

Opschaling van Innovatie - Perspectief op producten, bedrijven, industrieën & innovatiesystemen

TNO 2026 R10539 – 6 maart 2026

Opschaling van Innovatie - Perspectief op producten, bedrijven, industrieën & innovatiesystemen

Auteurs	Roald Suurs, Daan Pisa, Mirella Schrijvers, Veerle Zuurdeeg
	Met dank aan Roos de Jonge van het Copernicus Instituut voor het reviewen van de case studie "Offshore Windenergie".
Rubricering rapport	TNO Public
Titel	TNO Public
Rapporttekst	TNO Public
Bijlagen	TNO Public
Aantal pagina's	60 (excl. voor- en achterblad)
Aantal bijlagen	1

Alle rechten voorbehouden

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van TNO.

© 2026 TNO

Samenvatting

Dit rapport introduceert een integraal begrippenkader om opschalingsprocessen van technologische innovatie systematisch te analyseren. Door het begrippenkader toe te passen, kunnen beleidsmakers en bedrijven effectiever inspelen op de dynamiek van opschaling, knelpunten tijdig signaleren en strategieën flexibel aanpassen. Dit maakt het kader niet alleen analytisch waardevol, maar ook praktisch toepasbaar voor het versnellen en verduurzamen van innovatieprocessen.

Opschaling wordt hierin niet als een eendimensionaal proces gezien, maar als een veelzijdig fenomeen dat zich afspeelt langs vier dimensies: kwantitatief (groei in aantallen), functioneel (verbreding van activiteiten), organisatorisch (versterking van samenwerking en capaciteit) en institutioneel (verankering in beleid en normen). Daarnaast onderscheidt het rapport vier routes van opschaling: groei, replicatie, circulatie en institutionalisering. Deze worden toegepast binnen vier contexten: product/dienst, bedrijf/businessmodel, industrie/waardeketen en innovatiesysteem/niche.

Door deze contexten expliciet te maken, wordt het mogelijk om gericht te analyseren wat er precies opschaaft, welke mechanismen relevant zijn en welke handelingsperspectieven er zijn voor onderzoekers, beleidsmakers en ondernemers.

Opschaling per context en ontwikkelingsfase

CONTEXT	EXPLORATIE & NICHE-VORMING	VERSNELLING & OPSCHALING	CONSOLIDATIE & INSTITUTIONALISERING
PRODUCT / DIENST	Pilots, eerste gebruikers, leerprocessen	Schaalvergroting, standarisatie, groei	Normen, certificering, brede adoptie
BEDRIJF / BUSINESSMODEL	Ondernemerschap, lokale netwerken	Intrede grote bedrijven, internationale expansie	Stabiele verdienmodellen, verweven met beleid
INDUSTRIE / WAARDEKETEN	Variatie, experimenten, fragmentatie	Dominant design, ketenintegratie, schaalvoordeel	Consolidatie, procesinnovatie, hoge drempels
INNOVATIESYSTEEM	Kennisontwikkeling, coalities, pilots	Systeemgroei, beleidscoördinatie, replicatie	Inbedding in beleid, internationale regimes

De relevantie van dit begrippenkader blijkt uit de analyse van de case offshore windenergie. De case laat zien dat succesvolle opschaling vraagt om een holistische benadering, waarin technologische, organisatorische, institutionele en marktgerichte aspecten samenkomen.

Het kader helpt om strategieën te kiezen die passen bij de fase en context van de innovatie.

Het rapport biedt handelingsperspectieven voor beleidsmakers en andere systeemspelers met ambities om technologische innovatie op te schalen.

Inhoudsopgave

Samenvatting	3
1 Inleiding.....	6
1.1 Achtergrond en probleemdefinitie	6
1.2 Doelstelling en scope	7
1.3 Perspectieven op opschaling	7
1.4 Handelingsperspectief	7
1.5 Opbouw van het rapport	8
2 Perspectieven op opschaling.....	9
2.1 Dimensies van opschaling	9
2.2 Routes van opschaling	10
2.3 Contexten van opschaling	12
2.4 Naar een integraal begrip van opschaling.....	13
3 Begrippenkader opschaling	14
3.1 Producten en diensten.....	17
Wat schaaft er op?.....	17
Hoe schaaft het op?.....	17
Welke dimensies en routes zien we terug?.....	18
Handelingsperspectief	19
3.2 Bedrijven en businessmodellen	20
Wat schaaft er op?.....	20
Hoe schaaft het op?.....	21
Welke dimensies en routes zien we terug?.....	21
Handelingsperspectief	22
3.3 Industrieën en waardeketens.....	22
Wat schaaft er op?.....	22
Hoe schaaft het op?.....	23
Welke dimensies en routes zien we terug?.....	25
Handelingsperspectief	25
3.4 Innovatiesystemen.....	25
Wat schaaft er op?.....	26
Hoe schaaft het op?.....	26
Welke dimensies en routes zien we terug?.....	28
Handelingsperspectief	29
4 Casestudie offshore windenergie	30
4.1 Producten en diensten.....	30
4.2 Bedrijven en businessmodellen	34
4.3 Industrieën en waardeketens.....	35
4.4 Innovatiesystemen.....	37
5 Reflectie en duiding	39
5.1 Producten en diensten.....	39
Dimensies	39
Routes 39	
Handelingsperspectief	39
5.2 Bedrijven en businessmodellen	40
Dimensies	40
Routes 40	

