visualisatiemethode	39
Stap 6: Analyse.....	40
Stap 7: Opmaak netwerkgrafiek	43
2.3 Conclusie.....	43
Hoofdstuk 3. Bibliometrische literatuurstudie	45
3.1 Thematische kaarten van het onderzoeksdomein in de vorm van documentclusters	46
3.1.1 Methode.....	46
3.1.2 Resultaten.....	57
3.1.3 Bespreking resultaten	59
3.2 Analyse van belangrijke strekkingen binnen het onderzoeksdomein	61
3.2.1 Methode.....	61
3.2.2 Resultaten.....	64
3.2.3 Bespreking resultaten	93
3.3 Conclusie.....	95
Besluit	97
Bibliografie	98
Bijlagen	103
Bijlage 1: Bespreking overige netwerkextractiemethodes.....	103
Bijlage 2: Precisiecontrole van gedownloadede dataset	105
Bijlage 3: Details van de clusteranalyse van bibliografisch gekoppelde documenten	106
Clusters van documenten uit 2008.....	106
Clusters van documenten uit 2009.....	107

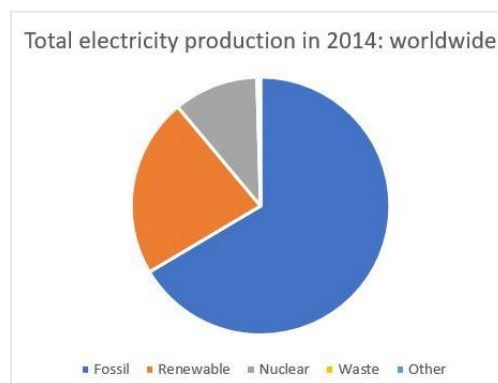
Clusters van documenten uit 2010.....	108
Clusters van documenten uit 2011.....	109
Clusters van documenten uit 2012.....	110
Clusters van documenten uit 2013.....	111
Clusters van documenten uit 2014.....	112
Clusters van documenten uit 2015.....	114
Clusters van documenten uit 2016.....	116
Clusters van documenten uit 2017.....	117

Probleemstelling

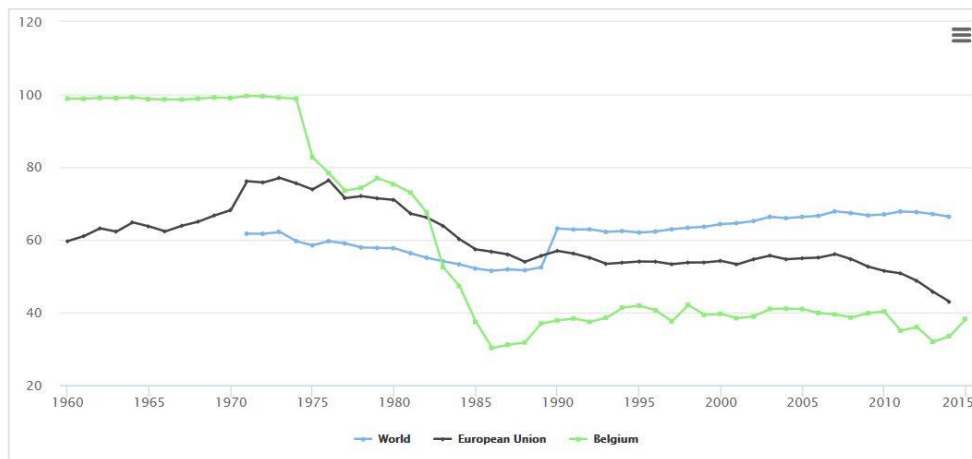
Het doel van deze masterproef is om met behulp van kwantitatieve methoden de product- en procesinnovatie binnen het onderzoeksdomein van organische fotovoltaïsche technologieën in kaart te brengen voor de periode van 2008 tot 2017. De keuze voor het onderzoeksdomein van organische fotovoltaïsche technologieën (*organic photovoltaics* (OPVs), ook organische zonnecellen (OSCs) genoemd) als onderwerp voor de strategische analyse heeft een dubbele reden: enerzijds is er het maatschappelijke belang van een transitie naar hernieuwbare energie in de context van duurzame ontwikkeling en anderzijds is er het mogelijke praktische belang van een dergelijke analyse voor IMO-IMOMECE, een onderzoeksinstituut verbonden aan de Universiteit Hasselt die onder andere inzet op onderzoek naar OPV-technologieën (UHasselt, 2017).

Maatschappelijk belang

Fossiele brandstoffen – olie, gas en kolen – zijn wereldwijd nog steeds de dominante energiebronnen voor elektriciteitsproductie: zowel uit gegevens van het Internationaal Energie-Agentschap (IEA, figuur 1) als uit gegevens gevonden op World-statistics.org (figuur 2) blijkt dat deze brandstoffen in 2014 instonden voor meer dan 66% van de totale elektriciteitsproductie (OECD/IEA, 2017; World-Statistics, 2017). Het uitputten van de natuurlijke energievoorraden van onze planeet houdt niet alleen economische risico's in (Fantazzini, Höök, & Angelantoni, 2011), het staat ook haaks op de gewenste transitie naar een meer duurzame wereld: een wereld waarin tegelijk belang wordt gehecht aan welvaart, sociale gelijkheid en zorg voor de planeet (United Nations, 2015), met als doel om in de behoeften van huidige generaties te voorzien zonder de mogelijkheid voor toekomstige generaties om in hun behoeften te voorzien in het gedrag te brengen (WCED, 1987). Daar komt nog bij dat de energiesector in zijn huidige vorm met een bijdrage van ongeveer 60% van de totale globale broeikasgasuitstoot de grootste schuld heeft aan de klimaatverandering (United Nations, 2017a).



Figuur 1: Totale wereldwijde elektriciteitsproductie 2014. Gebaseerd op IEA gegevens uit Statisticssearch © OECD/IEA 2017, www.iea.org/statistics. License: www.iea.org/t&c



Figuur 2: Elektriciteitsproductie van olie-, gas-, en koolbronnen (% van totaal)

De Verenigde Naties heeft de noodzaak voor een transformatie van de globale energiesector erkend door de doelstelling 'betaalbare en schone energie' op te nemen als een van hun zeventien Duurzame Ontwikkelingsdoelen tegen 2030 (United Nations, 2017b). Alle vijf actiepunten onder deze doelstelling kunnen aan hernieuwbare energie gerelateerd worden, maar actiepunt twee geeft het belang ervan expliciet weer: "tegen 2030 moet het aandeel aan hernieuwbare energie in de globale energiemix substantieel verhoogd worden" (United Nations, 2015). De Europese Unie zet al langer in op het gebruik van hernieuwbare bronnen voor energieproductie, vanwege het belang bij (1) het verminderen van de uitstoot van broeikasgassen en het tegengaan van de klimaatverandering, (2) het verhogen van de zekerheid en onafhankelijkheid van energievoorziening, (3) het promoten van technologische vooruitgang en innovatie en (4) het bieden van kansen voor werkgelegenheid en regionale ontwikkeling (European Parliament & Council of the European Union, 2009).

Op dit punt dient ook de speciale positie van nucleaire energie wat verder toegelicht te worden. Nucleaire elektriciteitsproductie is geen hernieuwbare energiebron, maar wordt volgens Verbruggen en Yurchenko (2017) wel door het IEA en het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) beschouwd als een optie voor toekomstige energieproductie met lage CO₂-uitstoot. Verbruggen en Yurchenko zelf concluderen echter dat nucleaire energie niet als duurzaam beschouwd mag worden en dat deze energiebron niet compatibel is met de variabiliteit van hernieuwbare energieproductie, waardoor een geleidelijke afbouw van nucleaire energie ten voordele van hernieuwbare energie volgens hen het meest duurzame ontwikkelingspad is. Dit scenario betekent dat hernieuwbare energie op termijn vervanging zou moeten bieden voor zowel olie, gas en kolen, als voor nucleaire energie – wat neerkomt op bijna 100% afhankelijkheid van hernieuwbare energieproductie (op figuur 2 is te zien dat nucleaire energie in 2014 een relatief grote bijdrage van ongeveer 10% leverde aan de totale wereldwijde elektriciteitsproductie). Een recente studie door Pleßmann en Blechinger (2017) ondersteunt de haalbaarheid van een dergelijk scenario voor de EU.

Uit het voorgaande kan besloten worden dat het maatschappelijke belang van een transitie naar hernieuwbare energiebronnen – en bijgevolg ook het belang van onderzoek naar deze bronnen – nauwelijks te overschatten is. Als een onderdeel van onderzoek naar hernieuwbare energiebronnen, is ook onderzoek naar OPV-technologieën van groot belang bij de overgang naar een meer duurzame

wereld, zeker gezien de voordelen die deze technologieën kunnen bieden in vergelijking met de gangbare zonnecellen (Darling & You, 2013).

Praktisch belang

Zoals eerder al werd aangehaald, was de interesse in OPVs uit zowel de academische als de economische wereld de afgelopen jaren erg groot. Die belangstelling heeft geleid tot veel nieuwe inzichten en vorderingen in het OPV-onderzoeksdomein (Dou et al., 2013; Su, Lan, & Wei, 2012), wat ook blijkt uit het hoge tempo waaraan academische publicaties over dit onderwerp elkaar de afgelopen jaren opvolgden. Ter illustratie: op 23 mei 2017 leverde het ingeven van de zoektermen "organic photovoltaics" in de UHasselt Discovery Service, de centrale zoekinterface van de Universiteit Hasselt, 48.820 zoekresultaten op na limitatie tot *scholarly & peer reviewed journal articles* (UHasselt, 2017c). Daarvan verschenen er maar liefst 40.961 (bijna 84%) verschenen in de periode 2007-2016, oftewel gemiddeld meer dan 11 academische publicaties per dag.

Dat het onderzoeksveld sterk geëvolueerd is, staat dus vast. De interessante vraag die na deze vaststelling gesteld kan worden, is: hoe is het geëvolueerd? Experts in het onderzoek naar organische zonnecellen kunnen daar ongetwijfeld een kwalitatief antwoord op bieden. Voor hen is het namelijk belangrijk om steeds op de hoogte te zijn van de interessante inhoudelijke ontwikkelingen die zich voordoen en die samengevat worden in publicaties zoals die van Kippelen en Brédas (2009), Spanggaard en Krebs (2004) en Dou et al. (2013). De vraag kan echter ook op een andere manier beantwoord worden, namelijk door de evolutie in het onderzoek op een kwantitatieve manier in kaart te brengen. Objectieve cijfers kunnen de kwalitatieve bevindingen van onderzoeksexperten verduidelijken, ondersteunen of weerleggen, of zelfs volledig nieuwe informatie blootleggen. Eerdere toepassingen van dergelijke kwantitatieve analyses in verwante onderzoeksdomeinen (Choe, Lee, Kim, & Seo, 2016; Choe, Lee, Seo, & Kim, 2013; Dong, Xu, Luo, Cai, & Gao, 2012) hebben bijvoorbeeld informatie opgeleverd in de vorm van algemene statistieken over de evolutie van het onderzoeksdomein in de tijd, publicatiestatistieken per land en per wetenschappelijk tijdschrift, statistieken over de meest voorkomende onderwerpen en titel- of kernwoorden binnen het domein met de evolutie van hun relatieve belang doorheen de jaren, en statistieken over het belang van en de informatie-uitwisseling tussen verschillende spelers in het domein.

Een kwantitatieve analyse van een onderzoeksdomein brengt dus informatie aan het licht die in het gepubliceerde onderzoek aanwezig is, maar op een onderliggend niveau dat enkel indirect toegankelijk is. Zonder dergelijke analyses hebben onderzoeksexperten in het beste geval vermoedens over de evolutie van het domein; in het slechtste geval zijn ze volledig blind voor *the bigger picture*. Dat is ook de reden waarom dit type onderzoek van strategisch belang kan zijn: het is als het ware een marktanalyse van het onderzoeksveld, die inzichten biedt in de evolutie en het toekomstpotentieel van het domein en die een onderzoeksinstelling kan helpen bij het identificeren van zijn sterktes en zwaktes en van de kansen en bedreigingen die zich voordoen binnen het domein. Het nut van zo een strategische analyse gaat echter verder dan de academische wereld: bedrijven zijn steeds op zoek naar nieuwe economische opportuniteiten en ook overheden hebben er baat bij, omdat het de beleidsvorming kan helpen sturen.

Het uitvoeren van een strategische analyse van het onderzoeksdomein van OPV-technologieën kan waardevol zijn voor IMO-IMOMEC, omdat zij onder andere onderzoek doen naar OPVs (UHasselt, 2017). De resultaten van deze kwantitatieve 'marktanalyse' kunnen ondersteuning bieden bij het sturen van hun onderzoek en bij het verstevigen van hun concurrentiepositie in het innovatielandschap.

Hoofdstuk 1: Organische fotovoltaïsche technologieën

Het doel van dit hoofdstuk is om de lezer een basisinzicht te bieden in wat OPV-technologieën precies zijn, hoe ze werken en wat belangrijke thema's zijn binnen het onderzoek naar deze technologieën. In eerste instantie zal het onderzoeksdomein van OPVs gesitueerd worden ten opzichte van de andere fotovoltaïsche technologieën die bestaan. Daarna zal een rudimentaire schets gegeven worden van de werking van een organische zonnecel, gevolgd door een bespreking van de manieren waarop de prestaties van dit type cel gemeten worden. Ten slotte wordt een overzicht gegeven van de verschillende aspecten van OPV-technologieën die op veel onderzoeks aandacht konden rekenen. Op het einde van dit hoofdstuk worden de volgende onderzoeksvragen beantwoord:

1. Wat zijn organische fotovoltaïsche technologieën?
2. Wat zijn belangrijke onderwerpen binnen het OPV-onderzoeksdomein?

1.1 Situering ten opzichte van andere PV-technologieën

Volgens Kippelen en Brédas, werd het fotovoltaïsch effect voor het eerst bestudeerd door Becquerel in 1839 en werd de eerste moderne technologie voor het omzetten van zonlicht in elektriciteit gerapporteerd door Chapin et al. in 1954 (Kippelen & Brédas, 2009). Deze technologie was gebaseerd op een enkele p-n junctie in silicium en behaalde een omzettingsefficiëntie (*power conversion efficiency*, PCE) van 6%, wat betekent dat zes procent van de energie van het invallende zonlicht werd omgevoerd in elektrische energie. Na verder onderzoek en het verhogen van de efficiëntie, bereikte deze technologie de consumentenmarkt als een groene, duurzame energiebron en tegen 2009 werd de markt gedomineerd door grote modules van aaneengekoppelde zonnecellen in de vorm van wafers van kristallijn silicium (Kippelen & Brédas, 2009).

Onderzoekers gingen echter verder met hun zoektocht naar PV-technologieën met een hoge omzettingsefficiëntie en lage productiekosten, wat ertoe leidde dat na de zonnecellen van kristallijn silicium een tweede generatie PV-technologieën, de dunne-filmzonnecellen, ontwikkeld werd. Voor dit type zonnecellen werd gebruik gemaakt van andere halfgeleiders die beter fotonen konden absorberen dan het kristallijne silicium en bovendien meteen op substraten met een grotere oppervlakte aangebracht konden worden: amorf silicium, halfgeleiders uit de II-VI groep (bijvoorbeeld CdS en CdTe) en chalcogeniden (bijvoorbeeld CuInSe₂ (CIS) en CuInGaSe₂ (CIGS)). Zonnecellen van deze generatie werden op de consumentenmarkt geïntroduceerd, maar haalden niet dezelfde populariteit als de zonnecellen van de eerste generatie. (Kippelen & Brédas, 2009)

Sinds de jaren 90 werd er veel onderzoek verricht naar organische halfgeleidermaterialen, wat uiteindelijk resulteerde in de opkomst van organische solid-state elektronica zoals de organische lichtemitterende diode (OLED), organische veld-effecttransistor (OFET) en organische fotovoltaïsche technologieën (OPV). Zonnecellen die gebaseerd zijn op organische halfgeleiders of geen gebruik maken van de conventionele enkele p-n junctie worden vaak beschouwd als PV-technologieën van de derde generatie. Deze generatie omvat dus meerdere soorten zonnecellen: de elektrochemische *dye-sensitized solar cells* (DSSCs) op basis van een elektrolyt, multi-junctiezonnecellen met halfgeleiders uit de groepen IV en III-V, hybride zonnecellen waarbij organische halfgeleiders worden

gecombineerd met anorganische *quantum dots* of nanogestructureerde anorganische halfgeleiders en ten slotte nog de volledig organische solid-state zonnecellen. (Kippelen & Brédas, 2009)

Binnen dit onderzoek wordt er hoofdzakelijk gefocust op de volledig organische solid-state zonnecellen (het gebruik van 'organische fotovoltaïsche technologieën'/OPV' en 'organische zonnecellen'/OSC' verwijst vanaf hier naar dat specifieke type zonnecellen). Kippelen en Brédas (2009) omschrijven OPV-toepassingen als "technologieën om zonlicht om te zetten in elektriciteit, gebruik makend van dunne lagen van organische halfgeleiders". Hoewel Kearns en Calvin in 1958 al een paper over deze technologie publiceerden, was het Tang die in 1986 een eerste mijlpaal in het OPV-onderzoek bereikte door een organische zonnecel te ontwerpen die een omzettingsefficiëntie van 1% haalde. Onderzoekers zijn nadien interesse blijven tonen in OPV-technologieën, omdat deze een aantal voordelen bieden ten opzichte van de anorganische zonnecellen: de fysieke eigenschappen van de organische halfgeleidermaterialen kunnen gemakkelijk aangepast worden door de chemische structuur van de moleculen te veranderen en bovendien kunnen deze moleculen op een relatief lage temperatuur verwerkt worden tot zonnecellen, waardoor er energie bespaard wordt, wat de productiekosten drukt, en er meer keuzemogelijkheden zijn qua substraat. Het substraat is de drager waarop de werkzame lagen van de zonnecel worden afgezet en bij OPVs kan daar bijvoorbeeld een materiaal als plastic voor gebruikt worden, wat de mogelijkheid biedt om lichte toepassingen te ontwikkelen die op een flexibele manier vormgegeven kunnen worden en minder kosten om te produceren. (Kippelen & Brédas, 2009)

Sinds een paar jaar zijn perovskietzonnecellen een hot topic geworden binnen het onderzoeksdomein van PV-technologieën. De meer dan 2000 publicaties over dit onderwerp getuigen van de grote onderzoeksinteresse, die geleid heeft tot een snelle evolutie en volwassenwording van deze technologie: terwijl de maximale omzettingsefficiëntie van organo-metaal-halide perovskietzonnecellen in 2009 nog 3,8% bedroeg, steeg de efficiëntie tot maar liefst 22,1% in 2016. Doordat dit type zonnecel bij lage temperatuur vanuit een oplossing bereid kan worden, belooft het een PV-technologie met een hoge efficiëntie en lage productiekosten te worden. Vanwege de status die perovskietzonnecellen verworven hebben binnen het onderzoek naar PV-technologieën en de invloed die dit mogelijk gehad heeft op de evolutie van het OPV-onderzoeksdomein, zal ook dit type zonnecellen nader worden onderzocht bij de bibliometrische literatuurstudie. (Correa-Baena et al., 2017)

1.2 Werking OPVs

De paper van Mazzi en Luscombe (2015) geeft een goed idee van de werking van een organische fotovoltaïsche cel. De auteurs zeggen hier zelf over dat hun vereenvoudigde voorstelling nuttig is om een algemeen begrip te krijgen van de processen die plaatsvinden bij het opwekken van energie in een OPV-toepassing. Deze paragraaf geeft in grote lijnen de werking van organische zonnecellen weer, gebaseerd op de uitleg gegeven door Mazzi en Luscombe (2015).

In tegenstelling tot een p-n junctie in anorganische zonnecellen, wat het raakvlak is tussen twee onderdelen met een verschillende dotering (onzuiverheden ingebracht in het atoomrooster) binnen één kristal van een bepaald materiaal, wordt er bij organische zonnecellen gebruik gemaakt van een overgang tussen twee materialen, namelijk het p-type donormateriaal en het n-type

acceptormateriaal. Het p-type donormateriaal heeft het kleinste ionisatiepotentiaal van de twee, wat betekent dat dit het materiaal is waarbij een elektron het makkelijkst vanuit het hoogst bezette moleculair orbitaal (*highest occupied molecular orbital*, HOMO) geëxciteerd wordt onder invloed van licht. Het n-type acceptormateriaal heeft daarentegen de grootste elektronenaffiniteit, wat betekent dat het laagstgelegen onbezette moleculaire orbitaal (*lowest unoccupied molecular orbital*, LUMO) zich op een lager energieniveau bevindt dan dat van het p-type materiaal, waardoor het n-type materiaal een betere elektronacceptor is.

Wanneer een foton met een energetische waarde groter dan het HOMO-LUMO bandgap van het donormateriaal invalt op de organische zonnecel, kan zijn energie overgedragen worden op een gebonden elektron in het donormateriaal, waardoor dit elektron geëxciteerd wordt van het HOMO naar het LUMO. In tegenstelling tot de werking van anorganische zonnecellen, waarbij het vrijgekomen elektron en het ontstane elektrongat vrije ladingdragers zijn die door de p-n junctie van elkaar gescheiden worden, leidt excitatie van elektronen bij organische zonnecellen tot het ontstaan van excitons. Een exciton is een gebonden toestand van een elektron en een elektrongat, te wijten aan de elektromagnetische aantrekkingskracht tussen beide deeltjes met een tegengestelde lading. Om te komen tot het opwekken van een elektrische stroom die nuttig gebruikt kan worden, moeten de elektronen en elektronengaten in excitons van elkaar gescheiden worden, zodat vrije ladingdragers ontstaan. Hiervoor moeten de excitons doorheen het donormateriaal diffunderen naar de contactzone van het donormateriaal met het acceptormateriaal.

Wanneer het verschil tussen de LUMO-energieniveaus van het donormateriaal en het acceptormateriaal (met andere woorden het verschil in de elektronenaffiniteit van beide materialen) groter is dan de aantrekkingskracht tussen het elektron en het elektrongat van een exciton, zal het elektron met grote waarschijnlijkheid vervallen van het LUMO van het donormateriaal tot het LUMO van het acceptormateriaal. Hierdoor ontstaat een zogenaamd charge transfer-complex, waarbij het elektron van het exciton zich in het acceptormateriaal bevindt, terwijl het elektrongat in het donormateriaal achterblijft. Wanneer de afstand tussen beide ladingdragers groot genoeg wordt om de elektromagnetische aantrekkingskracht te overwinnen, valt het exciton uiteen in vrije ladingdragers. Het vrije elektron kan zich vervolgens doorheen het acceptormateriaal verplaatsen in de richting van de kathode en het vrije elektrongat doorheen het donormateriaal in de richting van de anode, zodat ze in de vorm van elektrische stroom arbeid kunnen verrichten in een extern circuit.

Er zijn echter een aantal manieren waarop de opgevangen lichtenergie verloren kan gaan in de zonnecel. Ten eerste heeft een exciton slechts een beperkte levensduur, waardoor het belangrijk is dat de diffusie naar de contactzone en het opsplitsen in vrije ladingdragers snel gebeurt; als de afstand tot de contactzone te groot is, zal het elektron recombineren met het elektrongat en gaat de opgenomen energie verloren. Ten tweede gaat een bepaalde hoeveelheid energie verloren wanneer het elektron vervalt van het LUMO van de donor tot het LUMO van de acceptor. Dit is een noodzakelijk verlies om de ladingdragers in het exciton van elkaar te kunnen scheiden, maar het verschil tussen de elektronenaffiniteit van het donor- en acceptormateriaal moet zo precies mogelijk afgestemd worden om te voorkomen dat er meer energie verloren gaat dan wat nodig is. Het verschil tussen het HOMO-energieniveau van het donormateriaal en het LUMO-energieniveau van het acceptormateriaal, geeft dan ook een benadering van de maximale hoeveelheid lichtenergie die de

zonnecel in theorie kan omzetten in elektrische energie. Ten derde kunnen het elektron en het elektrongat ook na het ontstaan van het charge transfer-complex recombineren over de scheiding van de twee materialen heen, wanneer de afstand tussen beide ladingdragers niet groot genoeg wordt om aan de elektromagnetische aantrekkingskracht te ontsnappen. Dit fenomeen wordt in het Engels *geminate recombination* genoemd. Ten slotte kan zelfs na de splitsing van het exciton recombinatie optreden, wanneer de gevormde vrije ladingdragers tijdens het transport naar de elektrodes recombineren met andere ladingdragers die van nature aanwezig zijn in het materiaal. Dit laatste recombinatieproces heeft het meeste invloed op de efficiëntie van de zonnecel. Mazzio en Luscombe (2015) besluiten dat het minimaliseren van het energieverlies en het verlies van ladingdragers een belangrijk doel is bij het verbeteren van de efficiëntie van OPV-technologieën.

1.3 Evaluatie van OPV-prestaties

Volgens Mazzio en Luscombe (2015) is de omzettingsefficiëntie of de *power conversion efficiency*, afgekort als PCE, de voornaamste prestatie maatstaf voor zonnecellen. Het is de verhouding van de maximale elektrische energie die een zonnecel kan opwekken gedurende een bepaald tijdsinterval (het elektrisch vermogen van de cel) tot de totale hoeveelheid lichtenergie die inviel op de zonnecel gedurende dat tijdsinterval (het invallende optisch vermogen).

Het maximale elektrisch vermogen dat een zonnecel kan genereren, kan ook uitgedrukt worden als het product van drie kenmerkende eigenschappen van de cel: het maximale elektrochemische potentiaal, oftewel de elektrische spanning bij een open circuit (*open circuit voltage*, V_{oc}), de maximale elektrische stroomdichtheid (elektrische stroom per eenheid oppervlakte), die optreedt bij kortsluiting (*short circuit current density*, J_{sc}) en de zogenaamde *fill factor*. De fill factor is een maatstaf voor de kwaliteit van de zonnecel en geeft een indicatie van hoe gemakkelijk de opgewekte elektrische ladingen de zonnecel kunnen verlaten. Het is de verhouding van het product van de elektrische spanning en de elektrische stroomdichtheid op het moment dat de cel zijn maximale vermogen levert (respectievelijk V_{MP} en J_{MP}), tot het product van de theoretische maxima, zijnde V_{oc} en J_{sc} . Hoe dichter de fill factor de waarde één benadert, hoe beter de zonnecel. (Mazzio & Luscombe, 2015)

Een andere maatstaf om de efficiëntie te beoordelen, is de *Energy Payback Time* (EPBT), de tijd die het een PV-toepassing kost om even veel energie op te wekken als de hoeveelheid energie die nodig is om de module te produceren en aan het einde van zijn gebruikstijd weer uit dienst te nemen (Mazzio & Luscombe, 2015). De EPBT is dus de verhouding van de verbruikte energie over de hele levensduur tot de hoeveelheid energie die geproduceerd wordt gedurende het tijdsinterval (dagen, maanden, jaren) waarin de EPBT uitgedrukt dient te worden. De EPBT biedt een ruimer beeld op de efficiëntie van zonnecellen dan de PCE: PV-toepassingen met een hoge efficiëntie die energie-intensief zijn om te produceren, kunnen qua EPBT slechter scoren dan modules met een lagere efficiëntie.

Beide efficiëntie maatstaven geven een idee van de kwaliteit van de zonnecel, maar om na te gaan of een technologie ook levensvatbaar is op de consumentenmarkt, moeten er meer factoren in rekening worden gebracht. Eigenschappen waar vanuit de industrie veel belang aan wordt gehecht, zijn naast hoge efficiëntie ook lage productiekosten, een hoge stabiliteit of lange levensduur en goede

schaalbaarheid van het productieproces, zodat er op industriële schaal geproduceerd kan worden. Bovendien dient ook de milieu-impact van de zonnecellen meegenomen te worden in de evaluatie.

Een eerste prestatie maatstaf die een meer economisch gerichte beoordeling mogelijk maakt, is de *Levelized Cost of Energy* (LCOE). Dit is de verhouding van de totale kosten over de hele levenscyclus van de PV-toepassing (productiekosten, gebruikskosten, onderhoudskosten en kosten aan het einde van de levensduur) tot de totale hoeveelheid energie die geproduceerd wordt gedurende de levensduur. De LCOE wordt uitgedrukt in dollars of euro's per kilowattuur, waardoor het een handige maatstaf is om de kosteneffectiviteit van verschillende energiebronnen te vergelijken. (Mazzio & Luscombe, 2015)

Recent ontwikkelden Min et al. (2017) een *Industrial Figure of Merit* (i-FOM) voor organische halfgeleidermaterialen die er op gericht is om de PCE-maatstaf in relatie te brengen met de productiekosten en de levensduur van een OPV-technologie. Volgens hen zijn de materiaalkosten de belangrijkste kostencomponent bij de productie van dit type zonnecellen, zelfs op een kleine industriële schaal. Met deze vaststelling motiveerden zij het gebruik van een maatstaf voor de synthese complexiteit van de organische halfgeleidermaterialen als benadering voor de productiekosten. Met een maatstaf voor de stabiliteit ter vervanging van de levensduur, definieerden zij de i-FOM als de verhouding van het product van de PCE en de stabiliteit tot de synthese complexiteit. Een PCE van 10% gecombineerd met een stabiliteit van 100% als benadering voor een levensduur van minstens tien jaar en een synthese complexiteit van 50%, levert een i-FOM-score van 20% op, wat volgens de auteurs een realistische streefwaarde moet zijn bij de verdere ontwikkeling van materialen voor OPV-technologieën.

1.4 Kenmerken van OPV-toepassingen

In de zoektocht naar efficiënte organische zonnecellen met een lage productiekost en een hoge stabiliteit die bovendien gemakkelijk te produceren zijn, is er onderzoek gedaan naar verschillende aspecten van OPV-technologieën. Naast het ontwikkelen van betere halfgeleidermaterialen voor de actieve laag, is ook bestudeerd hoe de morfologie van de actieve laag geoptimaliseerd kon worden en wat de meest geschikte architectuur voor deze zonnecellen zou zijn.

Volgens Mazzio en Luscombe (2015) was het ontwikkelen van nieuwe donor- en acceptormaterialen vooral gericht op het verkrijgen van materialen met geschikte HOMO-LUMO bandgaps en energieniveaus, goede eigenschappen voor het transport van vrije ladingdragers, voldoende stabiliteit en de mogelijkheid om zonnecellen vanuit een oplossing te bereiden. Als donormateriaal werden aanvankelijk polyfenyleen-vinyleenafgeleiden gebruikt, waarna werd overgeschakeld op polythiofene materialen zoals het populaire poly(3-hexylthiofeen). Om tot polymere halfgeleiders met een klein HOMO-LUMO bandgap te komen, werden later donor/acceptor (D/A) polymeren met afwisselend elektronrijke en elektronarme regio's geïntroduceerd, net als polymeren met een gestabiliseerde chinoïde (*quinoidal*) vorm. Ten slotte won het gebruik van kleine organische moleculen als donormateriaal aan populariteit. Als acceptormateriaal werd het gebruik van verschillende soorten fullereenafgeleiden onderzocht.

Wat de morfologie van de actieve laag betreft, werd eerst onderzocht of het mogelijk was om organische zonnecellen te maken met een enkele actieve laag bestaande uit één organische halfgeleider. Toen dit onsuccesvol bleek, werd het gebruik van een dubbel gelaagde actieve laag met een planaire contactzone tussen een donor- en acceptormateriaal geïntroduceerd. Voor deze morfologie moest men echter vaststellen dat de efficiëntie beperkt was, omdat enkel excitonen die dicht genoeg bij de contactzone ontstonden lang genoeg overleefden om naar de contactzone te diffunderen en daar in vrije ladingdragers te splitsen. De best presterende morfologie is de bulk-heterojunctiemorfologie, waarbij er een groot contactoppervlak is tussen het donor- en acceptormateriaal omdat beide materialen doorheen de volledige bulk van de actieve laag met elkaar verstrengeld zijn. De ideale morfologie van de actieve laag is een verstrengeld netwerk van donor- en acceptormateriaal waarbij de domeinen van elk type materiaal ongeveer zo groot zijn als de afstand die een exciton kan afleggen tijdens zijn levensduur (ongeveer 10 nanometer), waarbij er voldoende contactoppervlak is tussen beide types materialen zodat zoveel mogelijk excitonen kunnen splitsen in vrije ladingdragers en waarbij de vrije ladingdragers doorheen de twee materialen naar de elektrodes toe kunnen bewegen zonder ingesloten te raken door het andere materiaal. Factoren die de morfologie van de actieve laag beïnvloeden, zijn de eigenschappen van het solvent waaruit de actieve laag bereid wordt, de eigenschappen van de donor- en acceptormaterialen en hun concentraties, de gekozen uitgloeimethode en -omstandigheden en het gebruik van solventadditieven. Het uitgloeien is een belangrijke manier om de prestaties van de zonnecel te verbeteren, omdat het zorgt voor een betere verticale scheiding van het donor- en acceptormateriaal, wat het transport van vrije ladingen naar de elektrodes vergemakkelijkt. De twee mogelijke uitgloeimethodes zijn thermisch uitgloeien (verhitting van de actieve laag) en solventuitgloeien (introductie van solvent of solventdamp in de actieve laag). Het toevoegen van solventadditieven wordt gedaan wanneer de actieve laag polymeren met een klein HOMO-LUMO bandgap bevat die niet goed reageren op het uitgloeiproces. (Mazzio & Luscombe, 2015)

Met de architectuur van de zonnecel wordt de opbouw en de volgorde van de verschillende lagen in de cel bedoeld. Mazzio en Luscombe (2015) bespreken enkel celarchitecturen voor zonnecellen waarvan de actieve laag de bulk-heterojunctiemorfologie heeft. Bij de standaardarchitectuur passeert het invallend licht eerst door het substraat en dan achtereenvolgens door de transparante anode, de elektrongattransportlaag, de actieve laag en de elektrontransportlaag, waarna de overgebleven fotonen kunnen weerkaatsen op de reflectieve kathode achteraan in de cel. Bij de omgekeerde architectuur is de volgorde van de lagen na het substraat precies omgekeerd, met een transparante kathode op het substraat en een reflectieve anode achteraan de cel. In vergelijking met de standaardarchitectuur, is de omgekeerde architectuur minder gevoelig voor degradatie en meer geschikt voor productie op industriële schaal. De tandemarchitectuur ten slotte komt grotendeels overeen met de omgekeerde architectuur, met dat verschil dat er minstens twee afzonderlijke actieve lagen gebruikt worden, die van elkaar gescheiden zijn door een connectielaag. Elke actieve laag kan licht uit een ander deel van het spectrum absorberen, waardoor een groter deel van het invallende licht nuttig gebruikt kan worden en de efficiëntie van zonnecellen met deze architectuur veel hoger ligt dan die van de andere celarchitecturen. De complexiteit van de tandemarchitectuur is echter een nadeel, want zonnecellen met deze architectuur kunnen minder makkelijk op industriële schaal geproduceerd worden en kosten ook meer om te produceren (Gasparini et al., 2016). Daarom werd

recentelijk het gebruik van drie componenten (twee donormaterialen en één acceptormateriaal of omgekeerd) in één actieve laag onderzocht, als eenvoudig alternatief voor de complexe tandemzonnecellen (Gasparini et al., 2016).

1.5 Conclusie

Kippelen en Brédas (2009) omschrijven organische fotovoltaïsche cellen als “technologieën om zonlicht om te zetten in elektriciteit, gebruik makend van dunne lagen van organische halfgeleiders”. OPV-technologieën beloven een aantal voordelen te bieden ten opzichte van hun anorganische voorgangers, zoals lagere productiekosten, bewerkbare fysieke eigenschappen en mogelijkheden voor de ontwikkeling van lichte zonneceltoepassingen die op een flexibele manier vormgegeven kunnen worden.

Belangrijke thema’s binnen het onderzoek naar organische zonnecellen zijn het ontwikkelen van betere halfgeleidermaterialen voor de actieve laag, het optimaliseren van de morfologie van de actieve laag en het ontwerpen van een zo goed mogelijke zonnecelarchitectuur. Het onderzoek naar deze drie aspecten is erop gericht om te komen tot organische zonnecellen met een zo hoog mogelijke efficiëntie, een lange levensduur en lage productiekosten. Bovendien moet de productie van deze zonnecellen gemakkelijk opgeschaald kunnen worden tot op industrieel niveau en is het wenselijk dat ze een netto positieve milieu-impact hebben.

Hoofdstuk 2: Kwantitatieve methodes voor literatuurstudie

Een literatuurstudie uitvoeren kan zowel op een kwalitatieve als een kwantitatieve manier. De kwalitatieve literatuurstudie is waarschijnlijk de meest gebruikte van de twee: het vormt de basis voor het theoretisch gedeelte van iedere wetenschappelijke publicatie en betreft het opzoeken en lezen van eerder gepubliceerde wetenschappelijke literatuur, met als doel om het onderzoek in context te plaatsen en het gebruik van bepaalde theorieën, uitspraken en methodes te verantwoorden. Bij een kwalitatieve literatuurstudie wordt gewoonlijk dus een eerder beperkt aantal publicaties inhoudelijk onderzocht om nieuw onderzoek te kaderen. Anderzijds, worden kwalitatieve literatuurstudies ook uitgevoerd als basis voor overzichtsartikels (*review articles*), die geschreven worden om de stand van zaken in een bepaald onderzoeksdomein aan te geven. In dat geval is het belangrijk dat de onderzoekers alle relevante publicaties binnen het onderzoeksdomein kunnen identificeren en analyseren, om geen vertekend beeld te geven van de staat van het onderzoek – een taak die strikt voorbehouden lijkt te zijn voor ervaren onderzoekers binnen het specifieke onderzoeksdomein.

Bij een kwantitatieve literatuurstudie wordt een set publicaties onderzocht op een meta-niveau: niet elke publicatie wordt inhoudelijk geanalyseerd, maar interessante eigenschappen van de verzameling publicaties worden met behulp van wiskundige en statistische methodes in kaart gebracht. Hoewel een kwantitatieve literatuurstudie niet zozeer bijdraagt tot een gedetailleerd begrip van de inhoud van het onderzoek binnen een onderzoeksdomein, is het een waardevolle aanpak voor het vaststellen van de stand van zaken in dat domein. Op dat vlak heeft het ook een aantal voordelen in vergelijking met een kwalitatieve literatuurstudie: omdat niet iedere publicatie gelezen moet worden, kan de literatuur op een beperkte hoeveelheid tijd toch op een grote schaal geëvalueerd worden, waardoor de objectiviteit van de literatuurstudie toeneemt en ook onderzoekers met een eerder beperkte ervaring binnen dat specifieke onderzoeksdomein de staat van het onderzoek kunnen evalueren.

Als student Handelsingenieur heb ik geen ervaring met onderzoek naar organische fotonvoltaïsche technologieën. Om de evolutie in het onderzoek naar dergelijke technologieën voor een periode van tien jaar in kaart te brengen, zal dus gebruik gemaakt worden van kwantitatieve methodes. De kwalitatieve literatuurstudie in het vorige hoofdstuk heeft als doel een basisinzicht in het onderzoeksdomein te verschaffen, dat later van pas zal komen in de interpretatiefase van de kwantitatieve literatuurstudie. Het doel van dit hoofdstuk is om een antwoord te vinden op de volgende onderzoeksvragen:

3. Welke kwantitatieve methodes zijn beschikbaar om de onderwerpen binnen een onderzoeksdomein in kaart te brengen?
4. Hoe wordt een kwantitatieve literatuurstudie uitgevoerd?

2.1 Achtergrond

Bij een kwantitatieve literatuurstudie worden kwantitatieve onderzoeksmethodes gebruikt om informatiestromen tussen bepaalde entiteiten te analyseren. Omdat dit een breed toepasbare onderzoeksaanpak is, zijn er in de loop der jaren meerdere begrippen ontstaan die grotendeels dezelfde lading dekken qua gebruikte methodes, maar die verschillen door de context van gebruik

(Hood & Wilson, 2001). Deze situatie leidt gemakkelijk tot onduidelijkheid en verwarring, dus is het belangrijk om de verschillende begrippen die in gebruik zijn kort toe te lichten.

Hood en Wilson (2001) verschaffen een uitgebreide bespreking van de drie belangrijkste begrippen – bibliometrie, scientometrie en informetrie. In hun paper lijsten ze voor elk meerdere definities op, die gecombineerd kunnen worden in een poging om de essentie van ieder begrip te vatten:

- Bibliometrie is de kwantitatieve studie van literatuur zoals weergegeven in bibliografieën, met als doel om de aard en ontwikkeling van een discipline te belichten door de toepassing van wiskundige en statistische methoden op boeken en andere communicatiemiddelen, voornamelijk in de context van bibliotheekwetenschappen.
- Scientometrie is de studie van de kwantitatieve aspecten van wetenschap als een discipline of economische activiteit, met als doel om de sociologische aspecten van wetenschap te belichten en bij te dragen aan de vorming van wetenschapsbeleid door het kwantitatief analyseren van wetenschappelijke activiteit in de brede zin.
- Informetrie is de studie van de kwantitatieve aspecten van informatie in elke vorm (niet enkel schriftelijk geregistreerd) en in elke sociale groep (niet enkel in wetenschapskringen), met als doel om een wetenschappelijk begrip te verkrijgen van informatieprocessen in een brede sociale context. Informetrie omvat zowel theoretische studies over wiskundige eigenschappen, wetmatigheden en verdelingen gerelateerd aan informatieprocessen, als empirische studies.

Voor velen is scientometrie moeilijk te onderscheiden van bibliometrie, omdat de meest tastbare output van wetenschappelijk en technologisch onderzoek nu eenmaal wetenschappelijke literatuur is (Hood & Wilson, 2001). Het is echter belangrijk om in te zien dat bij scientometrie meer gemeten kan worden dan de kenmerken van wetenschappelijke literatuur, zoals bijvoorbeeld welke methodes voornamelijk gebruikt worden door de wetenschappers binnen een bepaalde discipline, welke socio-organisatorische structuren er bestaan binnen een onderzoeksdomein, wat de economische impact is van wetenschappelijk onderzoek op nationaal niveau ... (Wilson, 2001, in Hood & Wilson, 2001). Hood en Wilson (2001) verwachten dat onderzoekers alle drie de termen naast elkaar zullen blijven gebruiken om hun onderzoek de best passende noemer te kunnen meegeven, maar ook dat wetenschappers van buiten de informatiewetenschappen geneigd zullen zijn om de voorkeur te geven aan de meest bekende term, bibliometrie.

Dit onderzoek bevindt zich in het overlappende deel van scientometrie en bibliometrie: het kan beschouwd worden als een scientometrisch onderzoek met een sterk bibliometrische benadering. Het uiteindelijke doel van het onderzoek is om een nuttige bijdrage te leveren aan het wetenschappelijke beleid van IMO-IMOMEC, wat aansluit bij de definitie van scientometrie. Om daartoe te komen zullen echter kwantitatieve analyses uitgevoerd worden op de wetenschappelijke literatuur omtrent organische fotonvoltaïsche technologieën om de aard en de ontwikkeling van het onderzoeksdomein in kaart te brengen, wat perfect past binnen de definitie van bibliometrie. Omdat de beoogde methodes voor dit onderzoek bibliometrisch van aard zijn, wordt in de volgende paragrafen dieper ingegaan op bibliometrische analysemethodes.

2.2 Bibliometrische analyse

Het toepassen van wiskundige en statistische methoden op boeken en andere communicatiemiddelen geeft een algemeen beeld van wat een bibliometrische analyse is, maar laat ook veel vrijheid aan de onderzoeker om dit in te vullen zoals hij of zij wil. Bij het zoeken naar wetenschappelijke publicaties met het onderwerp *bibliometric analysis* komt dus een grote verscheidenheid aan types van bibliometrische analyses naar voren, van heel simpel tot heel uitgebreid.

Santos en Sequeira (2011) hebben een heel eenvoudige vorm van bibliometrische analyse gebruikt om hun literatuurstudie over natriumboorhydride als brandstof van de toekomst te ondersteunen. Zij hebben een dataset aan wetenschappelijke publicaties gegroepeerd volgens onderwerp, waarna ze een voorstelling geven van het procentuele aandeel van elk onderwerp binnen het onderzoeksdomein en van de evolutie van het aantal publicaties per jaar voor ieder onderwerp afzonderlijk. Manzano-Agugliaro, Alcayde, Montoya, Zapata-Sierra en Gil (2013) deden dezelfde basisanalyse in hun literatuurstudie over onderzoek naar hernieuwbare energiebronnen, maar breidden het bibliometrische aspect wat verder uit door ook de productie van wetenschappelijke literatuur per land en per instelling te analyseren en rankings op te stellen voor de toptanden en -instellingen. Andere auteurs gaan veel verder met hun bibliometrische analyse. Dong, Xu, Luo, Cai en Gao (2012) onderzochten in hun bibliometrische analyse van onderzoek naar zonne-energie de meest voorkomende publicatietypes en meest voorkomende talen, analyseerden de evolutie van eigenschappen van de gepubliceerde papers zoals het gemiddelde aantal pagina's en het gemiddelde aantal referenties, stelden een ranking op van meest productieve landen en hun evolutie doorheen de tijd, onderzochten de mate van internationale samenwerking, gingen na hoe de belangrijkste onderzoeksdisciplines evolueerden en welke de belangrijkste wetenschappelijke tijdschriften¹ waren en analyseerden de evolutie van de belangrijkste titelwoorden en kernwoorden.