Handelingsperspectief	40
5.3 Industrieën en waardeketens.....	41
Dimensies	41
Routes 41	
Handelingsperspectief	41
5.4 Innovatiesystemen	42
Dimensies	42
Routes 42	
Handelingsperspectief	42
6 Conclusie	48
6.1 Conclusie en reflectie	48
6.2 Van analyse naar handelingsperspectief	49
6.3 Beperkingen en tekortkomingen	49
6.4 Aanbevelingen voor vervolgonderzoek	50
7 Referenties.....	51
Appendix: Kritieke beslissingen	54
Producten en diensten.....	56
Bedrijven en businessmodellen	57
Industrieën en waardeketens.....	58
Innovatiesystemen.....	59
Tabel I Kritieke beslissingen voor opschaling.....	60

Bijlage

Bijlage A: Appendix: Kritieke beslissingen

54

1 Inleiding

1.1 Achtergrond en probleemdefinitie

Technologische innovatie speelt een cruciale rol in het versterken van economische weerbaarheid en het aanpakken van urgente maatschappelijke opgaven, zoals de energietransitie, digitalisering en verduurzaming van industrieën. In beleids- en onderzoekscontexten wordt daarbij steeds vaker benadrukt dat niet zozeer het ontwikkelen van nieuwe technologieën de grootste uitdaging vormt, maar vooral het opschalen ervan: het realiseren van brede toepassing, structurele inbedding en duurzame impact.

De urgentie van het thema opschaling van technologische innovatie wordt onderstreept door recente beleidsadviezen en rapporten. Zo waarschuwt Mario Draghi in zijn rapport over het Europese concurrentievermogen dat Europa en Nederland alleen concurrerend kunnen blijven door gericht te investeren in technologie, menselijk kapitaal en het wegnemen van institutionele barrières. De Draghi-agenda legt daarbij expliciet de nadruk op het belang van het versnellen en opschalen van innovatie: niet alleen het ontwikkelen van nieuwe technologieën, maar vooral het realiseren van brede toepassing en structurele inbedding is essentieel om het verdienvermogen van Europa te versterken. Het recent verschenen rapport van Peter Wennink, 'De route naar toekomstige welvaart', vertaalt deze analyse naar de Nederlandse context. Wennink benadrukt dat Nederland haar uitzonderlijke kennis- en innovatiepositie dreigt te verliezen als noodzakelijke randvoorwaarden en bestuurlijke regie uitblijven. Hij benoemt specifiek dat het opschalen van innovaties wordt belemmerd door administratieve blokkades, trage vergunningverlening en een tekort aan infrastructuur.

Beide rapporten onderstrepen dat effectieve opschaling van technologische innovatie een samenhangende en daadkrachtige aanpak vereist, waarbij niet alleen technologische ontwikkeling centraal staat, maar ook het wegnemen van institutionele en organisatorische barrières. Tegen deze achtergrond biedt dit rapport een integraal begrippenkader om opschalingsprocessen van technologische innovatie systematisch te analyseren en te ondersteunen.

Tegelijkertijd is 'opschaling' een begrip dat in uiteenlopende contexten wordt gebruikt, vaak zonder expliciete afbakening of onderliggende theoretische consistentie. In de ene context verwijst opschaling naar het snel vergroten van productievolumes of gebruikersaantallen, terwijl het in andere gevallen gaat om het verbreden van activiteiten, het versterken van samenwerkingsstructuren of het institutioneel verankeren van nieuwe praktijken in beleid en regelgeving. Opschaling kan betrekking hebben op producten, bedrijven, industrieën of zelfs hele innovatiesystemen. De bestaande wetenschappelijke literatuur biedt rijke inzichten in afzonderlijke aspecten van opschaling – zoals diffusietheorie, businessmodel-opschaling, industriële levenscycli en innovatiesysteemtheorie – maar kent doorgaans geen integraal perspectief dat deze benaderingen met elkaar verbindt. Hierdoor ontbreekt een gedeelde taal om opschalingsprocessen systematisch te analyseren en strategisch te sturen.

Deze conceptuele ambiguïteit heeft belangrijke consequenties. Wanneer niet expliciet wordt gemaakt wat er opschaaft, in welke context en via welke mechanismen, blijven analyses oppervlakkig en handelingsperspectieven abstract. Beleidsinterventies die effectief zijn in een vroege experimentele fase, blijken bijvoorbeeld minder geschikt in latere fasen van consolidatie. Evenzo kunnen strategieën die werken op productniveau tekortschieten wanneer opschaling vooral institutionele of organisatorische veranderingen vereist.

1.2 Doelstelling en scope

Het doel van dit rapport is het ontwikkelen van een **praktisch toepasbaar integraal begrippenkader voor opschaling van technologische innovatie** dat recht doet aan de complexiteit en gelaagdheid van opschalingsprocessen, zonder deze te reduceren tot één dimensie of één analytisch perspectief. De centrale vraag die in dit rapport, middels dit begrippenkader, wordt beantwoord, luidt:

Hoe kunnen opschalingsprocessen van technologische innovatie systematisch worden begrepen en geduid, zodanig dat zowel analytische scherpste als concrete handelingsperspectieven ontstaan?

Hoewel het begrippenkader en de inzichten uit dit rapport in principe breder toepasbaar zijn op verschillende vormen van innovatie, ligt de nadruk in de analyse en de casestudy expliciet op technologische innovatie. Deze focus sluit aan bij de missie en het werkveld van TNO en is daarmee ook het meest relevant voor de beoogde lezers van dit rapport: beleidsmakers en systeemspelers (bedrijven, kennisinstellingen, brancheorganisaties) met ambities om technologische innovaties te helpen ontwikkelen, inbedden en opschalen.

1.3 Perspectieven op opschaling

Dit rapport introduceert een begrippenkader op basis van drie complementaire benaderingen:

- **Opschalingscontexten:** Opschaling vindt plaats in verschillende contexten, elk met een eigen dynamiek, actoren en succesfactoren. In dit rapport worden vier contexten onderscheiden: product/dienst, bedrijf/businessmodel, industrie/waardeketen, innovatiesysteem/niche.
- **Opschalingsdimensies:** Opschaling is geen eendimensionaal proces. Het omvat onder meer: kwantitatieve veranderingen (groei in volumes, aantallen of capaciteit), functionele verbreding (uitbreiding van activiteiten of functies), organisatorische versterking (capaciteit, netwerken, samenwerking), institutionele verankering (beleid, regelgeving, standaarden).
- **Opschalingsroutes:** Innovaties kunnen langs verschillende paden opschalen, waaronder groei, replicatie, circulatie en institutionalisering. Deze routes bieden inzicht in de mechanismen en strategieën waarmee opschaling plaatsvindt.

Door deze perspectieven te combineren ontstaat een uniform maar flexibel kader dat uiteenlopende opschalingsprocessen vergelijkbaar maakt, zonder contextspecifieke kenmerken te negeren.

1.4 Handelingsperspectief

Het ontwikkelde begrippenkader is niet bedoeld als een abstract classificatiemodel, maar als een analytisch en handelingsgericht instrument. De meerwaarde van het kader zit niet alleen in het ordenen van begrippen, maar vooral in het zichtbaar maken van relevante handelingsperspectieven.

Om dit concreet te maken wordt het begrippenkader toegepast op een case study van offshore windenergie. Deze case illustreert hoe opschaling zich gelijktijdig voltrekt op meerdere niveaus: van productontwikkeling (grotere turbines) en bedrijfsstrategieën (verticale integratie en internationale expansie), tot industriële standaardisatie en institutionele inbedding binnen energiebeleid en infrastructuurregimes.

De case laat zien dat succesvolle opschaling niet kan worden begrepen als louter volumegroei, maar het resultaat is van samenhangende kwantitatieve, organisatorische, functionele en institutionele veranderingen. Daarmee biedt het rapport niet alleen beschrijvende inzichten, maar ook verklarende patronen en strategische lessen voor onderzoekers, beleidsmakers en innovatie-actoren.

De relevantie van dit rapport ligt in het bieden van een gedeelde taal voor opschaling, die kan worden gebruikt in onderzoek, beleid en praktijk. Door expliciet te maken wat er opschaaft, langs welke routes en in welke contexten, helpt het begrippenkader om:

- misverstanden in discussie en beleidsvorming te voorkomen;
- verwachtingen over opschaling realistischer te maken;
- interventies gericht en fase-specifieker vorm te geven.

Het rapport levert daarmee een bijdrage aan zowel het wetenschappelijke debat over opschaling als aan de praktische vraag hoe technologische innovatie versneld én verantwoord kan worden opgeschaald in complexe maatschappelijke transities.

1.5 Opbouw van het rapport

Het rapport is als volgt opgebouwd:

Hoofdstuk 2 introduceert, op basis van een literatuurstudie, de kernbegrippen die nodig zijn voor een integraal begrippenkader voor opschaling van technologische innovatie. Hier worden de verschillende perspectieven op opschaling besproken: dimensies, routes en contexten.

Hoofdstuk 3 presenteert het integrale begrippenkader. Dit hoofdstuk combineert de perspectieven uit hoofdstuk 2 tot een uniform raamwerk en werkt deze uit per opschalingscontext: product/dienst, bedrijf/businessmodel, industrie/waardeketen en innovatiesysteem/niche.

Hoofdstuk 4 past het begrippenkader toe op een casestudie van offshore windenergie. In dit hoofdstuk wordt per context geanalyseerd hoe opschaling in de praktijk verloopt en welke mechanismen en handelingsperspectieven relevant zijn.

Hoofdstuk 5 reflecteert op de casestudie en benoemt de handelingsperspectieven die uit de analyse naar voren komen. Hier wordt expliciet gemaakt hoe fase, context en type opschaling samenhangen en welke strategische lessen daaruit te trekken zijn.

Hoofdstuk 6 sluit af met conclusies, beperkingen en aanbevelingen voor vervolgonderzoek. Dit hoofdstuk vat de belangrijkste inzichten samen en geeft richting aan verdere toepassing en verdieping van het begrippenkader.

Voor de analyse en het redigeren van deze rapportage is gebruikgemaakt van kunstmatige intelligentie (AI). AI-tools zijn ingezet om de inhoud te structureren, te verbeteren en te ondersteunen bij het verwerken van informatie.

2 Perspectieven op opschaling

Opschaling van innovatie is een onderwerp dat in de wetenschappelijke literatuur vanuit uiteenlopende perspectieven wordt benaderd (Woltering et al., 2019; Breaugh et al., 2021; Frake & Messina, 2018; Schut et al., 2020; Hartmann & Linn, 2008, Moore et al., 2015). Deze is deels te verklaren door het feit dat opschaling niet één enkelvoudig proces is, maar een multidimensionaal fenomeen. Afhankelijk van het uitgangspunt kan opschaling gaan over het vergroten van gebruikersaantallen, het uitbreiden van organisatorische capaciteit of het institutionaliseren van nieuwe praktijken. Bovendien zijn er verschillende routes waarlangs opschaling kan plaatsvinden, welke inzicht bieden in de relevante mechanismen van opschaling. Tenslotte zijn er uiteenlopende contexten – van technologische ontwikkeling tot marktadoptie, van individuele bedrijven tot hele industrieën en innovatiesystemen. Dit hoofdstuk legt de basis voor een holistisch begrip van de term opschaling op basis van zowel dimensies, routes en contexten.