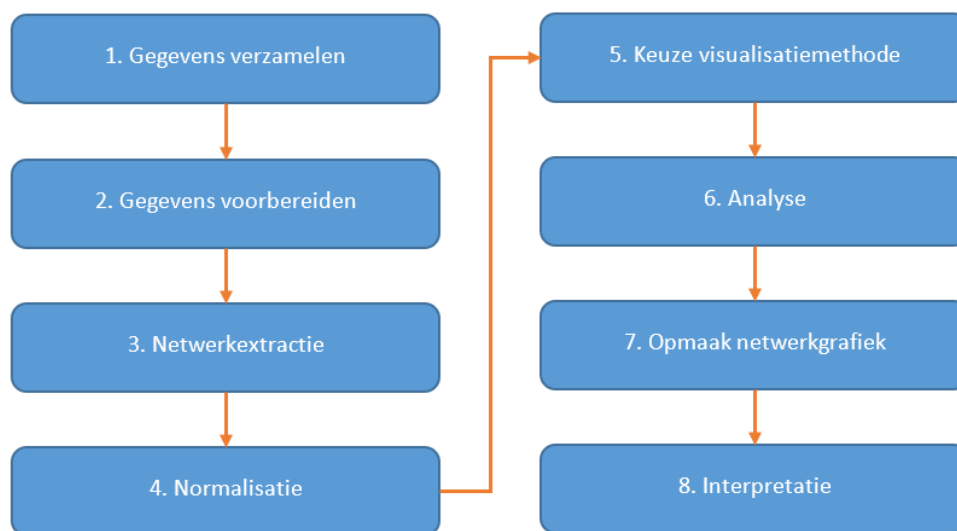
Een alternatieve manier om een onderzoeksdomein kwantitatief te analyseren, is door het letterlijk in kaart te brengen: een *science mapping*-analyse stelt ruimtelijk voor hoe de onderzochte elementen (documenten, auteurs, tijdschriften ...) met elkaar verbonden zijn en welke positie zij innemen binnen het onderzoeksdomein (Newell & Cousins, 2015). Op zo een kaart is (een deel van) het onderzoeksdomein zichtbaar als een netwerk dat vervolgens nader geïnspecteerd kan worden. Er bestaan verschillende manieren om dergelijke netwerkkaarten te construeren, afhankelijk van welke elementen onderzocht worden en welk type relatie tussen die elementen in kaart wordt gebracht. Sommige auteurs beperken zich tot een visuele inspectie van de opgestelde netwerkkaart om nuttige informatie over het onderzoeksdomein af te leiden. Door de netwerkkaart slim op te maken, kan achterliggende cijferinformatie zichtbaar gemaakt worden zonder dat de cijfers zelf nodig zijn om die informatie over te brengen. Newell en Cousins (2015) interpreteren drie verschillende netwerkkaarten op basis van hun uitzicht, zonder veel cijfermatige ondersteuning. Anderzijds kan een kwantitatieve analyse van het opgestelde netwerk nog bijkomende, nuttige informatie onthullen over het netwerk als geheel of over individuele elementen in het netwerk. Om zo een analyse uit te voeren, kunnen technieken uit de onderzoeksdiscipline van sociale netwerkanalyse overgenomen

¹ Het woord 'tijdschrift' verwijst in dit werk steeds naar een wetenschappelijk tijdschrift, ook wanneer dit niet expliciet wordt vermeld.

worden. Choe, Lee, Seo en Kim (2013) gebruiken deze aanpak om drie patentcitatienetwerken in detail te analyseren.

Er zijn ook voorbeelden van wetenschappelijke publicaties waarin gebruik wordt gemaakt van zowel bibliometrische analyse als van netwerkanalyse. Fahimnia, Sarkis en Davarzani (2015) combineren beide analysemethodes om de stand van zaken in het onderzoeksdomein van *green supply chain management* te beoordelen. Davarzani, Fahimnia, Bell en Sarkis (2016) doen hetzelfde om de literatuur over groene havens en maritieme logistiek te onderzoeken.

Het doel van het huidige onderzoek is eveneens om de methodes van bibliometrische analyse en netwerkanalyse te combineren in een poging om zoveel mogelijk informatie te onthullen over de stand van zaken in het onderzoek naar organische fotovoltaïsche cellen en de evolutie die de afgelopen jaren heeft plaatsgevonden in dat onderzoeksdomein. Om dat doel te realiseren wordt het stappenplan voor *science mapping*-analyse van Cobo, López-Herrera, Herrera-Viedma en Herrera (2011) gevolgd (figuur 3). Dit stappenplan wordt hieronder stap per stap toegelicht.



Figuur 3: Stappenplan voor science mapping-analyse

Stap 1: Gegevens verzamelen

Keuze van databank

Om een bibliometrische analyse uit te voeren, moeten bibliografische gegevens verzameld worden over relevante publicaties. Volgens Walsh en Renaud (2017) is het verzamelen van gegevens een van de belangrijkste onderdelen bij het doen van een literatuurstudie, omdat dit de uiteindelijke resultaten bepaalt. Tegenwoordig bestaan er meerdere online databanken die gebruikt kunnen worden om de nodige gegevens op te halen.

Cobo et al. (2011) lijsten een groot aantal gegevensbronnen op die gebruikt kunnen worden bij het uitvoeren van *science mapping*-analyses, waaronder bekende en minder bekende bibliografische databanken, databanken met patentgegevens en databanken met gegevens over financiering van onderzoek (tabel 1). Volgens hen zijn de belangrijkste bibliografische databanken de Web of Science-databank (WoS), die tegenwoordig beheerd wordt door Clarivate Analytics (voorheen door het

Institute for Scientific Information en Thomson Reuters), de Scopus-databank van Elsevier, de Google Scholar-zoekmachine en de MEDLINE-databank van de U.S. National Library of Medicine (NLM). Die laatste is echter specifiek gericht op literatuur uit de levenswetenschappen met een focus op biomedisch onderzoek (U.S. National Library of Medicine, 2018) en is dus niet relevant voor deze studie. Waltman (2016) noemt WoS, Scopus en Google Scholar als de drie belangrijkste multidisciplinaire databanken voor het doen van citatieanalyses. Harzing en Alakangas (2016) voerden een longitudinale vergelijking uit over een periode van twee jaar voor Google Scholar, Scopus en Web of Science en vonden dat het aantal publicaties en het aantal citaties voor alle drie de databanken ieder kwartaal op een consistente manier aangroeide. De auteurs besluiten daaruit dat de drie databanken een voldoende stabiel aanbod hebben om gebruikt te kunnen worden bij verdere analyses.

Tabel 1: Bibliografische bronnen volgens Cobo et al. (2011)

Belangrijkste bibliografische databanken	Andere bibliografische databanken	Databanken met patentgegevens	Databanken met gegevens over financiering
<ul style="list-style-type: none"> • WoS • Scopus • Google Scholar • MEDLINE 	<ul style="list-style-type: none"> • arXiv • CiteSeerX • Digital Bibliography & Library Project • SAO/NASA Astrophysics data system • Science Direct 	<ul style="list-style-type: none"> • United States Patent and Trademark Office • Derwent Innovations Index (provided by ISI WoS) 	<ul style="list-style-type: none"> • National Science Foundation

Google Scholar werd opgestart in 2004 en is eigenlijk geen databank, maar een zoekmachine die het internet afschuimt en de beschikbare wetenschappelijke literatuur indexeert (Montoya, Alcaide, Baños, & Manzano-Agugliaro, 2018; Waltman, 2016). Dat verschil met de databanken WoS en Scopus levert Google Scholar een paar voordelen op, maar ook een aantal belangrijke nadelen. De voordelen zijn dat de zoekmachine vrij beschikbaar is en gratis door iedereen gebruikt kan worden (Montoya et al., 2018; Waltman, 2016), dat de beschikbare informatie regelmatig wordt geüpdatet op basis van de informatie op het internet (Falagas, Pitsouni, Malietzis, & Pappas, 2008, in Montoya et al., 2018) en dat de zoekmachine een groter bereik heeft qua geïndexeerde literatuur dan de databanken (Harzing & Alakangas, 2016; Meho & Yang, 2007; Newell & Cousins, 2015; Thiede, 2017; Waltman, 2016). De nadelen zijn dat door een gebrek aan transparantie weinig geweten is over hoe groot het bereik van Google Scholar precies is en uit welke bronnen informatie wordt gehaald (Waltman, 2016) en dat de zoekmachine gegevens gebruikt die door de onderzoekers zelf bekend worden gemaakt (Falagas et al., 2008, in Montoya et al., 2018), wat in combinatie met een gebrekkige kwaliteitscontrole leidt tot onjuistheden (Falagas et al., 2008, in Montoya et al., 2018; Waltman, 2016) en manipulatie van gegevens mogelijk maakt (Waltman, 2016). Bovendien biedt Google Scholar niet dezelfde ondersteuning voor het uitvoeren van bibliometrische analyses als WoS en Scopus: de resultaten van een zoekopdracht kunnen niet op een gemakkelijke manier gedownload worden (Cobo et al., 2011; Newell & Cousins, 2015), er wordt slechts een beperkte hoeveelheid bibliografische meta-data over de publicaties gegeven (Waltman, 2016) en de gegevens die worden

aangeboden zijn moeilijk te analyseren (Wang, Zhao, Mao, Zuo, & Du, 2017) en vragen veel tijd om op te schonen vooraleer ze gebruiksklaar zijn (Meho & Yang, 2007; Waltman, 2016).

De Web of Science-databank is ontstaan uit de in 1963 opgerichte Science Citation Index (Y. Huang et al., 2017) en was de enige gegevensbron voor citatieanalyses tot de oprichting van Scopus en Google Scholar in 2004 (Harzing & Alakangas, 2016; Waltman, 2016). Tegenwoordig beschouwt de academische wereld WoS en Scopus als de twee belangrijkste gegevensbronnen voor bibliometrische en citatiegegevens (de la Hoz-Correa, Muñoz-Leiva, & Bakucz, 2018; Walsh & Renaud, 2017) en kunnen beide databanken gezien worden als gelijkwaardige alternatieven (Harzing & Alakangas, 2016). In tegenstelling tot Google Scholar, zijn deze databanken enkel toegankelijk voor betalende gebruikers met een abonnement (Waltman, 2016). De gegevens die opgenomen worden in de WoS- en Scopus-databanken worden dan ook aangeleverd door erkende bronnen en nauwgezet beheerd door de eigenaars van de databanken, waardoor de informatie in deze databanken betrouwbaarder is dan die van Google Scholar (Adriaanse & Rensleigh, 2013, in Montoya et al., 2018). Ook bieden WoS en Scopus betere ondersteuning voor het uitvoeren van literatuurstudies of scientometrische analyses: beide databanken hebben een analysefunctionaliteit waarmee snel een beter inzicht in de resultaten van een zoekopdracht bekomen kan worden en laten toe om uitgebreide bibliometrische meta-data over publicaties te downloaden in meerdere bestandsformaten. Een punt van kritiek op zowel WoS als Scopus is dat Engelstalige publicaties oververtegenwoordigd zijn, wat leidt tot een vertekend beeld waarbij de Anglo-Amerikaanse onderzoekswereld wordt bevoordeeld (Meerow, Newell, & Stults, 2016; Newell & Cousins, 2015).

De WoS-databank wordt in de literatuur geprezen voor de consistentie en hoge kwaliteit van haar gegevens (Li, Han, & Lu, 2018; Zhang, Huang, Yu, & Yang, 2017) en de kwaliteit en multidisciplinariteit van de geïndexeerde literatuur (R. Santos, Costa, & Grilo, 2017). Een nadeel van WoS is dat de kwaliteitseisen ertoe leiden dat enkel de meest impactvolle wetenschappelijke tijdschriften worden opgenomen in de database, waardoor belangrijke wetenschappelijke publicaties in andere bronnen over het hoofd gezien kunnen worden (Newell & Cousins, 2015; Thiede, 2017).

De Scopus-databank wordt beschouwd als de grootste databank met gegevens over gecontroleerde wetenschappelijke literatuur uit alle wetenschappelijke disciplines (Chiang et al., 2018; Davarzani et al., 2016; Fahimnia et al., 2015; Randhawa, Wilden, & Hohberger, 2016), met een groter bereik en hogere citatieaantallen dan WoS (Davarzani et al., 2016; Fahimnia et al., 2015; Waltman, 2016). De gegevens in Scopus gaan echter minder ver terug in de tijd dan de gegevens in WoS, namelijk tot 1970 (Elsevier, 2018a) in plaats van tot 1900 (Clarivate, 2018b, 2018g). De kwaliteit van de gegevens in Scopus blijkt ook lager te zijn dan die van de gegevens in WoS: Wang et al. (2017) rapporteren dat Scopus-gegevens meer informeel van aard en moeilijker te analyseren zijn dan die van WoS, Montoya et al. (2018) geven aan dat een van de meest voorkomende fouten in de gegevens van Scopus is dat er meerdere *AuthorIDs* bestaan voor één persoon en uit een bericht van Ludo Waltman (30 november 2017) op de *Getting Started*-pagina van de VOSviewer-website blijkt dat Scopus organisatienamen niet harmoniseert, in tegenstelling tot WoS (Centre for Science and Technology Studies - Leiden University, 2018a). Scopus-gegevens vragen bijgevolg meer tijd om op te schonen voor gebruik dan WoS-gegevens (Meho & Yang, 2007). Voor sommige bibliometrische analyses kan het echter toch interessant zijn om gegevens uit de Scopus-databank te gebruiken,

aangezien Scopus bij de geciteerde referenties van een artikel alle auteurs vermeldt, terwijl WoS voor geciteerde referenties enkel de eerstgenoemde auteur weergeeft (Persson, 2011).

Het combineren van informatie uit WoS, Scopus en Google Scholar kan een beter en vollediger beeld geven van de literatuur in een onderzoeksveld (Meho & Yang, 2007). Voor scientometrische studies op basis van een relatief kleine set publicaties kunnen de gegevens uit meerdere databanken geharmoniseerd worden en samengevoegd worden in één nieuwe databank (de la Hoz-Correa et al., 2018; Meerow et al., 2016). Wanneer grote aantallen publicaties geanalyseerd moeten worden, is het harmoniseren van gegevens uit meerdere databanken echter heel tijdsintensief. Afzonderlijke scientometrische studies uitvoeren met de gegevens uit iedere databank en achteraf de resultaten van de verschillende studies vergelijken, kan dan een goed alternatief zijn.

Ten slotte is het belangrijk om te vermelden dat WoS, Scopus en Google Scholar voortdurend verder ontwikkeld worden, waardoor besprekingen van deze databanken in de academische literatuur snel verouderd kunnen zijn (Waltman, 2016). De meest recente informatie over WoS en Scopus kan gevonden worden op de websites van respectievelijk Clarivate Analytics en Elsevier (Clarivate, 2018g; Elsevier, 2018a).

Selectie van wetenschappelijke publicaties

Naast de keuze van databank, is ook de strategie voor het selecteren van een dataset aan publicaties belangrijk. Er kunnen zes algemene selectiestrategieën onderscheiden worden: kwalitatieve selectie, allesomvattende selectie, selectie volgens klasse in de databank, selectie op basis van een citatierelatie met een bepaald artikel, selectie volgens wetenschappelijk tijdschrift en selectie op basis van een zoekopdracht.

Kwalitatieve selectie is een subjectieve selectiestrategie (Thiede, 2017), waarbij een onderzoeker op basis van vrij bepaalde criteria een beperkt aantal publicaties kiest die in de diepte onderzocht worden. Een allesomvattende selectie wordt gebruikt om tot algemene vaststellingen te komen (Thiede, 2017); de studie van Y. Huang et al. (2017), waarin voor het jaar 2015 alle publicaties in de Emerging Sources Citation Index (ESCI) van WoS worden onderzocht om een algemeen beeld te vormen van de toen nieuwe citatie-index, is daar een voorbeeld van. Wanneer de publicaties in een database volgens een bepaald systeem in klassen worden ingedeeld, kan een selectie volgens klasse gebruikt worden (C. Huang, Notten, & Rasters, 2011). Dit is vooral handig bij het opzoeken van patenten, omdat patentdatabanken gebruikmaken van een gedetailleerd classificatiesysteem waarbij patenten gegroepeerd worden volgens onderwerp. Walsh en Renaud (2017) beschrijven selectie op basis van een citatierelatie met een bepaald artikel, waarbij de citerende werken van een publicatie als dataset worden genomen, als een manier om de diffusie van een concept doorheen de literatuur te volgen. Selectie volgens publicatie in een tijdschrift kan voor verschillende doeleinden gebruikt worden: het kan dienen om de inhoud van een specifiek tijdschrift in kaart te brengen, om verschillende tijdschriften met elkaar te vergelijken, of om een heel onderzoeksveld in kaart te brengen (Thiede, 2017; Walsh & Renaud, 2017). Voorbeelden van studies die de inhoud van een specifiek tijdschrift onderzochten, zijn de studie van Ramos-Rodríguez en Ruíz-Navarro (2004) over het Strategic Management Journal en die van Merigó, Pedrycz, Weber en de la Sotta (2018) over het tijdschrift Information Sciences. Pilkington en Meredith (2009) onderzochten de evolutie in de

intellectuele structuur van het onderzoeksveld van operationeel management op basis van de publicaties in drie van de belangrijkste tijdschriften binnen dat onderzoeksveld.

Wanneer een specifiek onderwerp of thema binnen een onderzoeksveld onderzocht moet worden en de databank geen classificatie volgens onderwerp voorziet, kan best een selectie gemaakt worden op basis van een zoekopdracht: zo kunnen alle relevante publicaties over het onderwerp gevonden worden, onafhankelijk van het tijdschrift waarin gepubliceerd werd (Thiede, 2017; Walsh & Renaud, 2017). Er zijn meerdere methodes om publicaties te selecteren met behulp van een zoekopdracht. Porter, Youtie, Shapira en Schoeneck (2008) maken een onderscheid tussen exogene booleaanse selectiemethodes, waarbij in een iteratief proces een uitgebreide zoekopdracht geconstrueerd wordt met trefwoorden en booleaanse operatoren, en endogene bootstrappingselectiemethodes, waarbij eigenschappen van een basisset publicaties gebruikt worden om extra publicaties te identificeren. C. Huang et al. (2011) noemen vier benaderingen: een lexicale zoekopdracht, een evolutionaire lexicale zoekopdracht, citatiegebaseerde selectie en selectie volgens publicatie in kerntijdschriften.

Een lexicale zoekopdracht berust op een combinatie van trefwoorden die aan elkaar gelinkt worden met booleaanse operatoren en is de basis van elk van de vier selectiemethoden. Het verschil tussen de gewone lexicale zoekopdracht en de evolutionaire lexicale zoekopdracht is de manier waarop de trefwoordenlijst wordt samengesteld. Bij de gewone lexicale zoekopdracht wordt getracht om voor een bepaald onderwerp alle relevante trefwoorden te bepalen uitgaande van de kennis van experts (C. Huang et al., 2011). Bij de evolutionaire lexicale zoekopdracht wordt gebruik gemaakt van text-miningsoftware om kandidaat-trefwoorden te ontleden aan een set publicaties die gevonden werd met een eerste lexicale zoekopdracht, waarna de oorspronkelijke zoekopdracht in een aantal iteraties wordt uitgebreid met toepasselijke kandidaat-trefwoorden (C. Huang et al., 2011). De gewone lexicale zoekopdracht is dus een booleaanse selectiemethode, terwijl de evolutionaire lexicale zoekopdracht kenmerken heeft van zowel een booleaanse als een bootstrappingselectiemethode. C. Huang et al. (2011) beschrijven de lexicale zoekopdracht en de evolutionaire lexicale zoekopdracht als twee afzonderlijke selectiemethodes met specifieke kenmerken, voordelen en nadelen. Beide methodes kunnen echter ook beschouwd worden als een aanvulling op elkaar: nadat een gewone lexicale zoekopdracht werd opgesteld, kan deze getest worden door met behulp van text-miningsoftware te controleren of bepaalde kandidaat-trefwoorden die in eerste instantie over het hoofd werden gezien, afgeleid kunnen worden uit de zoekresultaten. Arora, Porter, Youtie en Shapira (2013) gebruiken deze benadering. Bij citatiegebaseerde selectie wordt met een lexicale zoekopdracht eerst een basisset aan publicaties verzameld, waarvan vervolgens de geciteerde werken geïdentificeerd worden als de kerndataset; daarna worden de citerende werken van de kerndataset geselecteerd als uiteindelijke dataset (C. Huang et al., 2011). Ten slotte wordt bij selectie volgens publicatie in kerntijdschriften eerst een lijst van tijdschriften geïdentificeerd aan de hand van de resultaten van een lexicale zoekopdracht, waarna een beperkt aantal kerntijdschriften gekozen wordt waarvan alle publicaties geselecteerd worden als dataset (C. Huang et al., 2011). Citatiegebaseerde selectie en selectie volgens publicatie in kerntijdschriften zijn bootstrappingselectiemethodes.

Tabel 2: Overzicht selectiestrategieën en -methodes

Selectiestrategieën	
1. Kwalitatief	4. Citatierelatie met ander artikel

2. Allesomvattend	5. Wetenschappelijk tijdschrift
3. Klasse in databank	6. Zoekopdracht
Selectiemethodes bij selectie op basis van een zoekopdracht	
a) Gewone lexicale zoekopdracht	c) Citatiegebaseerde selectie
b) Evolutionaire lexicale zoekopdracht	d) Kerntijdschriften

Een aantal van de beschreven selectiestrategieën en -methodes kunnen ook worden gecombineerd (Zupic & Čater, 2015, in Thiede, 2017). Voor zijn kwalitatieve literatuurstudie over citatie-impactindicatoren, selecteert Waltman (2016) eerst alle publicaties uit veertien belangrijke tijdschriften, waarna hij bijkomende relevante publicaties identificeert op basis van citatierelaties. Bolanos-Pizarro, Thijs en Glanzel (2010) maken een selectie volgens publicatie in de belangrijkste tijdschriften, aangevuld met verwante publicaties die geïdentificeerd worden met behulp van een zoekopdracht.

Bij het kiezen van een selectiestrategie moet met twee criteria rekening gehouden worden, namelijk het bereik en de precisie van de weerhouden publicaties (Porter et al., 2008). Een selectie moet een zo groot mogelijk bereik hebben, zodat zo weinig mogelijk relevante publicaties worden uitgesloten, maar ook een zo groot mogelijke precisie, zodat zo weinig mogelijk irrelevante publicaties onterecht worden opgenomen (Porter et al., 2008). In de praktijk houdt dit echter een trade-off in, waarbij een verbetering van het ene criterium leidt tot een verslechtering van het andere (Arora et al., 2013). Porter et al. (2008) geven aan dat er geen absolute standaarden bestaan voor diffuse onderzoeksdomeinen; onderzoekers moeten zelf uitmaken aan welk criterium zij het meest belang hechten, overeenkomstig met het doel van het onderzoek. Voor hun studie, met als doel een exhaustieve databank over nanotechnologieonderzoek samen te stellen, hechten Porter et al. (2008) meer belang aan bereik dan aan precisie. Concreet zijn zij bereid een precisie van slechts 70% te accepteren om het gewenste bereik te behalen. Ze controleren de precisie van hun zoekresultaten door kleine steekproeven van tien zoekresultaten per keer te inspecteren en na te gaan welk percentage van de gevonden resultaten gerelateerd is aan nanotechnologie. Deze inspectie heeft als bijkomstig voordeel dat het nieuwe trefwoorden onthult die gebruikt kunnen worden in een lexicale zoekopdracht (Porter et al., 2008).

Omdat de bibliografische databanken WoS en Scopus geen classificatiesysteem volgens onderwerp aanbieden, is selectie op basis van een zoekopdracht de aangewezen strategie voor dit onderzoek. Als selectiemethode komen enkel de lexicale zoekopdrachten in aanmerking, omdat zij relatief gemakkelijk te gebruiken zijn en het beste evenwicht tussen bereik en precisie mogelijk maken. De online versies van WoS en Scopus bieden niet de juiste ondersteuning voor een citatie-gebaseerde selectie, omdat er geen mogelijkheid is om alle citerende werken van een verzameling kernpublicaties te selecteren (C. Huang et al., 2011). Deze methode zou bovendien resulteren in een groot bereik, maar een lage precisie. Selectie volgens publicatie in kerntijdschriften is nog minder geschikt: vanwege de multidisciplinaire aard van het onderzoek naar organische fotovoltaïsche technologieën, zou deze selectiemethode resulteren in zowel een beperkt bereik als een lage precisie (C. Huang et al., 2011). Voor dit onderzoek zal de benadering van Arora et al. (2013) gevolgd worden, waarbij eerst gewerkt wordt met een gewone lexicale zoekopdracht, die vervolgens getest wordt volgens de principes van een evolutionaire lexicale zoekopdracht.

Het ontwerpen van een goede lexicale zoekopdracht is een iteratieve activiteit, waarbij meerdere versies getest en aangepast worden (Davarzani et al., 2016; Madani & Weber, 2016). Eerst moet een verzameling bruikbare trefwoorden bepaald worden. Porter et al. (2008) sommen drie voorwaarden op waaraan trefwoorden moeten voldoen om bruikbaar te zijn: ze moeten omvattend zijn (relevant voor het domein en gekoppeld aan een groot aantal publicaties), transparant (de onderzoekers moeten een duidelijk zicht kunnen behouden op hoe goed een bepaald onderwerp vertegenwoordigd is in de resultaten van de zoekopdracht) en elastisch (trefwoorden moeten gemakkelijk toegevoegd, geschrapt of aangepast kunnen worden om het bereik van de zoekopdracht aan te passen). De elasticiteitsvoorwaarde is minder belangrijk voor dit onderzoek, maar de twee eerste voorwaarden zijn algemeen geldend.

Volgens Madani en Weber (2016) kunnen geschikte trefwoorden gevonden worden door publicaties van bekende auteurs binnen het onderzoeksveld te lezen en door de zoekwoordplanner van Google Adwords te gebruiken om te achterhalen welke trefwoorden gebruikt worden wanneer naar een bepaald onderwerp gezocht wordt. Vervolgens moet de relevantie en de toepasselijkheid van de trefwoorden beoordeeld worden: de relevantie staat voor hoe nauw het trefwoord verbonden is met het onderwerp waarnaar gezocht wordt en de toepasselijkheid is de mate waarin het trefwoord nuttig is voor het huidige onderzoek (Madani & Weber, 2016). De auteurs sommen drie manieren op om de relevantie en toepasselijkheid te controleren: (i) een beter beeld vormen van wat het trefwoord betekent door definities en synoniemen op te zoeken in woordenboeken, synoniemenlijsten en encyclopedieën, (ii) het trefwoord gebruiken voor een zoekopdracht en nagaan of er papers worden gevonden en of dit de juiste papers zijn en (iii) een kleine selectie papers waarin het trefwoord wordt gebruikt lezen om een idee te krijgen van de gebruikscontext van het trefwoord (Madani & Weber, 2016). Davarzani et al. (2016) onderzoeken daarnaast ook de irrelevante resultaten van testzoekopdrachten, om trefwoorden te identificeren die expliciet uitgesloten moeten worden in de finale zoekopdracht. Wanneer deze uitsluitingstrefwoorden nauw verwant zijn met trefwoorden die wel nuttig zijn voor de zoekopdracht, kan het gebruik van uitsluitingstrefwoorden ertoe leiden dat ook relevante zoekresultaten ongewild worden uitgesloten. Sommige auteurs gebruiken dus geen uitsluitingstrefwoorden, maar controleren de zoekresultaten achteraf zelf om ongewenste publicaties uit de lijst te verwijderen (bijvoorbeeld Geissdoerfer, Savaget, Bocken, & Hultink, 2017; N. Li et al., 2018; Randhawa et al., 2016).

Het ontwerpen van een goede zoekopdracht berust echter niet alleen op het verzamelen van goede trefwoorden. Om tot een accurate selectie te komen waarbij zowel het bereik als de precisie zo hoog mogelijk zijn, is het even belangrijk om verstandig gebruik te maken van de zoekvelden die door de databank worden aangeboden, van booleaanse en nabijheidsoperatoren, van *wildcards* en van aanhalingstekens.

Om een groot zoekbereik te verkrijgen, wordt in de onderzochte bibliometrische studies vaak gebruik gemaakt van het zoekveld 'Topic' in WoS of het equivalente 'Article title, Abstract, Keywords' in Scopus. Wanneer wordt gezocht in het 'Topic'-zoekveld in WoS, wordt voor elk geregistreerd document nagegaan of de opgegeven trefwoorden voorkomen in de titel, de samenvatting, de kernwoorden opgegeven door de auteur en de zogenaamde Keywords Plus (Clarivate, 2018f). Keywords Plus zijn geïndexeerde kernwoorden die worden gegenereerd op basis van de titels van

geciteerde werken in de referentielijst van een document en zijn een aanvulling op de door de auteur opgegeven kernwoorden (Clarivate, 2018d). Het 'Topic'-zoekveld is de enige mogelijkheid in WoS die toelaat om naar trefwoorden te zoeken in samenvattingen en kernwoorden van documenten (Clarivate, 2018c, 2018f). Keywords Plus is daarbij altijd inbegrepen, wat zorgt voor een groter bereik, maar ten koste gaat van de precisie. Deze kernwoorden kunnen namelijk aan publicaties gekoppeld worden die over een ander onderwerp gaan, als ze automatisch worden gegenereerd op basis van geciteerde referenties die niets met de essentie van de publicatie te maken hebben, maar die bijvoorbeeld enkel voorkomen in de introductie. De studie van J. M. Li et al. (2018), die wordt weergegeven in de zoekresultaten wanneer naar "organic photovoltaics" wordt gezocht in het 'Topic'-veld, is hier een voorbeeld van: de auteurs vermelden OPV twee keer in de introductie, maar leggen nergens expliciet een verband tussen OPV en de resultaten van hun onderzoek. Wanneer de auteurs OPV niet vermelden in de titel, de zelfgekozen kernwoorden, of de samenvatting, kan in vraag gesteld worden of de studie wel relevant genoeg is om opgenomen te worden in een bibliometrische literatuurstudie over OPV.

Bij een zoekopdracht in het zoekveld 'Article title, Abstract, Keywords' in Scopus kunnen, naast de titel en de samenvatting, voor elk document vier mogelijke types kernwoorden doorzocht worden: kernwoorden gekozen door de auteurs, geïndexeerde kernwoorden, merknamen en namen van chemische verbindingen (Elsevier, 2018d). Geïndexeerde kernwoorden zijn in dit geval gestandaardiseerde kernwoorden gekozen door de aanbieder van het document, ter aanvulling van de kernwoorden gekozen door de auteur; dit zijn bijvoorbeeld meervoudsvormen, spellingsvarianten en synoniemen van de oorspronkelijke kernwoorden (Elsevier, 2018b). Scopus biedt meer vrijheid dan WoS bij het kiezen van zoekvelden: er kunnen afzonderlijke zoekopdrachten worden uitgevoerd in samenvattingen, in het overkoepelende kernwoordzoekveld en in elk van de kernwoordtypes afzonderlijk (Elsevier, 2018d).

Om de precisie van een zoekopdracht te verhogen, kunnen trefwoordcombinaties bij het ontwerpen van de zoekopdracht tussen aanhalingstekens geplaatst worden. Dit zorgt ervoor dat enkel resultaten worden weergegeven waarbij de zoekwoorden die tussen aanhalingstekens staan exact op die manier in één doorzoekbaar tekstveld voorkomen (Clarivate, 2018e; Elsevier, 2018c). Voor het 'Topic'-zoekveld in WoS is dat samen in de titel en/of samen in de samenvatting en/of samen in de lijst met kernwoorden gegeven door de auteur en/of samen in Keywords Plus. Wanneer geen aanhalingstekens worden gebruikt, wordt afzonderlijk gezocht naar iedere zoekterm in ieder doorzoekbaar tekstveld. Bij een zoekopdracht met de woorden *organic photovoltaics* in de WoS Core Collection op 19 april 2018, worden voor de zoekopdracht zonder aanhalingstekens 7.847 publicaties gevonden en voor de zoekopdracht met aanhalingstekens slechts 4.829 publicaties – in 3.018 publicaties kwamen de woorden *organic* en *photovoltaics* dus niet naast elkaar voor in hetzelfde doorzochte tekstveld.

Eens de zoekopdracht is uitgevoerd, kunnen de resultaten nog verder verfijnd worden. Vaak wordt de zoekopdracht beperkt tot een bepaalde periode in de tijd en worden zoekresultaten uit irrelevante wetenschappelijke disciplines uitgesloten (bijvoorbeeld Davarzani et al., 2016; Newell & Cousins, 2015). Bovendien kan de selectie verder verbeterd worden door enkel de meest nuttige documenttypes te behouden. Standaardartikels, overzichtsartikels, conferentiepublicaties en boeken

(of hoofdstukken uit boeken) zijn doorgaans de belangrijkste documenttypes; andere, zoals inleidende artikels geschreven door de redactie van een tijdschrift, brieven, nieuwsitems en samenvattingen, kunnen uit de selectie weggelaten worden. Sommige auteurs laten echter ook boeken en conferentiepublicaties weg, omdat deze werken voorafgaand aan hun publicatie vaak niet aan een strenge beoordeling worden onderworpen zoals dat bij artikels voor wetenschappelijke tijdschriften het geval is (Davarzani et al., 2016; Randhawa et al., 2016). Ramos-Rodríguez en Ruíz-Navarro (2004) noemen tijdschriftartikels daarom 'gecertificeerde kennis' en weerhouden enkel dit type zoekresultaten voor hun analyse. Een bijkomende reden om conferentiepublicaties weg te laten, is dat ze vaak in een latere fase na beoordeling ook gepubliceerd worden in een tijdschrift, waardoor ze via die weg als artikel in de selectie worden opgenomen (Davarzani et al., 2016). Als zowel artikels als conferentiepublicaties geselecteerd worden, leidt dit tot een dubbele representatie van bepaalde werken, waarvoor dan weer gecorrigeerd moet worden door een van beiden uit de selectie te verwijderen.

Bepaalde auteurs limiteren hun zoekresultaten tot publicaties in het Engels (bijvoorbeeld Geissdoerfer et al., 2017; Gurzki & Woisetschläger, 2017). Bij een kwantitatieve literatuurstudie moet de inhoud van de publicaties echter niet zozeer in detail geanalyseerd worden als bij een kwalitatieve literatuurstudie, dus is het uitsluiten van publicaties op basis van taal niet noodzakelijk – tenminste zolang de titel en samenvatting begrijpbaar zijn. Anderen beperken zich voor hun analyse tot publicaties in wetenschappelijke tijdschriften met een impactfactor (bijvoorbeeld Randhawa et al., 2016; R. Santos et al., 2017). De impactfactor is een jaarlijkse score die berekend wordt voor wetenschappelijke tijdschriften die opgenomen zijn in de *Science Citation Index Expanded* (SCIE) en/of de *Social Sciences Citation Index* (SSCI) van WoS en die een idee geeft van het gemiddelde aantal citaties per gepubliceerd werk voor een bepaald tijdschrift (Clarivate, 2018a). Het opleggen van de voorwaarde dat geselecteerde werken uit tijdschriften met een impactfactor moeten komen, geeft echter geen garantie dat de meest relevante publicaties opgenomen zijn in de studie: de impactfactor is een kenmerk van het tijdschrift, niet van de individuele publicaties in dat tijdschrift. Een werk dat gepubliceerd werd in een impactvol tijdschrift, heeft niet noodzakelijk meer waarde voor het onderzoeksdomein dan een andere studie die gepubliceerd werd in een minder bekend tijdschrift.

Stap 2: Voorbereiden van de gegevens

Na het verzamelen van een dataset aan publicatiegegevens, kan niet meteen begonnen worden met het analyseren van deze gegevens. Grote databanken lijden vaak onder een bepaald niveau van onregelmatigheid in gegevensregistratie, omdat er enorme hoeveelheden gegevens uit meerdere bronnen in worden verzameld (Montoya et al., 2018). Het probleem van gegevensinconsistentie is al vastgesteld voor zowel WoS (Pilkington & Meredith, 2009) als Scopus (Montoya et al., 2018). Vooraleer er analyses uitgevoerd kunnen worden, moeten onregelmatigheden in de gegevens dus opgespoord en verbeterd worden en kunnen eventueel een aantal bijkomende bewerkingen van de dataset uitgevoerd worden. Volgens Cobo et al. (2011) is het voorbereiden van de gegevens een heel belangrijke stap, omdat de kwaliteit van de uiteindelijke resultaten afhangt van de kwaliteit van gebruikte gegevens.

Voor hun beoordeling van softwaretoepassingen voor *science mapping*-analyses, controleren Cobo et al. (2011) voor elk van de onderzochte applicaties welke van vier mogelijke voorbereidende processen ondersteund worden. Het eerste proces is het opsporen en vereenzelvigen van dubbel geregistreerde gegevenselementen, wat nodig is wanneer eenzelfde item of concept op een aantal verschillende manieren in de dataset terug te vinden is. Deze situatie ontstaat bijvoorbeeld door het maken van een spellingsfout bij de registratie van de gegevens of door het gebruiken van een alternatieve spellingswijze of van andere woorden met dezelfde betekenis. Het tweede proces is het indelen van de verzamelde gegevens in verschillende tijdsperiodes, om de evolutie van het onderzoeksdomein doorheen de tijd te kunnen volgen. Het derde proces is reduceren van de dataset door te focussen op de meest belangrijke gegevens – bijvoorbeeld de meest geciteerde publicaties, de meest productieve auteurs of de best presterende tijdschriften – met als doel de interpreteerbaarheid van de resultaten te verbeteren. Het vierde proces heeft het zelfde doel als het derde, maar bereikt dit op een andere manier: het is gebaseerd op de netwerkrepresentatie van de gegevens, waarbij onbelangrijke elementen worden verwijderd om een beter zicht te krijgen op de belangrijkste gegevens in het netwerk. (Cobo et al., 2011)

Van de vier genoemde processen, heeft vooral het ontdubbelingsproces een grote impact op de kwaliteit van de gegevens. Eerst moet gecontroleerd worden of iedere publicatie, voorgesteld door zijn titel en eventueel een aantal bijkomende identificatiegegevens, slechts één keer in de dataset voorkomt. Als dit niet het geval is, worden de resultaten namelijk vertekend door de ongelijkwaardige representatie van bepaalde publicaties. Daarnaast moet bij alle gegevenstypes die gebruikt gaan worden in de analysestap, gezorgd worden dat iedere unieke entiteit ook slechts in één en dezelfde vorm in de dataset voorkomt. Ramos-Rodríguez en Ruíz-Navarro (2004) geven als voorbeeld de situatie waarbij op verschillende manieren verwezen wordt naar de werken van één auteur, namelijk met de achternaam gevolgd door enkel het eerste initiaal of de achternaam gevolgd door twee initialen. Bibliometrische software die gebruik maakt van tekstherkenning om een opsomming te maken van de auteurs in de verzameling publicaties en die niet over een proces voor ontdubbeling van de gegevens beschikt, zal beide schrijfwijzen van dezelfde naam beschouwen als twee verschillende auteurs. Wanneer er dan een rangschikking gemaakt wordt van de auteurs die vertegenwoordigd zijn in de dataset, zal deze lijst meer auteurs bevatten dan er werkelijk zijn en bovendien zal de rang van de auteur waarvan de naam meermaals voorkomt negatief beïnvloed worden, doordat zijn werken over twee namen in de lijst verdeeld zijn. Software met een ontdubbelingsproces zou beide versies van de naam kunnen vereenzelvigen, waardoor alle werken worden toegewezen aan de ene representatie van de auteur die behouden wordt. Dit proces kan echter ook leiden tot fouten: wanneer verschillende auteurs met dezelfde achternaam en hetzelfde eerste initiaal in de dataset voorkomen, leidt het verwaarlozen van het tweede initiaal tot het onterecht samenvoegen van publicaties van verschillende auteurs onder één naam. Om met vertrouwen te kunnen zeggen dat een juiste voorstelling van alle auteurs werd bekomen, is dus een zekere mate van toezicht door de onderzoeker nodig. Omdat het manueel opsporen en verbeteren van inconsistenties een erg arbeidsintensief proces is (Pilkington & Meredith, 2009), is het voor grote datasets beter om kandidaten voor ontdubbeling te identificeren met behulp van software en vervolgens zelf na te kijken of deze gegevens wel of niet samengevoegd mogen worden. Het softwareprogramma OpenRefine (voorheen Google Refine) maakt dit type bewerkingen van de

dataset mogelijk: het is een krachtig hulpmiddel voor het werken met rommelige gegevens en voor het verkrijgen van inzicht in grote datasets (openrefine.org). Naast het standaardiseren van namen van auteurs, kan het ontdebingsproces ook toegepast worden op namen van instellingen, tijdschriften, steden en landen, op verschillende uitgaves van boeken en op kernwoorden (Chiang et al., 2018; Montoya et al., 2018; Pilkington & Meredith, 2009; Ramos-Rodríguez & Ruíz-Navarro, 2004). Een extra moeilijkheid bij het nakijken van namen van tijdschriften, is dat tijdschriften in de loop van hun bestaan van naam kunnen veranderen (Chiang et al., 2018).

De drie andere voorbereidende processen hebben geen invloed op de kwaliteit van de gegevens, maar kunnen wel de kwaliteit van de resultaten beïnvloeden. Het indelen van de gegevens in aparte tijdsperiodes, laat toe om een extra dimensie – de evolutie doorheen de tijd – te analyseren, wat een dieper inzicht in het onderzochte onderwerp mogelijk maakt. Beide datareductieprocessen zijn erop gericht om de kwaliteit van de resultaten te verbeteren door het mogelijk te maken om te focussen op de belangrijkste gegevens. Hoewel de datareductieprocessen voorbereidende processen zijn, maken ze in feite geen deel uit van deze stap van de *science mapping*-analyse: om te kunnen focussen op de meest belangrijke gegevens, moeten die gegevens al geïdentificeerd zijn door analyses uit te voeren of door een netwerkvoorstelling te maken. De datareductieprocessen passen dus beter in de analysestap (stap 6) van de *science mapping*-analyse dan in stap 2. Walsh en Renaud (2017) gaan er in hun paper van uit dat datareductie wordt toegepast en spreken in die context over een eerste- en tweedegraadsdataset: de eerstegraadsdataset is een uitgebreide verzameling publicaties die wordt gebruikt om de belangrijkste werken in de verzameling te identificeren en de tweedegraadsdataset is de verzameling van deze belangrijke werken die wordt gebruikt voor de eigenlijke analyses. Volgens hen ontstaat er een trade-off door het beperken van het aantal publicaties in de tweedegraadsdataset, waarbij een grotere dataset een grondige interpretatie mogelijk maakt, maar ook meer statistisch ruis introduceert, terwijl een kleinere dataset een betere focus kan bieden op de meest relevante onderdelen van het netwerk, maar met meer gelimiteerde interpretatiemogelijkheden (Walsh & Renaud, 2017).

Stap 3: Netwerkextractie

In deze stap wordt bepaald welke netwerken er opgesteld zullen worden en dus ook welke analyses uiteindelijk mogelijk zullen zijn. VOSviewer, een softwaretoepassing voor het opstellen en het visualiseren van bibliometrische netwerken (Centre for Science and Technology Studies - Leiden University, 2018b), biedt een goed overzicht van de verschillende netwerkextractiemogelijkheden. Deze zijn opgelijst in tabel 3.

Netwerken bestaan uit knooppunten (*nodes*) en randen (*edges*). De gekozen analyse-eenheid bepaalt de aard van de knooppunten in het netwerk en de netwerkextractiemethode bepaalt de aard van de randen. Welke analyse-eenheden en netwerkextractiemethoden beschikbaar zijn om netwerken mee te vormen, hangt af van welke gegevens er worden verzameld bij het downloaden van de dataset uit de bibliografische databank. Wanneer enkel de standaard bibliografische gegevens van iedere publicatie worden gedownload (de titel van het werk, de bron waaruit het afkomstig is, de namen van de auteurs, de organisaties waar de auteurs zijn aangesteld en de adresgegevens van die organisaties, kernwoorden ...), kunnen enkel co-auteurschapsnetwerken en co-woordnetwerken

opgesteld worden. Wanneer aanvullend op deze standaardgegevens echter ook de geciteerde referenties van ieder werk opgevraagd worden, kunnen drie extra netwerkextractiemethoden gebruikt worden: directe citatie, bibliografische koppeling en co-citatie. Door het downloaden van de geciteerde referenties krijgt de dataset bovendien twee tijdsdimensies: de documenten in de dataset bieden een perspectief op de huidige toestand van het onderzoeksdomein, terwijl de geciteerde referenties van die documenten een representatie zijn van het relatieve verleden van het onderzoeksdomein (Walsh & Renaud, 2017). De geciteerde referenties bevatten niet zoveel bibliografische gegevens als de documenten in de gedownloadede dataset, maar ze leveren toch drie extra analyse-eenheden op: de geciteerde referenties zelf, de geciteerde tijdschriften en de geciteerde auteurs. Voor het huidige onderzoek, zal enkel gebruik gemaakt worden van directecitatie-netwerken en bibliografische-koppeling-netwerken. Deze twee netwerkextractiemethodes worden hieronder toegelicht. Een bespreking van de drie andere methodes is opgenomen in bijlage 1.

Tabel 3: Overzicht van de mogelijkheden voor het opstellen van netwerken

	HEDEN	VERLEDEN
Analyse-eenheden	<ul style="list-style-type: none"> • Documenten • Tijdschriften • Auteurs • Organisaties • Landen • Kernwoorden 	<ul style="list-style-type: none"> • Geciteerde referenties • Geciteerde tijdschriften • Geciteerde auteurs • NVT • NVT • NVT
Netwerk-extractie-methodes	<ul style="list-style-type: none"> • Co-woord • Co-auteurschap • Directe citatie • Bibliografische koppeling 	<ul style="list-style-type: none"> • Co-citatieanalyse • (Co-auteurschap)

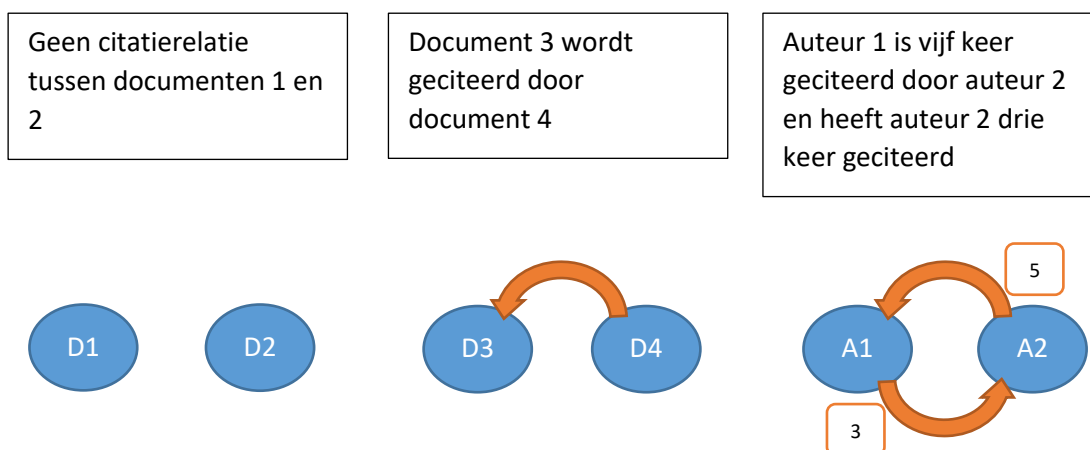
Directe citatie

Een directe-citatie-netwerk is een visuele voorstelling van informatiestromen tussen de entiteiten die actief zijn binnen het onderzoeksdomein. Dit type netwerk is gebaseerd op de citatierelaties tussen deze entiteiten, met als achterliggende redenering dat het citeren van een eerder gepubliceerd werk betekent dat een bepaald idee uit dat werk wordt overgenomen. Directe-citatie-netwerken kunnen opgesteld worden op het niveau van documenten, tijdschriften, auteurs, organisaties of landen.

Twee knooppunten in een directe-citatie-netwerk worden verbonden door een rand wanneer het ene knooppunt het andere citeert. Om het verschil tussen citerende en geciteerde knooppunten duidelijk te maken, hebben de randen in dit type netwerk normalerwijze een richting – de randen zijn pijlen en er is sprake van een gericht netwerk. Omdat een pijl staat voor het overnemen van informatie uit het ene knooppunt door het andere knooppunt, is de meest gebruikte voorstelling dat pijlen vertrekken bij citerende werken en toekomen bij geciteerde werken. Knooppunten met veel inkomende pijlen zijn autoriteiten binnen het onderzoeksdomein die veel geciteerd worden, knooppunten met veel uitgaande pijlen zijn hubs die kennis centreren door veel werken te citeren.

In een netwerk van documenten is er ofwel geen citatierelatie tussen twee documenten (geen pijl), ofwel citeert het ene document het andere (één pijl) – zie figuur 4. Het gewicht van iedere pijl is

gelijk aan één. Zoals eerder vermeld, geeft een citatierelatie tussen twee documenten aan hoe beide documenten zich tot elkaar verhouden in de tijd: het citerende werk is later geschreven dan het geciteerde werk. Dit type netwerk is dus niet alleen geschikt om de informatiestromen binnen het onderzoeksveld weer te geven, maar kan ook gebruikt worden om een tijdlijn van de literatuur in een onderzoeksdomein op te stellen. Voor de vier andere analyseniveaus worden de documenten gegroepeerd volgens de entiteit waaraan ze toebehoren: ze worden toegewezen aan het tijdschrift waarin ze gepubliceerd werden, aan de auteurs die ze geschreven hebben, aan de organisaties waaraan de auteurs tewerkgesteld zijn of aan de landen waarin deze organisaties gevestigd zijn. Daarna worden de citatierelaties tussen documenten opgeteld voor ieder entiteitenpaar. In netwerken van tijdschriften, auteurs, organisaties of landen heeft iedere pijl dus wel een gewicht, gelijk aan het aantal keer dat die specifieke citatierelatie voorkomt. Bovendien kunnen twee knooppunten elkaar wederzijds citeren (twee pijlen, zie figuur 4). Deze vier geaggregeerde netwerkvoorstellungen geven geen directe informatie over de evolutie van de literatuur doorheen de tijd². De netwerken van elk van de vijf mogelijke analyse-eenheden kunnen geanalyseerd worden met behulp van sociaal-netwerkanalyse om inzicht te krijgen in de kenmerken van het gehele netwerk en om invloedrijke knooppunten te identificeren.



Figuur 4: Mogelijke citatierelaties tussen knooppunten in directe-citatie-netwerken

Bibliografische koppeling

Een netwerk op basis van bibliografische koppeling is een visuele voorstelling van inhoudelijke verwantschap tussen de entiteiten die in het heden actief zijn binnen het onderzoeksdomein. Dit type netwerk is gebaseerd op de mate waarin de bibliografieën van deze entiteiten overeenkomen, volgens de redenering dat entiteiten die veel gelijkens vertonen in de referenties die ze citeren, met grote waarschijnlijkheid ook inhoudelijk gelijkend zijn. Netwerken op basis van bibliografische koppeling kunnen net als directe-citatie-netwerken opgesteld worden op het niveau van documenten, tijdschriften, auteurs, organisaties of landen.

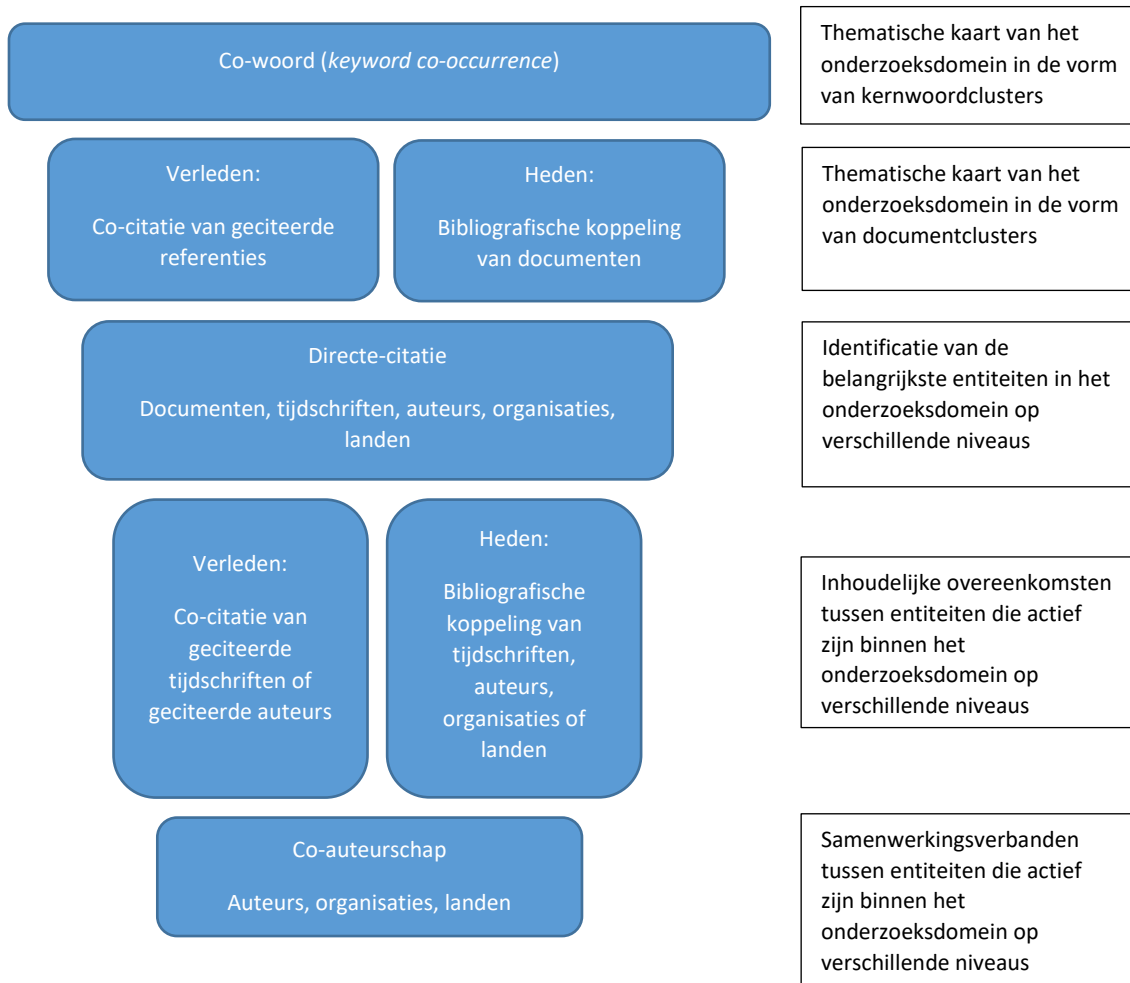
² Voor elk van de besproken netwerkextractiemethoden en analyse-eenheden geldt echter dat de evolutie doorheen de tijd onderzocht kan worden door afzonderlijke netwerken op te stellen voor verschillende tijdsperiodes en die netwerken te vergelijken.

Twee knooppunten in een netwerk volgens bibliografische koppeling worden verbonden door een rand wanneer ze minstens één geciteerde referentie gemeenschappelijk hebben (knooppunt A citeert publicatie C en knooppunt B citeert publicatie C → rand tussen knooppunten A en B). Randen in dit type netwerk hebben geen richting, maar wel een gewicht, dat gelijk is aan het aantal gedeelde referenties tussen de knooppunten. Hoe groter het gewicht van een rand, hoe meer gelijkend de twee verbonden knooppunten verwacht worden te zijn.

De verschillende analyse-eenheden die gebruikt kunnen worden voor het opstellen van een bibliografische-koppelingnetwerk, zorgen ervoor dat de gegevens vanuit meerdere perspectieven onderzocht kunnen worden, die echter ook om verschillende analysebenaderingen vragen. Een netwerk van documenten is het meest gedetailleerde analyseniveau met een groot aantal knooppunten. Het analyseren van de verwantschap tussen individuele documenten is niet zo veelzeggend, maar de documenten kunnen wel ingedeeld worden in groepen op basis van inhoudelijke gelijkenis. Een netwerk volgens bibliografische koppeling op documentniveau leent zich dus tot het uitvoeren van een clusteranalyse, zodat thematische clusters in het netwerk geïdentificeerd kunnen worden. Bij netwerken van tijdschriften, auteurs, organisaties en landen zijn de documenten al gegroepeerd volgens de entiteit waaraan ze toebehoren. Daardoor bestaan deze netwerken uit een kleiner aantal knooppunten en omvatten de knooppunten mogelijks documenten die tot verschillende onderwerpen binnen het onderzoeksdomein behoren. In tegenstelling tot het netwerk van bibliografisch gekoppelde documenten, zijn netwerken op het niveau van tijdschriften, auteurs, organisaties of landen meer geschikt om de mate van verwantschap tussen individuele entiteiten te onderzoeken dan voor het uitvoeren van clusteranalyses.

Samenvattend overzicht

Elk van de vijf netwerkextractiemethoden biedt een verschillend inzicht in de structuur van het onderzochte onderzoeksdomein. Daarbovenop komt nog dat de meeste methoden toegepast kunnen worden op meerdere analyse-eenheden. Figuur 5 geeft een overzicht van de praktische toepassing van de verschillende mogelijkheden, georganiseerd volgens de mate van detail van de bekomen informatie; bovenaan staat de methode die het meest algemene beeld van het onderzoeksdomein geeft en onderaan de methode die de meest specifieke informatie onthult. Dit overzicht kan beschouwd worden als een stappenplan dat doorlopen kan worden om een volledig inzicht in het onderzochte onderzoeksdomein te verkrijgen.



Figuur 5: Overzicht netwerkextractiemethoden met gebruikscontext

Cobo et al. (2011) vermelden ten slotte dat er ook netwerken opgesteld kunnen worden waarin de knooppunten tot verschillende analyse-eenheden behoren (bijvoorbeeld auteur-document-netwerken). Dit type netwerken lijkt echter weinig voor te komen en een bespreking ervan valt buiten het bereik van deze masterproef.

Netwerkextractie in de praktijk

In de praktijk worden netwerken opgesteld op basis van matrices waarin de relaties tussen knooppunten met cijferwaarden zijn vastgelegd. De besproken netwerkextractiemethoden behoren tot één van twee grote categorieën (tabel 4), naargelang het type matrix waarop ze gebaseerd zijn.

Tabel 4: Werking netwerkextractiemethoden

Directe verbinding (<i>direct linkage</i>)	Gelijktijdig voorkomen (<i>co-occurrence</i>)
<ul style="list-style-type: none"> • Directe citatie 	<ul style="list-style-type: none"> • Co-woord • Co-auteurschap • Co-citatie • Bibliografische koppeling

Een netwerk volgens directe verbinding is een voorstelling van directe relaties tussen de weergegeven entiteiten; in het geval van directie-citatie-netwerken zijn dit directe-citatie-relaties tussen documenten, tijdschriften, auteurs, organisaties of landen. Een directe-verbindingen-netwerk is gebaseerd op een vierkante matrix Q met een rij en een kolom voor iedere entiteit die voorkomt in de dataset, waarbij de cijferwaarden in de matrix aangeven tussen welke entiteiten er verbindingen bestaan en wat het gewicht van die verbindingen is. In het geval van een directe-citatie-netwerk is Q doorgaans niet-symmetrisch, omdat een citatie-relatie tussen twee entiteiten enkelvoudig is en een richting heeft. Om in een netwerk de voorstelling te verkrijgen waarbij een pijl vertrekt vanuit het citerende knooppunt en toekomt bij het geciteerde knooppunt, moeten de kolommen van Q de geciteerde entiteiten voorstellen en de rijen de citerende entiteiten. Toegepast op een directe-citatie-netwerk van documenten is Q een $[m \times m]$ document-documentmatrix, waarbij eentjes in de rij van document i aangeven welke andere documenten uit de dataset door dit document worden geciteerd. In een directe-citatie-netwerk van auteurs is Q een $[n \times n]$ auteur-auteurmatrix, waarbij cijfers verschillend van nul in de rij van auteur j aangeven welke andere auteurs uit de dataset door deze auteur werden geciteerd en hoe vaak.

Een netwerk op basis van gelijktijdig voorkomen is een voorstelling van gezamenlijke kenmerken van de weergegeven entiteiten. Voor co-woord-, co-auteurschaps- en co-citatie-extractiemethoden betekent dit dat twee entiteiten samen vertegenwoordigd zijn in een gegevensveld van een document in de dataset (Persson, Danell, & Wiborg Schneider, 2009) – kernwoorden voor de co-woordextractie, onderzoekers voor de co-auteurschapsextractie en geciteerde referenties voor de co-citatie-extractie. Netwerkextractie volgens bibliografische koppeling is in deze categorie de uitzondering, omdat entiteiten uit twee verschillende documenten in de dataset aan elkaar worden gekoppeld op basis van een vergelijking van de referenties van die documenten. Dit verschil weerspiegelt zich ook in de matrixvoorstelling van de netwerken.

Het vertrekpunt voor een netwerk op basis van gelijktijdig voorkomen is de binaire voorkomstenmatrix (*occurrence matrix*) O , opgesteld volgens de klassieke datastructuur waarbij de rijen gevormd worden door de observaties en de kolommen door de eigenschappen van die observaties. Vertaald naar de context van bibliometrische netwerken, worden de rijen van de voorkomstenmatrix gevormd door de documenten in de dataset en de kolommen door de entiteiten die voorkomen binnen de gekozen analyse-eenheid. Ter illustratie: voor een co-auteurschapsnetwerk is O een $[m \times n]$ document-auteurmatrix, waarbij eentjes en nullen in de rij van een document aangeven welke auteurs dit document hebben geschreven. De symmetrische gelijktijdige-voorkomstenmatrix (*co-occurrence matrix*) C die aangeeft welke entiteiten samen voorkomen en met welke frequentie, wordt bekomen aan de hand van de bewerking $C = O^T O$. Toegepast voor het co-auteurschapsnetwerk is C een $[n \times n]$ auteur-auteurmatrix met voor ieder auteurspaar de frequentie waarmee beide auteurs samengewerkt hebben en met op de diagonaal het aantal keer dat iedere individuele auteur voorkomt in de dataset. (van Eck & Waltman, 2009)

Netwerkextractie volgens bibliografische koppeling verschilt van de andere gelijktijdige-voorkomstennetwerken doordat de gelijktijdige-voorkomstenmatrix op een andere manier berekend wordt, namelijk met de bewerking $C = O O^T$. Een illustratie hiervan maakt het verschil tussen de extractiemethoden bibliografische koppeling en co-citatie mooi duidelijk. Een co-citatie-extractie op

het documentniveau is gebaseerd op een $[m \times p]$ voorkomstenmatrix O waarbij de rijen worden gevormd door de m documenten in de gedownloadede dataset en de kolommen worden gevormd door de p unieke referenties die geciteerd worden door deze documenten. De bewerking $C = O^T O$ levert een $[p \times p]$ gelijktijdige-voorkomstenmatrix op met voor ieder paar geciteerde referenties het aantal keer dat ze samen voorkomen in een document en met op de diagonaal het aantal keer dat iedere individuele referentie voorkomt in de dataset. Wanneer met dezelfde $[m \times p]$ voorkomstenmatrix O echter de bewerking $C = O O^T$ uitgevoerd wordt, is het resultaat een $[m \times m]$ gelijktijdige-voorkomstenmatrix met voor ieder documentenpaar het aantal geciteerde referenties dat ze delen en met op de diagonaal het aantal referenties van ieder individueel document in de dataset. Deze $[m \times m]$ document-documentmatrix vormt de basis voor het opstellen van een netwerk volgens bibliografische koppeling en wordt dus bekomen vertrekkende van de voorkomstenmatrix O die ook gebruikt wordt voor het opstellen van co-citatie-netwerken.

Stap 4: Normalisatie

Bij netwerken op basis van gelijktijdig voorkomen, wordt er gewerkt met bibliografische gegevens waarbij meerdere entiteiten samen voorkomen in één metadataveld. Hierdoor ontstaat een situatie waarbij per document in de dataset een verschillend aantal entiteiten kan voorkomen in het onderzochte metadataveld. Afhankelijk van de uitgevoerde analyse, kan het wenselijk zijn om dit verschil te corrigeren door bronnormalisatie toe te passen (Perianes-Rodriguez, Waltman, & van Eck, 2016; van Eck & Waltman, 2010). Neem bijvoorbeeld een co-auteurschapsanalyse: één publicatie wordt door twee auteurs geschreven, terwijl aan een andere publicatie door twintig verschillende auteurs een bijdrage wordt geleverd. Er kan gesteld worden dat de co-auteurschapsrelatie tussen de twee auteurs van de eerste paper sterker is dan die tussen de twintig auteurs van de tweede paper, maar wanneer geen bronnormalisatie toegepast wordt, blijkt dit niet uit de analyses. In dat geval bestaat er namelijk een link met een gewicht van één tussen elk paar co-auteurs van ieder document, wat in de literatuur ook *full counting* wordt genoemd (Perianes-Rodriguez et al., 2016). Wanneer er wel bronnormalisatie wordt toegepast, wordt de link tussen ieder paar co-auteurs per document gewogen voor het aantal co-auteurs van dat document, wat *fractional counting* heet (Perianes-Rodriguez et al., 2016). In het voorbeeld zouden de twee auteurs van de eerste paper dan verbonden worden door een link met een gewicht van 0,5, terwijl de linken tussen ieder paar co-auteurs van de tweede paper slechts een gewicht van 0,05 zouden hebben. Zoals aangegeven door Perianes-Rodriguez et al. (2016) kan bronnormalisatie ook toegepast worden op andere soorten netwerken, zoals co-citatie-netwerken en netwerken op basis van bibliografische koppeling. Volgens hen verschaffen *full* en *fractional counting* een verschillend perspectief op de bestudeerde bibliometrische gegevens en kunnen beide naast elkaar gebruikt worden. Hoewel ze een lichte voorkeur uitdrukken voor het perspectief dat geboden wordt door *fractional counting*, vermelden ze ook dat het gebruik hiervan de interpretatie van de resultaten van de netwerkanalyse bemoeilijkt, omdat de linken in het netwerk niet langer een integer gewicht hebben.

Naast bronnormalisatie, kunnen de bibliografische gegevens ook op het niveau van de volledige dataset genormaliseerd worden, wat in de praktijk gebeurt door de gelijktijdige-voorkomstenmatrix te normaliseren. Deze vorm van normalisatie wordt gebruikt omdat de entiteiten die vertegenwoordigd zijn in een bepaald metadataveld niet allemaal even vaak voorkomen in de

dataset, wat een invloed heeft op de waarde van een link tussen twee entiteiten die samen voorkomen. Ook dit wordt het beste duidelijk met behulp van een voorbeeld. Stel dat er een co-citatie-netwerk opgesteld moet worden en dat de drie referenties A, B en C respectievelijk 10, 15 en 50 keer voorkomen in de referentielijsten van de documenten in de dataset. Veronderstel nu dat referenties A en B tien keer samen voorkomen in de referentielijsten en dat ook de referenties A en C tien keer samen voorkomen. Zonder normalisatie zou referentie A in de analyse even sterk verbonden zijn met referenties B en C. De redenering achter het normaliseren van de gelijktijdige-voorkomstenmatrix is dat hoewel referentie A even vaak samen voorkomt met beide andere referenties, de verbinding met referentie B sterker is omdat referentie B afzonderlijk minder vaak voorkomt dan referentie C. Uitgedrukt in termen van kansen, is de kans dat referenties A en B toevallig samen zouden voorkomen in de referentielijst van een document kleiner dan de kans dat referenties A en C toevallig samen zouden voorkomen, waardoor de link tussen A en B waardevoller is. Deze vorm van normalisatie kan gebruikt worden bij alle analyses die gebaseerd zijn op gelijktijdige voorkomsten, maar moet bij bibliografische koppeling op een iets andere manier geïmplementeerd worden, namelijk door het aantal gedeelde referenties tussen twee documenten te normaliseren voor het aantal referenties in de afzonderlijke bibliografieën van beide documenten. Van Eck en Waltman (2009) analyseerden vier bekende gelijkheidsmaatstaven die gebruikt kunnen worden voor het normaliseren van de gelijktijdige-voorkomstenmatrix: de associatiesterkte, de cosinus, de inclusie-index en de Jaccardindex. Zij besloten dat gegevens over gelijktijdige voorkomsten altijd genormaliseerd dienen te worden met een probabilistische gelijkheidsmaatstaf en van de vier onderzochte maatstaven behoort enkel de associatiesterkte tot deze klasse (de drie andere behoren tot de klasse van de set-theoretische gelijkheidsmaatstaven). De associatiesterkte, ook wel nabijheidsindex, probabilistische affiniteitsindex of pseudo-cosinus genoemd, is gedefinieerd als de verhouding van het aantal gelijktijdige voorkomsten van twee entiteiten tot het product van het aantal afzonderlijke voorkomsten van iedere entiteit (van Eck & Waltman, 2009).

Stap 5: Keuze visualisatiemethode

Volgens Walsh en Renaud (2017) zijn er twee mogelijke visualisatiemethodes bij het doen van een *science mapping*-analyse, namelijk *multidimensional scaling* (MDS) en netwerkgebaseerde visualisatiemethodes. Bij MDS wordt de mate van gelijkheid tussen entiteiten omgezet naar afstanden in een multidimensionale ruimte (Hair et al., 2008, in Walsh & Renaud, 2017). Voor de duidelijkheid van de visualisatie, wordt meestal gekozen voor de tweedimensionale ruimte. Deze visualisatiemethode levert dus afstandsgebaseerde voorstellingen op, waarbij de sterkte van de relaties tussen de bibliometrische entiteiten wordt voorgesteld door de grootte van de afstand tussen deze entiteiten – sterk gerelateerde entiteiten zullen dichter bijeen geplaatst worden dan zwak gerelateerde entiteiten. (Walsh & Renaud, 2017)

Hoewel MDS gedurende lange tijd de meest gebruikte visualisatiemethode was, zijn de netwerkvisualisatiemethoden de laatste jaren populairder aan het worden. Netwerkvisualisatiemethoden maken gebruik van de randen tussen de knooppunten in een netwerk en kunnen zowel afstandsgebaseerde als graafgebaseerde voorstellingen opleveren. Bij afstandsgebaseerde voorstellingen wordt het gewicht van de randen tussen knooppunten gebruikt om sterk gerelateerde knooppunten dichter bijeen te plaatsen en zwak gerelateerde knooppunten

verder uit elkaar. Bij graafgebaseerde voorstellingen is de sterkte van de relatie tussen twee knooppunten niet zichtbaar als de afstand tussen de knooppunten, maar moet deze weergegeven worden via de eigenschappen van de randen (bijvoorbeeld als dikte van de rand of via vermelding als een label bij de rand). Welke voorstellingswijze de voorkeur krijgt, is afhankelijk van de gekozen netwerkextractiemethode en het doel van de analyse: afstandsgebaseerde voorstellingen maken het gemakkelijker om visueel clusters te identificeren, terwijl graafgebaseerde voorstellingen een meer geschikte keuze kunnen zijn wanneer alle randen in het netwerk hetzelfde gewicht hebben. (Walsh & Renaud, 2017)

Stap 6: Analyse

Overeenkomstig het doel van dit onderzoek om de evolutie in het onderzoeksdomein van organische fotovoltaïsche technologieën in kaart te brengen, zullen twee soorten analyses uitgevoerd worden. De eerste soort is een rechtstreekse kwantitatieve analyse van bibliometrische gegevens naar het voorbeeld van de paper van Dong et al. (2012). De tweede soort is het gebruik van netwerkanalysemethoden.

Het artikel van Dong et al. (2012) biedt heel wat inspiratie voor mogelijke kwantitatieve analyses, zoals het onderzoeken van de meest voorkomende documenttypes en talen, de evolutie van publicatiekenmerken, de meest productieve landen, de mate van internationale samenwerking, de belangrijkste onderzoeksdisciplines en wetenschappelijke tijdschriften en de belangrijkste titelwoorden en kernwoorden. Voor dit werk kan vooral het in kaart brengen van de algemene publicatiekarakteristieken en de belangrijke onderzoeksdisciplines, titelwoorden en kernwoorden nuttig zijn. Wat de algemene publicatiekarakteristieken betreft, rapporteren Dong et al. (2012) per jaar het totale aantal publicaties en de totale en gemiddelde aantallen pagina's, referenties en auteurs. Ook het gemiddelde aantal publicaties per wetenschappelijk tijdschrift wordt vermeld. Ze gebruiken deze gegevens om een algemene vergelijking te maken tussen de toestand van het onderzochte onderzoeksdomein aan het begin en het einde van de geanalyseerde periode. Voor de analyse van de onderzoeksdisciplines, titelwoorden en kernwoorden geven ze eerst een rangschikking van de best presterende entiteiten (disciplines of woorden) over de hele periode heen. Daarnaast rapporteren ze voor vier subperiodes voor iedere entiteit de plaats in de ranking van die periode en in hoeveel percent van de publicaties de entiteit voorkwam. Ten slotte geven ze met plus- en mintekens een indicatie van de evolutie van iedere entiteit over de vier subperiodes heen. Over de analyse van de titelwoorden, zeggen de auteurs dat "titels de kerninformatie over het onderzoek onthullen", terwijl auteurkernwoorden intacte woordgroepen zijn die "de onderzoekstrend weerspiegelen zoals die wordt ervaren door de onderzoekers" (Dong et al., 2012).

Met netwerkanalysemethoden kan informatie ontleed worden uit de netwerkstructuur van de bibliometrische gegevens. Volgens Cobo et al. (2011) laat netwerkanalyse toe om het opgestelde netwerk statistisch te analyseren. In navolging van publicaties als die van Davarzani et al. (2016), Randhawa et al. (2016) en Wang et al. (2017), zal gebruik gemaakt worden van het open source softwareprogramma Gephi om de netwerkanalyses uit te voeren (Gephi.org, 2017a).

Zoals aangegeven in stap 3, is het bij de analyse van bepaalde netwerken vooral interessant om clusters van nauw verwante entiteiten te identificeren: bij een co-woordnetwerk, een co-

citatie-netwerk van geciteerde referenties en een bibliografische-koppeling-netwerk van documenten kan op die manier namelijk een thematische kaart van het onderzoeksdomein opgesteld worden, waarbij iedere cluster staat voor een specifiek onderwerp binnen dat onderzoeksdomein. Het cluster-algoritme dat is geïntegreerd in Gephi, is gebaseerd op de modulariteit van een netwerk. De modulariteit is een maatstaf voor de mate waarin een netwerk verdeeld is in modules of clusters van knooppunten die onderling sterk verbonden zijn en is gedefinieerd als de fractie van de randen in het netwerk die knooppunten behorend tot eenzelfde cluster met elkaar verbinden, min de verwachte waarde van deze fractie wanneer de randen van ieder knooppunt in het netwerk op een willekeurige manier herverdeeld zouden worden (Newman & Girvan, 2004). De modulariteit geeft dus uitdrukking aan het idee dat het bestaan van een clusterstructuur in het netwerk gepaard gaat met een statistisch onverwachte verdeling van de randen tussen knooppunten (Newman, 2006) en kan een waarde aannemen van -1 tot +1 (Blondel, Guillaume, Lambiotte, & Lefebvre, 2008). Positieve waarden zijn indicatief voor de aanwezigheid van een clusterstructuur in het netwerk (Newman, 2006; Newman & Girvan, 2004).

Om de clusters in een netwerk te identificeren, maakt Gephi gebruik van het modulariteitsoptimalisatie-algoritme dat door Blondel et al. (2008) ontwikkeld werd en algemeen bekendheid heeft vergaard als de 'Louvain-methode' voor clusterdetectie. Bij deze methode wordt de modulariteit gemaximaliseerd aan de hand van een iteratief proces bestaande uit twee stappen: eerst worden kleine clusters geïdentificeerd door de modulariteit lokaal te optimaliseren, waarna de knooppunten binnen elke cluster worden samengevoegd zodat een nieuw netwerk gebouwd kan worden waarin de clusters de knooppunten zijn (Blondel, 2011; Blondel et al., 2008). Het is een eenvoudige en efficiënte methode die een hiërarchie van clusters in het netwerk onthult en toelaat om in te zoomen op subclusters op verschillende niveaus van detail (Blondel, 2011). Volgens Blondel (2011) was dit algoritme in 2011 één van de meest gebruikte methodes voor clusterdetectie in grote netwerken. Modulariteitsoptimalisatie voor het opsporen van de clusterstructuur in een netwerk is echter geen perfect algoritme: het werd bekritiseerd omdat kleine clusters te gemakkelijk opgenomen worden in grotere clusters, zelfs wanneer ze duidelijk verschillend zijn, waardoor belangrijke substructuren in het netwerk mogelijk onopgemerkt blijven (Fortunato & Barthélemy, 2007). Gebruik makend van de Louvain-methode kunnen de clusters wel op onderliggende niveaus onderzocht worden, maar deze controle kost veel tijd wanneer een groot aantal clusters nader geïnspecteerd moet worden.

Wanneer de clusters zijn geïdentificeerd, is ieder knooppunt toegewezen aan een zogenaamde 'modulariteitsklasse'. De belangrijkste knooppunten binnen iedere cluster kunnen vervolgens gebruikt worden bij het labelen van de clusters. Om te bepalen wat de belangrijkste knooppunten zijn, kan gebruik gemaakt worden van de gewogen graad: dit is een score per knooppunt die overeenkomt met de som van de gewichten van de linken die het knooppunt heeft naar zijn directe buren in het netwerk (m.a.w. de knooppunten die zich op een afstand van precies één link bevinden). Hoe groter de gewogen graad, hoe beter het knooppunt is ingebed in zijn lokale omgeving. Toegepast op een co-citatie-netwerk van geciteerde referenties, betekent het hebben van een hoge gewogen graad dat een referentie veel samen is geciteerd met andere bronnen, dus veel is geciteerd tout court. De referenties met een hoge gewogen graad zijn dan ook de meest impactvolle referenties, wat hen goede kandidaten maakt voor gebruik bij het labelen van de clusters. Bij een bibliografische-

koppelingnetwerk betekent het hebben van een hoge gewogen graad echter enkel dat het document veel referenties gemeenschappelijk heeft met andere documenten, wat niets zegt over het belang van het document binnen het onderzoeksdomein. Walsh and Renaud (2017) raden daarom aan om bij bibliografische-koppelingnetwerken ook het aantal keer dat een document werd geciteerd mee te nemen bij het identificeren van belangrijke knooppunten voor het labelen van de clusters.

Voor andere netwerkextractiemethoden is het interessanter om invloedrijke knooppunten in het netwerk te identificeren in plaats van op zoek te gaan naar een clusterstructuur. Dit is bijvoorbeeld het geval voor directe-citatie-netwerken met documenten als knooppunten. Gephi biedt ook voor dit type netwerken de mogelijkheid om een aantal nuttige statistieken te berekenen. Omdat directe-citatie-netwerken gerichte netwerken zijn, kunnen voor ieder knooppunt de ingraad en de uitgraad berekend worden. De ingraad komt overeen met het aantal pijlen dat aankomt bij het knooppunt en staat in een directe-citatie-netwerk van documenten voor het aantal keer dat een bepaald document is geciteerd door de andere documenten in het netwerk. De uitgraad daarentegen is gelijk aan het aantal uitgaande pijlen vanuit een knooppunt en is het equivalent van het aantal andere documenten in het netwerk dat door het document in kwestie werd geciteerd. De in- en uitgraad beperken zich tot het aantal linken met directe burenen in het netwerk en geven dus een indicatie van het lokale belang van een knooppunt in het netwerk.

Gephi bevat ook een implementatie van het *Hyperlink-Induced Topic Search* (HITS) algoritme, oorspronkelijk ontwikkeld door Jon Kleinberg om webpagina's te rangschikken (Kleinberg, 1999). Dit algoritme berekent voor ieder knooppunt twee scores: een autoriteitsscore die een indicatie geeft van de waarde van het knooppunt in het netwerk en een hubscore die een maatstaf is voor de waarde van de linken die het knooppunt heeft naar andere knooppunten in het netwerk (GitHub, 2018a). Deze scores worden berekend aan de hand van een iteratief proces, waarbij eerst de autoriteitsscore wordt berekend als de som van de hubscores van knooppunten waaruit inkomende pijlen aankomen en vervolgens de hubscore wordt berekend als de som van de autoriteitsscores van knooppunten waar uitgaande pijlen naar vertrekken. Dan worden beide scores genormaliseerd en start de volgende iteratie (GitHub, 2018a). Dit gaat in principe door tot de scores niet langer fluctueren. De autoriteitsscores en hubscores zijn een aanvulling op respectievelijk de ingraad en de uitgraad, waarbij niet gewoon het aantal linken naar directe burenen wordt geteld, maar ook rekening gehouden wordt met hoe belangrijk deze burenen zijn in het netwerk.

Daarnaast kan in Gephi een versie van het PageRank-algoritme gebruikt worden om invloedrijke knooppunten in het netwerk te identificeren. Dit algoritme werd ontwikkeld door de oprichters van Google om webpagina's te rangschikken (Brin & Page, 1998). De PageRank die aan een knooppunt toegekend wordt, is in essentie de kans dat iemand zich op een bepaald knooppunt bevindt na op een willekeurige manier een groot aantal linken tussen knooppunten te hebben gevolgd, met af en toe een sprong tussen knooppunten die niet door een rand verbonden zijn (GitHub, 2018b; Page, Brin, Motwani, & Winograd, 1999). De PageRank-score van een knooppunt wordt dus bepaald door de inkomende pijlen en brengt het belang van de knooppunten waaruit deze pijlen vertrekken in rekening. Het kan een aanvulling bieden op de ingraad en de autoriteitsscore.

Een laatste statistiek die nuttig is om de meest invloedrijke knooppunten in het netwerk te bepalen, is de eigenvectordichtheidscentraliteit. De dichtheidscentraliteit van een knooppunt in een netwerk

is gedefinieerd als de afstand van het knooppunt tot alle andere knooppunten in het netwerk, gemeten als het omgekeerde van de som van het aantal linken dat gevolgd moet worden om ieder ander knooppunt te bereiken (Hanneman & Riddle, 2005). Hoe groter deze score, hoe meer 'centraal' het knooppunt zich bevindt in het globale netwerk (in tegenstelling tot de ingraad en uitgraad, die enkel de directe burens in het netwerk in rekening nemen). Wanneer gewerkt wordt met grote netwerken, kan de dichtheidscentraliteit echter een vertekend beeld geven door de aanwezigheid van lokale structuren in het netwerk: een knooppunt dat zich in de buurt van een sterk gelinkte groep knooppunten bevindt, maar relatief ver verwijderd is van de rest van het netwerk, kan een even grote dichtheidscentraliteit hebben als een knooppunt dat zich op een gemiddelde afstand tot alle knooppunten bevindt (Hanneman & Riddle, 2005). De eigenvectordichtheidscentraliteit (EVDC) daarentegen geeft een score voor de dichtheid van een knooppunt ten opzichte van de andere knooppunten in de globale structuur van het netwerk en hecht minder belang aan lokale substructuren (Hanneman & Riddle, 2005). Deze scores worden berekend door een factoranalyse uit te voeren: de ladingen van de knooppunten op de ongeroteerde eerste factor zijn hun EVDC-scores (Hanneman & Riddle, 2005). De knooppunten met de grootste eigenvectordichtheidscentraliteit zijn het beste ingebed in het onderzochte netwerk.

Stap 7: Opmaak netwerkgrafiek

Gephi kan niet alleen gebruikt worden om netwerken kwantitatief te analyseren, maar ook om de netwerken te visualiseren en op te maken zodat de visuele representatie van de structuur in het netwerk ondersteuning kan bieden bij het interpreteren van de resultaten. Op de website van Gephi is een layout-tutorial beschikbaar die een goed beeld geeft van de mogelijkheden die het programma biedt.

Naar analogie met stap 6, werd er gezocht naar een layout-algoritme dat gebruikt kan worden voor het visualiseren van clusterstructuren en naar een dat nuttig is voor het identificeren van belangrijke knooppunten in het netwerk. De OpenOrd-layout blijkt specifiek gericht te zijn op het visueel onderscheiden van clusters en verwacht als input een netwerk waarvan de randen geen richting hebben, maar wel een gewicht (Gephi.org, 2017b). Wat het identificeren van belangrijke knooppunten betreft, is de zogenaamde Force Atlas 2-layout een goede keuze. Dit layout-algoritme is geschikt voor gebruik bij grote netwerken en biedt een compromis tussen een snelle werking en een goede interpreteerbaarheid (Gephi.org, 2017b).

Stap 8 van de *science mapping*-analyse, interpretatie van de resultaten, behoeft weinig extra uitleg: daarbij komt het erop aan om nuttige kennis te ontleen uit de resultaten die via de vorige stappen bekomen werden.

2.3 Conclusie

Bij een bibliometrische literatuurstudie kunnen rechtstreekse kwantitatieve analyses op bibliografische gegevens van publicaties uitgevoerd worden om algemene statistieken te verkrijgen die de karakteristieken van het onderzoeksdomein cijfermatig uitdrukken, of kan er gebruik gemaakt worden van netwerkanalysemethoden om inzicht te krijgen in de manier waarop de entiteiten die actief zijn binnen een onderzoeksdomein zich tot elkaar verhouden. Figuur 5 geeft een overzicht van

de verschillende mogelijkheden die beschikbaar zijn wanneer de netwerkbenadering wordt gebruikt, gaande van het in kaart brengen de belangrijke onderwerpen binnen het onderzoeksdomein tot het identificeren van samenwerkingsverbanden tussen actoren.

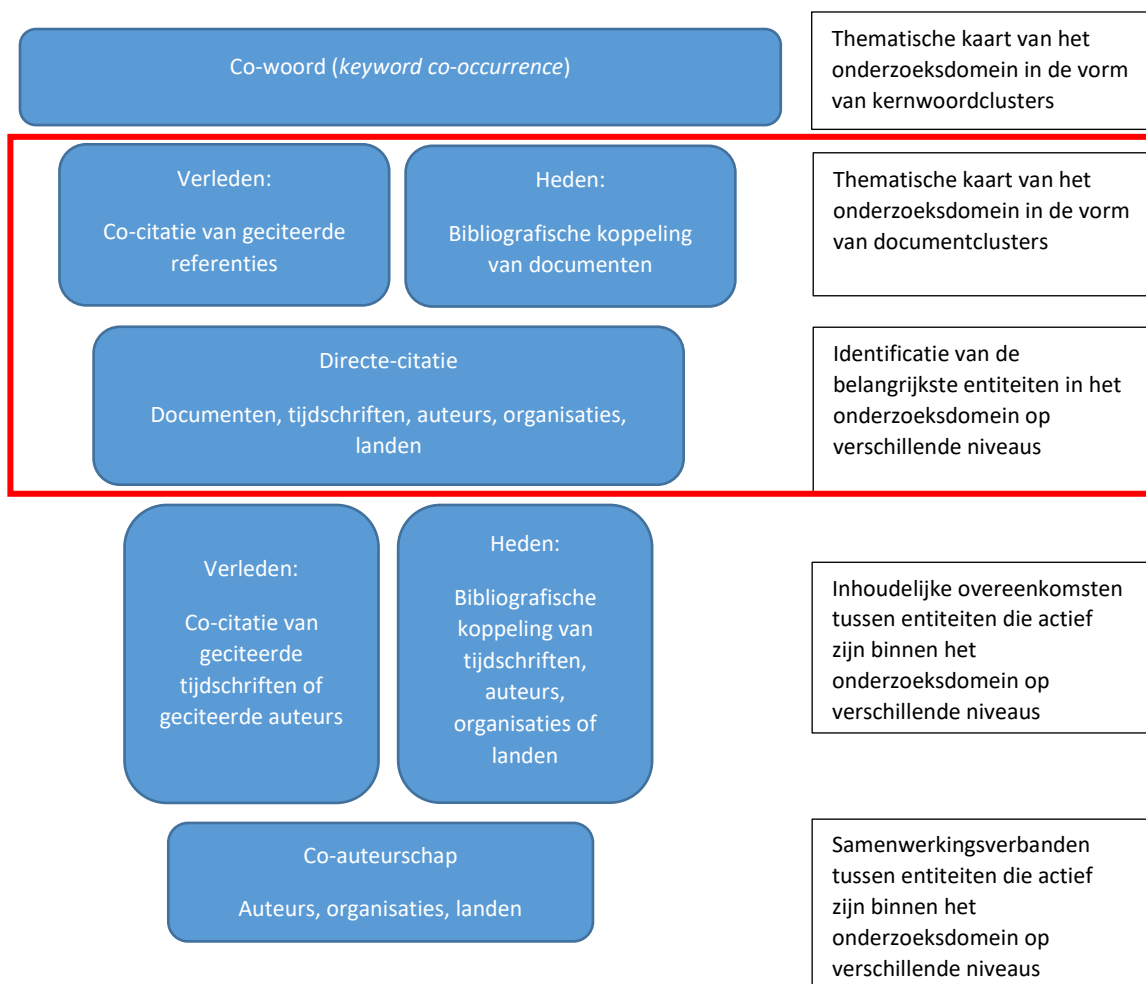
Om een goede bibliometrische literatuurstudie uit te voeren, kan het stappenplan voor *science mapping*-analyses van Cobo et al. (2011) gevolgd worden (figuur 3). Eerst moeten bibliografische gegevens verzameld worden, waarvoor een databank en een dataselectiestrategie gekozen moeten worden. Dan moeten de gegevens voorbereid worden, zodat ze geschikt zijn voor de beoogde analyses: duplicate gegevens moeten verwijderd of op elkaar afgestemd worden, de gegevens kunnen ingedeeld worden in afzonderlijke tijdsperiodes en er kan gekozen worden om enkel met de belangrijkste gegevens verder te werken door datareductie of netwerkreductie toe te passen. Wanneer de opzet is om rechtstreekse kwantitatieve analyses uit te voeren, kan na stappen 1 en 2 meteen overgegaan worden tot de analyse van de bibliografische gegevens, gevolgd door de interpretatie van de resultaten. Wanneer het echter de bedoeling is om netwerkanalysemethoden te gebruiken, moet na stap 2 een netwerkeextractiemethode gekozen worden (figuur 5), moet beslist worden of de gegevens genormaliseerd moeten worden en moet een keuze gemaakt worden tussen de visualisatiemethoden *multi-dimensional scaling* of netwerkvisualisatie. Dan pas volgt de analysestap, waarbij afhankelijk van de gekozen netwerkeextractiemethode best de clusterstructuur van het netwerk wordt geanalyseerd of op zoek wordt gegaan naar de belangrijkste knooppunten. Nadat de netwerkstructuur ook visueel verduidelijkt is door het netwerk op de juiste manier op te maken, kan uiteindelijk overgegaan worden tot het interpreteren van de bekomen resultaten.

Hoofdstuk 3. Bibliometrische literatuurstudie

Met dit hoofdstuk wordt getracht de volgende onderzoeksvragen te beantwoorden:

5. Welke onderwerpen domineerden het OPV-onderzoeksdomein gedurende de periode 2008-2017?
6. Hoe zijn de belangrijke onderwerpen afzonderlijk geëvolueerd gedurende deze periode?
7. Welke zijn de belangrijkste publicaties binnen ieder onderwerp?

De bibliometrische literatuurstudie werd uitgevoerd op de rood omkaderde niveaus in figuur 6. Het onderzoek verliep ook in twee fasen, omdat de resultaten van de analyse op niveau 2 gebruikt werden als basis voor de analyse op niveau 3. Voor beide analyseniveaus werd de gestructureerde aanpak van het stappenplan voor *science mapping*-analyses van Cobo et al. (2011) aangehouden (figuur 3).



Figuur 6: Analyseniveaus voor de bibliometrische literatuurstudie

3.1 Thematische kaarten van het onderzoeksdomein in de vorm van documentclusters

3.1.1 Methode

Stap 1. Gegevens verzamelen

In eerste instantie werd overwogen om gebruik te maken van zowel de WoS-databank als de Scopus-databank, omdat het nemen van de doorsnede van de gegevens in beide databanken meer zekerheid zou kunnen bieden over de precisie van dataset. Deze aanpak werd echter verhinderd door de software die gebruikt zou worden voor het uitvoeren van de analyses. De gemakkelijkste manier om de doorsnede van de datasets uit beide databanken te bepalen was het downloaden van de gegevens in *tab-delimited* formaat, zodat de gegevens in spreadsheetvorm samengevoegd en bewerkt konden worden met programma's als Excel en OpenRefine. Dit was echter geen optie, omdat het bibliometrische softwareprogramma BibExcel, waarmee de analyses zouden worden uitgevoerd, enkel werkt met gegevens in tekstformaat. Er werd bekeken of het mogelijk was om EndNote te gebruiken om de bibliografische gegevens in tekstformaat samen te brengen en de doorsnede te bepalen, maar de bibliografische gegevens die vanuit EndNote worden geëxporteerd, bleken niet volledig op dezelfde manier te zijn vormgegeven als de oorspronkelijk gedownloade tekstbestanden, waardoor deze exportbestanden evenmin gebruikt konden worden om analyses uit te voeren in BibExcel. Daarom werd de piste van het gebruiken van de doorsnede van de datasets uit beide databanken verlaten.