2.1 Dimensies van opschaling

Recente literatuur benadrukt dat opschaling méér is dan het 'bereiken van velen' (Woltering et al., 2019). Het gaat om het realiseren van duurzame systeemverandering op grote schaal. Dit vraagt om een blik op de voorwaarden en processen die opschaling mogelijk maken. In dit licht kunnen we opschaling zien als een multidimensionaal proces van verandering en aanpassing (Hartmann & Linn, 2008). Uvin (1995) identificeert daarbij vier dimensies van opschaling, die vaak onderling verbonden zijn:

- **Kwantitatieve opschaling:** geografische spreiding en het bereiken van een grotere groep binnen dezelfde context; uitbreiding in aantallen. Dit wordt ook wel horizontale opschaling of 'scaling out/wide' genoemd (Breaugh et al., 2021; Moore et al., 2015). De inverse hiervan is 'scaling down' (Schut et al., 2020).

Denk bijvoorbeeld aan de uitrol van zonnepanelen in Nederland in het afgelopen decennium, i.e. het groeiende aantal huishoudens en bedrijven dat zonnepanelen heeft geïnstalleerd.

- **Functionele opschaling:** verbreiding van de inhoud of reikwijdte. Bijvoorbeeld door een innovatieprogramma dat gericht is op technologische ontwikkeling en R&D uit te breiden met ondersteuning voor ondernemerschap, marktintroductie en skills development.

Zo kennen we bijvoorbeeld lokale energiecoöperaties die starten met het gezamenlijk inkopen van zonnepanelen, maar later ook laadpalen plaatsen, buurtbatterijen beheren of collectieve isolatieprojecten organiseren. Ze verbreden hun activiteiten van enkel opwek naar bredere energiediensten.

- **Organisatorische opschaling:** versterking of uitbreiding van de capaciteit, structuur en samenwerking binnen en tussen organisaties. Bijvoorbeeld door een tijdelijk projectteam uit te bouwen tot een programma-organisatie.

Denk bijvoorbeeld aan de ontwikkeling van door gemeenten gefaciliteerde pilotprojecten voor energiezuinige woningen naar een nationale wijkgerichte aanpak voor aardgasvrije woningen.

- **Politieke/institutionele opschaling:** verankering door het beïnvloeden van beleid, regelgeving of instituties. Dit wordt ook wel verticale opschaling of 'scaling up' genoemd (Breaugh et al., 2021). Moore et al. (2015) onderscheiden daarnaast ook 'scaling deep' als een vorm van 'zachte institutionele opschaling', gericht op diepgaande verandering van normen, waarden en cultuur binnen organisaties en systemen.

Zo werd windenergie breed geaccepteerd en toegepast nadat internationale normen en certificering voor windturbines werden ingevoerd. Hierdoor werd de technologie institutioneel verankerd en genormaliseerd, wat de opschaling naar grootschalige toepassing mogelijk maakte. Wat in deze context ook van belang was is dat, omdat Europese landen begonnen met het maken van routekaarten, waarin ze aangaven hoeveel megawatt ze in 2030 en 2050 geïnstalleerd wilden hebben (de aanloop naar wat nu de Esbjerg en Ostend declarations zijn) en wanneer ze daarvoor tenders zouden uitschrijven voor investeringszekerheid heeft gezorgd, waardoor opschaling mogelijk was.

2.2 Routes van opschaling

Van den Broek et al. (2020) introduceren daarnaast een raamwerk die vier verschillende routes van opschaling weergeeft (zie Figuur 1).

- **Groei:** hier vindt opschaling plaats door uitbreiding van het netwerk en verspreiding van de oplossing naar meerdere locaties. De focus ligt op verbreding en inbedding. Een kenmerk van opschaling door groei is dat betrokken partijen en locaties toenemen.

Voorbeeld: Door subsidies en dalende prijzen zijn zonnepanelen in Nederland exponentieel gegroeid van enkele duizenden naar ruim 2 miljoen woningen. Het mechanisme is hier vooral financiële stimulans en schaalvoordelen in productie.

- **Replicatie:** Replicatie houdt in dat een succesvolle innovatie wordt herhaald in andere contexten of regio's. Dit gebeurt vaak door het delen van kennis, het aanpassen van het model aan lokale omstandigheden, en het opzetten van nieuwe samenwerkingsverbanden.