Vervolgens werd gekozen om de Scopus-databank te gebruiken voor de gegevensextractie, wegens vermoedens dat de precisie van de gegevens uit Scopus groter zou zijn dan de precisie van de gegevens uit WoS. Dit vermoeden was gebaseerd op het feit dat in de WoS-databank ook automatisch gegenereerde Keywords Plus worden doorzocht wanneer het *topic*-zoekveld gebruikt wordt en de vrees dat dit voornamelijk vals-positieve zoekresultaten zou opleveren. Er werd een dataset gedownload uit Scopus die werd voorbereid voor het uitvoeren van de analyses. Bij aanvang van de analyses bleek echter dat de referentiegegevens van de documenten in de gedownloade dataset niet waren gestandaardiseerd: de referenties bleken te zijn opgenomen in de database zoals ze werden vermeld in het document, wat resulteerde in een situatie waarbij dezelfde referentie soms voorkwam zonder vermelding van de titel en soms met. Omdat dit probleem zelfs met OpenRefine niet op een snelle manier kon worden opgelost, moest uiteindelijk geconcludeerd worden dat de Scopusgegevens geen goede basis waren voor het uitvoeren van citatieanalyses.

De dataset die uiteindelijk gebruikt werd voor de analyses, werd op 8 juli 2017 gedownload vanuit de online versie van de WoS-database met toegang via de UHasselt. Er werd gezocht in de WoS Core Collection, die tien verschillende indexen omvat (tabel 5).

Tabel 5: Inhoud Web of Science Core Collection

- | |
|--|
| Web of Science Core Collection: Citatie-indexen |
| <ul style="list-style-type: none">• Science Citation Index Expanded (SCI-EXPANDED) – 1955 tot heden• Social Sciences Citation Index (SSCI) – 1956 tot heden• Arts & Humanities Citation Index (A&HCI) – 1975 tot heden |

<ul style="list-style-type: none"> • Conference Proceedings Citation Index – Science (CPCI-S) – 1990 tot heden • Conference Proceedings Citation Index – Social Sciences & Humanities (CPCI-SSH) – 1990 tot heden • Book Citation Index – Science (BKCI-S) – 2005 tot heden • Book Citation Index – Social Sciences & Humanities (BKCI-SSH) – 2005 tot heden • Emerging Sources Citation Index (ESCI) – 2015 tot heden
Web of Science Core Collection: Chemische indexen <ul style="list-style-type: none"> • Current Chemical Reactions (CCR-EXPANDED) – 1986 tot heden • Index Chemicus (IC) – 1993 tot heden

De zoekopdracht die gebruikt werd voor de dataselectie, werd met veel zorg opgesteld. Met behulp van een basiszoekopdracht (tabel 6) werden invloedrijke publicaties binnen het onderzoeksdomein geïdentificeerd, waarvan de titel, de kernwoorden, de samenvatting en de introductie werden gelezen op zoek naar kandidaattrefwoorden. Naar deze invloedrijke publicaties werd gezocht in zowel WoS als Scopus. Uit WoS werden de *hot papers* (de meest geciteerde documenten die werden gepubliceerd in de afgelopen twee jaren), de meest recente en de meest geciteerde *highly cited papers* en de meest recente en meest geciteerde publicaties van de topauteur binnen de zoekresultaten (zijnde Christoph J. Brabec) geselecteerd. Uit Scopus werden de meest geciteerde documenten en de meest recente en meest geciteerde publicaties van de topauteur binnen de zoekresultaten (eveneens Christoph J. Brabec) geselecteerd, waar verschillend van de documenten gevonden in WoS. Dit leverde 33 publicaties op, waaruit een lijstje van tien kandidaattrefwoorden werd afgeleid (tabel 7, nummers 1-10). *Dye-sensitized solar cells* en *perovskite solar cells* zijn ook in de lijst opgenomen, ondanks het feit dat het geen puur organische fotonvoltaïsche technologieën zijn, omdat er publicaties over deze technologieën in de selectie voorkwamen.

Tabel 6: Basiszoekopdracht voor identificatie van bijkomende trefwoorden

Databank	Zoekopdracht	Bereik
WoS Core Collection	TS=(organic NEAR/5 photovoltaic\$) AND TS=(organic NEAR/5 "solar cell\$")	1.211 resultaten
Scopus	TITLE-ABS-KEY(organic W/5 photovoltaic) AND TITLE-ABS-KEY(organic W/5 "solar cell")	3.218 resultaten

Tabel 7: Lijst met kandidaattrefwoorden voor uitgebreide zoekopdracht

1. Organic photovoltaics	2. Organic solar cells
3. Polymer solar cells	4. Small molecule solar cells
5. Bulk heterojunction solar cells	6. Excitonic solar cells
7. Molecular solar cells	8. Mesoscopic solar cells
9. Dye-sensitized solar cells	10. Perovskite solar cells
11. Plastic solar cells	

Elk van deze zoektermen werd ingegeven in de zoekwoordplanner van Google Adwords, maar dit leverde geen bruikbare nieuwe trefwoorden op – veel van de gesuggereerde trefwoordcombinaties verwezen niet specifiek naar organische fotonvoltaïsche technologieën (*photovoltaic system*, *polycrystalline solar cells*, *amorphous solar panels* ...) of beschreven eigenschappen die niet enkel van toepassing zijn op OPVs (*cheap solar cells*, *flexible solar cells* ...). Het gebruik van de

zoekwoordplanner maakte wel duidelijk dat *solar cells* in tabel 7 telkens vervangen kan worden door *solar panels*, *photovoltaic cells* of kortweg *photovoltaics*. De zoekterm *solar panels* is echter ambigu, omdat er naast zonnepanelen voor elektriciteitsproductie (*photovoltaic solar panels*) ook zonnepanelen voor warmteopwekking (*thermal solar panels*) bestaan.

Om de toepasselijkheid en relevantie van de zoektermen te controleren, werd achtergrondinformatie opgezocht op het internet en werden de zoektermen één per één ingegeven in de UHasselt Discovery Service. Dit proces leverde één nieuwe zoekterm op, namelijk *plastic solar cells*, dat als synoniem gebruikt wordt voor *polymer solar cells* (tabel 7, nummer 11). Het woord *polymeric* kan bovendien gebruikt worden als alternatief voor het woord *polymer*. Verder bleek dat de zoektermen *excitonic solar cells* en *molecular photovoltaic cells* kunnen verwijzen naar zowel *dye-sensitized solar cells* als naar OPVs en dat de zoekterm *mesoscopic solar cells* nauw verbonden is met *dye-sensitized solar cells*.

De lijst van verzamelde zoektermen in tabel 7 werd ter controle voorgelegd aan een expert binnen het onderzoeksdomein. Uit het gesprek met de expert werd duidelijk dat trefwoorden 1-5 en trefwoord 11 zeker gebruikt konden worden en dat trefwoorden 6 en 7 eventueel ook toegevoegd konden worden; trefwoord 8 werd best weggelaten. Zoals eerder aangegeven, vertegenwoordigen trefwoorden 9 en 10 twee strekkingen binnen het onderzoek naar fotonvoltaïsche technologieën van de derde generatie die in principe los staan van het onderzoek naar OPVs: *dye-sensitized solar cells* en *hybrid solar cells*, waar perovskietzonnecellen onder vallen, bevatten wel een organische component, maar zijn niet volledig organisch zoals OPVs. Daarom werd beslist om trefwoord 9 te gebruiken als uitsluitingstrefwoord. Trefwoord 10 werd uiteindelijk toch opgenomen in de zoekopdracht, omwille van vermoedens dat de snelle opkomst van perovskietzonnecellen de evolutie van het OPV-onderzoeksveld heeft beïnvloed en de verwachting dat het expliciet opnemen van dit type zonnecellen extra context kan verschaffen bij het in kaart brengen van de evolutie van het onderzoek naar OPVs.

De finale zoekopdracht is weergegeven in tabel 8a. Hieraan is de term *light-emitting diodes* toegevoegd als extra uitsluitingstrefwoord, omdat opgemerkt werd dat de zoekresultatenlijst in WoS publicaties over LEDs bevatte die niet gerelateerd waren aan OPVs, maar die louter opgepikt werden op basis van automatisch gegenereerde Keywords Plus. Toegepast op de WoS Core Collection voor de periode 2008-2017, leverde de zoekopdracht zonder uitsluiting van publicaties over LEDs 29.321 zoekresultaten op, terwijl de zoekopdracht met uitsluiting van publicaties over LEDs 26.678 zoekresultaten opleverde.

Tabel 8: Uitgebreide zoekopdracht en verfijnde zoekopdrachten met aantal zoekresultaten

	Zoekopdracht	Bereik
a)	(TS=(organic NEAR/5 photovoltaic\$) OR TS=(organic NEAR/5 "solar cell\$") OR TS=(polymer* NEAR/3 photovoltaic\$) OR TS=(polymer* NEAR/3 "solar cell\$") OR TS=("small molecule\$" NEAR/3 photovoltaic\$) OR TS=("small molecule\$" NEAR/3 "solar cell\$") OR TS=("bulk heterojunction" NEAR/3 photovoltaic\$) OR TS=("bulk heterojunction" NEAR/3 "solar cell\$") OR TS=("plastic photovoltaic\$" OR "plastic solar cell\$") OR TS=("excitonic photovoltaic\$" OR "excitonic solar cell\$") OR TS=("molecular photovoltaic\$" OR	26.678 resultaten

	"molecular solar cell\$") OR TS=(perovskite\$ NEAR/5 photovoltaic\$) OR TS=(perovskite\$ NEAR/5 "solar cell\$") NOT (TS=("dye sensitized") OR TS=("light emitting diode\$"))	
b)	Enkel standaardartikels en beoordelingsartikels	23.980 resultaten
c)	Enkel relevante onderzoeksdisciplines	23.953 resultaten

Vooraleer de dataset gedownload werd, werd hij verder verfijnd (tabel 8, b-c). Enkel de standaardartikels en beoordelingsartikels werden behouden, omdat de kwaliteit van deze documenttypes het best gegarandeerd is en om het dubbel opnemen van publicaties te vermijden. De 23.055 standaardartikels en 925 beoordelingsartikels vertegenwoordigden samen 89,89% van het totaal aantal zoekresultaten. Vervolgens werden resultaten uit irrelevante onderzoeksdisciplines uitgesloten. Daarvoor werden de zoekresultaten van mogelijk irrelevante onderzoeksdisciplines nader geïnspecteerd en wanneer de meerderheid van deze resultaten niet op een duidelijke manier gerelateerd was aan OPV, werd de discipline uitgesloten. De uitgesloten disciplines zijn opgesomd in tabel 9.

Tabel 9: Uitgesloten onderzoeksdisciplines

Pharmacology Pharmacy	Cell biology
Telecommunications	Microbiology
Automation control systems	Neurosciences Neurology
Information science Library science	Research experimental medicine
Biomedical social sciences	Surgery
Business economics	Water resources

Omdat aanvankelijk getwijfeld werd aan de precisie van de zoekresultaten in de WoS-databank, werd dit na het downloaden van de gegevens gecontroleerd. Hiervoor werden de gegevens voor de volledige periode met behulp van BibExcel omgezet van het tekstformaat waarin ze gedownload werden naar het *tab-delimited* formaat, wat het mogelijk maakte om de gegevens in spreadsheetvorm te openen met Excel. Om de precisie te controleren, werd als volgt geredeneerd: wanneer de trefwoorden van de zoekopdracht voorkomen in de titel of de lijst met auteurkernwoorden, hebben de auteurs van de publicatie een bewuste keuze gemaakt om dit woord te vermelden en is de kans groot dat dit artikel relevant is voor het onderzoek. Hetzelfde geldt voor het gebruik van de trefwoorden in de samenvatting van een publicatie, al is het risico dat de trefwoorden hierin terloops vermeld werden wel groter. Artikels waarbij de trefwoorden voorkwamen in de titel, de auteurkernwoorden of de samenvatting, werden als 'precies' gelabeld. Alle overige artikels werden opgepikt via het Keywords Plus-zoekveld op basis van automatisch gegenereerde kernwoorden, waardoor de relevantie van deze publicaties twijfelachtig is. Zij werden als 'niet-precies' gelabeld. De resultaten van de precisiecontrole zijn toegevoegd in Bijlage 2. De gedownloade dataset omvatte een precieze selectie van 19.871 artikels, wat neerkwam op een precisie van 83% ten opzichte van het totale aantal publicaties in de dataset. Om te beoordelen of deze precisie acceptabel was, moest de gedownloade dataset vergeleken worden met een alternatieve dataset. Wetende dat ook gekozen kon worden om de zoekopdracht in WoS zo te formuleren dat er enkel in het titelzoekveld naar trefwoorden gezocht zou worden, wat een dataset zou opleveren die volgens

de bovenstaande redenering een precisie van 100% zou hebben, werd opgezocht hoe groot het bereik van deze alternatieve dataset zou zijn. Daaruit bleek dat de alternatieve dataset met een precisie van 100% een bereik zou hebben van 14.295 publicaties. Tegenover de precisieafname van 17% ten opzichte van de alternatieve dataset, stond dus een toename van het precieze bereik van 39%. Op basis hiervan werd besloten dat de precisie van de gedownloadede dataset acceptabel was.

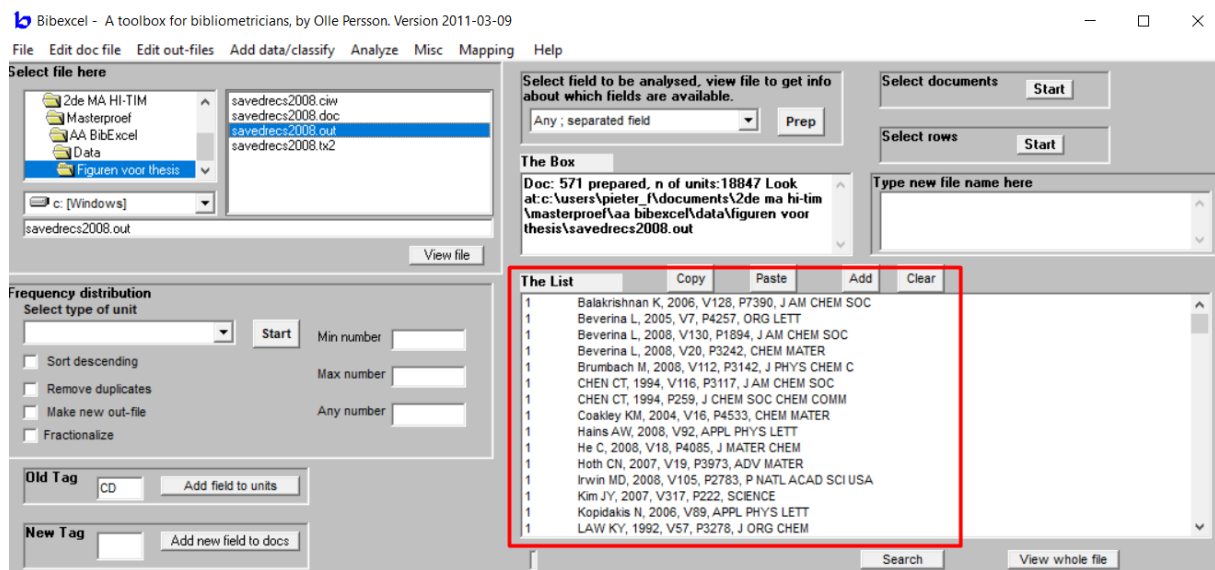
Stap 2. Gegevens voorbereiden

Van de vier voorbereidende processen – ontdebbling, indeling in tijdsperiodes, datareductie en netwerkreductie – ondersteunt BibExcel enkel de laatste twee. Om ontdebbling en indeling in tijdsperiodes te kunnen toepassen, zijn dus bijkomende maatregelen nodig. Wanneer met BibExcel gewerkt wordt, begint het voorbereiden van de gegevens eigenlijk al met het downloaden ervan: door de gegevens geordend volgens publicatiejaar te downloaden, kunnen ze zowel afzonderlijk als voor de gehele tijdsperiode bestudeerd worden. Omdat het in WoS sowieso enkel mogelijk is om uitgebreide bibliografische gegevens per document te downloaden in sets van 500 zoekresultaten per keer, is deze aanpak zelfs niet zoveel arbeidsintensiever dan het ongeordend downloaden. De gegevens werden gedownload in het ISI Common Export-formaat (extensie .ciw), bedoeld voor het importeren van de bibliografische gegevens in EndNote. Omdat dit een eenvoudig tekstformaat is, kunnen de gedownloadede bestanden geopend worden met programma's voor tekstbewerking, zoals Wordpad. In ieder jaar van de onderzochte tijdsperiode werden er meer dan 500 artikels gepubliceerd, dus moesten er voor ieder jaar een aantal gedownloadede bestanden samengevoegd worden (van twee bestanden voor de 571 artikels uit 2008 tot tien bestanden voor de 4597 artikels uit 2017).

Nadat de gegevens met behulp van Wordpad samengevoegd waren in een tekstbestand per jaar, werden deze bestanden één per één geïmporteerd in een EndNote-bibliotheek om ontdebbling op documentniveau te kunnen doen met behulp van de ingebouwde functie voor het identificeren van duplicate referenties. Geen enkel document kwam meer dan één keer in de dataset voor, maar dankzij het rangschikken van de documenten op naam van de auteurs werd wel duidelijk dat twee documenten geen auteursgegevens bevatten. Deze documenten werden opgezocht in de tekstbestanden en manueel verwijderd. Vervolgens werden negen nieuwe tekstbestanden gecreëerd, waarbij telkens de gegevens van een extra jaar werden toegevoegd aan het bestand dat alle gegevens van de voorgaande jaren bevatte (een tekstbestand voor de periode 2008-2009, een voor de periode 2008-2010, enzovoorts). Dit soort bestanden laat toe om de evolutie doorheen de tijd te volgen op een geaggregeerde manier, als aanvulling op het onderzoeken van de toestand van het onderzoeksdomein in elk afzonderlijk jaar.

De tekstbestanden met bibliografische gegevens konden nu bewerkt worden met BibExcel. De eerste stap in BibExcel was het bewerken de opmaak van het tekstbestand zodat het programma in de volgende stappen de gegevens juist zou kunnen lezen. Wanneer dit gebeurd was, kon een bestand met de extensie .out gegenereerd worden vertrekkende van het metadataveld waarin zich de gegevens bevinden die de basis zouden vormen voor de uit te voeren analyses. Aangezien het de bedoeling was om bibliografische-koppelinganalyses uit te voeren en zo de strekkingen binnen het onderzoeksdomein (en hun evolutie) te identificeren, werd het metadataveld met de geciteerde referenties van de documenten gebruikt. Het resultaat was een *tab-delimited* OUT-bestand met twee

kolommen: de linkerkolom bevatte de identificatienummers voor de documenten in de dataset en de rechterkolom bevatte de afzonderlijke referenties van ieder document, zoals afgebeeld in figuur 7.



Figuur 7: OUT-bestand in BibExcel

Met behulp van een commando in BibExcel werden de woorden in drukletters omgevormd tot woorden in kleine letters. Het resulterende bestand met de extensie *.low* kon als *tab-delimited* bestand geïmporteerd worden in OpenRefine om ontduubeling op het niveau van de geciteerde referenties toe te passen. Hoewel de geciteerde referenties in de WoS-databank meer gestandaardiseerd zijn dan die in de Scopus-databank, was ontduubeling nodig vanwege verschillen in het gebruik van leestekens (bijvoorbeeld: puntjes achter de initialen van de auteur of niet, een liggend streepje tussen de initialen van de auteur of niet, puntjes achter ieder woord in de afkorting van het tijdschrift of niet).

Ontduubeling met behulp van OpenRefine is gebaseerd op een zogenaamd *text facet* dat bepaalt welke tekstregels voorkomen in de dataset en hoeveel keer ze voorkomen. Daarna kunnen clusteralgoritmes toegepast worden om groepen van gelijkaardige tekstregels te identificeren en in een paar klikken kunnen de elementen binnen een cluster in overeenstemming worden gebracht met het vaakst voorkomende element binnen die cluster (figuur 8). OpenRefine biedt de keuze tussen een aantal clusteralgoritmes. Om te vermijden dat verschillende referenties geïdentificeerd zouden worden als één en dezelfde referentie en onterecht samengevoegd zouden worden, werden de twee minst agressieve clusteralgoritmes gebruikt, namelijk de *fingerprint*-methode gevolgd door de *2-gram fingerprint*-methode. Het resultaat van deze bewerking werd vervolgens geëxporteerd als een *tab separated values*-bestand en opnieuw omgezet naar een gewoon tekstbestand. Dat ontduubelde OUT-bestand vormde de input voor de netwerkextractie-algoritmen van BibExcel.

Cluster & Edit column "Column 2"

This feature helps you find groups of different cell values that might be alternative representations of the same thing. For example, the two strings "New York" and "new york" are very likely to refer to the same concept and just have capitalization differences, and "Gödel" and "Godel" probably refer to the same person. [Find out more ...](#)

Method Keying Function 22 clusters found

Cluster Size	Row Count	Values in Cluster	Merge?	New Cell Value
3	80	<ul style="list-style-type: none"> Reyes-Reyes M, 2005, V87, Appl Phys Lett (77 rows) Reyes-Reyes M., 2005, V87, Appl Phys Lett (2 rows) Reyesreyes M, 2005, V87, Appl Phys Lett (1 rows) 	<input checked="" type="checkbox"/>	Reyes-Reyes M, 2005, V87, A
2	38	<ul style="list-style-type: none"> Kim Y, 2005, V86, Appl Phys Lett (37 rows) Kim Y., 2005, V86, Appl Phys Lett (1 rows) 	<input checked="" type="checkbox"/>	Kim Y, 2005, V86, Appl Phys I
2	3	<ul style="list-style-type: none"> Bailey-Salzman RF, 2007, V91, Appl Phys Lett (2 rows) Baileysalzman RF, 2007, V91, Appl Phys Lett (1 rows) 	<input checked="" type="checkbox"/>	Bailey-Salzman RF, 2007, V9
2	12	<ul style="list-style-type: none"> Waldauf C, 2006, V89, Appl Phys Lett (11 rows) Waldauf C., 2006, V89, Appl Phys Lett (1 rows) 	<input checked="" type="checkbox"/>	Waldauf C, 2006, V89, Appl P
2	31	<ul style="list-style-type: none"> Kim K, 2007, V90, Appl Phys Lett (30 rows) Kim K., 2007, V90, Appl Phys Lett (1 rows) 	<input checked="" type="checkbox"/>	Kim K, 2007, V90, Appl Phys I

Choices in Cluster:

Rows in Cluster:

Average Length of Choices:

Length Variance of Choices:

2 — 3

2 — 80

28 — 50

0.5 — 1.5

Select All
Unselect All
Export Clusters
Merge Selected & Re-Cluster
Merge Selected & Close
Close

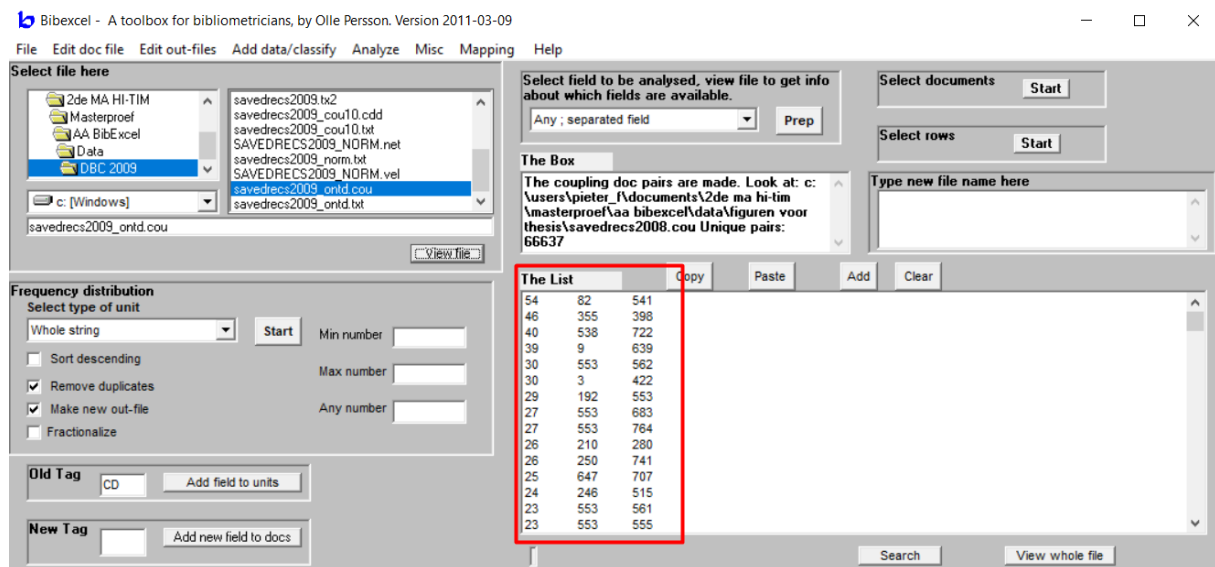
Figuur 8: Ontdubbeling met behulp van clusteralgoritmes in OpenRefine

Stap 3. Netwerkextractie

Vertrekkende van een OUT-file gebaseerd op het metadataveld met gegevens over de geciteerde referenties, kan BibExcel zowel co-citatieanalyses van geciteerde referenties als bibliografische-koppelinganalyses van documenten uitvoeren. In eerste instantie was het de bedoeling om de wetenschappelijke steunpilaren van het onderzoeksdomein te identificeren door een co-citatieanalyse uit te voeren op de gegevens voor de volledige periode van 2008 tot 2017 en om de evolutie van de belangrijkste onderwerpen binnen het onderzoeksdomein in kaart te brengen door bibliografische-koppelinganalyses uit te voeren voor het jaar 2008 tot en met de periode 2008-2017. Bij het uitvoeren van deze analyses bleek echter dat de berekeningen voor volledige dataset met gegevens over 23.951 artikels meer rekenkracht vereisten dan wat BibExcel aankon. Er werd bekeken of andere bibliometrische softwareprogramma's (VOSviewer, Sci² Tool, CiteSpace) een oplossing konden bieden voor dit probleem, maar dat bleek niet het geval te zijn. Daarom werd besloten om verder te werken met BibExcel, maar gegevens van de afzonderlijke jaren te gebruiken om de evolutie van het onderzoeksdomein in kaart te brengen.

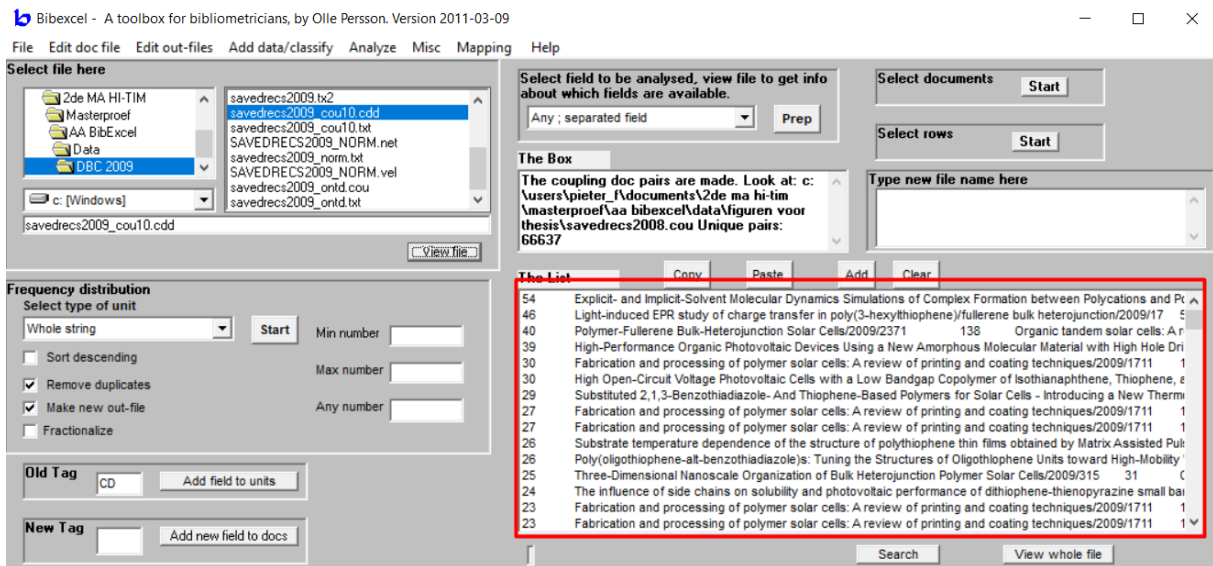
Voor elk jaar van 2008 tot en met 2017 werd een bibliografische-koppelinganalyse uitgevoerd met als input het via OpenRefine ontdubbelde OUT-bestand. Dit leverde een *tab-delimited* tekstbestand op met de extensie *.cou*, met drie getalwaarden per rij: de getalwaarde in de linkerkolom stond voor het aantal referenties dat gedeeld werd door de twee documenten waarvan de documentnummers werden weergegeven in de midden- en rechterkolommen (figuur 9). BibExcel berekent de gedeelde referenties voor elk documentenpaar in de dataset, waardoor het COU-bestand ook documentenparen vermeldt die slechts één referentie gemeenschappelijk hebben. Er werd beslist om enkel documentenparen met minimum tien gedeelde referenties te behouden voor de verdere

analyse, om te kunnen focussen op de meest relevante documenten en om de volgende bewerkingen in BibExcel te versnellen. De gegevens over documentenparen met minder dan tien gemeenschappelijke referenties werden verwijderd door het COU-bestand bewerken in WordPad en het opnieuw op te slaan als een gewoon tekstbestand.



Figuur 9: COU-bestand in BibExcel, output van netwerkextractie volgens bibliografische koppeling

Omdat de identificatienummers van de documenten niet veel informatie prijsgeven, kunnen labels toegekend worden aan de getallen in de midden- en rechterkolom. BibExcel biedt de mogelijkheid om deze labels zelf te ontwerpen met informatie uit metadatavelden van de documenten in de dataset. Er werd gekozen om de titel, het publicatiejaar, het aantal keer dat het document werd geciteerd en het aantal referenties van het document op te nemen in het label. De titel, het publicatiejaar en het aantal referenties werden verbonden met een /-teken, maar het aantal referenties werd aangehecht met een tab. Deze aanpak maakte het mogelijk om de het aantal co-citatie tussen twee documenten in de volgende stap van het stappenplan te normaliseren. Het bestand met de gelabelde documentenkoppels is eveneens een *tab-delimited* tekstbestand, dit keer met de extensie *.cdd* (figuur 10).



Figuur 10: CDD-bestand in BibExcel, met labels in plaats van documentnummers

Stap 4. Normalisatie

Om het aantal gedeelde referenties tussen twee documenten te normaliseren op basis van het aantal referenties dat ieder document afzonderlijk heeft, werd gekozen voor de associatiesterktemethode, waarbij het aantal gedeelde referenties gedeeld wordt door het product van het aantal referenties van de individuele documenten. Hiervoor werd het CDD-bestand geopend met Excel, waarbij het aantal referenties van de individuele documenten automatisch van de labels werd afgesplitst dankzij de scheiding met een tab (figuur 11). Na het berekenen van de genormaliseerde waarden voor het aantal gedeelde referenties, werden de oorspronkelijke getallen in kolom A vervangen door de genormaliseerde waarden en werden de kolommen met de aantallen referenties van de individuele artikelen verwijderd. Dit bestand met drie kolommen werd vervolgens opnieuw opgeslagen als een tekstdocument met tabs als scheidingsteken.

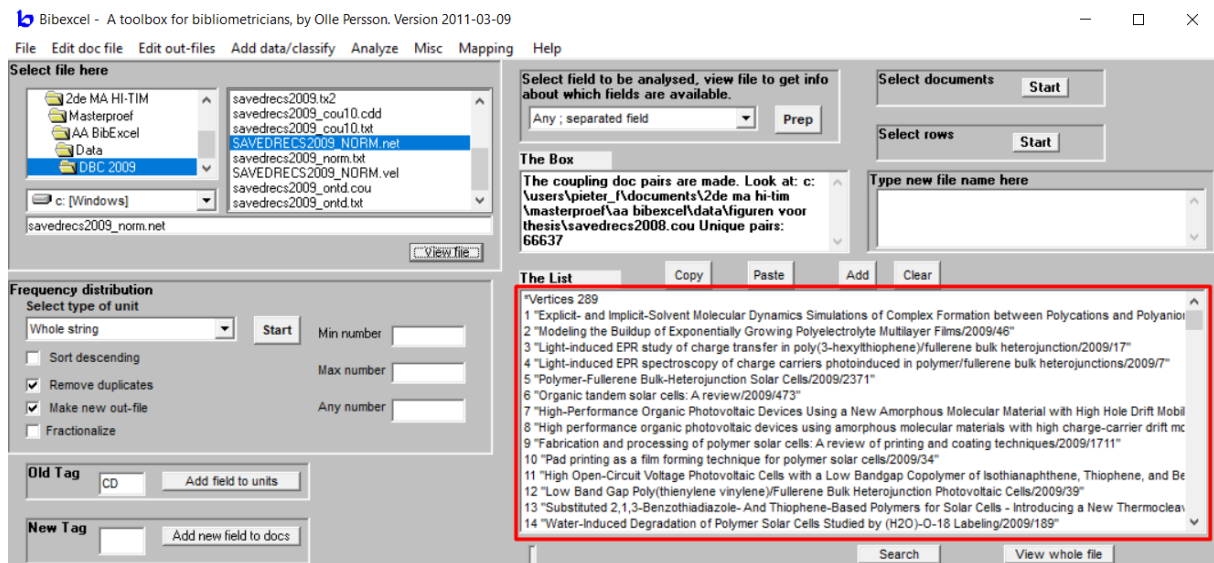
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	54	Explicit- and Implicit-Solvent Molecular Dynamics Simulations of Complex Formation between Polycations and Polyanions/2009/21	108	Modeling t	78											
2	46	Light-Induced EPR Study of Charge Transfer in Poly(3-hexylthiophene)/Fullerene Bulk Heterojunction/2009/17	57	Light-Induc	68											
3	40	Polymer-Fullerene Bulk-Heterojunction Solar Cells/2009/2371	138	Organic ta	74											
4	39	High-Performance Organic Photovoltaic Devices Using a New Amorphous Molecular Material with High Hole Dr	73	High perfo	40											
5	30	Fabrication and processing of polymer solar cells: A review of printing and coating techniques/2009/1711	108	Pad printin	42											
6	30	High Open-Circuit Voltage Photovoltaic Cells with a Low Bandgap Copolymer of Isothianaphthene, Thiophene, a	70	Low Band	60											
7	29	Substituted 2,1,3-Benzothiadiazole- and Thiophene-Based Polymers for Solar Cells - Introducing a New Therm	72	Fabricatio	108											
8	27	Fabrication and processing of polymer solar cells: A review of printing and coating techniques/2009/1711	108	Water-Ind	38											
9	27	Fabrication and processing of polymer solar cells: A review of printing and coating techniques/2009/1711	108	A roll-to-re	45											
10	26	Substrate temperature dependence of the structure of polythiophene thin films obtained by Matrix Assisted Pul	38	Dependenci	38											
11	26	Poly(oligothiophene-alt-benzothiadiazole)s: Tuning the Structures of Oligothiophene Units toward High-Mobility	65	Novel NIR	62											
12	25	Three-Dimensional Nanoscale Organization of Bulk Heterojunction Polymer Solar Cells/2009/315	31	CONTROLL	28											
13	24	The influence of side chains on solubility and photovoltaic performance of dithiophene-thienopyrazine small ba	40	Effect of E	44											
14	23	Fabrication and processing of polymer solar cells: A review of printing and coating techniques/2009/1711	108	Reel-to-re	57											
15	23	Fabrication and processing of polymer solar cells: A review of printing and coating techniques/2009/1711	108	A complet	48											
16	23	A complete synthesis of poly(3-hexylthiophene)/fullerene bulk heterojunction solar cells	48	Pad printin	42											
17	23	Electric Field-Induced Self-Assembly of Poly(3-hexylthiophene) and Fullerene	46	Characteri	50											
18	23	Fabrication and processing of polymer solar cells: A review of printing and coating techniques/2009/1711	108	Novel NIR	62											
19	22	Substituted 2,1,3-Benzothiadiazole- and Thiophene-Based Polymers for Solar Cells - Introducing a New Therm	72	Thermo-cl	31											
20	22	Substituted 2,1,3-Benzothiadiazole- and Thiophene-Based Polymers for Solar Cells - Introducing a New Therm	72	All solutio	40											
21	22	Photovoltaic Performance of Polymer Solar Cells: A Review of Printing and Coating Techniques/2009/1711	98	Polymer-F	138											

Figuur 11: Normalisatie is mogelijk door het CDD-bestand te openen in Excel

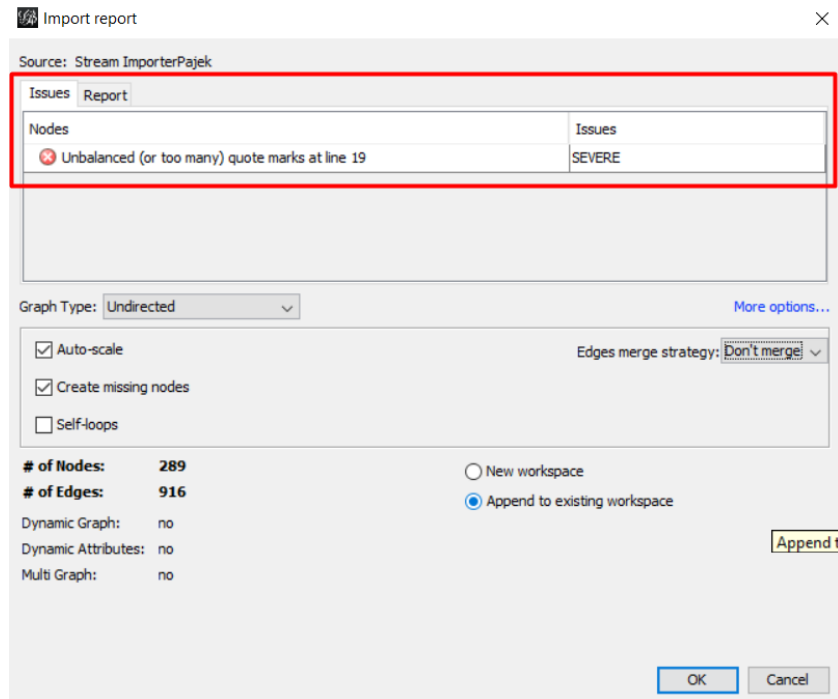
Stap 5. Keuze visualisatiemethode

Er werd gekozen om het netwerk in meer detail te onderzoeken met behulp van Gephi. Dit softwareprogramma maakt graafgebaseerde netwerkvoorstellingen en bevat algoritmes voor het identificeren en visueel voorstellen van clusters. Het tekstdocument met de genormaliseerde waarden voor het aantal gedeelde referenties in de linkerkolom en de labels met titel/jaar/aantal_keer_geciteerd in de midden- en rechterkolom, kan door BibExcel als input gebruikt worden om een bestand met de extensie *.net* te creëren (figuur 12). NET-bestanden werden oorspronkelijk gebruikt als input voor visualisatie met Pajek, maar kunnen ook door andere netwerkvisualisatieprogramma's geïmporteerd worden, waaronder Gephi. Ze bestaan uit twee grote onderdelen: bovenaan een opsomming van alle knooppunten met identificatienummer en label en onderaan een opsomming van alle randen met vertrek- en aankomstknooppunt en het gewicht van de rand.

Bij het importeren van het NET-bestand in Gephi, werden waarschuwingen getoond over het gebruik van aanhalingstekens in bepaalde lijnen (figuur 13). Om dit te onderzoeken en overbodige aanhalingstekens te verwijderen, werd het NET-bestand geopend en bewerkt in WordPad. Vervolgens kon het netwerk succesvol in Gephi geïmporteerd worden. Voor de bibliografische-koppelingnetwerken werd gekozen voor niet-directionele netwerken zonder lussen van en naar hetzelfde knooppunt.



Figuur 12: NET-bestand gegenereerd met BibExcel om netwerk in te laden in Gephi



Figuur 13: Er moesten correcties worden uitgevoerd in het NET-bestand om het juist te kunnen inladen in Gephi

Stap 6. Analyse

Gephi werd gebruikt om de gewogen graad en de modulariteitsklasse van ieder knooppunt te berekenen. Zodra dit gebeurd was, werd de tabel met de knooppunten en de berekende statistieken geëxporteerd in *comma separated values* (CSV)-formaat, zodat de rest van de clusteranalyse met behulp van Excel uitgevoerd kon worden. Omdat Gephi bij het opmaken van de grafiek een kleur toekent aan de acht grootste clusters binnen het netwerk, werden de knooppunten behorend tot deze clusters gescheiden van de rest. Per cluster werden zij geordend volgens gewogen graad, van groot naar klein. De bovenste tien percent van het totale aantal artikels van een cluster (met een minimum van twintig, tenzij de cluster minder dan twintig publicaties bevatte) werd verder geanalyseerd, aangezien dit de papers zijn die het beste zijn ingebed in de cluster – ze delen het grootste aantal referenties met hun burens in het netwerk. Voor deze artikels werd het label met titel, publicatiejaar en het aantal keer dat de paper werd geciteerd, uitgesplitst in afzonderlijke kolommen. De publicaties werden vervolgens geordend van meest geciteerd naar minst geciteerd en de twintig die het meest geciteerd werden, werden gebruikt voor de zoektocht naar een passend clusterlabel. In alle titels werden kenmerkende woorden in het vet gemarkeerd en vervolgens werd geprobeerd om een duidelijk patroon te herkennen. Voor sommige clusters was dit gemakkelijk, maar voor andere bleek dit een hele uitdaging te zijn, omdat de inhoud van de titels niet eenduidig was. Dit resulteerde in het toekennen van meerdere labels aan bepaalde clusters.

Stap 7: Opmaak netwerkgrafiek

Alle netwerkgrafieken werden opgemaakt met de OpenOrd-layout om de clusterstructuur van het netwerk te kunnen visualiseren. Om een zo duidelijk mogelijke voorstelling te verkrijgen, werd de waarde van de 'edge cut'-eigenschap, die bepaalt hoe sterk de verschillende clusters zijn afgelijnd,

gevarieerd. De kleur van de knooppunten werd ingesteld op basis van hun modulariteitsklasse en de grootte werd bepaald door hun gewogen graad. Om het gewicht van de individuele randen te kunnen visualiseren, werd naast het verschil in dikte ook gebruik gemaakt van een kleurschaal. Dikke, donkergroene randen hebben het grootste gewicht en geven aan dat de verbonden publicaties veel gemeenschappelijke referenties hebben.

3.1.2 Resultaten

Voor elk jaar in de periode 2008-2017 werden de acht grootste clusters nader onderzocht en gelabeld. In de jaren 2014 en 2015 was de grootste cluster inhoudelijk niet eenduidig. Gezien het grote aantal publicaties in deze clusters (38,66% van het totale aantal in 2014 en 41,93% in 2015) werd er beslist om op die clusters een tweede clusteranalyse uit te voeren en ook de acht grootste subclusters te identificeren. In totaal werden dus 96 clusters gelabeld op basis van de titels van de twintig artikels met de hoogste gewogen graad (of alle artikels in de cluster wanneer dit er minder dan twintig waren). In bijlage 3 is een overzicht te vinden van de gelabelde clusters per jaar, met cijfergegevens over de grootte van iedere cluster.

Door het grote aantal clusters en de variatie van de inhoud van de clusters doorheen de jaren, was het moeilijk om op basis van de voorstelling per jaar een goed zicht te krijgen op de evolutie van het onderzoeksdomein. Om de informatie interpreteerbaar te maken, werd ervoor gekozen om een aantal meer algemene onderwerpen uit de lijst met clusterlabels te filteren en per jaar aan te geven hoeveel keer ieder onderwerp vertegenwoordigd was in de clusterlabels van dat jaar. Vervolgens werden de onderwerpen geordend, in eerste instantie volgens het jaar waarin ieder onderwerp voor de eerste keer voorkwam en in tweede instantie volgens het aantal keer dat ieder onderwerp werd genoemd in de clusterlabels over de hele periode van tien jaar. Het resultaat zijn tabellen 10 en 11, die voor respectievelijk perovskietzonnecellen en organische fotovoltaïsche technologieën een overzicht geven van de verschillende onderwerpen binnen het onderzoeksdomein, op een manier waaruit ook het belang van de verschillende onderwerpen en de evolutie van het onderzoeksdomein duidelijk wordt.

Tabel 10

PEROVSKIETZONNECELLEN	2014	2015	2016	2017	TOTAAL
Productiemethodes voor PSCs	1	1	1	1	4
Ontwikkeling van hybride perovskietmaterialen voor PSCs	1			1	2
Stabiliteit en degradatie in PSCs		1	2	2	5
Morfologie van de actieve laag in PSCs		1	1	1	3
Ontwikkeling van bufferlagen voor PSCs			1	2	3
PSCs met planaire architectuur			1		1
PSCs met omgekeerd-planaire architectuur			1		1

Tabel 11

ORGANISCHE FOTOVOLTAÏSCHE TECHNOLOGIEËN	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	TOTAAL
Ontwikkeling van polymeren voor de actieve laag van OSCs	2	2	1	1	2	1	2	1	1		13
Morfologie van de actieve laag in OSCs	1	1	1	1	1	1	2	2			10
OSC's met tandemarchitectuur	1	1	1		1	1	2	1			8
Ontwikkeling van andere materialen voor de actieve laag van OSCs	2	2	1								5
Gebruik van nanopartikels in OSCs	1			1	1		1	1			5
Stabiliteit en degradatie in OSCs	1										1
Balanstheorie en elektro-optisch modelleren	1										1
Ontwikkeling van kleine organische moleculen voor de actieve laag van OSCs		1	2	1	1	1	1	2			9
Ontstaan, transport en verlies van ladingen in OSCs		1	1	1	1		1	1	1		7
Productiemethodes voor OSCs		1	1				1				3
Ontwikkeling van fullereenafgeleiden als acceptormateriaal in OSCs			2	1	1	1	1				6
OSC's met omgekeerde architectuur			1		1	2	1	1			6
Ontwikkeling van elektrodes voor OSCs			1			1	1	1			4
Opschalen en economische evaluatie van OSCs			1								1
Zelfordenende fenomenen in supramoleculaire systemen				1							1
Elektronische eigenschappen in OSCs				1							1
Ontwikkeling van bufferlagen voor OSCs					1	1	2	2		1	7
Ontwikkeling van niet-fullerene acceptormaterialen voor OSCs					1	1	1	1	1	1	6
Volledig-polymeerzonnecellen						2				1	3
Verbeterd lichtmanagement (plasmonische nanopartikels, reflectoren, OSCs in V-vorm)							2	1	1		4
OSC's met een enkele actieve laag bestaande uit drie-componentmengsels							1	1		1	3

3.1.3 Bespreking resultaten

De onderwerpen binnen het onderzoek naar organische fotovoltaïsche technologieën die vanaf 2008 zo goed als continu voorkwamen in de clusterlabels, zijn de ontwikkeling van polymeren voor de actieve laag en het optimaliseren van de morfologie van de actieve laag. De enige jaren waar deze onderwerpen ontbraken (2016 en 2017), zijn de jaren waarin een aanzienlijk deel van de clusters over perovskietzonnecellen ging. Een ander veelvoorkomend onderwerp sinds het begin van de onderzochte periode was het ontwikkelen van zonnecellen met een tandemarchitectuur, dat in clusterlabels van zeven van de tien jaren terug te vinden was. Vanaf 2009 gingen de onderwerpen 'ontwikkeling van kleine organische moleculen voor de actieve laag' en 'ontstaan, transport en verlies van ladingen' een belangrijke rol spelen, vanaf 2010 kwamen daar 'ontwikkeling van fullereenafgeleiden als acceptormateriaal' en 'ontwikkeling van zonnecellen met een omgekeerde architectuur' bij. In 2011 werden er geen nieuwe invloedrijke onderwerpen gevonden, maar bleef er onderzoek gedaan worden naar de eerder genoemde onderwerpen. In 2012 verschoof een deel van de aandacht naar het ontwikkelen van bufferlagen en niet-fullerene acceptormaterialen, twee onderwerpen die in de tweede helft van de onderzochte periode op continue aandacht konden blijven rekenen. In 2013 werd voor het eerst melding gemaakt van volledig-polymeerzonnecellen, maar dat onderwerp kwam daarna niet meer aan bod in clusterlabels tot in het jaar 2017. In 2014 werden de laatste twee nieuwe onderwerpen geïntroduceerd, namelijk het inzetten op een verbeterd lichtmanagement en het ontwikkelen van zonnecellen met een enkele actieve laag bestaande uit drie-componentmengsels.

Clusters over perovskietzonnecellen kwamen sinds 2014 voor. Het enige onderwerp dat in elk jaar van de periode 2014-2017 terug te vinden is in de clusterlabels, is dat van productiemethodes voor perovskietzonnecellen. Vanaf 2015 kwamen ook de onderwerpen 'stabiliteit en degradatie' en 'morfologie van de actieve laag' ieder jaar voor. Een belangrijk onderwerp dat sinds 2016 zijn intrede deed, was het ontwikkelen van bufferlagen voor perovskietzonnecellen.

Om een meer gedetailleerd zicht te krijgen op de evolutie binnen de belangrijke onderwerpen, werd de inhoud van de clusterlabels per onderwerp en per jaar bekeken. Binnen het onderwerp 'ontwikkeling van polymeren voor de actieve laag van OSCs' werd van bij de start van de onderzochte periode onderzoek gedaan naar polymeren met een klein bandgap. Vanaf 2010 kwam ook de term 'D/A-copolymeren' regelmatig voor in de clusterlabels, duidend op het onderzoek naar polymeren met zowel donor- als acceptorregio's in de keten. Sinds 2013 werd het gebruik van polymeren als niet-fullerene acceptormaterialen verkend. Uit de labels van clusters uit het jaar 2015 bleek dat polymeren met een breed bandgap en zijketenmodificatie onderzocht werden. In 2016 kwam ten slotte het gebruik van directe-arylatiepolymerisatie aan bod. Bij het onderwerp 'morfologie van de actieve laag' werd aanvankelijk vooral de actieve laag in polymeer/fullereen-zonnecellen bestudeerd. In 2011 werd voor het eerst het gebruik van procesadditieven vermeld in een clusterlabel.

Bij het onderwerp 'OSCs met tandemarchitectuur' werden tijdens het labelen van de clusters geen extra kernwoorden genoteerd. Wel kwam dit onderwerp regelmatig samen met andere onderwerpen voor binnen een cluster, zoals met 'ontstaan, transport en verlies van ladingen' in 2011, 'OSCs met omgekeerde architectuur' in 2012 en 2013, 'ontwikkeling van bufferlagen' in 2012, 'volledig-

polymeerzonnecellen' in 2013, 'productiemethodes voor modules' in 2014 en 'morfologie van de actieve laag' in 2015.

Het onderwerp 'ontwikkeling van kleine organische moleculen voor de actieve laag' was aanvankelijk toegespitst op donormaterialen. Vanaf 2011 kwam 'uit-oplossing-geproduceerde zonnecellen' naar voren als extra kernwoord en sinds 2013 werd in de clusterlabels ook melding gemaakt van het gebruik van kleine organische moleculen als (niet-fullerene) acceptoren. De clusterlabels bij het onderwerp 'onstaan, transport en verlies van ladingen in OSCs' vertoonden weinig variatie: in 2009 werd enkel 'onstaan en transport' gebruikt, vanaf 2010 kwam 'recombinatie' erbij. In 2011 werd ook het woord 'verstrikking' opgenomen in een clusterlabel.

Bij het onderwerp 'ontwikkeling van fullereenafgeleiden als acceptormateriaal' werd 'indeen-fullereenbisadducten' als enige extra kernwoord vermeld in een clusterlabel uit 2010. Het onderwerp 'OSCs met omgekeerde architectuur' kwam vanaf 2012 steeds voor in een context van onderzoek naar bufferlagen voor dit type zonnecel. Zoals hierboven aangegeven kwam dit onderwerp in 2012 en 2013 ook samen met het onderwerp 'OSCs met tandemarchitectuur' voor.

Naast de samenhang met de onderwerpen over de omgekeerde architectuur en de tandemarchitectuur, werd voor het onderwerp 'ontwikkeling van bufferlagen voor OSCs' ook genoteerd dat grafeen en afgeleiden van grafeen in de jaren 2014 en 2015 onderzocht werden als materialen voor bufferlagen. Binnen het onderwerp 'ontwikkeling van niet-fullerene acceptormaterialen' werd vanaf 2013 onderzoek gedaan naar zowel polymeren als kleine organische moleculen ter vervanging van acceptormaterialen op basis van fullerenen. Bij het onderwerp 'volledig-polymeerzonnecellen' werd in 2017 vermeld dat er onderzoek werd gedaan naar polymeren als acceptormateriaal.

Wat het onderwerp 'verbeterd lichtmanagement' betreft, werden in 2014 verschillende manieren voorgesteld om dit te bewerkstelligen, namelijk het gebruik van plasmonische nanopartikels, het ontwerpen van organische zonnecellen met een V-vorm en het gebruik van fotonische kristalreflectoren. In de jaren 2015 en 2016 kwam enkel nog het gebruik van plasmonische nanopartikels voor in de clusterlabels gerelateerd aan dit onderwerp. Zonnecellen met een enkele actieve laag werden al bestudeerd voor de opkomst van de tandemarchitectuur, maar vanaf 2014 werd onderzoek gedaan naar een specifieke variant van dit type zonnecel, waarbij drie-componentmengsels als actieve laag werden gebruikt.

Bij de onderwerpen over perovskietzonnecellen viel op dat stabiliteit en degradatie in dit type zonnecellen sterk verbonden is met ionmigratie en het hysteresis-effect. De ontwikkeling van bufferlagen voor perovskietzonnecellen bleek voornamelijk gericht te zijn op materialen voor de elektrongattransportlaag. Over specifieke productiemethodes voor perovskietzonnecellen en de morfologie van de actieve laag werd geen extra informatie opgenomen in de clusterlabels. Beide onderwerpen komen in jaren 2016 en 2017 wel samen voor in clusters waarin ook de architectuur van perovskietzonnecellen en het onderzoek naar bufferlagen voor dit type zonnecellen als onderwerpen vervat zitten.

3.2 Analyse van belangrijke strekkingen binnen het onderzoeksdomein

Op basis van de resultaten uit de clusteranalyses in de vorige paragraaf, werd beslist om vier onderwerpen binnen het OPV-onderzoeksdomein nader te onderzoeken: het gebruik van kleine organische moleculen, volledig-polymeerzonnecellen, het gebruik van de tandemarchitectuur en zonnecellen met een enkele actieve laag. Deze onderwerpen werden gekozen omdat ze twee per twee als tegenovergestelden kunnen worden beschouwd (kleine moleculen vs. volledig-polymeer en tandemarchitectuur vs. enkele actieve laag) en omdat één van de twee al een belangrijke rol heeft gespeeld binnen het onderzoeksdomein (kleine moleculen, tandemarchitectuur), terwijl het andere pas meer recent aan populariteit begon te winnen (volledig-polymeer, enkele actieve laag). Naast deze 4 OPV-onderwerpen, werd ook de evolutie van het onderzoek naar perovskietzonnecellen meer in detail geanalyseerd.

3.2.1 Methode

De datasets per onderwerp werden geselecteerd door eerst de finale zoekopdracht uit paragraaf 3.1 opnieuw in te geven en deze vervolgens per onderwerp in te perken door binnen de zoekresultaten een nieuwe zoekopdracht met specifieke trefwoorden uit te voeren. Deze zoekopdrachten en hun bereik zijn opgelijst in tabel 12. Voor de vijf verschillende onderwerpen werd vervolgens steeds dezelfde aanpak gebruikt.

Tabel 12

	Verfijning zoekopdracht	Bereik
1	"small molecule" NOT ("all polymer" OR perovskite)	1.561 resultaten
2	"all polymer" NOT perovskite	262 resultaten
3	(tandem OR multi\$junction) NOT perovskite	797 resultaten
4	("single layer" OR ternary) NOT (tandem OR multi\$junction OR perovskite)	594 resultaten
5	Perovskite	4.731 resultaten

Net als in de vorige paragraaf, werden de gegevens gedownload per jaar en waar nodig gecombineerd tot één tekstbestand. Met behulp van EndNote werd gecontroleerd of er duplicate gegevens verwijderd moesten worden en of er andere correcties nodig waren. Dit was enkel het geval voor de dataset over perovskietzonnecellen, waaruit twee publicaties zonder auteurs werden verwijderd.

Om de evolutie van het onderzoek binnen ieder onderwerp in kaart te brengen, werden rechtstreekse kwantitatieve analyses op de bibliografische data uitgevoerd. Daarnaast werd het directecitatie-netwerk van documenten geanalyseerd met de bedoeling om de belangrijkste publicaties op te sporen. Omdat de toepassing van het stappenplan voor *science mapping*-analyses verschilt voor beide analysemethodes, wordt de beschrijving van de gevolgde aanpak hieronder opgesplitst.

Rechtstreekse kwantitatieve analyses

Eenvoudige statistieken over de resultaten van een zoekopdracht (de verdeling van de resultaten wat betreft taal, documenttype, auteurs, tijdschriften, onderzoeksdisciplines en landen) worden door

WoS ter beschikking gesteld via de 'analyze results'-functie. Met behulp van BibExcel werden een aantal jaarlijkse publicatiekarakteristieken berekend, zoals het totale aantal pagina's, geciteerde referenties en auteurs. Deze aantallen werden gedeeld door het aantal publicaties in elk jaar om gemiddelde waarden te bekomen. Met BibExcel kunnen ook frequenties berekend worden, wat toelaat om te zien hoeveel unieke entiteiten er in de gegevens aanwezig zijn. Op die manier werden voor ieder jaar het aantal unieke auteurs en unieke wetenschappelijke tijdschriften opgevraagd. Door het aantal publicaties te delen door het aantal unieke wetenschappelijke tijdschriften, werd bekomen hoeveel artikels er gemiddeld gepubliceerd werden per tijdschrift.

Om een idee te krijgen van de evolutie van de inhoud van het onderzoek, werden de meest voorkomende titelwoorden en auteurkernwoorden geïdentificeerd, bekeken over de hele periode van tien jaar heen en voor vijf subperiodes. Voor de vier OPV-onderwerpen werd gekozen om met subperiodes van telkens twee jaar te werken. Over perovskietzonnecellen verscheen er gedurende de eerste helft van de tienjarige periode slechts een heel beperkt aantal publicaties in vergelijking met de aantallen in de periode van 2014 tot 2017. Voor dit onderwerp werd het daarom nuttiger geacht om de jaren 2008 tot 2013 te combineren tot één subperiode en de jaren 2014 tot 2017 als zelfstandige subperiodes te beschouwen. Vooraleer de analyse in BibExcel uitgevoerd kon worden, moesten de tekstbestanden met jaarlijkse gegevens met behulp van Wordpad gecombineerd worden tot een tekstbestand voor de volledige periode van tien jaar en een tekstbestand voor elke subperiode. Daarna werden met BibExcel lijsten van alle voorkomende titelwoorden en auteurkernwoorden ontleed uit de gecombineerde tekstbestanden. Deze lijsten werden vervolgens ontdebeld door gebruik te maken van de *text facet*-functie en clusteralgoritmes in OpenRefine. Om het samenvoegen van woorden met een verschillende betekenis te vermijden, werden enkel de minst agressieve clusteralgoritmes (*fingerprint*, *2-gram fingerprint* of *1-gram fingerprint*) gebruikt en werd telkens een snelle inspectie van de inhoud van de clusters gedaan. Na de ontdebelling kon opnieuw overgeschakeld worden op BibExcel om de frequenties van de titelwoorden en auteurkernwoorden te berekenen. Daarbij werd gekozen om duplicate titelwoorden (meerdere voorkomsten van eenzelfde woord in de titel) te verwijderen, zodat de frequentie van een woord weergaf in hoeveel artikels het titelwoord voorkwam en een vergelijking gemaakt kon worden ten opzichte van het totale aantal artikels. De frequentiegegevens voor de volledige periode en de vijf subperiodes werden samengebracht in een Excelbestand (een voor de titelwoorden en een voor de auteurkernwoorden) om de meest voorkomende woorden van de verschillende periodes te kunnen vergelijken. Deze vergelijkende analyse werd uiteindelijk enkel uitgevoerd voor de titelwoorden, vanwege de arbeidsintensiviteit van het analyseproces en de verwachting dat de analyse van de auteurkernwoorden slechts weinig nieuwe inzichten zou opleveren ten opzichte van de titelwoordanalyse.

Voor de titelwoordanalyse werd dezelfde aanpak als die van Dong et al. (2012) gebruikt. De dertig meest voorkomende titelwoorden gedurende de volledige periode van tien jaar vormden de basis van de vergelijking; hiervoor werd de frequentie vermeld als het absolute aantal voorkomsten en als het procentuele aandeel ten opzichte van het totale aantal artikels. Voor elk van deze woorden werd per subperiode opgezocht op welke plaats in de rangschikking ze stonden en in hoeveel procent van de artikels ze voorkwamen. Bij het bepalen van de plaats in de ranking werden woorden met dezelfde frequentie wel op dezelfde plaats gerangschikt, in tegenstelling tot de aanpak van Dong et al. (2012).

Om de evolutie van de titelwoorden over de subperiodes heen in kaart te brengen, werd telkens de procentuele verandering van de minimale frequentie tot de maximale frequentie berekend. Voor titelwoorden waarbij deze procentuele verandering minstens 50% bedroeg, werden het verloop van de evolutie en de subperiode waarin de frequentie een piek bereikte aangegeven.

Analyse van het directe-citatie netwerk

BibExcel bevat een procedure om directe-citatie netwerken op te stellen. Op basis van het tekstbestand met bibliografische gegevens voor de volledige periode van tien jaar, werd een OUT-bestand gecreëerd waarin alle geciteerde referenties zijn opgelijst samen met de vermelding van het identificatienummer van het document waarin ze voorkwamen. Het OUT-bestand werd omgevormd tot een LOW-bestand, dat dezelfde informatie bevat, maar met een gestandaardiseerde opmaak. Om directe-citatie linkjes te kunnen maken, leest BibExcel eerst de bibliografische gegevens van de documenten in de dataset en stelt daarmee een zoekleutel op voor elk document. Deze zoekleutels worden opgeslagen in een DDC-bestand en bevatten de familienaam van de eerste auteur, het publicatiejaar, het volumenummer van het tijdschrift waarin werd gepubliceerd en het paginanummer van de beginpagina van het artikel. Deze gegevens zijn ook terug te vinden in het LOW-bestand met de geciteerde referenties en BibExcel vergelijkt vervolgens het DDC-bestand met het LOW-bestand. De uitkomst is een LIN-bestand dat de directe-citatie linkjes tussen documenten in de dataset bevat in de vorm van gepaarde identificatienummers uit het DDC-bestand. Om de citatie linkjes te kunnen interpreteren, werden de zoekleutels uit het DDC-bestand als labels toegevoegd aan het LIN-bestand. BibExcel doet dit door een nieuw ADD-bestand te genereren dat zowel de identificatienummers als de labels bevat, in de vorm van vier kolommen die door tabs van elkaar gescheiden worden. BibExcel kan echter enkel een NET-bestand creëren op basis van een *tab-delimited* bestand met drie kolommen: het gewicht van de link, gevolgd door de labels van de knooppunten die door de link verbonden worden. Het ADD-bestand werd met behulp van Excel bewerkt om aan deze vormvoorwaarden te voldoen, waarbij het gewicht van alle linkjes werd gelijkgesteld aan één.

Eens BibExcel het NET-bestand had gecreëerd, kon dit geïmporteerd worden in Gephi. Wanneer Gephi hierbij een waarschuwing gaf over de aanwezigheid van overbodige aanhalingstekens, werden deze manueel verwijderd door het NET-bestand te bewerken in Wordpad. Vervolgens werden in Gephi onder andere de ingraad, uitgraad, autoriteitsscore, hubscore, PageRank en eigenvectordichtheidscentraliteit (EVDC) van elk knooppunt berekend. Daarna werd de lijst met knooppunten en de berekende statistieken geëxporteerd als een CSV-bestand, om bijkomende bewerkingen te kunnen doen in Excel. Zo werden de top tien best scorende publicaties voor elk van de zes bovenstaande statistieken geïdentificeerd – dit zijn de belangrijkste artikels binnen het onderzoeksdomein. Omdat de ingraad, de autoriteitsscore, de PageRank en de EVDC allemaal een maat zijn voor hoe invloedrijk een publicatie is binnen het netwerk, werden deze scores onderling vergeleken. Ook de uitgraad en de hubscore werden vergeleken, omdat deze allebei een idee geven van de mate waarin een publicatie de kennis die aanwezig is binnen het onderzoeksdomein, centraliseert. Tot dit punt in de analyse werden de zoekleutels uit het DDC-bestand gebruikt om de verschillende publicaties van elkaar te onderscheiden. Hierna werd elk van deze artikels opgezocht

in de EndNote-bibliotheek die bij aanvang gebruikt werd om duplicate publicaties op te sporen, om een idee te krijgen van de inhoud van deze belangrijke papers.

Om de netwerkvoorstellungen op te maken, werd steeds gekozen voor de Force Atlas 2-layout en werd de optie 'dissuade hubs' aangevinkt, zodat hubs zich meer aan de buitenkant van de voorstelling zouden bevinden, terwijl de autoriteiten centraal in de grafiek zouden blijven. Omdat er twee soorten publicaties opgespoord werden (autoriteiten en hubs), werden er telkens twee netwerkgrafieken opgesteld. Om de leesbaarheid van de grafieken te verbeteren, werd gekozen om tien percent van het totale aantal knooppunten te behouden. De blauwe grafieken bevatten de knooppunten met de hoogste ingraad en geven dus de autoriteiten binnen het netwerk weer. De rode grafieken focussen op de hubs en bevatten de knooppunten met de hoogste uitgraad. De grootte van een knooppunt en het bijbehorende label geven een indicatie van de grootte van de in- of uitgraad, terwijl de donkerte van de kleuren overeenkomt met de autoriteits- of hubscore. Om duidelijke labels te kunnen toevoegen aan de grafieken, werd het NET-bestand opnieuw geopend in Excel en werden de verschillende componenten van de zoekleutellabels van elkaar gescheiden. Deze afzonderlijke componenten werden vervolgens als kenmerken van de knooppunten geïmporteerd in Gephi, zodat gekozen kon worden om de naam van de eerste auteur, het publicatiejaar en het volumenummer op te nemen in de labels en de beginpagina van het artikel weg te laten. Aanvankelijk werd ook het volumenummer weggelaten, maar bij sommige grafieken bleek dit extra kenmerk nodig te zijn om bepaalde publicaties van elkaar te kunnen onderscheiden. Met de Label Adjust-layout werd ervoor gezorgd dat de labels elkaar niet overlaptten.

3.2.2 Resultaten

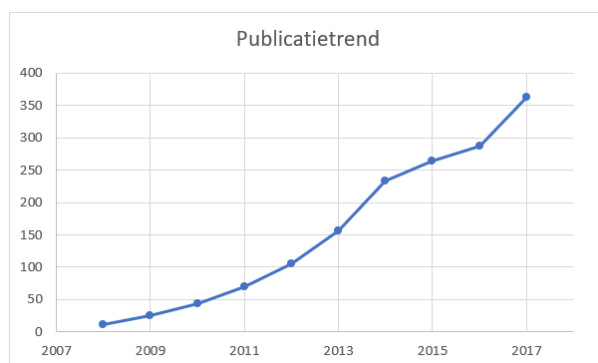
Onderwerp 1: Het gebruik van kleine organische moleculen in OPV-toepassingen

a) Algemene publicatiestatistieken

In de periode 2008-2017 werden 1.561 publicaties over het gebruik van kleine organische moleculen in OPV-toepassingen gevonden, waarvan er 1.543 (98.85%) in het Engels geschreven werden en 18 (1,15%) in het Chinees. De overgrote meerderheid van deze publicaties waren standaardartikels (1.490 of 95,45%). Er werden ook 71 beoordelingsartikels geschreven, goed voor 4,55% van de totale hoeveelheid publicaties.

Figuur 14 geeft een zicht op de publicatietrend van papers over dit onderwerp. Uit de grafiek blijkt dat het aantal jaarlijkse publicaties een continue groei heeft gekend, zij het met een vertraging in de periode 2015-2016. In 2017 herstelde de groei zich tot het niveau van 2014. Tabel 13 bevat een overzicht van de publicatiekarakteristieken per jaar. Terwijl publicaties in 2008 gemiddeld ongeveer vijf pagina's lang waren, vijftientig referenties telden en door vijf à zes auteurs geschreven werden, was de lengte van een gemiddelde publicatie in 2017 ongeveer negen pagina's, met een vijftientigtal referenties en een zevental co-auteurs. In 2008 waren er achtenzestig auteurs actief binnen het onderzoek naar het gebruik van kleine organische moleculen voor OPV-toepassingen en werden er papers gepubliceerd in negen wetenschappelijke tijdschriften, wat neerkwam op een gemiddelde van 1,33 papers per tijdschrift. Tien jaar later werkten er maar liefst 1.503 verschillende

auteurs aan publicaties binnen dit onderwerp, die gepubliceerd werden in vijftien tijdschriften (gemiddeld 3,82 papers per tijdschrift).



Figuur 14

Tabel 13

Jaar	TA	PG/TA	NR/TA	AU/TA	AU uniek	J uniek	TA/J uniek
2008	12	5.17	25.33	5.67	68	9	1.33
2009	25	6.28	33.84	5.44	110	14	1.79
2010	44	7.36	36.43	5.41	195	27	1.63
2011	70	6.76	37.67	6.06	305	26	2.69
2012	106	8.22	48.32	6.03	449	44	2.41
2013	156	7.50	42.03	6.35	727	51	3.06
2014	234	8.59	48.26	6.69	1008	76	3.08
2015	264	9.26	52.38	6.78	1091	73	3.62
2016	287	9.47	54.21	6.99	1295	80	3.59
2017	363	9.04	55.05	7.14	1503	95	3.82

De statistieken over de meest publicerende auteurs, de populairste tijdschriften, de belangrijkste onderzoeksdisciplines en de landen waar het meeste onderzoek naar dit onderwerp werd uitgevoerd, zijn samengevat in tabellen 14 tot 17. In de lijst met landen, stond België met zestien publicaties op de zeventiende plaats. In de *organizations enhanced*-lijst van WoS stond de Universiteit Hasselt op de zesennegentigste plaats, met elf publicaties.

Tabellen 14-17

Auteurs			Tijdschriften		
1	CHEN YS	68	1	JOURNAL OF MATERIALS CHEMISTRY A	135
2	LI YF	62	2	ORGANIC ELECTRONICS	130
3	SHARMA GD	61	3	ACS APPLIED MATERIALS INTERFACES	111
4	WAN XJ	58	4	ADVANCED ENERGY MATERIALS	73
5	LEO K	56	5	SOLAR ENERGY MATERIALS AND SOLAR CELLS	61
5	LIU F	56	6	ADVANCED MATERIALS	58
7	CAO Y	55	7	RSC ADVANCES	55
8	ZHAN XW	43	8	DYES AND PIGMENTS	54
9	KAN B	40	9	JOURNAL OF PHYSICAL CHEMISTRY C	51
10	BAZAN GC	39	10	JOURNAL OF MATERIALS CHEMISTRY C	45
10	NGUYEN TQ	39			

Onderzoeksdisciplines			Landen		
1	MATERIALS SCIENCE	1012	1	PEOPLES R CHINA	630
2	CHEMISTRY	923	2	USA	336
3	PHYSICS	655	3	SOUTH KOREA	177
4	SCIENCE TECHNOLOGY OTHER TOPICS	358	4	GERMANY	161
5	ENERGY FUELS	316	5	INDIA	96
6	ENGINEERING	83	6	TAIWAN	94
7	POLYMER SCIENCE	64	7	JAPAN	79
8	OPTICS	26	8	UK	57
9	ENVIRONMENTAL SCIENCES ECOLOGY	19	9	SPAIN	53
10	CRYSTALLOGRAPHY	13	10	CANADA	47

b) Meest voorkomende titelwoorden

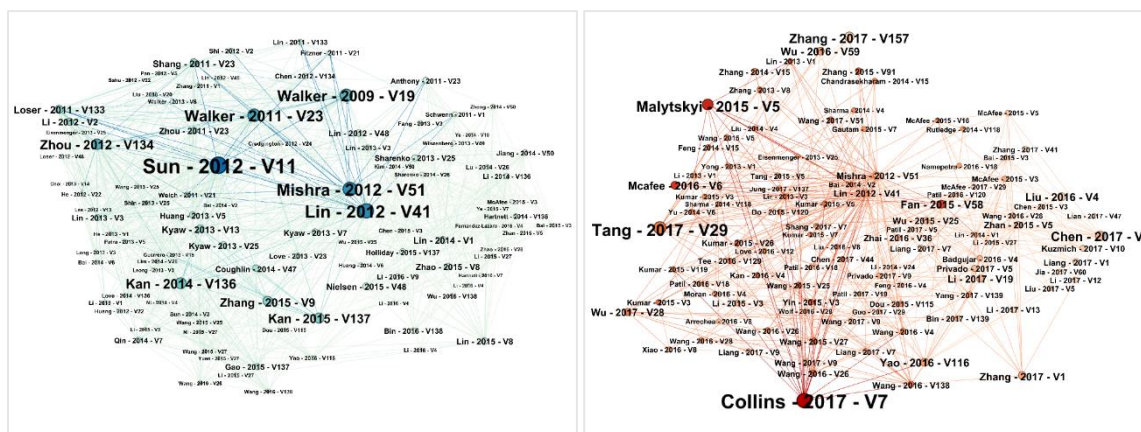
Tabel 18 geeft een overzicht van de meest voorkomende titelwoorden binnen het onderwerp 'gebruik van kleine organische moleculen in OPV-toepassingen' en van de evolutie van de gebruiksfrequentie van deze titelwoorden.

'Acceptors' was het titelwoord dat de sterkste procentuele verandering doormaakte: terwijl dit woord niet voorkwam in de periode 2008-2009 en in de periode 2010-2011 slechts in 0,88% van de titels werd gebruikt, was het in de periode 2016-2017 vertegenwoordigd in 11,08% van alle titels. Ook 'non-fullerene' kende een sterke populariteitsstijging en kwam tijdens de periode 2016-2017 met een representatie van 18,31% in bijna één vijfde van de titels aan bod. Andere woorden die gedurende de onderzochte periode een sterke evolutie doormaakten, waren 'solution-processed' (piek in 2012-2013), 'polymer', 'acceptor' (beide piekten in 2016-2017) en 'heterojunction' (sterke populariteitsdaling van 37,84% in 2008-2009 tot 7,38% in 2016-2017).

Tabel 158

	Titelwoorden	2008-2017 TA	2008-2017 %	2008-2009 (R, %)		2010-2011 (R, %)		2012-2013 (R, %)		2014-2015 (R, %)		2016-2017 (R, %)		Evolutie	Piekperiode
1	cells	1070	68.55%	1	72.97%	1	72.81%	1	65.65%	1	69.88%	2	67.69%		
2	solar	1050	67.26%	3	51.35%	2	64.91%	1	65.65%	2	68.67%	1	68.15%		
3	organic	893	57.21%	2	70.27%	3	58.77%	3	61.45%	3	55.62%	3	55.69%		
4	small	575	36.84%	6	32.43%	4	35.96%	4	43.89%	4	40.56%	4	31.54%		
5	molecule	436	27.93%	6	32.43%	5	34.21%	5	31.68%	5	29.72%	5	23.69%		
6	photovoltaic	258	16.53%	4	43.24%	8	21.05%	11	14.50%	7	17.27%	10	14.46%	--	2008-2009
7	based	239	15.31%	9	16.22%	15	8.77%	10	14.89%	8	15.06%	8	16.77%	-, +	2016-2017
8	Small-Molecule	211	13.52%	14	8.11%	15	8.77%	9	16.03%	9	14.86%	12	12.62%	+, -	2012-2013
9	Efficient	209	13.39%	10	13.51%	9	14.91%	15	9.92%	10	13.45%	10	14.46%	+, -, +	2010-2011
10	heterojunction	203	13.00%	5	37.84%	6	26.32%	7	17.56%	12	13.05%	20	7.38%	---	2008-2009
11	solution-processed	200	12.81%	44	2.70%	11	9.65%	6	20.61%	6	18.07%	23	6.77%	+++ , --	2012-2013
12	bulk	199	12.75%	8	29.73%	7	23.68%	7	17.56%	11	13.25%	19	7.54%	--	2008-2009
13	polymer	178	11.40%	44	2.70%	18	7.02%	49	2.67%	13	10.44%	7	16.92%	+++	2016-2017
13	non-fullerene	178	11.40%	-	-	88	1.75%	66	2.29%	15	10.24%	6	18.31%	+++	2016-2017
15	acceptor	159	10.19%	11	10.81%	56	2.63%	26	4.96%	19	8.03%	9	15.23%	-- , +++	2016-2017
16	performance	150	9.61%	44	2.70%	10	12.28%	19	7.25%	16	9.04%	14	10.92%	++ , -, +	2010-2011
17	Efficiency	145	9.29%	11	10.81%	11	9.65%	13	10.69%	20	7.63%	15	9.85%		
18	molecules	136	8.71%	-	-	56	2.63%	12	13.36%	13	10.44%	22	7.08%	+++ , --	2012-2013
19	High	132	8.46%	14	8.11%	21	6.14%	15	9.92%	22	7.03%	16	9.38%	~	2012-2013
20	donor	126	8.07%	44	2.70%	34	4.39%	19	7.25%	16	9.04%	18	8.62%	++ , -	2014-2015
21	electron	121	7.75%	-	-	11	9.65%	24	5.34%	20	7.63%	17	8.92%	-, +	2010-2011
22	acceptors	114	7.30%	-	-	151	0.88%	42	3.05%	23	6.63%	13	11.08%	+++	2016-2017
23	Photovoltaics	108	6.92%	-	-	17	7.89%	17	8.02%	24	6.22%	21	7.23%		
24	Molecular	107	6.85%	44	2.70%	11	9.65%	23	5.73%	18	8.23%	26	6.00%	~	2010-2011
25	solution	91	5.83%	11	10.81%	24	5.26%	14	10.31%	24	6.22%	49	3.54%	-, + , --	2008-2009
26	properties	86	5.51%	44	2.70%	-	-	24	5.34%	28	5.62%	25	6.62%	++	2016-2017
26	Synthesis	86	5.51%	-	-	24	5.26%	19	7.25%	26	5.82%	29	4.92%		
28	processed	78	5.00%	44	2.70%	24	5.26%	22	6.49%	26	5.82%	46	3.85%	++ , -	2012-2013
29	layer	73	4.68%	44	2.70%	24	5.26%	18	7.63%	29	5.22%	53	3.08%	++ , -	2012-2013
30	Effect	70	4.48%	14	8.11%	24	5.26%	32	4.20%	32	4.82%	43	4.00%	--	2008-2009

c) Analyse van het directe-citatie-netwerk



Publicatie	In-graad	Authoriteit	PageRank	Eigenvector	Gemiddelde	Publicatie	Uit-graad	Hub	Gemiddelde
1 Sun, 2012, V11, P44	1	1	3	3	2.00	1 Collins, 2017, V7, P17266	1	1	1.00
2 Walker, 2011, V23, P470	4	4	2	2	3.00	2 Malyskiy, 2015, V5, P354	3	2	2.50
3 Walker, 2009, V19, P3063	5	6	1	1	3.25	3 Mcafee, 2016, V6, P127	6	3	4.50
4 Mishra, 2012, V51, P2020	3	3	6	5	4.25	4 Fan, 2015, V58, P922	6	4	5.00
5 Lin, 2012, V41, P4245	2	2	10	4	4.50	5 Tang, 2017, V29, P663	2	-	2.00
6 Loser, 2011, V133, P8142	10	10	8	7	8.75	6 Chen, 2017, V5, P1275	4	-	4.00
7 Zhou, 2012, V134, P16345	7	5	-	8	6.67	6 Zhang, 2017, V157, P71	4	-	4.00
8 Shang, 2011, V23, P1554	-	-	5	6	5.50	8 Yin, 2015, V3, P11575	-	5	5.00
9 Kan, 2014, V136, P15529	6	7	-	-	6.50	9 Yao, 2016, V116, P7397	6	-	6.00
10 Kan, 2015, V137, P3886	8	8	-	-	8.00	9 Liu, 2016, V4, P17604	6	-	6.00
11 Wei, 2010, V4, P1927	-	-	7	10	8.50	9 Wang, 2015, V25, P3514	-	6	6.00
12 Zhang, 2015, V9, P35	9	9	-	-	9.00	12 Zhang, 2015, V91, P165	-	7	7.00
13 Ooi, 2008, V18, P4619	-	-	4	-	4.00	13 Wang, 2017, V51, P410	-	8	8.00
14 Fitzner, 2011, V21, P897	-	-	9	-	9.00	14 Wang, 2015, V27, P4338	-	9	9.00
14 Zhou, 2011, V23, P4666	-	-	-	9	9.00	15 Wu, 2016, V59, P371	10	-	10.00
						15 Wang, 2016, V26, P1803	-	10	10.00

AUTORITEITEN			
2008	13	Ooi et al. (2008)	Solution processable bulk-heterojunction solar cells using a small molecule acceptor
2009	3	Walker et al. (2009)	Nanoscale Phase Separation and High Photovoltaic Efficiency in Solution-Processed, Small-Molecule Bulk Heterojunction Solar Cells
2010	11	Wei, Wang, Renshaw, Thompson en Forrest (2010)	Solution-Processed Squaraine Bulk Heterojunction Photovoltaic Cells
2011	2	Walker, Kim en Nguyen (2011)	Small Molecule Solution-Processed Bulk Heterojunction Solar Cells
	6	Loser et al. (2011)	A Naphthodithiophene-Diketopyrrolopyrrole Donor Molecule for Efficient Solution-Processed Solar Cells
	8	Shang et al. (2011)	A Solution-Processable Star-Shaped Molecule for High-Performance Organic Solar Cells
	14	Fitzner et al. (2011)	Dicyanovinyl-Substituted Oligothiophenes: Structure-Property Relationships and Application in Vacuum-Processed Small-Molecule Organic Solar Cells
2012	14	Zhou et al. (2011)	A Planar Small Molecule with Dithienosilole Core for High Efficiency Solution-Processed Organic Photovoltaic Cells
	1	Sun et al. (2012)	Solution-processed small-molecule solar cells with 6.7% efficiency
2012	4	Mishra en Bauerle (2012)	Small Molecule Organic Semiconductors on the Move: Promises for Future Solar Energy Technology
	5	Lin, Li en Zhan (2012)	Small molecule semiconductors for high-efficiency organic photovoltaics
	7	Zhou et al. (2012)	Small Molecules Based on Benzo 1,2-b:4,5-b' dithiophene Unit for High-Performance Solution-Processed Organic Solar Cells
2014	9	Kan et al. (2014)	Solution-Processed Organic Solar Cells Based on Dialkylthiol-Substituted Benzodithiophene Unit with Efficiency near 10%
2015	10	Kan et al. (2015)	A Series of Simple Oligomer-like Small Molecules Based on Oligothiophenes for Solution-Processed Solar Cells with High Efficiency
	12	Zhang et al. (2015)	Small-molecule solar cells with efficiency over 9%

HUBS			
2015	2	Malytskyi, Simon, Patrone en Raimundo (2015)	Thiophene-based push-pull chromophores for small molecule organic solar cells (SMOSCs)
	4	Fan en Zhu (2015)	Development of small-molecule materials for high-performance organic solar cells
	8	Yin et al. (2015)	Rational design of diketopyrrolopyrrole-based oligomers for high performance small molecular photovoltaic materials via an extended framework and multiple fluorine substitution
	9	J. L. Wang, Yin, et al. (2015)	Rational Design of Small Molecular Donor for Solution-Processed Organic Photovoltaics with 8.1% Efficiency and High Fill Factor via Multiple Fluorine Substituents and Thiophene Bridge
	12	Z. G. Zhang (2015)	Organic Semiconductor Photovoltaic Materials
2016	14	J. L. Wang, Wu, et al. (2015)	Solution-Processed Diketopyrrolopyrrole-Containing Small-Molecule Organic Solar Cells with 7.0% Efficiency: In-Depth Investigation on the Effects of Structure Modification and Solvent Vapor Annealing
	3	McAfee, Welch en Hoven (2016)	Design and Synthesis of Small Molecule Donors for High Efficiency Solution Processed Organic Solar Cells
	9	Liu, Wu, Zhang en Gao (2016)	Non-fullerene small molecule acceptors based on perylene diimides
	9	Yao et al. (2016)	Molecular Design of Benzodithiophene-Based Organic Photovoltaic Materials
	15	J. L. Wang et al. (2016)	Difluorobenzothiadiazole-Based Small-Molecule Organic Solar Cells with 8.7% Efficiency by Tuning of pi-Conjugated Spacers and Solvent Vapor Annealing
2017	15	Wu, Yin en Li (2016)	pi-Linkage effect of push-pull-structure organic small molecules for photovoltaic application
	1	Collins, Ran, Heiber en Nguyen (2017)	Small is Powerful: Recent Progress in Solution-Processed Small Molecule Solar Cells
	5	Tang, Zhan, Yao en Zhou (2017)	Design of Diketopyrrolopyrrole (DPP)-Based Small Molecules for Organic-Solar-Cell Applications
	6	Chen en Zhang (2017)	Recent progress in non-fullerene small molecule acceptors in organic solar cells (OSCs)
	6	H. Zhang et al. (2017)	The effect of processing conditions on performance of small-molecule organic solar cells
13	B. C. Wang et al. (2017)	Novel thienoisindigo-based dyes for near-infrared organic photovoltaics - A combination of theoretical and experimental study	

De meest invloedrijke publicaties binnen het onderzoek naar het gebruik van kleine organische moleculen zijn terug te vinden in tabellen X (gerangschikt volgens impact) en X (gerangschikt per jaar en met vermelding van de titels) en zijn visueel voorgesteld in figuur X. Tabellen Y en Y en figuur Y geven een overzicht van de kennishubs.

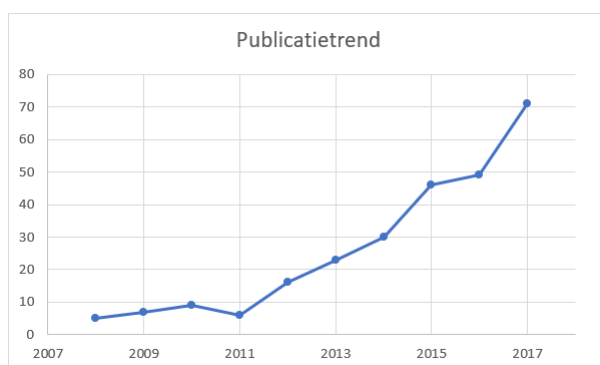
Bij het overlopen van de titels van de meest invloedrijke publicaties binnen het onderwerp van kleine organische moleculen voor OPVs, valt op dat er vooral werd ingezet op het ontwikkelen van nieuwe materialen en op het verhogen van de efficiëntie van dit type zonnecel. Materialen afgeleid van thiofeen kwamen het vaakst aan bod en terwijl in 2012 nog een efficiëntie van 6,7% werd gerapporteerd, werd dit opgedreven tot bijna 10% in 2014. De bulkheterostructuur morfologie lijkt het meest gebruikt te worden en er werd voornamelijk onderzoek gedaan naar het uit-oplossing-bereiden als productiemethode. Bij de titels van de publicaties die het meeste informatie over dit onderwerp hebben gecentraliseerd, valt qua materiaalgebruik op dat naast thiofeenafgeleiden ook diketopyrrolopyrrol belangrijk was en dat er interesse was in niet-fullereenacceptoren en donor-acceptormoleculen (push-pull moleculen). Het gebruik van fluor als substituent kwam eveneens in twee titels voor. Wat het controleren van de morfologie van de actieve laag betreft, werd de uitgloeimethode met solventdamp twee keer vermeld.

Onderwerp 2: Volledig-polymeerzonnecellen

a) Algemene publicatiestatistieken

In de periode 2008-2017 werden 262 publicaties over volledig-polymeerzonnecellen gevonden, waarvan er 259 (98.85%) in het Engels geschreven werden en 3 (1,15%) in het Chinees. De overgrote meerderheid van deze publicaties waren standaardartikels (252 of 96,18%). Er werden ook 10 beoordelingsartikels geschreven, goed voor 3,82% van de totale hoeveelheid publicaties.

Figuur 4 geeft een zicht op de publicatietrend van papers over dit onderwerp. Tot 2011 werden er minder dan tien artikels per jaar gepubliceerd over volledig-polymeerzonnecellen, met in 2011 zelfs een terugval in het aantal publicaties ten opzichte van 2010. Vanaf 2012 nam het aantal jaarlijkse publicaties continu toe, al was de groei in 2016 minimaal. In 2017 kende het onderzoek dan weer een boost, met 22 extra publicaties ten opzichte van het voorgaande jaar goed voor de grootste stijging van de publicatiesnelheid tijdens de geëvalueerde periode. Tabel 12 bevat een overzicht van de publicatiekarakteristieken per jaar. Terwijl publicaties in 2008 gemiddeld vijf à zes pagina's lang waren, zevenentwintig referenties telden en door ongeveer vijf auteurs geschreven werden, was de lengte van een gemiddelde publicatie in 2017 net geen negen pagina's, met een tweeënvijftigtal referenties en zeven à acht co-auteurs. In 2008 waren er twintig auteurs actief binnen het onderzoek naar volledig-polymeerzonnecellen en werden er papers gepubliceerd in vier wetenschappelijke tijdschriften, wat neerkwam op een gemiddelde van 1,25 papers per tijdschrift. Tien jaar later werkten er al 350 verschillende auteurs aan publicaties binnen dit onderwerp, die gepubliceerd werden in tweeëndertig tijdschriften (gemiddeld 2,22 artikels per tijdschrift).



Jaar	TA	PG/TA	NR/TA	AU/TA	AU uniek	J uniek	TA/J uniek
2008	5	5.60	27.00	4.80	20	4	1.25
2009	7	6.43	32.29	5.71	36	6	1.17
2010	9	7.56	43.56	5.00	42	8	1.13
2011	6	6.50	42.67	6.50	39	6	1.00
2012	16	8.06	45.06	5.56	78	13	1.23
2013	23	7.22	44.83	5.48	108	15	1.53
2014	30	9.17	52.73	8.27	207	21	1.43
2015	46	8.48	50.33	6.11	203	29	1.59
2016	49	8.90	53.51	8.08	274	29	1.69
2017	71	8.85	52.46	7.62	350	32	2.22

De statistieken over de meest publicerende auteurs, de populairste tijdschriften, de belangrijkste onderzoeksdisciplines en de landen waar het meeste onderzoek naar dit onderwerp werd uitgevoerd, zijn samengevat in tabellen 13 tot 16. In de lijst met landen, stond België met één publicatie op de tweeëntwintigste plaats. De Universiteit Hasselt kwam niet voor in de *organizations enhanced*-lijst van WoS.