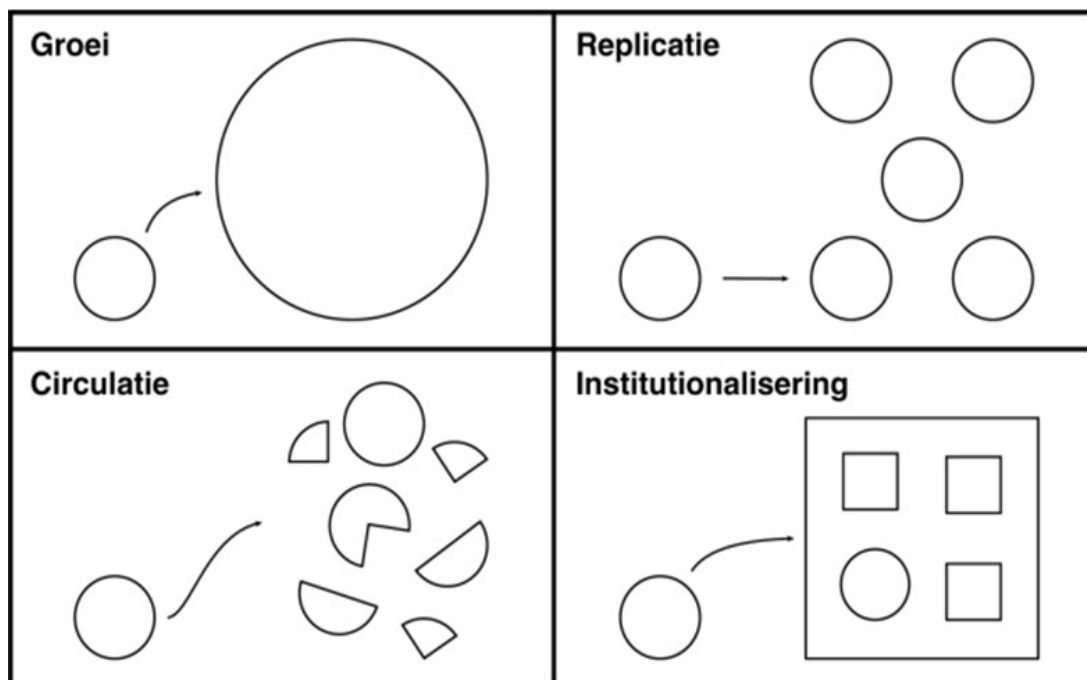
Voorbeeld: Het succes van het Deense windenergiecluster werd gerepliceerd in Duitsland en het VK, waarbij lokale bedrijven en overheden het model aanpasten aan hun eigen context. Het mechanisme is kennisoverdracht en aanpassing (Karnoe & Garud, 2012).

- **Circulatie:** Circulatie betekent dat losse elementen van een innovatie (zoals technologie, kennis of methoden) worden verspreid en toegepast in andere sectoren of regio's, zonder dat het hele systeem wordt gekopieerd. Dit is met name relevant waar het niet mogelijk is om een innovatie in zijn geheel te implementeren in een nieuwe contexten.

Voorbeeld: De Lithium-ion batterijtechnologie, oorspronkelijk ontwikkeld voor consumentenelektronica, wordt nu toegepast in elektrische voertuigen, thuisbatterijen, grootschalige energieopslag en zelfs in netbalancing. Het mechanisme is dat een technologische bouwsteen (de batterij) circuleert tussen sectoren en toepassingen, waarbij telkens aanpassingen worden gedaan aan capaciteit, veiligheid en levensduur.

- **Institutionalisering:** Institutionalisering betekent dat een innovatie wordt verankerd in regelgeving, standaarden, beleid of routines, waardoor het steeds breder wordt toegepast en genormaliseerd.

Voorbeeld: Internationale normen en certificering voor windturbines zorgen ervoor dat technologie breed wordt toegepast en geaccepteerd. Het mechanisme is internationale samenwerking en technische standaardisatie.



Figuur 1 : Vier routes van opschaling (Giller et al., 2024; Van den Broek et al., 2020)

In deze vier opschalingsroutes zien we enige overlap terug met de eerder beschreven opschalingsdimensies. Zo is de opschalingsroute ‘groei’ sterk gerelateerd aan kwantitatieve opschalingsdimensie. En zien we ‘institutionalisering’ terug in beide indelingen. Hartmann en Linn (2008) maken daarbij ook de koppeling tussen de organisatorische opschalingsdimensie en de opschalingsroutes ‘groei’ (bijvoorbeeld het opschalen van een pilot binnen een organisatie) en ‘replicatie’ (pilot wordt overgenomen door andere organisaties). Ook stellen ze dat organisatorische opschaling kan worden geïnitieerd en gecoördineerd vanuit een hiërarchische (top-down), individualistische (bottom-up) of relationele (community) setting.

Tot slot wordt er in sommige literatuur ook onderscheid gemaakt tussen opschaling en diffusie, waarbij opschaling als een doelbewust en gestuurd proces wordt omschreven, en diffusie wordt beschouwd als een grotendeels passief proces waarbij innovaties zich ‘spontaan en explosief’ verspreiden (Breaugh et al., 2021; Hartmann & Linn, 2008). De vraag is echter in hoeverre dit strikte onderscheid houdbaar is. Diffusietheorie (o.a. Rogers (1962)) biedt namelijk verschillende verklaringen voor de mate van adoptie, die aantonen dat ook diffusie niet vanzelf hoeft te gaan en beïnvloed wordt door uiteenlopende factoren. In die zin kan diffusie worden gezien als een specifieke invulling van opschaling, primair gericht op kwantitatieve verspreiding van producten en diensten.¹

¹ Deze discussie wordt ook gevoerd in het kader van nieuwere “transition theories”. Het Multi-Level-Perspective (MLP) heeft de focus op emergentie, terwijl een benadering als Mission Innovation Systems (MIS) aangeeft dat om een missie te voltooien er een continu proces nodig is van afstemmen over het doel en welke middelen daarvoor ingezet moeten worden.

2.3 Contexten van opschaling

Opschaling van innovatie vindt plaats in uiteenlopende contexten, elk met een eigen dynamiek, betrokken actoren en succesfactoren. Om de complexiteit van opschaling te kunnen duiden, is het van belang onderscheid te maken tussen verschillende contexten waarin opschaling zich manifesteert. In de innovatieliteratuur zijn vier hoofdcontexten te onderscheiden die elk voortbouwen op specifieke theoretische stromingen. Door deze contexten te expliciteren, wordt het mogelijk om gericht te analyseren wat er precies opschaaft, welke mechanismen daarbij een rol spelen en welke handelingsperspectieven relevant zijn voor onderzoekers, beleidsmakers en ondernemers. In het vervolg van deze sectie worden deze vier opschalingscontexten kort geïntroduceerd, steeds met verwijzing naar de onderliggende literatuurstromingen die het analytisch kader vormen.