Auteurs		Tijdschriften		
1	LI YF	23	1 ACS APPLIED MATERIALS INTERFACES	14
2	KIM BJ	20	2 ADVANCED ENERGY MATERIALS	13
3	LEE C	17	2 ADVANCED FUNCTIONAL MATERIALS	13
4	ADE H	15	4 ADVANCED MATERIALS	12
4	KIM Y	15	4 CHEMISTRY OF MATERIALS	12
4	MCNEILL CR	15	4 JOURNAL OF MATERIALS CHEMISTRY A	12
4	WANG C	15	4 MACROMOLECULES	12
8	MA WL	14	8 POLYMER CHEMISTRY	10
9	FACCHETTI A	13	9 ENERGY ENVIRONMENTAL SCIENCE	8
9	YUAN JY	13	9 JOURNAL OF POLYMER SCIENCE PART A POLYMER CHEMISTRY	8
9	ZHAN XW	13		

Onderzoeksdisciplines		Landen		
1	CHEMISTRY	135	1 PEOPLES R CHINA	131
2	MATERIALS SCIENCE	134	2 USA	83
3	PHYSICS	86	3 SOUTH KOREA	46
4	SCIENCE TECHNOLOGY OTHER TOPICS	66	4 UK	24
5	POLYMER SCIENCE	63	5 JAPAN	22
6	ENERGY FUELS	39	6 GERMANY	15
7	ENGINEERING	21	7 AUSTRALIA	12
8	ENVIRONMENTAL SCIENCES ECOLOGY	8	8 NETHERLANDS	8
9	OPTICS	2	8 SWEDEN	8
10	CRYSTALLOGRAPHY	1	10 CANADA	7
10	ELECTROCHEMISTRY	1		
10	METALLURGY METALLURGICAL ENGINEERING	1		

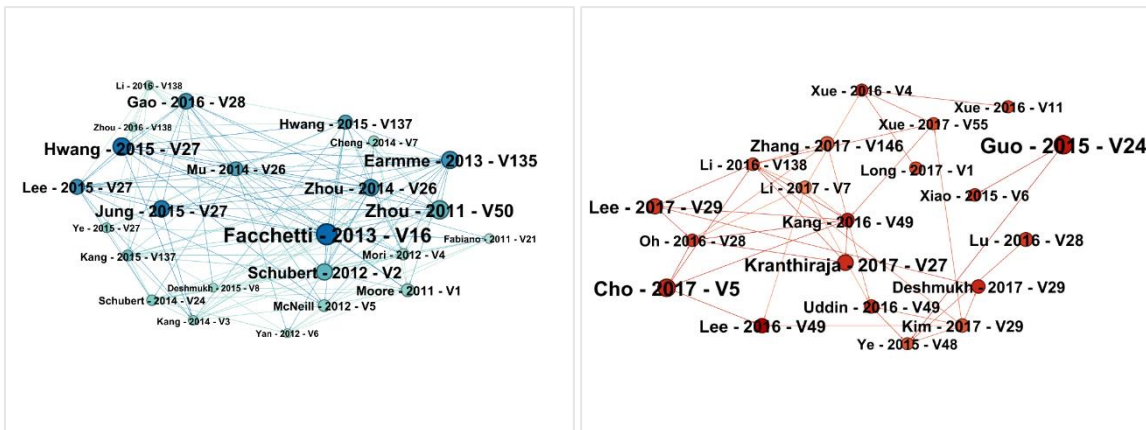
b) Meest voorkomende titelwoorden

Tabel 17 geeft een overzicht van de meest voorkomende titelwoorden binnen het onderwerp 'volledig-polymeerzonnecellen' en van de evolutie van de gebruiksfrequentie van deze titelwoorden.

Het woord dat de grootste verandering in gebruiksfrequentie doormaakte, was 'photovoltaic', al kan hieraan niet veel betekenis gegevens worden zonder context. Opvallend was dat de populariteit van het woord 'synthesis' na de piek van 20,51% in 2012-2013 drastisch daalde tot 2,50% in 2016-2017. Ook het gebruik van het woord 'bulk' daalde sterk tijdens de onderzochte periode, van 20% in 2010-2011 tot slechts 3,33% in 2016-2017. Interessante woorden die hun populariteitspiek bereikten in de meest recente periode, waren 'acceptor(s)' en 'performance'.

	Titelwoorden	2008-2017 TA	2008-2017 %	2008-2009 (R, %)		2010-2011 (R, %)		2012-2013 (R, %)		2014-2015 (R, %)		2016-2017 (R, %)		Evolutie	Piekperiode
1	Solar	207	79.01%	1	50.00%	1	66.67%	1	87.18%	1	73.68%	1	84.17%	+, -, +	2012-2013
2	Cells	199	75.95%	1	50.00%	1	66.67%	2	82.05%	2	72.37%	2	80.00%	+, -, +	2012-2013
3	All-Polymer	181	69.08%	1	50.00%	4	40.00%	3	61.54%	3	71.05%	3	75.83%	-, +	2016-2017
4	Polymer	93	35.50%	18	8.33%	3	46.67%	4	30.77%	4	30.26%	4	41.67%	+++ , -- , ++	2010-2011
5	Acceptor	45	17.18%	-	-	28	6.67%	11	15.38%	23	6.58%	5	27.50%	+, -, ++	2016-2017
6	Based	39	14.89%	4	25.00%	10	13.33%	6	20.51%	5	15.79%	9	11.67%	-- , + , -	2008-2009
7	Polymers	37	14.12%	4	25.00%	28	6.67%	6	20.51%	11	10.53%	8	14.17%	-- , + , -	2008-2009
7	Performance	37	14.12%	-	-	10	13.33%	21	7.69%	7	14.47%	7	17.50%	-, ++	2016-2017
9	Copolymers	33	12.60%	18	8.33%	10	13.33%	5	25.64%	16	9.21%	12	10.83%	++ , --	2012-2013
10	diimide	31	11.83%	9	16.67%	28	6.67%	12	12.82%	8	11.84%	9	11.67%	-- , +	2008-2009
11	acceptors	30	11.45%	-	-	-	-	21	7.69%	32	5.26%	6	19.17%	-, ++	2016-2017
12	Conjugated	28	10.69%	9	16.67%	10	13.33%	6	20.51%	16	9.21%	18	7.50%	-, + , --	2012-2013
12	n-type	28	10.69%	9	16.67%	28	6.67%	10	17.95%	5	15.79%	30	5.00%	-, + , --	2012-2013
14	Blend	26	9.92%	9	16.67%	5	20.00%	17	10.26%	23	6.58%	14	10.00%	+, --	2010-2011
15	Naphthalene	25	9.54%	-	-	-	-	12	12.82%	16	9.21%	12	10.83%		
16	High	24	9.16%	-	-	10	13.33%	29	5.13%	11	10.53%	14	10.00%	-- , +	2010-2011
17	Photovoltaic	23	8.78%	4	25.00%	5	20.00%	56	2.56%	11	10.53%	22	6.67%	--- , + , -	2008-2009
18	Efficient	22	8.40%	9	16.67%	28	6.67%	-	-	23	6.58%	9	11.67%	-- , +	2008-2009
18	Efficiency	22	8.40%	-	-	28	6.67%	29	5.13%	8	11.84%	16	8.33%	-, + , -	2014-2015
18	Morphology	22	8.40%	-	-	5	20.00%	29	5.13%	8	11.84%	22	6.67%	-- , + , -	2010-2011
21	Perylene	20	7.63%	9	16.67%	10	13.33%	29	5.13%	23	6.58%	18	7.50%	-- , +	2008-2009
21	Bulk	20	7.63%	18	8.33%	5	20.00%	12	12.82%	16	9.21%	45	3.33%	++ , ---	2010-2011
23	Effect	19	7.25%	-	-	-	-	29	5.13%	11	10.53%	18	7.50%	++ , -	2014-2015
23	Charge	19	7.25%	9	16.67%	-	-	29	5.13%	11	10.53%	27	5.83%	-- , + , -	2008-2009
25	Heterojunction	18	6.87%	18	8.33%	10	13.33%	12	12.82%	16	9.21%	45	3.33%	+, --	2010-2011
26	Organic	17	6.49%	-	-	10	13.33%	12	12.82%	23	6.58%	36	4.17%	--	2010-2011
27	Electron	16	6.11%	18	8.33%	-	-	29	5.13%	50	3.95%	16	8.33%	++	2016-2017
27	Synthesis	16	6.11%	18	8.33%	-	-	6	20.51%	32	5.26%	62	2.50%	---	2012-2013
27	Molecular	16	6.11%	-	-	28	6.67%	29	5.13%	23	6.58%	22	6.67%		
30	Copolymer	15	5.73%	18	8.33%	28	6.67%	21	7.69%	32	5.26%	30	5.00%	-	2008-2009

c) Analyse van het directe-citatie netwerk



	Publicatie	In-graad	Autoriteit	PageRank	Eigenvector	Gemiddelde
1	Facchetti, 2013, V16, P123	1	1	8	4	3.50
2	Schubert, 2012, V2, P369	6	10	5	2	5.75
3	Zhou, 2011, V50, P2799	2	-	2	1	1.67
4	Earmme, 2013, V135, P14960	4	5	-	5	4.67
5	Zhou, 2014, V26, P3767	6	6	-	7	6.33
6	Hwang, 2015, V27, P4578	3	2	-	-	2.50
7	Moore, 2011, V1, P230	-	-	4	3	3.50
8	Jung, 2015, V27, P3310	5	3	-	-	4.00
9	Lee, 2015, V27, P2466	9	4	-	-	6.50
10	Gao, 2016, V28, P1884	8	7	-	-	7.50
10	Swaraj, 2010, V10, P2863	-	-	6	9	7.50
10	Fabiano, 2011, V21, P5891	-	-	7	8	7.50
13	Hwang, 2015, V137, P4424	10	9	-	-	9.50
14	McNeill, 2008, V18, P2309	-	-	1	-	1.00
15	Zhan, 2009, V19, P5794	-	-	3	-	3.00
16	Mori, 2012, V4, P3325	-	-	-	6	6.00
17	Mu, 2014, V26, P7224	-	8	-	-	8.00
18	Zhou, 2010, V20, P2362	-	-	9	-	9.00
19	Flesch, 2009, V10, P1549	-	-	10	-	10.00
19	McNeill, 2012, V5, P5653	-	-	-	10	10.00

	Publicatie	Uit-grad	Hub	Gemiddelde
1	Guo, 2015, V24, P675	1	2	1.50
2	Lee, 2016, V49, P5051	5	1	3.00
3	Cho, 2017, V5, P21291	2	5	3.50
4	Kranthiraja, 2017, V27, P6793	3	6	4.50
5	Kang, 2016, V49, P2424	8	3	5.50
6	Deshmukh, 2017, V29, P804	8	4	6.00
7	Lee, 2017, V29, P9407	4	9	6.50
8	Uddin, 2016, V49, P6374	8	7	7.50
9	Lu, 2016, V28, P872	6	-	6.00
9	Zhang, 2017, V146, P169	6	-	6.00
11	Kim, 2017, V29, P6793	8	-	8.00
11	Xue, 2016, V4, P5810	-	8	8.00
13	Oh, 2016, V28, P10016	-	10	10.00

AUTORITEITEN			
2008	14	McNeill et al. (2008)	Efficient polythiophene/polyfluorene copolymer bulk heterojunction photovoltaic devices: Device physics and annealing effects
2009	15	Zhan et al. (2009)	Copolymers of perylene diimide with dithienothiophene and dithienopyrrole as electron-transport materials for all-polymer solar cells and field-effect transistors
	19	Flesch, Resel en McNeill (2009)	Charge transport properties and microstructure of polythiophene/polyfluorene blends
2010	10	Swaraj et al. (2010)	Nanomorphology of Bulk Heterojunction Photovoltaic Thin Films Probed with Resonant Soft X-ray Scattering
	18	E. Zhou, Tajima, Yang en Hashimoto (2010)	Band gap and molecular energy level control of perylene diimide-based donor-acceptor copolymers for all-polymer solar cells
2011	3	E. J. Zhou et al. (2011)	All-Polymer Solar Cells from Perylene Diimide Based Copolymers: Material Design and Phase Separation Control
	7	Moore et al. (2011)	Polymer Blend Solar Cells Based on a High-Mobility Naphthalenediimide-Based Polymer Acceptor: Device Physics, Photophysics and Morphology
	10	Fabiano et al. (2011)	Role of photoactive layer morphology in high fill factor all-polymer bulk heterojunction solar cells
2012	2	Schubert et al. (2012)	Influence of Aggregation on the Performance of All-Polymer Solar Cells Containing Low-Bandgap Naphthalenediimide Copolymers
	16	Mori, Bente, Ohkita, Ito en Miyake (2012)	Polymer/Polymer Blend Solar Cells Improved by Using High-Molecular-Weight Fluorene-Based Copolymer as Electron Acceptor
	19	McNeill (2012)	Morphology of all-polymer solar cells
2013	1	Facchetti (2013)	Polymer donor-polymer acceptor (all-polymer) solar cells
	4	Earmme, Hwang, Murari, Subramaniyan en Jenekhe (2013)	All-Polymer Solar Cells with 3.3% Efficiency Based on Naphthalene Diimide-Selenophene Copolymer Acceptor
2014	5	Y. Zhou et al. (2014)	High Performance All-Polymer Solar Cell via Polymer Side-Chain Engineering
	17	Mu et al. (2014)	High-Efficiency All-Polymer Solar Cells Based on a Pair of Crystalline Low-Bandgap Polymers
2015	6	Hwang, Courtright, Ferreira, Tolbert en Jenekhe (2015)	7.7% Efficient All-Polymer Solar Cells
	8	Jung et al. (2015)	Fluoro-Substituted n-Type Conjugated Polymers for Additive-Free All-Polymer Bulk Heterojunction Solar Cells with High Power Conversion Efficiency of 6.71%
	9	Lee et al. (2015)	High-Performance All-Polymer Solar Cells Via Side-Chain Engineering of the Polymer Acceptor: The Importance of the Polymer Packing Structure and the Nanoscale Blend Morphology
	13	Hwang, Earmme, Courtright, Eberle en Jenekhe (2015)	n-Type Semiconducting Naphthalene Diimide-Perylene Diimide Copolymers: Controlling Crystallinity, Blend Morphology, and Compatibility Toward High-Performance All-Polymer Solar Cells
2016	10	Gao et al. (2016)	All-Polymer Solar Cells Based on Absorption-Complementary Polymer Donor and Acceptor with High Power Conversion Efficiency of 8.27%

HUBS			
2015	1	Guo, Tu en Liu (2015)	Recent advances in rylene diimide polymer acceptors for all-polymer solar cells
2016	2	Lee et al. (2016)	Correlation between Phase-Separated Domain Sizes of Active Layer and Photovoltaic Performances in All-Polymer Solar Cells
	5	Kang et al. (2016)	From Fullerene-Polymer to All-Polymer Solar Cells: The Importance of Molecular Packing, Orientation, and Morphology Control
	8	Uddin et al. (2016)	Controlling Energy Levels and Blend Morphology for All-Polymer Solar Cells via Fluorination of a Naphthalene Diimide-Based Copolymer Acceptor
	9	Lu, Zhang, Wang en Ling (2016)	The Research Progress on Naphthalene Diimide Based n-Type Polymer Acceptor Materials
	11	Xue et al. (2016)	Indacenodithienothiophene-naphthalene diimide copolymer as an acceptor for all-polymer solar cells
	13	Oh et al. (2016)	Side-Chain Fluorination: An Effective Approach to Achieving High-Performance All-Polymer Solar Cells with Efficiency Exceeding 7%
2017	3	Cho et al. (2017)	Impact of highly crystalline, isoindigo-based small-molecular additives for enhancing the performance of all-polymer solar cells
	4	Kranthiraja et al. (2017)	The Impact of Sequential Fluorination of pi-Conjugated Polymers on Charge Generation in All-Polymer Solar Cells
	6	Deshmukh et al. (2017)	Critical Role of Pendant Group Substitution on the Performance of Efficient All-Polymer Solar Cells
	7	Lee et al. (2017)	Importance of 2D Conjugated Side Chains of Benzodithiophene-Based Polymers in Controlling Polymer Packing, Interfacial Ordering, and Composition Variations of All-Polymer Solar Cells
	9	Zhang et al. (2017)	Naphthalene diimide-based random terpolymer for efficient all-polymer solar cells with high open circuit voltage
	11	Kim et al. (2017)	Morphological Control of Donor/Acceptor Interfaces in All-Polymer Solar Cells Using a Pentafluorobenzene-Based Additive

De meest invloedrijke publicaties binnen het onderzoek naar volledig-polymeorzonnecellen zijn terug te vinden in tabellen X (gerangschikt volgens impact) en X (gerangschikt per jaar en met vermelding van de titels) en zijn visueel voorgesteld in figuur X. Tabellen Y en Y en figuur Y geven een overzicht van de kennishubs.

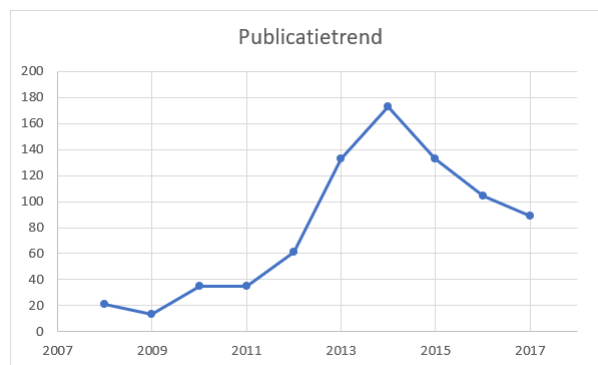
Bij het overlopen van de titels van de meest invloedrijke publicaties binnen dit onderwerp, valt op dat er veel aandacht werd besteed aan het ontwerpen van geschikte polymere acceptormaterialen en aan het verbeteren van de morfologie van de actieve laag. Polymere acceptormaterialen gebaseerd op fluoreen of op diimides met een ryleenstructuur (naftaleendiimide en peryleendiimide) werden expliciet vermeld. Wat het verbeteren van de morfologie van de actieve laag betreft, werd vanaf 2014 interesse getoond in het toepassen van zijketenmodificatie en het gebruik van fluor als substituent. Vanaf 2013 kwam de zoektocht naar een hogere omzettingsefficiëntie nadrukkelijker naar voren in de titels: in 2013 werd een efficiëntie van 3,3% gerapporteerd, wat toenam tot 8,27% in 2016. De titels van de kennishubs geven grotendeels hetzelfde beeld. Naftaleendiimide wordt meermaals vermeld als de basis voor polymere acceptormaterialen, terwijl zijketenmodificatie en het gebruik van fluor als substituent duidelijk op veel aandacht kunnen rekenen in de context van het optimaliseren van de morfologie van de actieve laag. Voor dat laatste wordt het gebruik van additieven ook in twee titels genoemd.

Onderwerp 3: OPV-toepassingen met de tandemarchitectuur

a) Algemene publicatiestatistieken

In de periode 2008-2017 werden 797 publicaties over het gebruik van de tandemarchitectuur voor OPV-toepassingen gevonden, waarvan er 790 (99,12%) in het Engels geschreven werden, zes (0,75%) in het Chinees en één in het Japans (0,13%). De overgrote meerderheid van deze publicaties waren standaardartikels (762 of 95,61%). Er werden ook 35 beoordelingsartikels geschreven, goed voor 4,39% van de totale hoeveelheid publicaties.

Figuur 7 geeft een zicht op de publicatietrend van papers over dit onderwerp. In de periode van 2008 tot 2011 vertoonde het aantal jaarlijkse publicaties over het gebruik van de tandemarchitectuur geen duidelijke trend, met een daling van het aantal publicaties in 2009 en een gelijke publicatiesnelheid in de jaren 2010 en 2011. Vanaf 2012 was er echter duidelijk meer interesse in dit onderwerp, wat te zien is aan de sterke groei van het aantal jaarlijkse publicaties tot een maximum van 173 publicaties in 2014. Opvallend is dat na deze periode van toegenomen onderzoek, de interesse in het gebruik van de tandemarchitectuur leek weg te ebben: in de periode van 2015 tot 2017 daalde het aantal nieuwe publicaties ieder jaar, zij het met een geleidelijk afnemende snelheid, tot het niveau van 89 publicaties in 2017. Tabel 21 bevat een overzicht van de publicatiekarakteristieken per jaar. Terwijl publicaties in 2008 gemiddeld zes tot zeven pagina's lang waren, een vijftienvijftigtal referenties telden en door vier à vijf auteurs geschreven werden, bedroeg de lengte van een gemiddelde publicatie in 2017 al meer dan negen pagina's, werd naar een tweeënvijftigtal bronnen gerefereerd en werkten gemiddeld zeven co-auteurs aan iedere publicatie. In 2008 waren er zevententachtig auteurs actief binnen het onderzoek naar de tandemarchitectuur en werden er papers over dit onderwerp gepubliceerd in veertien wetenschappelijke tijdschriften, goed voor een gemiddelde van 1,50 papers per tijdschrift. Tien jaar later werkten er 490 verschillende auteurs aan publicaties over dit onderwerp. Dat zijn er 344 minder dan in het topjaar 2014, toen er 834 auteurs onderzoek deden naar de tandemarchitectuur voor organische zonnecellen. Opvallend is dat het aantal wetenschappelijke tijdschriften dat artikels over dit onderwerp publiceerde, in 2015 nog toenam tot vijftenzestig, terwijl het aantal nieuwe artikels dat jaar al afnam. In 2017 werd er nog in zesentwintig tijdschriften gepubliceerd, wat overeenkomt met een gemiddelde van 1,93 artikels per tijdschrift.



Jaar	TA	PG/TA	NR/TA	AU/TA	AU uniek	J uniek	TA/J uniek
2008	21	6.43	25.19	4.62	87	14	1.50
2009	13	7.62	36.77	5.23	55	10	1.30
2010	35	7.09	33.69	4.94	145	18	1.94
2011	35	6.94	36.20	6.26	205	15	2.33
2012	61	6.87	38.43	6.51	345	28	2.18
2013	133	8.22	51.44	6.41	655	51	2.61
2014	173	8.13	46.28	6.90	834	58	2.98
2015	133	8.46	47.11	6.76	665	65	2.05
2016	104	8.97	53.19	7.24	635	51	2.04
2017	89	9.43	52.40	7.00	490	46	1.93

De statistieken over de meest publicerende auteurs, de populairste tijdschriften, de belangrijkste onderzoeksdisciplines en de landen waar het meeste onderzoek naar dit onderwerp werd uitgevoerd, zijn samengevat in tabellen 22 tot 25. In de lijst met landen, stond België met veertien publicaties op de vijftiende plaats. In de *organizations enhanced*-lijst van WoS stond de Universiteit Hasselt op plaats 266 met één publicatie over het gebruik van de tandemarchitectuur in OPV-toepassingen.

Auteurs			Tijdschriften		
1	HOU JH	28	1	ADVANCED MATERIALS	57
1	YANG Y	28	2	SOLAR ENERGY MATERIALS AND SOLAR CELLS	52
3	KREBS FC	27	3	ORGANIC ELECTRONICS	50
4	JANSSEN RAJ	24	4	APPLIED PHYSICS LETTERS	43
5	BRABEC CJ	23	5	ADVANCED ENERGY MATERIALS	39
5	LI YF	23	6	JOURNAL OF MATERIALS CHEMISTRY A	37
7	WIENK MM	21	7	ACS APPLIED MATERIALS INTERFACES	32
8	CAO Y	20	8	ENERGY ENVIRONMENTAL SCIENCE	28
8	KIM H	20	9	CHEMISTRY OF MATERIALS	21
10	KIM JY	17	10	POLYMER CHEMISTRY	19
10	ZHANG SQ	17			

Onderzoeksdisciplines			Landen		
1	MATERIALS SCIENCE	447	1	PEOPLES R CHINA	281
2	PHYSICS	396	2	USA	189
3	CHEMISTRY	358	3	SOUTH KOREA	133
4	SCIENCE TECHNOLOGY OTHER TOPICS	191	4	GERMANY	67
5	ENERGY FUELS	184	5	TAIWAN	41
6	POLYMER SCIENCE	91	6	NETHERLANDS	36
7	ENGINEERING	44	7	JAPAN	35
8	OPTICS	35	8	DENMARK	28
9	ENVIRONMENTAL SCIENCES ECOLOGY	29	9	UK	27
10	CRYSTALLOGRAPHY	5	10	INDIA	20
10	ELECTROCHEMISTRY	5			

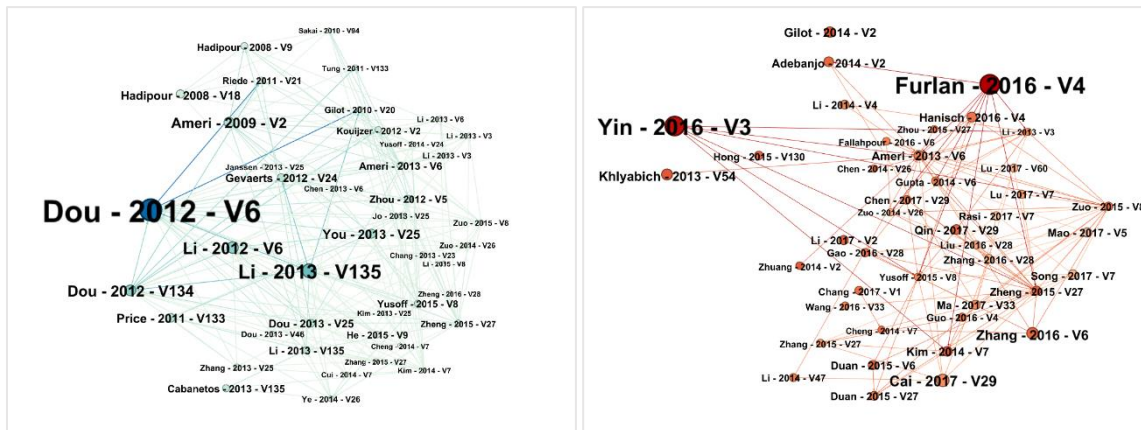
b) Meest voorkomende titelwoorden

Tabel 26 geeft een overzicht van de meest voorkomende titelwoorden binnen het onderwerp 'OPV-toepassingen met de tandemarchitectuur' en van de evolutie van de gebruiksfrequentie van deze titelwoorden.

'Conjugated' was het woord dat de sterkste procentuele verandering doormaakte en bereikte zijn populariteitspiek in de periode 2012-2013, toen het in ongeveer één tiende van alle publicatietitels voorkwam. Andere woorden waarvan de gebruiksfrequentie grote verschillen vertoonde, waren 'layers', 'inverted' (beide piekten in 2010-2011), 'layer' (piek in 2012-2013) en 'low' (piek in 2016-2017). Naast 'low' bereikten ook de woorden 'small', 'gap', 'bandgap', 'high', 'open-circuit' en 'hybrid' hun hoogste populariteit in de periode 2016-2017.

	Titelwoorden	2008-2017 TA	2008-2017 %	2008-2009 (R, %)		2010-2011 (R, %)		2012-2013 (R, %)		2014-2015 (R, %)		2016-2017 (R, %)		Evolutie	Piekperiode
1	solar	561	70.39%	1	67.65%	1	77.14%	1	68.56%	1	71.90%	1	67.88%		
2	cells	533	66.88%	2	52.94%	1	77.14%	2	65.98%	2	68.63%	2	63.73%		
3	organic	317	39.77%	2	52.94%	4	51.43%	3	38.66%	4	36.60%	3	39.38%		
4	Polymer	308	38.64%	5	29.41%	5	34.29%	4	37.11%	3	44.44%	4	34.20%	+, -	2014-2015
5	tandem	254	31.87%	4	41.18%	3	55.71%	5	26.29%	5	29.74%	5	30.57%	+, --	2010-2011
6	photovoltaic	146	18.32%	6	20.59%	6	18.57%	6	18.56%	6	20.26%	6	14.51%		
7	Efficient	108	13.55%	8	11.76%	11	8.57%	7	15.98%	9	13.73%	7	12.95%	-, +, -	2012-2013
8	layer	94	11.79%	33	2.94%	10	10%	8	13.40%	10	12.75%	12	10.88%	++, -	2012-2013
9	polymers	93	11.67%	-	-	-	-	9	12.89%	7	14.38%	10	12.44%		
9	Efficiency	93	11.67%	9	8.82%	12	7.14%	11	10.31%	8	14.05%	11	11.40%	-, +, -	2014-2015
11	based	91	11.42%	16	5.88%	12	7.14%	9	12.89%	11	11.11%	7	12.95%	++	2016-2017
12	cell	78	9.79%	6	20.59%	7	14.29%	14	8.25%	15	9.15%	14	8.81%	--	2008-2009
13	High	77	9.66%	16	5.88%	27	4.29%	15	7.73%	12	10.46%	7	12.95%	++	2016-2017
14	performance	69	8.66%	-	-	27	4.29%	13	8.76%	14	10.13%	13	9.33%	++	2014-2015
15	Conjugated	60	7.53%	-	-	77	1.43%	16	7.22%	12	10.46%	18	6.74%	+++,-	2014-2015
16	photovoltaics	53	6.65%	9	8.82%	12	7.14%	12	9.79%	21	5.23%	25	5.18%	-, +, -	2012-2013
17	heterojunction	47	5.90%	16	5.88%	12	7.14%	16	7.22%	19	5.56%	31	4.66%	+, -	2012-2013
18	inverted	46	5.77%	-	-	9	11.43%	18	6.19%	16	7.19%	76	2.07%	---	2010-2011
19	bandgap	43	5.40%	-	-	-	-	26	5.15%	19	5.56%	15	8.29%	+	2016-2017
20	bulk	42	5.27%	33	2.94%	20	5.71%	18	6.19%	23	4.58%	22	5.70%	++, -, +	2012-2013
21	small	40	5.02%	33	2.94%	27	4.29%	18	6.19%	36	3.92%	20	6.22%	++, -, +	2016-2017
21	hybrid	40	5.02%	33	2.94%	27	4.29%	28	4.64%	36	3.92%	16	7.77%	++	2016-2017
21	Highly	40	5.02%	-	-	27	4.29%	30	4.12%	17	6.54%	31	4.66%	+, -	2014-2015
24	Synthesis	38	4.77%	33	2.94%	77	1.43%	22	5.67%	21	5.23%	31	4.66%	++, -	2012-2013
24	copolymers	38	4.77%	33	2.94%	-	-	30	4.12%	18	5.88%	22	5.70%	++	2014-2015
26	Voltage	37	4.64%	-	-	39	2.86%	22	5.67%	23	4.58%	25	5.18%	+	2012-2013
27	low	36	4.52%	33	2.94%	77	1.43%	30	4.12%	23	4.58%	20	6.22%	-, ++	2016-2017
28	layers	35	4.39%	33	2.94%	8	12.86%	30	4.12%	31	4.25%	76	2.07%	+++,-	2010-2011
29	Solution-Processed	31	3.89%	-	-	39	2.86%	18	6.19%	23	4.58%	99	1.55%	+, --	2012-2013
29	properties	31	3.89%	16	5.88%	77	1.43%	30	4.12%	31	4.25%	39	3.63%	--,+	2008-2009
29	open-circuit	31	3.89%	-	-	77	1.43%	38	3.61%	23	4.58%	31	4.66%	++	2016-2017
29	gap	31	3.89%	33	2.94%	77	1.43%	38	3.61%	40	3.59%	22	5.70%	-, ++	2016-2017

c) Analyse van het directe-citatie netwerk



Publicatie	In-graad	Autoriteit	PageRank	Eigenvector	Gemiddelde	Publicatie	Uit-graad	Hub	Gemiddelde
1 Dou, 2012, V6, P180	1	1	2	1	1.25	1 Furlan, 2016, V4, P310	1	1	1.00
2 Ameri, 2009, V2, P347	5	6	3	2	4.00	2 Yin, 2016, V3, P1288	2	2	2.00
3 Li, 2012, V6, P153	3	4	8	3	4.50	3 Khlyabich, 2013, V54, P5267	5	4	4.50
4 Dou, 2012, V134, P10071	4	3	10	5	5.50	4 Kim, 2014, V7, P4118	7	3	5.00
5 Price, 2011, V133, P4625	7	8	9	10	8.50	5 Gilot, 2014, V2, P277	6	5	5.50
6 Li, 2013, V135, P5529	2	2	-	4	2.67	6 Adebanjo, 2014, V2, P10331	7	10	8.50
7 Gevaerts, 2012, V24, P2130	9	9	-	6	8.00	7 Cai, 2017, V29, P11501	3	-	3.00
8 Hadipour, 2008, V18, P169	8	-	1	-	4.50	8 Zhang, 2016, V6, P4817	4	-	4.00
9 You, 2013, V25, P3973	6	5	-	-	5.50	9 Zhuang, 2014, V2, P2202	-	6	6.00
10 Hadipour, 2008, V9, P617	-	-	4	8	6.00	10 Ameri, 2013, V6, P2390	7	-	7.00
10 Gilot, 2010, V20, P3904	-	-	5	7	6.00	10 Hanisch, 2016, V4, P4771	7	-	7.00
12 Riede, 2011, V21, P3019	-	-	6	9	7.50	10 Zheng, 2015, V27, P1189	-	7	7.00
13 Dou, 2013, V25, P825	10	7	-	-	8.50	13 Li, 2017, V2, P839	-	8	8.00
14 Hagemann, 2008, V92, P1327	-	-	7	-	7.00	14 Hong, 2015, V130, P315	-	9	9.00
15 Li, 2013, V135, P13549	-	10	-	-	10.00				

AUTORITEITEN			
2008	8	Hadipour, de Boer en Blom (2008b)	Organic tandem and multi-junction solar cells
	10	Hadipour, de Boer en Blom (2008a)	Device operation of organic tandem solar cells
	14	Hagemann, Bjerring, Nielsen en Krebs (2008)	All solution processed tandem polymer solar cells based on thermocleavable materials
2009	2	Ameri, Dennler, Lungenschmied en Brabec (2009)	Organic tandem solar cells: A review
2010	10	Gilot, Wienk en Janssen (2010)	Measuring the External Quantum Efficiency of Two-Terminal Polymer Tandem Solar Cells
2011	5	Price, Stuart, Yang, Zhou en You (2011)	Fluorine Substituted Conjugated Polymer of Medium Band Gap Yields 7% Efficiency in Polymer-Fullerene Solar Cells
	12	Riede et al. (2011)	Efficient Organic Tandem Solar Cells based on Small Molecules
2012	1	Dou, You, et al. (2012)	Tandem polymer solar cells featuring a spectrally matched low-bandgap polymer
	3	G. Li, Zhu en Yang (2012)	Polymer solar cells
	4	Dou, Gao, et al. (2012)	Systematic Investigation of Benzodithiophene- and Diketopyrrolopyrrole-Based Low-Bandgap Polymers Designed for Single Junction and Tandem Polymer Solar Cells
	7	Gevaerts, Furlan, Wienk, Turbiez en Janssen (2012)	Solution Processed Polymer Tandem Solar Cell Using Efficient Small and Wide bandgap Polymer:Fullerene Blends
2013	6	W. W. Li, Furlan, Hendriks, Wienk en Janssen (2013)	Efficient Tandem and Triple-Junction Polymer Solar Cells
	9	You et al. (2013)	10.2% Power Conversion Efficiency Polymer Tandem Solar Cells Consisting of Two Identical Sub-Cells
	13	Dou et al. (2013)	A Selenium-Substituted Low-Bandgap Polymer with Versatile Photovoltaic Applications
	15	K. Li et al. (2013)	Development of Large Band-Gap Conjugated Copolymers for Efficient Regular Single and Tandem Organic Solar Cells

HUBS			
2013	3	Khlyabich, Burkhart, Rudenko en Thompson (2013)	Optimization and simplification of polymer-fullerene solar cells through polymer and active layer design
	10	Ameri, Li en Brabec (2013)	Highly efficient organic tandem solar cells: a follow up review
2014	4	Kim et al. (2014)	Effect of pi-conjugated bridges of TPD-based medium bandgap conjugated copolymers for efficient tandem organic photovoltaic cells
	5	Gilot en Janssen (2014)	Tandem and Multijunction Organic Solar Cells
	6	Adebanjo, Vaagensmith en Qiao (2014)	Double junction polymer solar cells
	9	Zhuang, Lundin en Andersson (2014)	Computational modelling of donor-acceptor conjugated polymers through engineered backbone manipulations based on a thiophene-quinoxaline alternating copolymer
2015	10	Zheng et al. (2015)	Highly Efficient Tandem Polymer Solar Cells with a Photovoltaic Response in the Visible Light Range
	14	Hong, Dou, Li en Yang (2015)	Tandem Solar Cell-Concept and Practice in Organic Solar Cells
2016	1	Furlan en Janssen (2016)	Multi-Junction Polymer Solar Cells
	2	Yin, Wei en Zheng (2016)	Interfacial Materials for Organic Solar Cells: Recent Advances and Perspectives
	8	Zhang, Ye en Hou (2016)	Breaking the 10% Efficiency Barrier in Organic Photovoltaics: Morphology and Device Optimization of Well-Known PBDTTT Polymers
	10	Hanisch, Wahl, Wessendorf en Ahlswede (2016)	Efficient polymer tandem modules and solar cells by doctor blading
2017	7	Cai, Huo en Sun (2017)	Recent Advances in Wide-Bandgap Photovoltaic Polymers
	13	Li, Chang en Yang (2017)	Low-bandgap conjugated polymers enabling solution-processable tandem solar cells

De meest invloedrijke publicaties binnen het onderzoek naar het gebruik van de tandemarchitectuur zijn terug te vinden in tabellen X (gerangschikt volgens impact) en X (gerangschikt per jaar en met vermelding van de titels) en zijn visueel voorgesteld in figuur X. Tabellen Y en Y en figuur Y geven een overzicht van de kennishubs. Het artikel van Khlyabich et al. (2013) op plaats drie in de rangschikking van de kennishubs bleek niet over de tandemarchitectuur te gaan, maar over alternatieven hiervoor. Deze paper werd verkeerdelijk opgepikt door de gebruikte zoekopdracht omdat de tandemarchitectuur wordt vermeld in de samenvatting van het artikel en omdat zonnecellen met een enkele actieve laag niet expliciet werden uitgesloten.

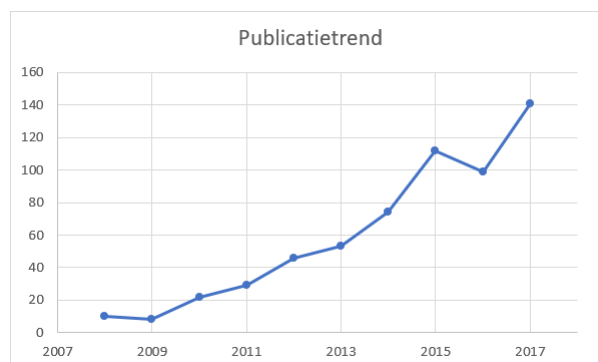
Bij het overlopen van de titels van de meest invloedrijke publicaties over het gebruik van de tandemarchitectuur, valt op dat er vooral gefocust werd op het ontwikkelen van geschikte materialen voor de actieve lagen in dit soort zonnecellen. Naast polymeren met een klein, middelmatig en groot bandgap, werden ook het gebruik van polymeren met fluor- en seleniumsubstituenten, kleine organische moleculen en zogenaamde *thermocleavable* materialen vermeld in de titels. In 2011 werd een omzettingsefficiëntie van 7% bereikt en in 2013 een van 10,2%. Uit de titels van de kennishubs blijkt dat naast materialen voor de actieve laag, ook materialen voor de connectielaag en de lagen voor het transport van ladingdragers werden onderzocht. Volgens een artikel kon een omzettingsefficiëntie van meer dan 10% bereikt worden door de bouw van de zonnecel en de morfologie van de actieve lagen te optimaliseren. Hanisch et al. rapporteerden in 2016 dat ze erin geslaagd waren om efficiënte tandemzonnecellen te fabriceren door gebruik te maken van een rakel bij het printproces (*doctor blading*), wat een methode is die op industriële schaal toegepast kan worden.

Onderwerp 4: OPV-toepassingen met een enkele actieve laag

a) Algemene publicatiestatistieken

In de periode 2008-2017 werden 594 publicaties over OPV-toepassingen met een enkele actieve laag gevonden, waarvan er 587 (98,82%) in het Engels geschreven werden en zeven (1,18%) in het Chinees. De overgrote meerderheid van deze publicaties waren standaardartikels (568 of 95,62%). Er werden ook 35 beoordelingsartikels geschreven, goed voor 4,38% van de totale hoeveelheid publicaties.

Figuur 10 geeft een zicht op de publicatietrend van papers over dit onderwerp. Na een kleine terugval in 2009, nam het aantal jaarlijkse publicaties over OPV-toepassingen met een enkele actieve laag geleidelijk aan toe. Aanvankelijk was de groei van het publicatietempo bescheiden, met zeven tot zeventien extra publicaties per jaar in de periode 2010 tot 2013. In 2014 en 2015 steeg het aantal jaarlijkse publicaties aanzienlijk, maar in 2016 kende het onderzoek naar dit onderwerp een terugval: er werden dertien artikels minder gepubliceerd dan het jaar voordien, wat overeenkomt met een daling van ongeveer 11,61%. In 2017 herstelde de interesse zich echter en werden in totaal 141 nieuwe papers geschreven. Dat waren er tweeënveertig meer dan het jaar voordien en negenentwintig meer dan het vorige maximum uit 2016. Tabel 30 bevat een overzicht van de publicatiekarakteristieken per jaar. Terwijl publicaties in 2008 gemiddeld tussen de vijf en zes pagina's lang waren, ongeveer twintig referenties telden en door een zestal auteurs geschreven werden, bedroeg de lengte van een gemiddeld artikel in 2017 al meer dan negen pagina's, werd naar bijna vierenvijftig bronnen gerefereerd en werkten gemiddeld zeven co-auteurs aan iedere publicatie. In 2008 waren er veertig auteurs actief binnen het onderzoek naar OPV-toepassingen met een enkele actieve laag en werden er papers over dit onderwerp gepubliceerd in veertien wetenschappelijke tijdschriften, goed voor een gemiddelde van 1,50 papers per tijdschrift. Tien jaar later werkten er maar liefst 763 verschillende auteurs aan publicaties over OPV-toepassingen met een enkele actieve laag. Deze werden gepubliceerd in tweeënzestig verschillende tijdschriften, wat neerkomt op een gemiddelde van 2,27 artikels per tijdschrift.



Jaar	TA	PG/TA	NR/TA	AU/TA	AU uniek	J uniek	TA/J uniek
2008	10	5.60	19.60	6.20	40	10	1.00
2009	8	6.88	35.38	5.38	43	6	1.33
2010	22	8.68	35.27	5.86	113	20	1.10
2011	29	6.90	35.45	6.17	178	25	1.16
2012	46	8.09	43.11	5.48	236	28	1.64
2013	53	8.66	50.83	5.57	267	36	1.47
2014	74	8.84	50.32	5.68	384	46	1.61
2015	112	8.50	45.23	5.55	519	64	1.75
2016	99	9.06	49.98	6.52	539	51	1.94
2017	141	9.11	53.57	7.13	763	62	2.27

De statistieken over de meest publicerende auteurs, de populairste tijdschriften, de belangrijkste onderzoeksdisciplines en de landen waar het meeste onderzoek naar dit onderwerp werd uitgevoerd, zijn samengevat in tabellen 31 tot 34. In de lijst met landen, stond België met vijf publicaties op de vierentwintigste plaats. In de *organizations enhanced*-lijst van WoS stond de Universiteit Hasselt op plaats 76 met vier publicaties over OPV-toepassingen met een enkele actieve laag.

Auteurs			Tijdschriften		
1	BRABEC CJ	21	1	ACS APPLIED MATERIALS INTERFACES	45
2	MA W	19	2	JOURNAL OF MATERIALS CHEMISTRY A	36
3	AMERI T	18	3	ORGANIC ELECTRONICS	33
4	ZHANG J	16	4	SOLAR ENERGY MATERIALS AND SOLAR CELLS	20
5	ZHANG FJ	15	5	ADVANCED ENERGY MATERIALS	19
6	AN QS	14	5	JOURNAL OF PHYSICAL CHEMISTRY C	19
7	LI YF	12	7	ADVANCED MATERIALS	14
7	THOMPSON BC	12	7	SYNTHETIC METALS	14
9	ITO S	10	9	MACROMOLECULES	13
9	TANG WH	10	10	ADVANCED FUNCTIONAL MATERIALS	12
9	WEI ZX	10	10	RSC ADVANCES	12
9	ZHANG L	10			

Onderzoeksdisciplines			Landen		
1	MATERIALS SCIENCE	383	1	PEOPLES R CHINA	217
2	PHYSICS	275	2	USA	119
3	CHEMISTRY	251	3	GERMANY	45
4	SCIENCE TECHNOLOGY OTHER TOPICS	168	4	SOUTH KOREA	44
5	ENERGY FUELS	105	5	TAIWAN	37
6	POLYMER SCIENCE	72	6	JAPAN	34
7	ENGINEERING	35	7	INDIA	32
8	OPTICS	22	8	UK	31
9	ELECTROCHEMISTRY	11	9	FRANCE	24
9	ENVIRONMENTAL SCIENCES ECOLOGY	11	10	AUSTRALIA	22

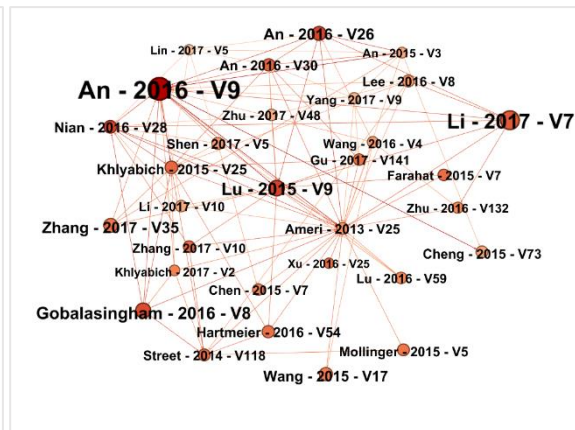
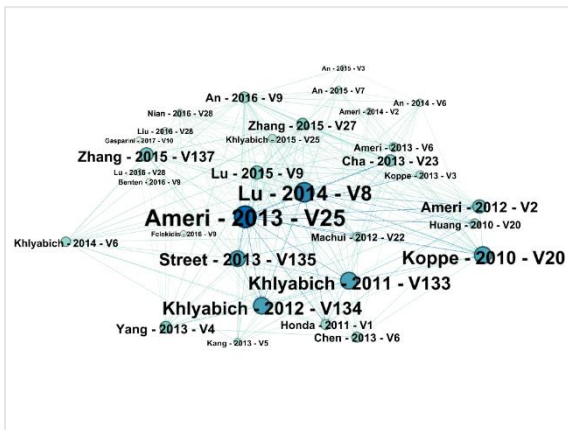
b) Meest voorkomende titelwoorden

Tabel 35 geeft een overzicht van de meest voorkomende titelwoorden binnen het onderwerp 'OPV-toepassingen met een enkele actieve laag' en van de evolutie van de gebruiksfrequentie van deze titelwoorden.