- **Opschaling van nieuwe producten en diensten:** Deze context is direct gebaseerd op de adoptie- en diffusietheorie van Everett Rogers (1962). Rogers beschrijft hoe innovaties zich verspreiden van een kleine groep pioniers naar brede marktadoptie, via verschillende gebruikersgroepen (innovators, early adopters, early majority, late majority, laggards). De theorie verklaart de snelheid en het patroon van adoptie aan de hand van factoren als relatief voordeel, compatibiliteit, complexiteit, testbaarheid en observeerbaarheid. Dit perspectief is fundamenteel voor het begrijpen van kwantitatieve opschaling en de verspreiding van innovaties binnen een populatie.

Voorbeeld: De introductie van de elektrische auto: eerst gekocht door innovators en early adopters, later massaal door de consumenten.

- **Opschaling van bedrijven en businessmodellen:** Deze context bouwt voort op stromingen rond business model innovatie (Osterwalder & Pigneur, 2010; Ries, 2011). Hier ligt de nadruk op het ontwikkelen, valideren en opschalen van waardeproposities en businessmodellen, met aandacht voor de overgang van startup naar scale-up en de uitdagingen van de 'valley of death'. De opschalingsdimensies (kwantitatief, functioneel, organisatorisch, institutioneel) worden toegepast op de groei van bedrijven, hun interne organisatie en marktbereik.

Voorbeeld: Een startup die na succesvolle validatie van haar product doorgroeit tot scale-up en internationaal uitbreidt.

- **Opschaling van industrieën:** Deze context is gebaseerd op de industrie- en dominant design theorie (Utterback, 1975; Abernathy & Utterback, 1978). Deze stroming beschrijft hoe industrieën evolueren via fasen van productinnovatie naar procesinnovatie, met aandacht voor het ontstaan van dominante ontwerpen, standaardisatie en schaalvoordelen. Het model verklaart hoe opschaling in industrieën leidt tot massaproductie, consolidatie en het ontstaan van sectorbrede standaarden.

Voorbeeld: De groei van de offshore windindustrie, waarbij kleine bedrijven en uitvinders plaatsmaken voor grote energiebedrijven en internationale consortia. Of meer specifiek de switch van het kiezen van een ontwerp (drie bladen) naar de focus op het vergroten van de turbine en daarbij ook het organisatorisch proces van overnames zoals het samengaan van Siemens en Gamesa.

- **Opschaling van innovatiesystemen en niches:** Deze context is gestoeld op de innovatiesysteemtheorie (Freeman, 1987; Lundvall, 1992; Malerba, 2002; Hekkert et al., 2007; Geels, 2002). Deze stroming benadrukt dat innovatie ontstaat door interactie

tussen actoren, netwerken, infrastructuur en instituties. Opschaling wordt hier gezien als de versterking van het gehele systeem. Dit perspectief maakt het mogelijk om opschaling te begrijpen als een collectief, systemisch proces.

Voorbeeld: De ontwikkeling van het Deense innovatiesysteem rond windenergie, waarin overheid, bedrijven en universiteiten samenwerkten aan kennis, beleid en marktontwikkeling.

Hoewel de vier onderscheiden opschalingscontexten elk hun eigen dynamiek en focus hebben, is er een conceptuele overlap met de eerder besproken dimensies en routes van opschaling. In elke context komen verschillende dimensies (zoals kwantitatief, organisatorisch, functioneel en institutioneel) en routes (groei, replicatie, circulatie, institutionalisering) in meer of mindere mate terug. Zo is bijvoorbeeld kwantitatieve opschaling vooral zichtbaar in de product- en industriecontext, terwijl institutionele opschaling en institutionalisering juist een grotere rol spelen bij industrieën en innovatiesystemen. De context bepaalt daarmee welke dimensies en routes dominant zijn, maar in de praktijk zijn deze perspectieven sterk met elkaar verweven.

2.4 Naar een integraal begrip van opschaling

Het begrip opschaling kan vanuit verschillende perspectieven worden benaderd: dimensies, routes en contexten. Elk perspectief biedt unieke inzichten, maar kent ook beperkingen.

Dimensies van opschaling (zoals kwantitatief, functioneel, organisatorisch en institutioneel) maken het mogelijk om de verschillende vormen van groei en verankering van innovaties te onderscheiden. Het voordeel van dit perspectief is dat het nuance aanbrengt in wat er precies verandert tijdens opschaling. Het nadeel is dat het soms abstract blijft en onvoldoende rekening houdt met de dynamiek van het opschalingsproces in de praktijk.

Routes van opschaling (groei, replicatie, circulatie, institutionalisering) bieden inzicht in de mechanismen en paden waarlangs innovaties zich verspreiden. Dit perspectief is vooral nuttig om strategieën te formuleren voor het vergroten van impact. Een nadeel is dat routes in de praktijk vaak door elkaar lopen en niet altijd duidelijk te scheiden zijn, waardoor het risico bestaat dat het model te simplistisch wordt toegepast.

Contexten van opschaling (product, bedrijf, industrie, innovatiesysteem) benadrukken dat opschaling afhankelijk is van de omgeving waarin een innovatie zich ontwikkelt. Dit perspectief helpt om de relevante actoren, dynamieken en succesfactoren per situatie te identificeren. Het voordeel is dat het model aansluit bij de praktijk en maatwerk mogelijk maakt. Een nadeel is dat het onderscheid tussen contexten soms kunstmatig is, omdat opschaling vaak over de grenzen van deze contexten heen plaatsvindt.