Het enige titelwoord dat een sterke evolutie doormaakte en waaraan betekenis gegeven kan worden zonder context, is 'morphology'. In de periode 2008-2009 kwam dit woord in 11,11% van alle titels voor, waarna de gebruiksfrequentie sterk daalde tot 1,96% in 2010-2011. In de periode 2016-2017 kende het echter een opleving en werd het opnieuw in 11,25% van de titels gebruikt. Interessante woorden die ook hun piekpopulariteit bereikten in 2016-2017, waren 'ternary', 'efficient' en 'efficiency'.

	Titelwoorden	2008-2017 TA	2008-2017 %	2008-2009 (R, %)		2010-2011 (R, %)		2012-2013 (R, %)		2014-2015 (R, %)		2016-2017 (R, %)		Evolutie	Piekperiode
1	solar	360	60.61%	2	44.44%	2	41.18%	2	52.53%	1	62.90%	1	67.50%	+	2016-2017
2	cells	350	58.92%	4	38.89%	2	41.18%	1	53.54%	2	61.29%	2	64.58%	+	2016-2017
3	Ternary	248	41.75%	7	22.22%	5	21.57%	4	29.29%	3	40.86%	3	53.33%	++	2016-2017
4	organic	231	38.89%	4	38.89%	1	47.06%	3	39.39%	4	30.65%	4	43.33%	+, -, +	2010-2011
5	polymer	154	25.93%	2	44.44%	7	19.61%	7	13.13%	5	27.42%	5	30.00%	--, +	2008-2009
6	photovoltaic	98	16.50%	1	50.00%	4	29.41%	5	23.23%	11	11.29%	8	12.50%	--	2008-2009
7	based	82	13.80%	26	5.56%	7	19.61%	21	5.05%	10	12.37%	6	17.92%	++, --, +	2010-2011
8	blend	78	13.13%	7	22.22%	19	7.84%	11	10.10%	6	18.28%	12	10.83%	--, +, -	2008-2009
9	performance	75	12.63%	14	11.11%	12	11.76%	11	10.10%	8	14.52%	8	12.50%		
10	heterojunction	69	11.62%	-	-	9	17.65%	6	15.15%	9	13.44%	15	8.33%	--	2010-2011
11	bulk	66	11.11%	-	-	11	13.73%	9	11.11%	7	15.05%	15	8.33%	-, +, -	2014-2015
12	Efficient	59	9.93%	26	5.56%	23	5.88%	28	4.04%	12	7.53%	7	15.42%	-, ++	2016-2017
13	efficiency	49	8.25%	14	11.11%	19	7.84%	21	5.05%	19	5.91%	10	11.25%	--, ++	2016-2017
14	Morphology	42	7.07%	14	11.11%	76	1.96%	47	3.03%	24	4.84%	10	11.25%	---, +++	2016-2017
14	layer	42	7.07%	26	5.56%	5	21.57%	13	9.09%	32	3.76%	23	5.83%	+++ , ---	2010-2011
16	energy	41	6.90%	-	-	37	3.92%	28	4.04%	16	6.45%	13	9.58%	++	2016-2017
16	photovoltaics	41	6.90%	26	5.56%	17	9.80%	21	5.05%	12	7.53%	19	6.67%	~	2010-2011
18	Graphene	36	6.06%	-	-	23	5.88%	9	11.11%	12	7.53%	47	3.33%	+, --	2012-2013
19	properties	35	5.89%	9	16.67%	23	5.88%	13	9.09%	16	6.45%	47	3.33%	---, +, -	2008-2009
20	devices	34	5.72%	9	16.67%	12	11.76%	8	12.12%	39	3.23%	55	2.92%	---	2008-2009
21	cell	33	5.56%	14	11.11%	12	11.76%	28	4.04%	24	4.84%	30	5.00%	--	2010-2011
22	Effect	32	5.39%	6	27.78%	17	9.80%	21	5.05%	24	4.84%	47	3.33%	---	2008-2009
23	small	30	5.05%	-	-	76	1.96%	47	3.03%	12	7.53%	30	5.00%	++, -	2014-2015
23	Enhanced	30	5.05%	-	-	-	-	47	3.03%	16	6.45%	21	6.25%	++	2014-2015
25	Polymers	28	4.71%	14	11.11%	23	5.88%	47	3.03%	39	3.23%	23	5.83%	--, +	2008-2009
25	charge	28	4.71%	26	5.56%	37	3.92%	28	4.04%	29	4.30%	26	5.42%		
25	Blends	28	4.71%	-	-	12	11.76%	47	3.03%	21	5.38%	42	3.75%	--, +, -	2010-2011
28	Conjugated	27	4.55%	14	11.11%	19	7.84%	80	2.02%	72	2.15%	21	6.25%	---, ++	2008-2009
29	High	26	4.38%	-	-	76	1.96%	-	-	55	2.69%	15	8.33%	++	2016-2017
30	molecule	25	4.21%	26	5.56%	76	1.96%	80	2.02%	21	5.38%	33	4.58%	--, +	2008-2009

c) Analyse van het directe-citatie netwerk



Publicatie	In-graad	Autoriteit	PageRank	Eigenvector	Gemiddelde
1 Koppe, 2010, V20, P338	3	6	1	1	2.75
2 Khlyabich, 2011, V133, P14534	4	4	2	2	3.00
3 Ameri, 2013, V25, P4245	1	1	6	5	3.25
4 Khlyabich, 2012, V134, P9074	5	3	5	3	4.00
5 Ameri, 2012, V2, P1198	8	7	8	4	6.75
6 Lu, 2014, V8, P716	2	2	9	-	4.33
7 Street, 2013, V135, P986	6	5	-	7	6.00
8 Honda, 2011, V1, P588	-	-	7	6	6.50
9 Li, 2011, V95, P3465	-	-	4	10	7.00
10 Zhang, 2015, V137, P8176	7	8	-	-	7.50
11 Huang, 2010, V20, P2820	-	-	10	8	9.00
11 Lu, 2015, V9, P491	9	9	-	-	9.00
13 Yang, 2013, V4, P1802	10	10	-	-	10.00
14 Kim, 2009, V113, P1620	-	-	3	-	3.00
15 Cha, 2013, V23, P1556	-	-	-	9	9.00

Publicatie	Uit-graad	Hub	Gemiddelde
1 An, 2016, V9, P281	1	1	1.00
2 Lu, 2015, V9, P491	3	2	2.50
3 Li, 2017, V7, P6954	2	6	4.00
4 Gobalasingham, 2016, V8, P27931	4	5	4.50
4 An, 2016, V26, P180	5	4	4.50
6 Nian, 2016, V28, P8184	8	3	5.50
7 Khlyabich, 2015, V25, P5557	8	8	8.00
8 An, 2016, V30, P276	10	7	8.50
9 Zhang, 2017, V35, P184	5	-	5.00
10 Wang, 2015, V17, P27217	7	-	7.00
11 Zhang, 2017, V10, P3765	-	9	9.00
12 Hartmeier, 2016, V54, P237	10	-	10.00
12 Kipp, 2016, V1, P353	10	-	10.00
12 Xu, 2016, V25, P170	-	10	10.00

AUTORITEITEN			
2009	14	Kim, Shin en Kim (2009)	Distinct Annealing Temperature in Polymer:Fullerene:Polymer Ternary Blend Solar Cells
2010	1	Koppe et al. (2010)	Near IR Sensitization of Organic Bulk Heterojunction Solar Cells: Towards Optimization of the Spectral Response of Organic Solar Cells
	11	Huang, Velusamy, Ho, Lin en Chu (2010)	A ternary cascade structure enhances the efficiency of polymer solar cells
2011	2	Khlyabich, Burkhart en Thompson (2011)	Efficient Ternary Blend Bulk Heterojunction Solar Cells with Tunable Open-Circuit Voltage
	8	Honda, Ohkita, Benten en Ito (2011)	Selective Dye Loading at the Heterojunction in Polymer/Fullerene Solar Cells
	9	Li, Machui, Waller, Koppe en Brabec (2011)	Determination of phase diagrams of binary and ternary organic semiconductor blends for organic photovoltaic devices
2012	4	Khlyabich, Burkhart en Thompson (2012)	Compositional Dependence of the Open-Circuit Voltage in Ternary Blend Bulk Heterojunction Solar Cells Based on Two Donor Polymers
	5	Ameri et al. (2012)	Performance Enhancement of the P3HT/PCBM Solar Cells through NIR Sensitization Using a Small-Bandgap Polymer
2013	3	Ameri, Khoram, Min en Brabec (2013)	Organic Ternary Solar Cells: A Review
	7	Street, Davies, Khlyabich, Burkhart en Thompson (2013)	Origin of the Tunable Open-Circuit Voltage in Ternary Blend Bulk Heterojunction Organic Solar Cells
	13	Yang, Yan en You (2013)	Organic Solar Cells beyond One Pair of Donor-Acceptor: Ternary Blends and More
	15	Cha et al. (2013)	Complementary Absorbing Star-Shaped Small Molecules for the Preparation of Ternary Cascade Energy Structures in Organic Photovoltaic Cells
2014	6	Lu, Xu, Chen, Landry en Yui (2014)	Ternary blend polymer solar cells with enhanced power conversion efficiency
2015	10	Zhang et al. (2015)	Conjugated Polymer-Small Molecule Alloy Leads to High Efficient Ternary Organic Solar Cells
	11	Lu, Kelly, You en Yu (2015)	Status and prospects for ternary organic photovoltaics

HUBS			
2015	2	Lu, Kelly, You en Yu (2015)	Status and prospects for ternary organic photovoltaics
	7	Khlyabich, Rudenko, Thompson en Loo (2015)	Structural Origins for Tunable Open-Circuit Voltage in Ternary-Blend Organic Solar Cells
	10	Wang, Ohkita, Benten en Ito (2015)	Highly efficient exciton harvesting and charge transport in ternary blend solar cells based on wide- and low-bandgap polymers
2016	1	An, Zhang, Zhang, et al. (2016)	Versatile ternary organic solar cells: a critical review
	4	An, Zhang, Sun, et al. (2016)	Efficient organic ternary solar cells with the third component as energy acceptor
	4	Gobalasingham, Noh, Howard en Thompson (2016)	Influence of Surface Energy on Organic Alloy Formation in Ternary Blend Solar Cells Based on Two Donor Polymers
	6	Nian et al. (2016)	11% Efficient Ternary Organic Solar Cells with High Composition Tolerance via Integrated Near-IR Sensitization and Interface Engineering
	8	An, Zhang, Yin, et al. (2016)	High-performance alloy model-based ternary small molecule solar cells
	12	Hartmeier et al. (2016)	Significance of Miscibility in Multidonor Bulk Heterojunction Solar Cells
	12	Kipp, Verduzco en Ganesan (2016)	Block copolymer compatibilizers for ternary blend polymer bulk heterojunction solar cells - an opportunity for computation aided molecular design
	12	Xu et al. (2016)	10.20% Efficiency polymer solar cells via employing bilaterally hole -cascade diazaphenanthrothiadiazole polymer donors and electron -cascade indene-C70 bisadduct acceptor
2017	3	Li, Lu en Wei (2017)	Polymer/Small Molecule/Fullerene Based Ternary Solar Cells
	9	L. Zhang en Ma (2017)	Morphology optimization in ternary organic solar cells
	11	S. H. Zhang et al. (2017)	Efficient and 1,8-diiodooctane-free ternary organic solar cells fabricated via nanoscale morphology tuning using small-molecule dye additive

De meest invloedrijke publicaties binnen het onderzoek naar zonnecellen met een enkele actieve laag zijn terug te vinden in tabellen X (gerangschikt volgens impact) en X (gerangschikt per jaar en met vermelding van de titels) en zijn visueel voorgesteld in figuur X. Tabellen Y en Y en figuur Y geven een overzicht van de kennishubs.

Bij het overlopen van de titels van de meest invloedrijke publicaties over zonnecellen met een enkele actieve laag, valt op dat alle artikels over ternaire zonnecellen gaan. Dit type zonnecel maakt gebruik van een derde donor- of acceptorcomponent in de actieve laag dat licht uit een bijkomend deel van het spectrum kan omzetten in elektrische ladingen, waardoor een hogere omzettingsefficiëntie

bereikt kan worden. Het derde component kan een polymeer of een klein organisch molecuul zijn. Twee artikels gaan specifiek over het toevoegen van een component dat nabij-infrarood licht kan omzetten. Drie artikels gaan over de morfologie van de actieve laag en nog drie andere over de observatie dat de spanning bij open-circuitomstandigheden in dit type zonnecellen beïnvloed kan worden. De informatie in de titels van de kennishubs ligt in dezelfde lijn. In 2016 haalde een ternaire zonnecel een omzettingsefficiëntie van 11%.

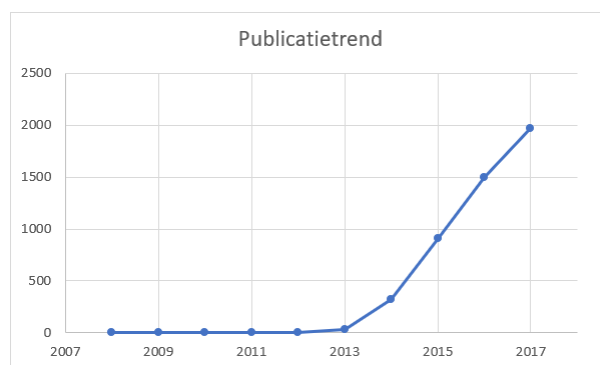
Onderwerp 5: Perovskietzonnecellen

a) Algemene publicatiestatistiek

In de periode 2008-2017 werden 4.731 publicaties over perovskietzonnecellen gevonden, waarvan er 4.672 (98,75%) in het Engels geschreven werden. De overige papers werden geschreven in het Chinees (54 of 1,14%), het Koreaans (2 of 0,04%) en het Duits, Japans en Spaans (telkens 1 of 0,02%). De overgrote meerderheid van deze publicaties waren standaardartikels (4514 of 95,41%). Er werden ook 217 beoordelingsartikels geschreven, goed voor 4,59% van de totale hoeveelheid publicaties.

Figuur 10 geeft een zicht op de publicatietrend van papers over dit onderwerp. In de eerste helft van de onderzochte periode was het aantal publicaties over perovskietzonnecellen laag, maar niet nul: in de jaren 2008, 2009 en 2010 werd telkens één paper over dit onderwerp gepubliceerd, in 2011 twee en in 2012 zes. Ook in 2013 was de hoeveelheid onderzoek naar perovskietzonnecellen met achtentwintig publicaties nog beperkt, maar in 2014 begon het onderwerp te *boomen*: met 321 artikels werden in dat jaar meer dan tien keer zoveel papers gepubliceerd dan het jaar voordien. De snelle groei van het publicatietempo bleef ook na 2014 aanhouden. In 2015 werden 908 nieuwe papers gepubliceerd, in 2016 waren dit er 1.493 en in 2017 maar liefst 1.970. Deze laatste drie jaren van de onderzochte periode omvatten dus 92,39% van al het onderzoek over perovskietzonnecellen.

Tabel 39 bevat een overzicht van de publicatiekarakteristieken per jaar. Deze cijfers zijn gebaseerd op 4.729 publicaties in plaats van 4.731, omdat voor de analyses met BibExcel en Gephi twee papers zonder auteurs werden verwijderd. Terwijl publicaties bij de start van de explosieve groei van het onderzoek naar perovskietzonnecellen in 2014 gemiddeld zes à zeven pagina's lang waren, ongeveer zesendertig referenties telden en door een zestal auteurs geschreven werden, was een gemiddeld artikel in 2017 ongeveer acht à negen pagina's lang, met net geen vijftig referenties en geschreven door zeven co-auteurs. Terwijl er in 2013 nog 'maar' 135 auteurs actief waren binnen het onderzoek naar dit onderwerp, waren dit er één jaar later al 1.232 en in 2017 zelfs 6.680. Het aantal wetenschappelijke tijdschriften waarin gepubliceerd werd nam ook snel toe, van zeventien in 2013 over vierenvijftig in 2014 tot 278 in 2017. Ondanks het grote aantal tijdschriften, werden in 2017 gemiddeld zeven artikels per tijdschrift gepubliceerd, terwijl dit gemiddelde in 2013 nog 1,65 papers bedroeg.



Jaar	TA	PG/TA	NR/TA	AU/TA	AU uniek	J uniek	TA/J
2008	1	3.00	26.00	12.00	12	1	1.00
2009	1	3.00	21.00	4.00	4	1	1.00
2010	1	4.00	29.00	7.00	7	1	1.00
2011	2	6.00	27.00	5.00	10	2	1.00
2012	6	6.67	36.50	6.83	41	6	1.00
2013	28	6.04	32.39	5.79	135	17	1.65
2014	321	6.66	36.54	6.62	1232	54	5.94
2015	907	7.52	43.60	6.51	2979	126	7.20
2016	1493	8.36	45.62	6.88	5033	201	7.43
2017	1969	8.65	49.32	6.98	6680	278	7.08

De statistieken over de meest publicerende auteurs, de populairste tijdschriften, de belangrijkste onderzoeksdisciplines en de landen waar het meeste onderzoek naar dit onderwerp werd uitgevoerd, zijn samengevat in tabellen 40 tot 44. In de lijst met landen, stond België met vijfendertig publicaties op de eenentwintigste plaats. In de *organizations enhanced*-lijst van WoS stond de Universiteit Hasselt op plaats 154 met achttien publicaties over perovskietzonnecellen.

Auteurs			Tijdschriften		
1	GRATZEL M	142	1	JOURNAL OF MATERIALS CHEMISTRY A	457
2	SNAITH HJ	124	2	ACS APPLIED MATERIALS INTERFACES	274
3	NAZEERUDDIN MK	117	3	JOURNAL OF PHYSICAL CHEMISTRY LETTERS	184
4	CHENG YB	72	4	JOURNAL OF PHYSICAL CHEMISTRY C	179
5	HAGFELDT A	70	5	RSC ADVANCES	169
6	PARK NG	65	6	ADVANCED ENERGY MATERIALS	154
7	ZHU K	61	7	NANOSCALE	130
8	ZAKEERUDDIN SM	59	8	NANO ENERGY	129
9	YANG Y	58	9	ENERGY ENVIRONMENTAL SCIENCE	119
9	ZHANG Y	58	10	ADVANCED MATERIALS	108
			10	SOLAR ENERGY MATERIALS AND SOLAR CELLS	108

Onderzoeksdisciplines			Landen		
1	MATERIALS SCIENCE	2985	1	PEOPLES R CHINA	2036
2	CHEMISTRY	2953	2	USA	946
3	PHYSICS	1884	3	SOUTH KOREA	448
4	SCIENCE TECHNOLOGY OTHER TOPICS	1814	4	JAPAN	384
5	ENERGY FUELS	1193	5	UK	349
6	ENGINEERING	223	6	SWITZERLAND	307
7	ELECTROCHEMISTRY	209	7	GERMANY	221
8	ENVIRONMENTAL SCIENCES ECOLOGY	122	8	AUSTRALIA	210
9	OPTICS	110	9	TAIWAN	174
10	METALLURGY METALLURGICAL ENGINEERING	26	10	SPAIN	161

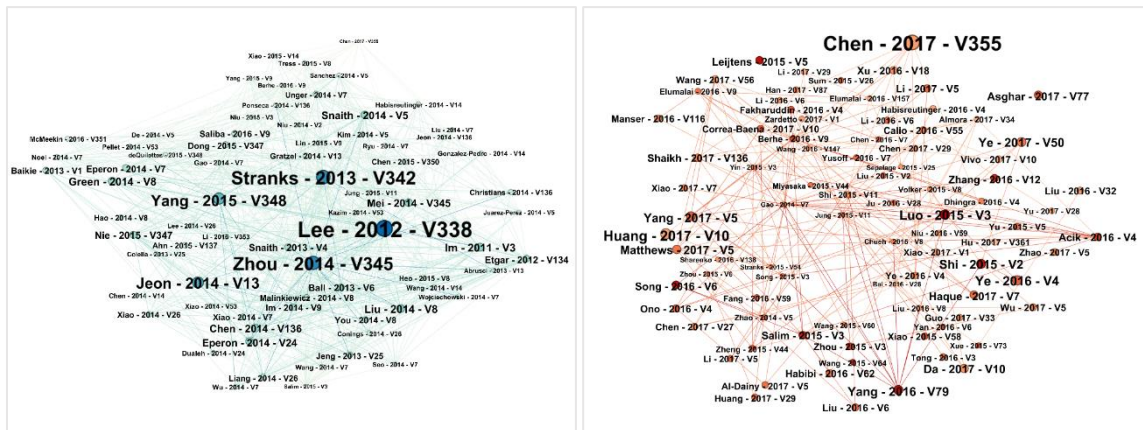
b) Meest voorkomende titelwoorden

Tabel 45 geeft een overzicht van de meest voorkomende titelwoorden binnen het onderwerp 'perovskietzonnecellen' en van de evolutie van de gebruiksfrequentie van deze titelwoorden.

'Planar' was het woord dat de grootste evolutie in gebruiksfrequentie doormaakte en bereikte zijn populariteitspiek in het jaar 2015 (14,11%), waarna een lichte terugval volgde. Ook de gebruiksfrequentie van 'transport' (piek in 2008-2013 gevolgd door daling en heropleving), 'heterojunction' (piek in 2008-2013 gevolgd door continue daling) en 'stability' (piek in 2017) veranderde sterk doorheen de onderzochte periode.

	Titelwoorden	2008-2017 TA	2008-2017 %	2008-2013 (R, %)		2014 (R, %)		2015 (R, %)		2016 (R, %)		2017 (R, %)		Evolutie	Piekperiode
1	perovskite	3648	77.14%	3	69.23%	2	73.21%	1	77.84%	1	79.04%	1	76.43%		
2	solar	3435	72.64%	1	76.92%	1	80.06%	2	74.75%	2	72.27%	2	70.64%		
3	cells	3068	64.88%	2	71.79%	3	70.09%	3	66.59%	3	64.63%	3	63.28%		
4	Efficient	749	15.84%	7	12.82%	5	15.58%	4	17.31%	4	15.07%	4	15.85%		
5	planar	535	11.31%	52	2.56%	9	10.59%	5	14.11%	6	10.85%	6	10.67%	+++,-	2015
6	layer	522	11.04%	-	-	17	8.10%	6	10.69%	5	11.99%	5	11.17%		
7	performance	444	9.39%	11	10.26%	18	7.79%	11	8.05%	7	9.38%	7	10.26%		
8	halide	426	9.01%	7	12.82%	4	17.13%	11	8.05%	8	8.98%	11	8.08%	+,-	2014
9	hybrid	398	8.42%	4	20.51%	7	12.77%	8	9.92%	11	8.44%	18	6.75%	--	2008-2013
10	CH3NH3PbI3	395	8.35%	11	10.26%	12	9.66%	7	10.58%	10	8.51%	16	6.96%	-	2015
11	Lead	392	8.29%	11	10.26%	5	15.58%	9	9.04%	14	7.77%	14	7.11%	+,-	2014
12	efficiency	387	8.18%	-	-	13	9.35%	15	7.17%	13	8.24%	8	8.58%		
13	cell	383	8.10%	15	7.69%	8	10.90%	10	8.82%	12	8.31%	13	7.16%	+,-	2014
14	films	377	7.97%	-	-	27	4.67%	18	6.73%	9	8.91%	9	8.53%	+	2016
15	hole	351	7.42%	28	5.13%	10	10.28%	13	7.61%	16	7.30%	15	7.01%	++,	2014
16	transport	337	7.13%	7	12.82%	60	2.49%	19	6.50%	18	7.03%	10	8.13%	---,++	2008-2013
17	high	336	7.11%	52	2.56%	11	9.97%	21	6.39%	14	7.77%	20	6.55%	~	2014
18	photovoltaic	301	6.36%	11	10.26%	22	6.23%	14	7.28%	23	5.49%	20	6.55%	~	2008-2013
19	based	295	6.24%	5	15.38%	19	7.48%	15	7.17%	20	5.69%	22	5.84%	--	2008-2013
20	Perovskites	288	6.09%	-	-	14	8.72%	22	6.06%	20	5.69%	22	5.84%	-	2014
21	stability	286	6.05%	-	-	75	1.87%	37	3.31%	17	7.17%	12	7.26%	++	2017
22	materials	284	6.01%	15	7.69%	31	4.36%	24	4.96%	19	5.96%	18	6.75%	-,+	2008-2013
23	TiO2	268	5.67%	15	7.69%	20	6.54%	19	6.50%	24	5.22%	25	5.43%		
24	electron	264	5.58%	52	2.56%	49	2.80%	26	4.63%	24	5.22%	17	6.81%	++	2017
25	heterojunction	229	4.84%	5	15.38%	14	8.72%	17	6.84%	30	4.15%	37	3.61%	--	2008-2013
26	thin	226	4.78%	-	-	34	4.05%	27	4.41%	22	5.63%	32	4.47%		
27	Highly	222	4.69%	-	-	27	4.67%	30	4.30%	26	4.69%	27	4.98%		
28	via	214	4.53%	52	2.56%	27	4.67%	34	3.75%	27	4.62%	28	4.82%	+,-,+	2017
29	Enhanced	211	4.46%	28	5.13%	31	4.36%	48	2.76%	28	4.42%	26	5.28%	-,+	2017
30	material	210	4.44%	52	2.56%	23	4.98%	32	4.19%	30	4.15%	30	4.72%	+	2014

c) Analyse van het directe-citatie netwerk



Publicatie	In-graad	Autoriteit	PageRank	Eigenvector	Gemiddelde
1 Lee, 2012, V338, P643	1	1	2	1	1.25
2 Stranks, 2013, V342, P341	2	3	5	2	3.00
3 Zhou, 2014, V345, P542	3	2	10	3	4.50
3 Im, 2011, V3, P4088	6	7	1	4	4.50
5 Jeon, 2014, V13, P897	5	4	-	5	4.67
6 Yang, 2015, V348, P1234	4	5	-	6	5.00
7 Eperon, 2014, V24, P151	-	9	6	8	7.67
8 Ball, 2013, V6, P1739	-	-	4	7	5.50
9 Etgar, 2012, V134, P17396	-	-	3	9	6.00
10 Liu, 2014, V8, P133	7	6	-	-	6.50
11 Snaith, 2013, V4, P3623	-	-	7	10	8.50
12 Mei, 2014, V345, P295	10	10	-	-	10.00
13 Chen, 2014, V136, P622	-	8	-	-	8.00
13 Abrusci, 2013, V13, P3124	-	-	8	-	8.00
13 Green, 2014, V8, P506	8	-	-	-	8.00
16 Jeng, 2013, V25, P3727	-	-	9	-	9.00
17 Snaith, 2014, V5, P1511	9	-	-	-	9.00

Publicatie	Uit-graad	Hub	Gemiddelde
1 Luo, 2015, V3, P8992	3	1	2
2 Yang, 2016, V79, P2652	6	3	4.5
3 Shi, 2015, V2, P378	5	5	5
4 Chen, 2017, V355, P98	1	-	1
5 Huang, 2017, V10, P2284	2	-	2
5 Leijtens, 2015, V5, P23110	-	2	2
7 Ye, 2016, V4, P1	3	-	3
8 Song, 2016, V6, P3176	-	4	4
9 Salim, 2015, V3, P8943	-	6	6
10 Yang, 2017, V5, P11462	7	-	7
10 Ye, 2017, V50, P31959	7	-	7
10 Zhang, 2016, V12, P137	-	7	7
13 Wang, 2015, V64, P83	-	8	8
14 Da, 2017, V10, P1471	9	-	9
14 Matthews, 2017, V5, P17135	9	-	9
14 Zhou, 2015, V3, P19205	-	9	9
17 Acik, 2016, V4, P6185	-	10	10

AUTORITEITEN			
2011	3	Im, Lee, Lee, Park en Park (2011)	6.5% efficient perovskite quantum-dot-sensitized solar cell
2012	1	Lee, Teuscher, Miyasaka, Murakami en Snaith (2012)	Efficient Hybrid Solar Cells Based on Meso-Superstructured Organometal Halide Perovskites
	9	Etgar et al. (2012)	Mesoscopic CH₃NH₃PbI₃/TiO₂ Heterojunction Solar Cells
2013	2	Stranks et al. (2013)	Electron-Hole Diffusion Lengths Exceeding 1 Micrometer in an Organometal Trihalide Perovskite Absorber
	8	Ball, Lee, Hey en Snaith (2013)	Low-temperature processed meso-superstructured to thin-film perovskite solar cells
	11	Snaith (2013)	Perovskites: The Emergence of a New Era for Low-Cost, High-Efficiency Solar Cells
	13	Abrusci et al. (2013)	High-Performance Perovskite-Polymer Hybrid Solar Cells via Electronic Coupling with Fullerene Monolayers
	16	Jeng et al. (2013)	CH₃NH₃PbI₃ Perovskite/Fullerene Planar-Heterojunction Hybrid Solar Cells
2014	3	Zhou et al. (2014)	Interface engineering of highly efficient perovskite solar cells
	5	Jeon et al. (2014)	Solvent engineering for high-performance inorganic-organic hybrid perovskite solar cells
	7	Eperon, Burlakov, Docampo, Goriely en Snaith (2014)	Morphological Control for High Performance, Solution-Processed Planar Heterojunction Perovskite Solar Cells
	10	Liu en Kelly (2014)	Perovskite solar cells with a planar heterojunction structure prepared using room-temperature solution processing techniques
	12	Mei et al. (2014)	A hole-conductor-free, fully printable mesoscopic perovskite solar cell with high stability
	13	Chen et al. (2014)	Planar Heterojunction Perovskite Solar Cells via Vapor-Assisted Solution Process
	13	Green, Ho-Baillie en Snaith (2014)	The emergence of perovskite solar cells
	17	Snaith et al. (2014)	Anomalous Hysteresis in Perovskite Solar Cells
2015	6	Yang et al. (2015)	High-performance photovoltaic perovskite layers fabricated through intramolecular exchange

HUBS			
2015	1	Luo en Daoud (2015)	Recent progress in organic-inorganic halide perovskite solar cells: mechanisms and material design
	3	Shi, Li, Li en Wang (2015)	Advancements in all-solid-state hybrid solar cells based on organometal halide perovskites
	5	Leijtens et al. (2015)	Stability of Metal Halide Perovskite Solar Cells
	9	Salim et al. (2015)	Perovskite-based solar cells: impact of morphology and device architecture on device performance
	13	Wang, Tan, Dai en Li (2015)	Recent advances in planar heterojunction organic-inorganic hybrid perovskite solar cells
	14	Zhou, Pang, Liu, Xu en Cui (2015)	Interface engineering for high-performance perovskite hybrid solar cells
2016	2	L. Y. Yang, Barrows, Lidzey en Wang (2016)	Recent progress and challenges of organometal halide perovskite solar cells
	7	Ye, Liu, Iocozzia, Liu en Lin (2016)	Nanostructured Materials for High Efficiency Perovskite Solar Cells
	8	Song, Waththage, Phillips en Heben (2016)	Pathways toward high-performance perovskite solar cells: review of recent advances in organo-metal halide perovskites for photovoltaic applications
	10	Zhang, Wang, Li en Xiao (2016)	Recent Progress of Perovskite Solar Cells
	17	Acik en Darling (2016)	Graphene in perovskite solar cells: device design, characterization and implementation
2017	4	Chen et al. (2017)	Recent progress in stabilizing hybrid perovskites for solar cell applications
	5	Huang, Tan, Lund en Zhou (2017)	Impact of H₂O on organic-inorganic hybrid perovskite solar cells
	10	S. D. Yang, Fu, Zhang, Chen en Li (2017)	Recent advances in perovskite solar cells: efficiency, stability and lead-free perovskite
	10	Ye et al. (2017)	Recent advances in interfacial engineering of perovskite solar cells
	14	Da en Zheng (2017)	Tailoring interface of lead-halide perovskite solar cells
	14	Matthews, Lewis en O'Brien (2017)	Updating the road map to metal-halide perovskites for photovoltaics

De meest invloedrijke publicaties binnen het onderzoek naar perovskietzonnecellen zijn terug te vinden in tabellen X (gerangschikt volgens impact) en X (gerangschikt per jaar en met vermelding van de titels) en zijn visueel voorgesteld in figuur X. Tabellen Y en Y en figuur Y geven een overzicht van de kennishubs.

Uit de titels van de invloedrijke publicaties bleek dat er twee soorten perovskietzonnecellen zijn, namelijk mesoscopische zonnecellen en zonnecellen die gebruik maken van een actieve laag met een planaire heterojunctiemorfologie. Voor beide soorten werd gerapporteerd dat ze op lage temperatuur

gefabriceerd kunnen worden. Terwijl er bij de mesoscopische variant geen transportlaag voor elektrongaten nodig is, moest er voor de variant met de planaire heterostructuur morfologie wel onderzoek gedaan worden naar transportlagen. Het enige perovskietmateriaal dat expliciet in de titels genoemd wordt, is methylammoniumloodjodide ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$). In 2014 kwam het hystereseeffect voor de eerste keer aan bod in de titel van een van deze belangrijke publicaties. De titels van de kennishubs leken vooral gericht te zijn op zonnecellen met een planaire heterostructuur morfologie. Onder andere materiaalontwikkeling, de morfologie van de actieve laag en het onderzoek naar bufferlagen kwamen hierin aan bod. Daarnaast werd ook de stabiliteit van perovskietzonnecellen onderzocht. Het gebruik van grafeen en de ontwikkeling van loodvrije perovskietzonnecellen werden beide één keer vermeld.

3.2.3 Bespreking resultaten

Voor alle vijf onderwerpen was het Engels met een vertegenwoordiging van ongeveer 99% de dominante publicatietaal. De overige publicaties werden voornamelijk in het Chinees geschreven. Iets meer dan 4% van de artikels waren beoordelingsartikels, behalve bij het onderwerp 'volledig-polymeerzonnecellen', waar dit aandeel met 3,82% wat lager lag. Over volledig-polymeerzonnecellen werden de minste publicaties gevonden, wat aangeeft dat de opgebouwde kennis en bijgevolg de nood aan beoordelingsartikels beperkter is dan bij de andere onderwerpen.

Het aantal jaarlijkse publicaties over perovskietzonnecellen is op vier jaar tijd sterk toegenomen, waardoor dit tegen 2017 met 4.731 publicaties het grootste van de vijf onderzochte onderwerpen was. Het gebruik van kleine organische moleculen was het tweede grootste onderwerp (1.561 artikels), op een afstandje gevolgd door onderzoek naar het gebruik van de tandemarchitectuur (797 artikels). Het onderzoek naar zonnecellen met een enkele actieve laag en volledig-polymeerzonnecellen was het minst ver gevorderd. De grote interesse in perovskietzonnecellen lijkt een weerslag gehad te hebben op het onderzoek naar de vier andere onderwerpen, waarbij een stagnatie of daling van het aantal jaarlijkse publicaties optrad in de jaren 2014 of 2015. Drie van deze vier onderwerpen kenden in 2017 een herstel van de groei in publicatiesnelheid; enkel voor het gebruik van de tandemarchitectuur bleef het aantal jaarlijkse publicaties dalen. Dit was dan ook het eerste jaar waarin meer artikels verschenen over zonnecellen met een enkele actieve laag dan over zonnecellen met een tandemarchitectuur.

Gemiddeld genomen waren publicaties over de vijf onderzochte onderwerpen in 2017 ongeveer negen pagina's lang, telden ze een vijftigtal referenties en werden ze geschreven door zeven co-auteurs. Artikels over de tandemarchitectuur waren gemiddeld het langst en die over het gebruik van kleine organische moleculen bevatten gemiddeld de meeste referenties. Papers over perovskietzonnecellen waren gemiddeld korter dan die van de andere onderwerpen en verwezen naar het kleinste aantal bronnen. Met maar liefst 6.680 unieke auteurs, trok dit onderwerp wel veruit de meeste aandacht van onderzoekers. Overeenkomstig met de publicatietrend valt op dat er in 2017 meer auteurs betrokken waren bij onderzoek naar zonnecellen met een enkele actieve laag (763 auteurs) dan bij onderzoek naar de tandemarchitectuur (490 auteurs).

Uit een vergelijking van de toptienlijstjes met de meest voorkomende auteurs, blijkt dat Y.F. Li betrokken was bij een groot aantal publicaties over alle onderwerpen behalve perovskietzonnecellen. Slechts vier andere auteurs kwamen voor in meer dan één top tien (figuur X).

	Auteur	Kleine moleculen	Volledig-polymeer	Tandem	Enkele laag	Perovskiet	Gemiddelde
1	LI YF	2	1	5	7	-	3.75
2	BRABEC CJ	-	-	5	1	-	3
3	YANG Y	-	-	1	-	9	5
4	CAO Y	7	-	8	-	-	7.5
5	ZHAN XW	8	9	-	-	-	8.5

Vier tijdschriften kwamen aan bod in alle toptienlijstjes, namelijk *ACS Applied Materials & Interfaces*, *Journal of Materials Chemistry A*, *Advanced Energy Materials* en *Advanced Materials*. De drie meest voorkomende onderzoeksdisciplines waren voor alle vijf onderwerpen dezelfde: materiaalwetenschappen, chemie en fysica. In de lijstjes van de meest voorkomende landen stonden de Volksrepubliek China en de Verenigde Staten steeds op respectievelijk plaats één en twee. Ook Zuid-Korea, Duitsland, Japan en het Verenigd Koninkrijk kwamen in alle lijstjes voor.

Wanneer de lijsten met de dertig meest gebruikte titelwoorden van elk onderwerp naast elkaar gelegd worden, valt op dat de woorden 'efficient', 'efficiency' en 'performance' in elke lijst terug te vinden zijn. Op basis hiervan kan gesteld worden dat het verbeteren van de prestaties van de verschillende soorten zonnecellen en het bereiken van een zo hoog mogelijke omzettingsefficiëntie gedurende de periode 2008-2017 een belangrijke onderzoeksfocus was. Om een goed idee te krijgen van de maximale efficiëntie die voor ieder onderwerp werd bereikt, werden ter aanvulling van de informatie uit de titels van de belangrijkste publicaties ook de samenvattingen van de meest recente kennishubs gescand. De resultaten zijn samengevat in tabel X.

Onderwerp	PCE	Bron
Kleine organische moleculen	±12%	Chen en Zhang (2017)
Volledig-polymeerzonnecellen	8,27%	Gao et al. (2016)
Tandemarchitectuur	±12%	Li et al. (2017)
Ternaire zonnecellen	±12%	L. Zhang en Ma (2017)
Perovskietzonnecellen	22,1%	S. D. Yang et al. (2017)

Ook het woord 'heterojunction' komt in elke lijst voor, maar bij de vier pure OPV-technologieën werd dit gecombineerd met het woord 'bulk', terwijl het bij de perovskietzonnecellen gelinkt kon worden aan 'planar'. Dit verschil tussen het gebruik van de bulkheterojunctiemorfologie voor de ene soort en de planaire heterojunctiemorfologie voor de andere is opvallend.

Bij het vergelijken van de informatie uit de titels van de belangrijkste publicaties per onderwerp, wordt duidelijk dat het ontwikkelen van verbeterde materialen voor de actieve laag de basis vormt voor de vooruitgang binnen ieder onderwerp. Daarnaast valt op dat enkel bij het onderwerp 'gebruik van de tandemarchitectuur' een belangrijke publicatie gevonden werd over een productiemethode die op industriële schaal toegepast kan worden.

3.3 Conclusie

Aan de hand van een clusteranalyse op basis van de bibliografische koppeling tussen documenten, werden de belangrijkste onderwerpen binnen enerzijds het OPV-onderzoeksdomein en anderzijds het onderzoek naar perovskietzonnecellen geïdentificeerd. Deze onderwerpen zijn samengevat in tabellen X en Y, chronologisch geordend volgens de eerste voorkomst in een clusterlabel.

ORGANISCHE FOTOVOLTAÏSCHE TECHNOLOGIEËN	
Vanaf 2008	Ontwikkeling van polymeren voor de actieve laag van OSCs
	Morfologie van de actieve laag in OSCs
	OSC's met tandemarchitectuur
Vanaf 2009	Ontwikkeling van kleine organische moleculen voor de actieve laag van OSCs
	Ontstaan, transport en verlies van ladingen in OSCs
Vanaf 2010	Ontwikkeling van fullereenaafgeleiden als acceptormateriaal in OSCs
	OSC's met omgekeerde architectuur
Vanaf 2012	Ontwikkeling van bufferlagen voor OSCs
	Ontwikkeling van niet-fullerene acceptormaterialen voor OSCs
Vanaf 2013	Volledig-polymeerzonnecellen
Vanaf 2014	Verbeterd lichtmanagement (plasmonische nanopartikels, reflectoren, OSCs in V-vorm)
	OSC's met enkele actieve laag bestaande uit drie-componentmengsel

PEROVSKIETZONNECELLEN	
Vanaf 2014	Productiemethodes voor PSCs
Vanaf 2015	Stabiliteit en degradatie in PSCs
	Morfologie van de actieve laag in PSCs
Vanaf 2016	Ontwikkeling van bufferlagen voor PSCs

De inhoud en de evolutie van vijf belangrijke onderwerpen werd in meer detail onderzocht. Uit de pure OPV-onderwerpen werden het gebruik van kleine organische moleculen in de actieve laag, volledig-polymeerzonnecellen, het gebruik van de tandemarchitectuur en zonnecellen met een enkele actieve laag gekozen. Er werd beslist om het onderzoek naar perovskietzonnecellen in zijn geheel als vijfde onderwerp te analyseren.

Voor het onderwerp 'gebruik van kleine organische moleculen' kan besloten worden dat thiofeen en diketopyrrolopyrrol belangrijke basismaterialen waren. Terwijl kleine organische moleculen oorspronkelijk ontwikkeld werden als donormaterialen, werd naar het einde van de onderzochte periode toe het gebruik als niet-fullerene acceptormaterialen verkend. Het uit-oplossing-bereiden lijkt de voornaamste productiemethode te zijn geweest. In 2017 werd een efficiëntie van ongeveer 12% gerapporteerd. Gedurende de onderzochte periode nam de interesse in dit onderwerp continu toe, wat resulteerde in 363 nieuwe publicaties in 2017 geschreven door 1.503 onderzoekers. De belangrijkste artikels binnen dit onderwerp kunnen teruggevonden worden in tabellen X en Y.

Wat het onderwerp 'volledig-polymeerzonnecellen' betreft, waren fluoreen, naftaleendiimide en peryleendiimide belangrijke basismaterialen bij de zoektocht naar polymere acceptormaterialen. Om de morfologie van de actieve laag te verbeteren, werden zijketenmodificatie en het gebruik van fluor als substituent toegepast. In 2016 werd een efficiëntie van 8,27% gerapporteerd. Sinds 2011 werden

ieder jaar meer nieuwe artikels over volledig-polymeerzonnecellen gepubliceerd, met in 2017 een maximum van 71 papers geschreven door 350 auteurs. De belangrijkste publicaties over dit onderwerp kunnen teruggevonden worden in tabellen X en Y.

Binnen het onderwerp 'gebruik van de tandemarchitectuur' werd voornamelijk onderzoek gedaan naar materialen met verschillende bandgapgroottes (klein, middelmatig en groot) om actieve lagen met complementaire lichtabsorptiespectra te kunnen ontwikkelen. Daarnaast werd ook onderzoek gedaan naar de connectielaag en de bufferlagen. In 2017 werd een efficiëntie van ongeveer 12% gerapporteerd. Het gebruik van de tandemarchitectuur was het enige onderwerp waarbij een productiemethode die op industriële schaal toegepast kan worden (*doctor blading*) vermeld werd in de titel van een belangrijke publicatie in het netwerk. Anderzijds, was het ook het enige onderwerp dat zijn maximale populariteit bereikte tijdens de onderzochte periode (in 2014, met 173 artikels geschreven door 834 onderzoekers), waarna de hoeveelheid nieuwe publicaties afnam. De reden voor deze verandering is niet duidelijk, maar twee mogelijkheden zijn de overgang tot toegepast onderzoek richting commercialisatie, of de verschuiving van de interesse van onderzoekers naar andere onderwerpen zoals ternaire zonnecellen of perovskietzonnecellen. De belangrijkste artikels over het gebruik van de tandemarchitectuur kunnen teruggevonden worden in tabellen X en Y.

Het onderzoek naar zonnecellen met een enkele actieve laag spitste zich toe op ternaire zonnecellen met een drie-componentmengsel als actieve laag. Daarbij zorgt de derde component voor lichtabsorptie uit een bijkomend deel van het spectrum, zoals nabij-infrarood licht. Bij dit type zonnecellen is de controle van de morfologie van de actieve laag belangrijk. In 2017 werd een efficiëntie van ongeveer 12% gerapporteerd. Tijdens de onderzochte periode nam de interesse in dit onderwerp bijna continu toe, wat resulteerde in 141 nieuwe publicaties in 2017 geschreven door 763 onderzoekers. De belangrijkste artikels binnen dit onderwerp kunnen teruggevonden worden in tabellen X en Y.