Samenvattend bieden de verschillende perspectieven samen een rijk en veelzijdig begrippenkader voor opschaling. De uitdaging is om ze niet als losse modellen te zien, maar als complementaire lenzen die samen een integraal en handelingsgericht begrip van opschaling mogelijk maken.

3 Begrippenkader opschaling

In het voorgaande hoofdstuk is duidelijk geworden dat opschaling van innovatie een veelzijdig en complex proces is, dat vanuit verschillende perspectieven kan worden benaderd. Hoofdstuk 2 liet zien dat de perspectieven van dimensies, routes en contexten elk unieke inzichten bieden, maar ook deels overlappen en soms tot verwarring kunnen leiden wanneer ze los van elkaar worden toegepast. Om deze fragmentatie te voorkomen en het begrip opschaling zowel analytisch als praktisch hanteerbaar te maken, introduceren we in dit hoofdstuk een uniform kader waarin de sterke punten van elk perspectief worden gecombineerd.

Dit kader is tot stand gekomen door de perspectieven uit Hoofdstuk 2 kritisch naast elkaar te leggen en te analyseren waar overlap en hiaten zaten. Door context als startpunt te nemen, dimensies als verdiepende lens te gebruiken en routes als handelingsperspectief te positioneren, minimaliseren we dubbelures en benutten we de complementariteit van de benaderingen. Het resultaat is een integraal raamwerk dat zowel analyse als actie ondersteunt, en dat toepasbaar is op opschalingsvraagstukken rondom technologische innovatieprocessen.

Door eerst de context te bepalen, ontstaat er direct helderheid over wie betrokken zijn en welke randvoorwaarden gelden. Vervolgens helpen de dimensies van opschaling om het begrip verder te verdiepen: ze maken zichtbaar dat opschaling meer is dan alleen kwantitatieve groei, en omvat ook functionele, organisatorische en institutionele veranderingen. Tot slot bieden de routes van opschaling inzicht in de mechanismen en strategieën waarmee opschaling gerealiseerd kan worden, zoals groei, replicatie, circulatie en institutionalisering.

De hiervoor beschreven dimensies en routes van opschaling kunnen plaatsvinden binnen verschillende innovatiecontexten. Voor elk van deze contexten worden de volgende vragen beantwoord:

- Wat schaaft er op?
- Hoe schaaft het op?
- Welke opschalingsdimensies en -routes verwachten we hier terug te zien?
- Wat is het relevante handelingsperspectief?

Zie Tabel 1 voor een schematisch overzicht met enkele voorbeelden. In de navolgende secties wordt het kader per opschalingscontext nader uitgewerkt.² Tabel 2 beschrijft de opschalingscontexten in termen van drie ontwikkelingsfasen.

² Hoewel dit rapport de focus legt op vier innovatiecontexten, sluit dit niet uit dat andere contexten aan opschaling verbonden kunnen worden. De ontwikkeling van technologie (zoals bijvoorbeeld via Technology Readiness Levels) nemen we daarbij bewust niet mee als een context van opschaling. TRL-stappen beschrijven primair een toestand van een technologie en bieden weinig inzicht in de wijze waarop de technologie 'volwassen' wordt. Dit proces wordt tot op zekere hoogte wel beschreven in de context van product/dienst en bedrijf/business case maar een echte engineering-bik ontbreekt in deze beschouwing.

Tabel 1: Integraal begrippenkader Opschaling van Technologische Innovatie - I

CONTEXT	WAT SCHAALT ER OP?	HOE SCHAALT HET OP?	HANDELINGSPERSPECTIEVEN?
	KERNDIMENSIES	VOORKEURSRoutes	SLEUTELACTOREN
PRODUCT / DIENST	Gebruik van het product, verspreiding onder gebruikers, de adoptiegraad <i>Kwantitatief (adoptie), evt. functioneel</i>	Van nichegebruikers (innovators en early adopters) naar brede adoptie en marktsaturatie. <i>Groei, Replicatie, (later) Institutionalisering</i>	Ontwerp van producten, marketing, distributie, prijsstelling bepalen. <i>Marketing & Sales, Distributiepartners, Gebruikers</i>
BEDRIJF / BUSINESS-MODEL	Omzet, klanten, medewerkers, validatie businessmodel, productiecapaciteit <i>Organisatorisch, Functioneel, Kwantitatief</i>	Van een startup met een idee/prototype, via validatie van waardepropositie naar structurele groei en marktexpansie (scale-up); richting meer marktaandeel, winstgevendheid en duurzame marktpositie. <i>Groei, Replicatie, Circulatie (licenties/partnerships), Institutionalisering (standaarden/compliance)</i>	Investeringsbeslissingen, Organisatie-ontwerp, Productiecapaciteit uitbreiden, Partnerschappen aangaan, Governance inrichten. <i>Management, Investeerders, Ondernemers</i>
INDUSTRIE / WAARDE-KETEN	Aantal bedrijven, type bedrijven, dominant technologieën, standaarden. <i>Organisatorisch (waardeketens), Institutioneel (standaarden), Kwantitatief (capaciteit)</i>	Van introductie (productinnovatie, diversiteit) via groeifase (dominant design en standaardisatie) naar volwassenheid (consolidatie, procesinnovatie). <i>Institutionalisering (dominant design), Groei, Replicatie (naar regio's), Circulatie (procesprincipes)</i>	Programmering van beleid, Standaardisatie en certificering, Ketenarchitectuur en contractering, Investeringsbeslissingen (infra), prioriteren innovatie-agenda's, compliance regelgeving vormgeven. <i>Grote bedrijven, Ketenpartners, Brancheorganisaties, Overheden</i>
INNOVATIE-SYSTEEM	De collectieve capaciteit van actoren, netwerken en instituties om innovaties te ontwikkelen, te verspreiden en te verankeren. <i>Institutioneel (beleid/normen), Organisatorisch (netwerken), Functioneel (systeemfuncties), Kwantitatief (pilots/infrastructuur)</i>	Van technologische niches (experimentele, 'beschermde' ruimte) naar regime-introductie en uiteindelijke brede institutionalisering. <i>Groei (systeemfuncties), Replicatie (pilots), Circulatie (kennis/bouwstenen), Institutionalisering (beleid/standaarden)</i>	Ontwikkeling van beleid, financieringsstrategieën, opzetten samenwerkingsnetwerken, pilots en experimenten organiseren, infrastructuur bouwen. <i>Overheden, Kennisinstituten, Grote bedrijven, Netwerkorganisaties, Financiers</i>