Voor perovskietzonnecellen werden voornamelijk organisch-anorganische halidematerialen met de perovskietstructuur, zoals methylammoniumloodjodide ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$), bestudeerd. Mesoscopische perovskietzonnecellen en perovskietzonnecellen die gebruik maken van een actieve laag met een planaire heterojunctiemorfologie bestaan naast elkaar, al lijkt het onderzoek voornamelijk gericht te zijn op deze laatste soort. Hiervoor moesten wel elektrongattransportlagen ontwikkeld worden, wat voor de eerste soort niet het geval was. Ook de stabiliteit en degradatie van perovskietzonnecellen werd uitgebreid onderzocht en gelinkt aan ionmigratie en het hysteresis-effect. In 2017 werd een efficiëntie van 22,1% gerapporteerd. De populariteit van perovskietzonnecellen kende vanaf 2013 een grote jaarlijkse groei, zodat in 2017 maar liefst 1.969 nieuwe publicaties verschenen die geschreven werden door niet minder dan 6.680 verschillende auteurs. De belangrijkste papers over perovskietzonnecellen kunnen teruggevonden worden in tabellen X en Y.

Besluit

In de periode van 2008 tot 2017 werd er veel onderzoek gedaan naar organische fotovoltaïsche technologieën – technologieën die gebruik maken van organische halfgeleiders om zonlicht om te zetten in elektriciteit. OPV-technologieën beloven namelijk een aantal voordelen te bieden ten opzichte van hun anorganische voorgangers, zoals lagere productiekosten, bewerkbare fysieke eigenschappen en mogelijkheden voor de ontwikkeling van lichte zonneceltoepassingen die op een flexibele manier vormgegeven kunnen worden. Belangrijke thema's binnen het onderzoek naar organische zonnecellen zijn het ontwikkelen van betere halfgeleidermaterialen voor de actieve laag, het optimaliseren van de morfologie van de actieve laag en het ontwerpen van een zo goed mogelijke zonnecelarchitectuur. Het onderzoek naar deze drie aspecten is erop gericht om te komen tot organische zonnecellen met een zo hoog mogelijke efficiëntie, een lange levensduur en lage productiekosten. Bovendien moet de productie van deze zonnecellen gemakkelijk opgeschaald kunnen worden tot op industrieel niveau en is het wenselijk dat ze een netto positieve milieu-impact hebben.

Wat het onderzoek naar betere halfgeleidermaterialen voor de actieve laag betreft, verdeelden de onderzoekers hun aandacht over het ontwikkelen van enerzijds polymeren en anderzijds kleine organische moleculen. Aanvankelijk werd voor beide materiaalklassen gefocust op het ontwikkelen van nieuwe elektronendonormaterialen om te gebruiken in combinatie met fullereenaafgeleiden als elektronacceptormaterialen. Later werden zowel polymeren als kleine organische moleculen echter onderzocht als vervanger voor deze fullerene acceptormaterialen. Dit leidde tot de situatie waarbij twee schijnbaar tegengestelde onderwerpen binnen het OPV-onderzoek – het gebruik van kleine organische moleculen en de ontwikkeling van volledig-polymeerzonnecellen – toch allebei een continue groei konden doormaken.

De tandemarchitectuur speelde van bij de start van de onderzochte periode een belangrijke rol binnen het onderzoek naar OPV-technologieën en zorgde er later voor dat ook de ontwikkeling van bufferlagen en connectielagen een belangrijk onderwerp werd. In 2014 bereikte de interesse in de tandemarchitectuur echter een piek, waarna de populariteit van dit onderzoek jaar na jaar afnam. Dit stond in contrast met de opkomst van organische zonnecellen met een enkele actieve laag bestaande uit een drie-componentmengsel.

Perovskietzonnecellen zijn een hybride technologie die sinds 2013 op een grote interesse kon rekenen en een deel van de onderzoeks aandacht wegtrok van de pure OPV-technologieën. Belangrijke onderwerpen binnen het onderzoek naar perovskietzonnecellen waren de morfologie van de actieve laag en de stabiliteit van dit type zonnecellen.

Bibliografie

- Adriaanse, L. S., & Rensleigh, C. (2013). Web of Science, Scopus and Google Scholar: A content comprehensiveness comparison. *The Electronic Library*, 31(6), 727-744. doi:10.1108/EL-12-2011-0174
- Arora, S. K., Porter, A. L., Youtie, J., & Shapira, P. (2013). Capturing new developments in an emerging technology: an updated search strategy for identifying nanotechnology research outputs. *Scientometrics*, 95(1), 351-370. doi:10.1007/s11192-012-0903-6
- Blondel, V. D. (2011). The Louvain method for community detection in large networks. Retrieved from <https://perso.uclouvain.be/vincent.blondel/research/louvain.html>
- Blondel, V. D., Guillaume, J.-L., Lambiotte, R., & Lefebvre, E. (2008). Fast unfolding of communities in large networks. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 2008(10), P10008.
- Bolanos-Pizarro, M., Thijs, B., & Glanzel, W. (2010). Cardiovascular research in Spain. A comparative scientometric study. *Scientometrics*, 85(2), 509-526. doi:10.1007/s11192-009-0155-2
- Brin, S., & Page, L. (1998). The anatomy of a large-scale hypertextual Web search engine. *Computer Networks and ISDN Systems*, 30(1), 107-117. doi:[https://doi.org/10.1016/S0169-7552\(98\)00110-X](https://doi.org/10.1016/S0169-7552(98)00110-X)
- Centre for Science and Technology Studies - Leiden University. (2018a). VOSviewer - Getting Started. Retrieved from <http://www.vosviewer.com/getting-started>
- Centre for Science and Technology Studies - Leiden University. (2018b). VOSviewer - Visualizing scientific landscapes. Retrieved from <http://www.vosviewer.com/>
- Chiang, H. S., Huang, R. Y., Weng, P. W., Mau, L. P., Tsai, Y. W. C., Chung, M. P., . . . Cheng, W. C. (2018). Prominence of scientific publications towards peri-implant complications in implantology: A bibliometric analysis using the H-classics method. *Journal of Oral Rehabilitation*, 45(3), 240-249. doi:10.1111/joor.12606
- Choe, H., Lee, D. H., Kim, H. D., & Seo, I. W. (2016). Structural properties and inter-organizational knowledge flows of patent citation network: The case of organic solar cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 361-370. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.150>
- Choe, H., Lee, D. H., Seo, I. W., & Kim, H. D. (2013). Patent citation network analysis for the domain of organic photovoltaic cells: Country, institution, and technology field. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 492-505. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.037>
- Clarivate. (2018a). The Clarivate Analytics Impact Factor. Retrieved from <https://clarivate.com/essays/impact-factor/>
- Clarivate. (2018b). Web of Science Core Collection. Retrieved from <https://clarivate.com/products/web-of-science/web-science-form/web-science-core-collection/>
- Clarivate. (2018c). Web of Science Core Collection Help - Advanced Search Field Tags. Retrieved from http://images.webofknowledge.com.bib-proxy.uhasselt.be/WOKRS528R15/help/WOS/hs_advanced_fieldtags.html
- Clarivate. (2018d). Web of Science Core Collection Help - Keywords. Retrieved from http://images.webofknowledge.com.bib-proxy.uhasselt.be/WOKRS528R15/help/WOS/hp_full_record.html#dsy1028-TRS_keywords_plus
- Clarivate. (2018e). Web of Science Core Collection Help - Search Rules. Retrieved from http://images.webofknowledge.com.bib-proxy.uhasselt.be/WOKRS528R15/help/WOS/hs_search_rules.html
- Clarivate. (2018f). Web of Science Core Collection Help - Searching the Topic Field. Retrieved from http://images.webofknowledge.com.bib-proxy.uhasselt.be/WOKRS528R15/help/WOS/hs_topic.html
- Clarivate. (2018g). Web of Science Databases. Retrieved from <https://clarivate.com/products/web-of-science/databases/>

- Cobo, M. J., López-Herrera, A. G., Herrera-Viedma, E., & Herrera, F. (2011). Science mapping software tools: Review, analysis, and cooperative study among tools. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 62(7), 1382-1402. doi:10.1002/asi.21525
- Correa-Baena, J. P., Abate, A., Saliba, M., Tress, W., Jacobsson, T. J., Gratzel, M., & Hagfeldt, A. (2017). The rapid evolution of highly efficient perovskite solar cells. *Energy & Environmental Science*, 10(3), 710-727. doi:10.1039/c6ee03397k
- Darling, S. B., & You, F. (2013). The case for organic photovoltaics. *Rsc Advances*, 3(39), 17633-17648. doi:10.1039/C3RA42989J
- Davarzani, H., Fahimnia, B., Bell, M., & Sarkis, J. (2016). Greening ports and maritime logistics: A review. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 48, 473-487. doi:<https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.07.007>
- de la Hoz-Correa, A., Muñoz-Leiva, F., & Bakucz, M. (2018). Past themes and future trends in medical tourism research: A co-word analysis. *Tourism Management*, 65, 200-211. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tourman.2017.10.001>
- Dong, B., Xu, G., Luo, X., Cai, Y., & Gao, W. (2012). A bibliometric analysis of solar power research from 1991 to 2010. *Scientometrics*, 93(3), 1101-1117. doi:10.1007/s11192-012-0730-9
- Dou, L., You, J., Hong, Z., Xu, Z., Li, G., Street, R. A., & Yang, Y. (2013). 25th Anniversary Article: A Decade of Organic/Polymeric Photovoltaic Research. *Advanced Materials*, 25(46), 6642-6671. doi:10.1002/adma.201302563
- Elsevier. (2018a). Content - How Scopus Works. Retrieved from <https://www.elsevier.com/solutions/scopus/how-scopus-works/content>
- Elsevier. (2018b). How do Author / Indexed keywords work? - Scopus: Access and use Support Center. Retrieved from https://service.elsevier.com/app/answers/detail/a_id/21730/kw/article%20title%2C%20abstract%2C%20keywords/supporthub/scopus/
- Elsevier. (2018c). How do I search for a document? - Scopus: Access and use Support Center. Retrieved from https://service.elsevier.com/app/answers/detail/a_id/11213/kw/exact%20search/supporthub/scopus/
- Elsevier. (2018d). What are Field Codes? - Scopus: Access and use Support Center. Retrieved from https://service.elsevier.com/app/answers/detail/a_id/11236/kw/article%20title%2C%20abstract%2C%20keywords/supporthub/scopus/
- European Parliament, & Council of the European Union. (2009). Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC. *Official Journal of the European Union*, L 140, 16-62.
- Fahimnia, B., Sarkis, J., & Davarzani, H. (2015). Green supply chain management: A review and bibliometric analysis. *International Journal of Production Economics*, 162, 101-114. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.01.003>
- Falagas, M. E., Pitsouni, E. I., Malietzis, G. A., & Pappas, G. (2008). Comparison of PubMed, Scopus, Web of Science, and Google Scholar: strengths and weaknesses. *The FASEB journal*, 22(2), 338-342. doi:10.1096/fj.07-9492LSF
- Fantazzini, D., Höök, M., & Angelantoni, A. (2011). Global oil risks in the early 21st century. *Energy Policy*, 39(12), 7865-7873. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.09.035>
- Fortunato, S., & Barthélemy, M. (2007). Resolution limit in community detection. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(1), 36-41. doi:10.1073/pnas.0605965104
- Gasparini, N., Jiao, X. C., Heumueller, T., Baran, D., Matt, G. J., Fladischer, S., . . . Ameri, T. (2016). Designing ternary blend bulk heterojunction solar cells with reduced carrier recombination and a fill factor of 77%. *Nature Energy*, 1, 9. doi:10.1038/nenergy.2016.118
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757-768. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>

- Gephi.org. (2017a). Gephi - The Open Graph Viz Platform. Retrieved from <https://gephi.org/>
- Gephi.org. (2017b). Tutorial Layouts. Retrieved from <https://gephi.org/users/tutorial-layouts/>
- GitHub. (2018a). HITS - gephi Wiki. Retrieved from <https://github.com/gephi/gephi/wiki/HITS>
- GitHub. (2018b). PageRank - gephi Wiki. Retrieved from <https://github.com/gephi/gephi/wiki/PageRank>
- Gurzki, H., & Woisetschläger, D. M. (2017). Mapping the luxury research landscape: A bibliometric citation analysis. *Journal of Business Research*, 77, 147-166. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ibusres.2016.11.009>
- Hanneman, R. A., & Riddle, M. (2005). Introduction to social network methods: University of California Riverside.
- Harzing, A.-W., & Alakangas, S. (2016). Google Scholar, Scopus and the Web of Science: a longitudinal and cross-disciplinary comparison. *Scientometrics*, 106(2), 787-804. doi:10.1007/s11192-015-1798-9
- Hood, W. W., & Wilson, C. S. (2001). The Literature of Bibliometrics, Scientometrics, and Informetrics. *Scientometrics*, 52(2), 291. doi:10.1023/a:1017919924342
- Huang, C., Notten, A., & Rasters, N. (2011). Nanoscience and technology publications and patents: a review of social science studies and search strategies. *Journal of Technology Transfer*, 36(2), 145-172. doi:10.1007/s10961-009-9149-8
- Huang, Y., Zhu, D., Lv, Q., Porter, A. L., Robinson, D. K. R., & Wang, X. (2017). Early insights on the Emerging Sources Citation Index (ESCI): an overlay map-based bibliometric study. *Scientometrics*, 111(3), 2041-2057. doi:10.1007/s11192-017-2349-3
- Kippelen, B., & Brédas, J.-L. (2009). Organic photovoltaics. *Energy & Environmental Science*, 2(3), 251-261. doi:10.1039/B812502N
- Kleinberg, J. M. (1999). Authoritative sources in a hyperlinked environment. *J. ACM*, 46(5), 604-632. doi:10.1145/324133.324140
- Li, J. M., Zhou, H. P., Zhang, Y. Y., Shahzad, S. A., Yang, M. D., Hu, Z. Z., & Yu, C. (2018). Tuning of the perylene probe excimer emission with silver nanoparticles. *Analytica Chimica Acta*, 1016, 40-48. doi:10.1016/j.aca.2018.02.014
- Li, N., Han, R., & Lu, X. (2018). Bibliometric analysis of research trends on solid waste reuse and recycling during 1992–2016. *Resources, Conservation and Recycling*, 130, 109-117. doi:<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.11.008>
- Madani, F., & Weber, C. (2016). The evolution of patent mining: Applying bibliometrics analysis and keyword network analysis. *World Patent Information*, 46, 32-48. doi:<https://doi.org/10.1016/j.wpi.2016.05.008>
- Manzano-Agugliaro, F., Alcayde, A., Montoya, F. G., Zapata-Sierra, A., & Gil, C. (2013). Scientific production of renewable energies worldwide: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 134-143. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.10.020>
- Mazzio, K. A., & Luscombe, C. K. (2015). The future of organic photovoltaics. *Chemical Society Reviews*, 44(1), 78-90. doi:10.1039/C4CS00227J
- Meerow, S., Newell, J. P., & Stults, M. (2016). Defining urban resilience: A review. *Landscape and Urban Planning*, 147, 38-49. doi:<https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.11.011>
- Meho, L. I., & Yang, K. (2007). Impact of data sources on citation counts and rankings of LIS faculty: Web of science versus scopus and google scholar. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 58(13), 2105-2125. doi:10.1002/asi.20677
- Merigó, J. M., Pedrycz, W., Weber, R., & de la Sotta, C. (2018). Fifty years of Information Sciences: A bibliometric overview. *Information Sciences*, 432, 245-268. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ins.2017.11.054>
- Min, J., Luponosov, Y. N., Cui, C. H., Kan, B., Chen, H. W., Wan, X. J., . . . Brabec, C. J. (2017). Evaluation of Electron Donor Materials for Solution-Processed Organic Solar Cells via a Novel Figure of Merit. *Advanced Energy Materials*, 7(18), 10. doi:10.1002/aenm.201700465

- Montoya, F. G., Alcayde, A., Baños, R., & Manzano-Agugliaro, F. (2018). A fast method for identifying worldwide scientific collaborations using the Scopus database. *Telematics and Informatics*, 35(1), 168-185. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tele.2017.10.010>
- Newell, J. P., & Cousins, J. J. (2015). The boundaries of urban metabolism. *Progress in Human Geography*, 39(6), 702-728. doi:<http://dx.doi.org/10.1177/0309132514558442>
- Newman, M. E. J. (2006). Modularity and Community Structure in Networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 103(23), 8577-8582.
- Newman, M. E. J., & Girvan, M. (2004). Finding and evaluating community structure in networks. *Physical review E*, 69(2). doi:10.1103/PhysRevE.69.026113
- OECD/IEA. (2017). IEA - Report: World Electricity and Heat for 2014. Retrieved from <http://www.iea.org/statistics/statisticssearch/report/?year=2014&country=WORLD&product=ElectricityandHeat>
- Page, L., Brin, S., Motwani, R., & Winograd, T. (1999). *The PageRank citation ranking: Bringing order to the web*. Retrieved from <http://ilpubs.stanford.edu:8090/422/1/1999-66.pdf>
- Perianes-Rodríguez, A., Waltman, L., & van Eck, N. J. (2016). Constructing bibliometric networks: A comparison between full and fractional counting. *Journal of Informetrics*, 10(4), 1178-1195. doi:<https://doi.org/10.1016/j.joi.2016.10.006>
- Persson, O. (2011). Mapping Science using Bibexcel and Pajek. Retrieved from <https://homepage.univie.ac.at/juan.gorraiz/bibexcel/>
- Persson, O., Danell, R., & Wiborg Schneider, J. (2009). How to use Bibexcel for various types of bibliometric analysis *Celebrating scholarly communication studies : A Festschrift for Olle Persson at his 60th Birthday* (pp. 9-24): ISSI.
- Pilkington, A., & Meredith, J. (2009). The evolution of the intellectual structure of operations management—1980–2006: A citation/co-citation analysis. *Journal of Operations Management*, 27(3), 185-202. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jom.2008.08.001>
- Pleißmann, G., & Blechinger, P. (2017). How to meet EU GHG emission reduction targets? A model based decarbonization pathway for Europe's electricity supply system until 2050. *Energy Strategy Reviews*, 15, 19-32. doi:<https://doi.org/10.1016/j.esr.2016.11.003>
- Porter, A. L., Youtie, J., Shapira, P., & Schoeneck, D. J. (2008). Refining search terms for nanotechnology. *Journal of Nanoparticle Research*, 10(5), 715-728. doi:10.1007/s11051-007-9266-y
- Ramos-Rodríguez, A.-R., & Ruíz-Navarro, J. (2004). Changes in the intellectual structure of strategic management research: a bibliometric study of the Strategic Management Journal, 1980–2000. *Strategic Management Journal*, 25(10), 981-1004. doi:10.1002/smj.397
- Randhawa, K., Wilden, R., & Hohberger, J. (2016). A Bibliometric Review of Open Innovation: Setting a Research Agenda. *Journal of Product Innovation Management*, 33(6), 750-772. doi:10.1111/jpim.12312
- Santos, D. M. F., & Sequeira, C. A. C. (2011). Sodium borohydride as a fuel for the future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(8), 3980-4001. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.018>
- Santos, R., Costa, A. A., & Grilo, A. (2017). Bibliometric analysis and review of Building Information Modelling literature published between 2005 and 2015. *Automation in Construction*, 80, 118-136. doi:<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.03.005>
- Spanggaard, H., & Krebs, F. C. (2004). A brief history of the development of organic and polymeric photovoltaics. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 83(2), 125-146. doi:<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2004.02.021>
- Su, Y. W., Lan, S. C., & Wei, K. H. (2012). Organic photovoltaics. *Materials Today*, 15(12), 554-562. doi:10.1016/s1369-7021(13)70013-0
- Thiede, M. (2017). Citation Analyses in Information Systems. *PACIS 2017 Proceedings*, 47.
- U.S. National Library of Medicine. (2018). MEDLINE: Description of the database. Retrieved from <https://www.nlm.nih.gov/bsd/medline.html>

- UHasselt. (2017). Organic Photovoltaic Devices. Retrieved from <http://www.uhasselt.be/UH/IMO/Research-domains/Energy/Organic-photovoltaic-devices.html>
- United Nations. (2015). *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. Resolution adopted by the General Assembly on 25 September 2015. (A/RES/70/1)*. New York: UN General Assembly.
- United Nations. (2017a). Energy - United Nations Sustainable Development. Retrieved from <http://www.un.org/sustainabledevelopment/energy/>
- United Nations. (2017b). Sustainable Development Goals - United Nations.
- van Eck, N. J., & Waltman, L. (2009). How to normalize cooccurrence data? An analysis of some well-known similarity measures. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 60(8), 1635-1651. doi:doi:10.1002/asi.21075
- van Eck, N. J., & Waltman, L. (2010). Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*, 84(2), 523-538. doi:10.1007/s11192-009-0146-3
- Verbruggen, A., & Yurchenko, Y. (2017). Positioning Nuclear Power in the Low-Carbon Electricity Transition. *Sustainability*, 9(1), 163. doi:<http://dx.doi.org/10.3390/su9010163>
- Walsh, I., & Renaud, A. (2017). Reviewing the literature in the IS field: Two bibliometric techniques to guide readings and help the interpretation of the literature. *Systèmes d'Information et Management*, 22(3), 75-115,117.
- Waltman, L. (2016). A review of the literature on citation impact indicators. *Journal of Informetrics*, 10(2), 365-391. doi:<https://doi.org/10.1016/j.joi.2016.02.007>
- Wang, L., Zhao, L., Mao, G., Zuo, J., & Du, H. (2017). Way to accomplish low carbon development transformation: A bibliometric analysis during 1995–2014. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 57-69. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.08.021>
- WCED. (1987). *Our Common Future (Brundtland Report) - World Commission on Environment and Development*. Oxford: Oxford University Press.
- World-Statistics. (2017). World Statistics - International Statistics: Electricity production from oil, gas & coal sources (% of total). Retrieved from [http://world-statistics.org/index-res.php?code=EG.ELC.FOSL.ZS?name=Electricity production from oil, gas and coal sources \(% of total\)#top-result](http://world-statistics.org/index-res.php?code=EG.ELC.FOSL.ZS?name=Electricity%20production%20from%20oil,%20gas%20and%20coal%20sources%20(%20of%20total)#top-result)
- Zhang, Y., Huang, K., Yu, Y., & Yang, B. (2017). Mapping of water footprint research: A bibliometric analysis during 2006–2015. *Journal of Cleaner Production*, 149, 70-79. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.067>
- Zupic, I., & Čater, T. (2015). Bibliometric Methods in Management and Organization. *Organizational Research Methods*, 18(3), 429-472. doi:10.1177/1094428114562629

Bijlagen

Bijlage 1: Bespreking overige netwerkeextractiemethodes

Co-woord

Een co-woordnetwerk is een visuele voorstelling van de inhoudelijke verwantschap tussen veelvoorkomende woorden binnen het onderzoeksdomein. Hoewel co-woordnetwerken in principe opgesteld kunnen worden voor woorden uit verschillende onderdelen van een publicatie, zoals titelwoorden of woorden uit de abstract, wordt het vooral gebruikt voor kernwoorden (zogenaamde *keyword co-occurrence networks*). Dit type netwerk is gebaseerd op de gezamenlijke vermelding van kernwoorden in het "kernwoord"-veld van de documenten in de dataset, volgens de redenering dat hoe vaker kernwoorden samen voorkomen, hoe waarschijnlijker het is dat ze inhoudelijk verwant zijn. Het co-woordnetwerk is de enige netwerkeextractiemethode waarbij kernwoorden worden gebruikt als analyse-eenheid.

De kernwoorden die voorkomen in de dataset worden voorgesteld door knooppunten in het netwerk. Twee knooppunten in een co-woordnetwerk worden verbonden door een rand wanneer zij minstens één keer samen vertegenwoordigd zijn in het "kernwoord"-veld van een document. Randen in dit type netwerk hebben geen richting, omdat ze een representatie zijn van een wederzijdse eigenschap van de knooppunten die ze verbinden (namelijk het samen voorkomen in de kernwoordenlijst van een document). Het belangrijkste kenmerk van de randen in dit netwerk is hun gewicht, dat gelijk is aan het aantal documenten waarin beide knooppunten samen voorkomen in de kernwoordenlijst. Hoe groter het gewicht van een rand, hoe vaker de twee verbonden knooppunten samen voorkomen en hoe waarschijnlijker het is dat deze kernwoorden inhoudelijk verwant zijn. Het opgestelde netwerk kan geanalyseerd worden met behulp van clusteranalysemethoden, waarbij groepen van nauw verwante kernwoorden worden geïdentificeerd. Elke cluster van kernwoorden stelt een bepaald onderwerp of thema voor, waardoor een thematische kaart van het onderzoeksdomein bekomen wordt.

Co-auteurschap

Een co-auteurschapsnetwerk geeft een visuele voorstelling van de samenwerkingsverbanden tussen de entiteiten die actief zijn binnen het onderzoeksdomein. Dit type netwerk is gebaseerd op de gezamenlijke vermelding van meerdere onderzoekers in het "auteur"-veld van de documenten in de dataset. In combinatie met gegevens over de organisaties waar deze onderzoekers zijn aangesteld en de adresgegevens van die organisaties, kunnen co-auteurschapsnetwerken opgesteld worden op het niveau van auteurs, organisaties of landen. Afhankelijk van de databank waaruit de gegevens gedownload zijn, wordt bij de geciteerde referenties van een document enkel de naam van de eerste auteur vermeld (WoS), of worden de namen van alle auteurs gegeven (Scopus). Wanneer de namen van alle auteurs van de geciteerde referenties beschikbaar zijn, kan in principe ook een co-auteurschapsnetwerk opgesteld worden op het niveau van de geciteerde auteurs.

De entiteiten die actief zijn binnen het onderzoeksdomein op het gekozen analyseniveau, worden voorgesteld door knooppunten in het netwerk. Twee knooppunten in een co-auteurschapsnetwerk

worden verbonden door een rand wanneer zij minstens één keer samen vertegenwoordigd zijn in het "auteur"-veld van een document. Randen in dit type netwerk hebben geen richting, maar wel een gewicht, dat gelijk is aan het aantal documenten waaraan beide knooppunten een gezamenlijke bijdrage hebben geleverd. Hoe groter het gewicht van een rand, hoe vaker de twee verbonden knooppunten samengewerkt hebben. Het opgestelde netwerk kan geanalyseerd worden met behulp van sociaal-netwerkanalyse om inzicht te krijgen in de kenmerken van het gehele netwerk en om invloedrijke knooppunten te identificeren.

Co-citatieanalyse

Een co-citatie-netwerk is een visuele voorstelling van inhoudelijke verwantschap tussen de entiteiten die in het verleden actief waren binnen het onderzoeksdomein. Dit type netwerk is gebaseerd op de mate waarin deze entiteiten samen voorkomen in de bibliografieën van de documenten in de gedownloade dataset, volgens de redenering dat entiteiten die vaak samen vermeld worden in referentielijsten, met grote waarschijnlijkheid ook inhoudelijk gelijkend zijn. Co-citatie-netwerken kunnen enkel opgesteld worden voor entiteiten waarover de geciteerde referenties informatie bevatten, zijnde de geciteerde referenties op zich, de geciteerde tijdschriften en de geciteerde auteurs.

Twee knooppunten in een co-citatie-netwerk worden verbonden door een rand wanneer ze minstens één keer samen voorkomen in de referentielijst van een document in de dataset (knooppunt A en knooppunt B worden geciteerd door publicatie C → rand tussen knooppunten A en B). Randen in dit type netwerk hebben geen richting, maar wel een gewicht, dat gelijk is aan het aantal keer dat de verbonden knooppunten samen voorkomen in de referentielijsten van de verzamelde documenten. Hoe groter het gewicht van een rand, hoe meer gelijkend de twee verbonden knooppunten verwacht worden te zijn. Enkel documenten die maar één referentie vermelden, leveren knooppunten zonder co-citatie-relaties op; vanaf het moment dat een document twee of meer citaties heeft, bestaan er co-citatie-relaties tussen de vertegenwoordigde entiteiten. Randen met een gewicht van één zijn dus triviaal in een co-citatie-netwerk en kunnen best vermeden worden om de analyse van het netwerk te vergemakkelijken (Persson et al., 2009). Dit kan bereikt worden door een minimumvereiste op te leggen voor het aantal keer dat een entiteit moet voorkomen in de verzameling van geciteerde referenties om als knooppunt in het netwerk opgenomen te worden – entiteiten die slechts één keer voorkomen kunnen hoe dan ook uitgesloten worden, maar het staat onderzoekers vrij om een hogere minimumvereiste te hanteren (Persson et al., 2009).

Zoals blijkt uit een vergelijking van de interpretatie van co-citatie-netwerken en netwerken volgens bibliografische koppeling, zijn beide extractiemethoden heel gelijkaardig: afgezien van het verschillend tijdsperspectief dat wordt ingenomen, stellen ze dezelfde relaties tussen entiteiten in het onderzoeksdomein voor. De analysebenaderingen voor co-citatie-netwerken zijn dan ook vergelijkbaar met die van netwerken op basis van bibliometrische koppeling: op netwerken van geciteerde referenties kan clusteranalyse toegepast worden om thematische clusters te verkrijgen die de vroegere toestand van het onderzoeksdomein weerspiegelen, terwijl netwerken van geciteerde tijdschriften en geciteerde auteurs beter gebruikt kunnen worden om de relaties tussen individuele entiteiten te onderzoeken.

Bijlage 2: Precisiecontrole van gedownloade dataset

Beoordeling precisie van de dataset

Documenten	Aantal	Aandeel	Cumulatief
- met trefwoorden in titel	15411	64%	64%
- met trefwoorden in auteurkernwoorden	1466	6%	70%
- met trefwoorden in samenvattingen	2994	13%	83%
- overige	4080	17%	100%

Precieze selectie	19871
Overige documenten	4080

Totaal aantal documenten	23951
Precisie	83%

Vergelijking met dataset op basis van trefwoorden in titels

Totaal aantal documenten	14295
Precisie	100%

Toename bereik (precieze selectie)	39%
Afname precisie	-17%

Bijlage 3: Details van de clusteranalyse van bibliografisch gekoppelde documenten

Clusters van documenten uit 2008

Cluster	Label	Aantal nodes	Aandeel	Cumulatief	Totaal aantal nodes
11 - paars	Morfologie van polymeer/fullereen mengsels	49	27.53%	0.2753	178
4 - lichtgroen	Stabiliteit en degradatie van polymeerzonnecellen	29	16.29%	0.4382	
2 - blauw	Ontwerp en ontwikkeling van polymeren met klein bandgap	28	15.73%	0.5955	
10 - donkerbruin	Polythiofene materialen voor OSCs	11	6.18%	0.6573	
20 - oranje	Oligothiofene materialen met klein bandgap voor OSCs	5	2.81%	0.6854	
0 - rood	Porfyriene in combinatie met koolstofnanostructuren / CdSe-nanopartikels	4	2.25%	0.7079	
1 - donkergroen	Balanstheorie en electro-optisch modelleren	4	2.25%	0.7304	
25 - lichtbruin	Tandem OSCs	4	2.25%	0.7529	
21 overige clusters	-	44	24.72%	1.0001	

Clusters van documenten uit 2009

Cluster	Label	Aantal nodes	Aandeel	Cumulatief	Totaal aantal nodes
6 - paars	Studie van polymeren met klein bandgap voor OSCs	66	22.84%	0.2284	289
27 - groen	Morfologie van de actieve laag in polymer/fullerene BHJ zonnecellen	58	20.07%	0.4291	
16 - blauw	Productieprocessen voor polymeerzonnecellen	43	14.88%	0.5779	
25 - donkerbruin	Donormaterialen voor OSCs: polymeren en organische moleculen	15	5.19%	0.6298	
31 - oranje	Ontstaan en transport van elektrische ladingen, PCE en Voc	14	4.84%	0.6782	
2 - rood	OSCs met tandemarchitectuur	9	3.11%	0.7093	
11 - donkergroen	Gebruik van porfyrienen voor PV-toepassingen	4	1.38%	0.7231	
5 - lichtbruin	Polymer/TiO ₂ -zonnecellen en "Intensity Modulated Photocurrent Spectroscopy"	3	1.04%	0.7335	
37 overige clusters	-	77	26.64%	0.9999	

Clusters van documenten uit 2010

Cluster	Label	Aantal nodes	Aandeel	Cumulatief	Totaal aantal nodes
13 - paars	Morfologie van polymeer/fullereen zonnecellen	115	20.95%	0.2095	549
8 - lichtgroen	Nieuwe materialen voor OPVs: D/A copolymeren als donors, indeen-fullereenbisadducten als acceptoren	107	19.49%	0.4044	
17 - blauw	Opschalen, productiemethodes en mogelijkheden voor vermarkting van OSCs	81	14.75%	0.5519	
6 - donkerbruin	Onstaan, transport en recombinatie van elektrische ladingen; OSCs met tandemarchitectuur	47	8.56%	0.6375	
2 - oranje	OSCs met omgekeerde architectuur	43	7.83%	0.7158	
14 - rood	Moleculaire BHJ zonnecellen met oligomeren of kleine organische moleculen als donormateriaal	40	7.29%	0.7887	
19 - donkergroen	Moleculaire D/A heterojuncties (OSCs obv kleine moleculen); transparante geleidende elektrodes op basis van grafeen	27	4.92%	0.8379	
3 - lichtbruin	Nieuwe elektronacceptormaterialen (voornamelijk fullereenafgeleiden)	23	4.19%	0.8798	
24 overige clusters	-	66	12.02%	1.0000	

Clusters van documenten uit 2011

Cluster	Label	Aantal nodes	Aandeel	Cumulatief	Totaal aantal nodes
12 - paars	Ontwerp en ontwikkeling van nieuwe geconjugeerde polymeren (klein bandgap, D/A copolymeren)	146	19.26%	0.1926	758
2 - lichtgroen	Ontstaan, transport en verlies van elektrische ladingen (recombinatie, verstriking)	137	18.07%	0.3733	
7 - blauw	Morfologie van BHJ OSCs, invloed van procesadditieven	131	17.28%	0.5461	
23 - donkerbruin	Nieuwe electronacceptormaterialen voor OSCs, afgeleid van fullerenen	64	8.44%	0.6305	
31 - oranje	Polymer/inorganic nanoparticle hybrid solar cells, quantum dot solar cells	61	8.05%	0.7110	
28 - rood	Nieuwe kleine donormoleculen voor uit-oplossing-geproduceerde zonnecellen	49	6.46%	0.7756	
14 - donkergroen	Zelfordenende fenomenen in supramoleculaire systemen	9	1.19%	0.7875	
33 - lichtbruin	Elektronische eigenschappen in OSCs	8	1.06%	0.7981	
57 overige clusters	-	153	20.18%	0.9999	

Clusters van documenten uit 2012

Cluster	Label	Aantal nodes	Aandeel	Cumulatief	Totaal aantal nodes
4 - paars	Ontwerp en ontwikkeling van donorpolymeren (vnl. D/A copolymeren)	214	21.64%	0.2164	989
29 - lichtgroen	Morfologie van de actieve laag van OSCs	206	20.83%	0.4247	
22 - blauw	Donormaterialen van kleine organische moleculen voor uit-oplossing-bereide zonnecellen	131	13.25%	0.5572	
3 - donkerbruin	Architectuur van OSCs: omgekeerde structuur en tandemstructuur; bufferlagen voor OSCs	123	12.44%	0.6816	
16 - oranje	Ontstaan, transport en verlies van elektrische ladingen in OSCs, vnl. in polymeer/fullereen zonnecellen	110	11.12%	0.7928	
20 - rood	Electronacceptormaterialen afgeleid van fullerenen	63	6.37%	0.8565	
19 - donkergroen	Diketopyrrolopyrrol-gebaseerde halfgeleidende polymeren	15	1.52%	0.8717	
30 - lichtbruin	Hybride organische-anorganische zonnecellen met Si-nanowires; Elektronacceptormaterialen met grafeen	12	1.21%	0.8838	
45 overige clusters	-	115	11.63%	1.0001	

Clusters van documenten uit 2013

Cluster	Label	Aantal nodes	Aandeel	Cumulatief	Totaal aantal nodes
10 - paars	Morfologie van de actieve laag in OSCs	219	18.25%	0.1825	1200
15 - lichtgroen	Ontwerp en ontwikkeling van polymeren als donormateriaal in OSCs (vnl. klein bandgap, D/A copolymeren)	198	16.50%	0.3475	
3 - blauw	Ontwerp en ontwikkeling van elektronacceptormaterialen gebaseerd op fullerenen	139	11.58%	0.4633	
19 - donkerbruin	Ontwerp en ontwikkeling van kleine organische moleculen als elektrondonormaterialen voor uit-oplossing-bereide zonnecellen	88	7.33%	0.5366	
1 - oranje	Architectuur van OSCs (omgekeerd en tandem); volledig-polymeerzonnecellen	76	6.33%	0.5999	
42 - rood	Grensvlak-/bufferlagen voor OSCs, voornamelijk voor de omgekeerde architectuur	57	4.75%	0.6474	
44 - donkergroen	Transparante, geleidende elektrodes o.b.v. Si-nanowires of grafeen	50	4.17%	0.6891	
35 - lichtbruin	Ontwerp en ontwikkeling van niet-fullerene elektronacceptormaterialen (polymeren en kleine moleculen); volledig-polymeerzonnecellen	42	3.50%	0.7241	
70 overige clusters	-	331	27.58%	0.9999	

Clusters van documenten uit 2014

Cluster	Label	Aantal nodes	Aandeel	Cumulatief	Totaal aantal nodes
22 - paars	Zie subclusters	658	38.66%	0.3866	1702
44 - lichtgroen	Kleine organische moleculen als elektrondonormateriaal; niet-fullerene elektronacceptormaterialen (polymeren en kleine organische moleculen)	215	12.63%	0.5129	
24 - blauw	Hybride halide perovskietzonnecellen met organische en anorganische component	195	11.46%	0.6275	
20 - donkerbruin	Opwekking, transport en verlies van elektrische ladingen in OSCs	106	6.23%	0.6898	
19 - oranje	Productiemethodes voor hybride perovskietzonnecellen met organische en anorganische component	94	5.52%	0.7450	
46 - rood	Beter lichtmanagement / lichtstrikking in OSCs (OSCs verbeterd met plasmonische nanopartikels, OSCs in V-vorm)	55	3.23%	0.7773	
27 - donkergroen	Nanocomposietmaterialen voor hybride organisch-anorganische zonnecellen (vnl. o.b.v. chalcogenide nanopartikels), polymer/nanokristal-zonnecellen	50	2.94%	0.8067	
37 - lichtbruin	Productiemethodes voor OSC-modules; OSCs met tandemarchitectuur; ITO-vrije OSCs; semitransparante polymeerzonnecellen met photonische kristalreflectoren	31	1.82%	0.8249	
96 overige clusters	-	298	17.51%	1.0000	

Subcluster	Label	Aantal nodes	Aandeel	Cumulatief	Totaal aantal nodes
2 - paars	Ontwerp en ontwikkeling van polymeren	163	24.77%	0.2477	658
3 - lichtgroen	Morfologie	116	17.63%	0.4240	
10 - blauw	Bufferlagen voor OSCs met omgekeerde architectuur	78	11.85%	0.5425	
7 - donkerbruin	Elektronacceptoren afgeleid van fullereen	67	10.18%	0.6443	
0 - oranje	OSCs met (omgekeerde) tandemarchitectuur	52	7.90%	0.7233	

11 - rood	Ontwerp en ontwikkeling van polymeren	40	6.08%	0.7841	
9 - donkergroen	Ternary blend OSCs	38	5.78%	0.8419	
13 - lichtbruin	Grafeenoxide als materiaal voor transport van elektronengaten; procesadditieven	38	5.78%	0.8997	
6 overige clusters	-	66	10.03%	1.0000	

Clusters van documenten uit 2015

Cluster	Label	Aantal nodes	Aandeel	Cumulatief	Totaal aantal nodes
9 - paars	Zie subclusters	909	41.93%	0.4193	2168
18 - lichtgroen	Morfologie van perovskietzonnecellen; stabiliteit en hysteresis-effect	395	18.22%	0.6015	
13 - blauw	Productiemethodes voor perovskietzonnecellen	204	9.41%	0.6956	
29 - donkerbruin	(perovskietzonnecellen, niet eenduidig)	200	9.23%	0.7879	
35 - oranje	Nieuwe elektronacceptormaterialen voor fullereen-vrije OSCs	131	6.04%	0.8483	
72 - rood	Ontstaan, transport en recombinatie van ladingdragers	51	2.35%	0.8718	
52 - donkergroen	Hybride organische zonnecellen met inorganische nanopartikels voor beter lichtmanagement en hogere efficiëntie	45	2.08%	0.8926	
49 - lichtbruin	Transparante elektrodes voor OSCs	35	1.61%	0.9087	
72 overige clusters	-	198	9.13%	1.0000	

Subcluster	Label	Aantal nodes	Aandeel	Cumulatief	Totaal aantal nodes
6 - paars	Ontwerp en ontwikkeling van polymeren als elektronendonormaterialen: breed-bandgap polymeren en zijketenmodificatie	261	28.71%	0.2871	909
9 - lichtgroen	Ontwerp en ontwikkeling van kleine organische moleculen als elektronendonormaterialen voor uit-vloeistof-bereide OSCs	134	14.74%	0.4345	
20 - blauw	Ontwerp en ontwikkeling van materialen voor bufferlagen in OSCs (vnl. voor de kathode bij OSCs met omgekeerde architectuur)	126	13.86%	0.5731	
0 - donkerbruin	OSCs met actieve laag o.b.v. een drie-componentmengsel	99	10.89%	0.6820	
1 - oranje	Grafeen en afgeleiden van grafeen als materiaal voor bufferlagen in OSCs	52	5.72%	0.7392	
2 - rood	Ontwerp en ontwikkeling van kleine organische moleculen als elektronendonormaterialen of elektronacceptormaterialen voor OSCs	45	4.95%	0.7887	

3 - donkergroen	Morfologie van de actieve laag in OSCs	36	3.96%	0.8283	
22 - lichtbruin	OSCs met tandemarchitectuur; morfologie van OSCs	34	3.74%	0.8657	
17 overige clusters	-	122	13.42%	0.9999	

Clusters van documenten uit 2016

Cluster	Label	Aantal nodes	Aandeel	Cumulatief	Totaal aantal nodes
5 - paars	Niet-fullerene OSCs: polymeren of kleine organische moleculen als elektronacceptoren	927	35.61%	0.3561	2603
27 - lichtgroen	Architectuur (planair/omgekeerd planair), bufferlagen, productiemethoden en morfologie van perovskietzonnecellen	397	15.25%	0.5086	
32 - blauw	Stabiliteit en degradatie van perovskietzonnecellen	391	15.02%	0.6588	
14 - donkerbruin	Ionmigratie en hystereseeffect in perovskietzonnecellen	294	11.29%	0.7717	
57 - oranje	Elektronengattransportlagen voor perovskietzonnecellen	113	4.34%	0.8151	
4 - rood	Onstaan, transport en recombinatie van ladingdragers in OSCs	64	2.46%	0.8397	
0 - donkergroen	Verbeterd lichtmanagement en lichtstrikking door gebruik van plasmonische nanopartikels in OSCs	53	2.04%	0.8601	
9 - lichtbruin	Synthese van nieuwe polymeren voor OSCs via directe-arylatiepolymerisatie	45	1.73%	0.8774	
92 overige clusters	-	319	12.26%	1.0000	

Clusters van documenten uit 2017

Cluster	Label	Aantal nodes	Aandeel	Cumulatief	Totaal aantal nodes
66 - paars	Elektrontransportlagen in perovskietzonnecellen; productiemethoden en morfologie van perovskietzonnecellen	754	25.87%	0.2587	2915
54 - lichtgroen	Stabiliteit van perovskietzonnecellen en gemengde perovskietmaterialen	445	15.27%	0.4114	
29 - blauw	OSCs met actieve laag o.b.v. een drie-componentmengsel	406	13.93%	0.5507	
27 - donkerbruin	OSCs met niet-fullerene elektronacceptoren	399	13.69%	0.6876	
18 - oranje	Bufferlagen voor perovskietzonnecellen, vnl. de elektrongattransportlaag	143	4.91%	0.7367	
43 - rood	Ionmigratie en hysteresis-effect in perovskietzonnecellen	125	4.29%	0.7796	
55 - donkergroen	Bufferlagen voor OSCs	125	4.29%	0.8225	
68 - lichtbruin	Volledig-polymeerzonnecellen (polymeer als elektronacceptormateriaal)	120	4.12%	0.8637	
111 overige clusters	-	398	13.65%	1.0002	

Auteursrechtelijke overeenkomst

Ik/wij verlenen het wereldwijde auteursrecht voor de ingediende eindverhandeling:
Analyse van product- en procesinnovatie binnen het domein van organische fotovoltaïsche technologieën: bibliometrische literatuurstudie

Richting: **master in de toegepaste economische wetenschappen: handelsingenieur-technologie-, innovatie- en milieumanagement**

Jaar: **2018**

in alle mogelijke mediaformaten, - bestaande en in de toekomst te ontwikkelen - , aan de Universiteit Hasselt.

Niet tegenstaand deze toekenning van het auteursrecht aan de Universiteit Hasselt behoud ik als auteur het recht om de eindverhandeling, - in zijn geheel of gedeeltelijk -, vrij te reproduceren, (her)publiceren of distribueren zonder de toelating te moeten verkrijgen van de Universiteit Hasselt.

Ik bevestig dat de eindverhandeling mijn origineel werk is, en dat ik het recht heb om de rechten te verlenen die in deze overeenkomst worden beschreven. Ik verklaar tevens dat de eindverhandeling, naar mijn weten, het auteursrecht van anderen niet overtreedt.

Ik verklaar tevens dat ik voor het materiaal in de eindverhandeling dat beschermd wordt door het auteursrecht, de nodige toelatingen heb verkregen zodat ik deze ook aan de Universiteit Hasselt kan overdragen en dat dit duidelijk in de tekst en inhoud van de eindverhandeling werd genotificeerd.

Universiteit Hasselt zal mij als auteur(s) van de eindverhandeling identificeren en zal geen wijzigingen aanbrengen aan de eindverhandeling, uitgezonderd deze toegelaten door deze overeenkomst.

Voor akkoord,

Fonteyn, Pieter

Datum: **22/08/2018**