Tabel 2: Integraal begrippenkader Opschaling van Technologische Innovatie - II

OPSCHALINGSCONTEXT	FASE 1 – EXPLORATIE & NICHEVORMING	FASE 2 – VERSNELLING & OPSCHALING	FASE 3 – CONSOLIDATIE & INSTITUTIONALISERING
PRODUCT / DIENST	Adoptiekenmerken bepalen de eerste acceptatie: relatief voordeel, compatibiliteit, complexiteit, testbaarheid, observeerbaarheid. Focus op pilots, experimenten en eerste gebruikersgroepen (innovators, early adopters).	Versnelling door het bereiken van kritieke massa (early/late majority), schaalvergroting en standaardisatie van het product. S-curve van adoptie, zichtbare groei in gebruik en marktpenetratie.	Product wordt standaardoplossing; institutionalisering via normen, certificering en regelgeving. Adoptie is breed, innovatie is ingebed in routines en beleid.
BEDRIJF / BUSINESSMODEL	Validatie van waardepropositie, experimenteren met businessmodel. Ondernemerschap, zoeken naar markt-fit, afhankelijkheid van subsidies/projectfinanciering.	Opschalen van organisatie, marktpositie en productiecapaciteit. Verticale integratie, internationale expansie. Overbruggen van 'valley of death'.	Stabilisatie van businessmodel, institutionele inbedding (regulering, standaarden, sectorale afspraken). Structurele marktpositie, minder afhankelijk van subsidies.
INDUSTRIE / WAARDEKETEN	Veel variatie in ontwerpen, technologieën en spelers. Fragmentatie, experimenteren, zoeken naar werkbare configuraties.	Ontstaan van dominant design, gestandaardiseerde productie. Consolidatie van bedrijven. Ontwikkeling infrastructuur.	Dominante spelers, hoge toetredingsdrempels, procesoptimalisatie. Institutionalisering via normen, certificering, infrastructuur.
INNOVATIESYSTEEM / NICHE	Systeem is fragiel, afhankelijk van publieke ondersteuning. Innovatiefuncties: kennisontwikkeling, experimenteren, netwerkvorming, legitimatie.	Replicatie van succesvolle pilots en beleid. Innovatiefuncties: richting geven en mobiliseren van middelen. Systeemgroei door versterking van systeemfuncties.	Institutionalisering van routines en netwerken. Technologie is onderdeel van regelgeving en infrastructuur. Systeemfuncties: marktontwikkeling.

3.1 Producten en diensten

Opschaling in de context van nieuwe producten en diensten gaat primair over **gebruikersadoptie**: de mate waarin een innovatie zich verspreidt binnen een populatie. De adoptie- en diffusietheorie van Everett Rogers (1962) vormt een belangrijk referentiekader om te begrijpen hoe innovaties zich van kleine niches naar brede markten ontwikkelen. Zijn theorie laat zien dat de verspreiding van innovaties sterk wordt beïnvloed door kenmerken van de innovatie zelf, de gebruikersgroepen en de sociale context waarin zij zich bevinden.

Wat schaalt er op?

In deze context schaalt de adoptie van een innovatie op. Het gaat daarbij specifiek om het aantal gebruikers dat het product of de dienst implementeert en de snelheid waarmee dit proces plaatsvindt. Diffusie verwijst hierbij naar het proces waarin een innovatie zich van één of enkele gebruikers verspreidt naar steeds grotere groepen. Adoptie is de individuele keuze van een persoon of organisatie om het product daadwerkelijk te gaan gebruiken. Rogers laat zien dat dit geen spontaan proces is. De verspreiding wordt beïnvloed door communicatie tussen gebruikers, netwerken en change agents die bewust proberen adoptie te stimuleren.

Hoe schaalt het op?

Opschaling van nieuwe producten of diensten loopt van kleine, risicobereide gebruikersgroepen naar brede maatschappelijke of marktadoptie. Rogers onderscheidt hierin vijf verschillende groepen gebruikers, ieder met een verschillende bereidheid en andere motieven om een nieuw product te adopteren:

- De eerste gebruikers zijn de **innovators**. Zij zijn bereid risico's te nemen en investeren vaak als eersten in een nieuw, soms nog onvolledig ontwikkeld en kostbaar prototype. Hun vroege gebruik levert waardevolle terugkoppeling op voor verdere productontwikkeling.
- Daarna volgt de groep **early adopters**, ofwel de pioniers. Deze gebruikers zijn cruciaal voor het succes van de innovatie. Zij fungeren als opinieleiders en hebben een belangrijke voorbeeldfunctie richting andere potentiële gebruikers. Wanneer zij de innovatie omarmen, legitimeren zij deze in het bredere netwerk.
- Zodra de innovatie zich heeft bewezen bij de pioniers, wordt deze aantrekkelijk voor de **early majority**. Deze groep wil het product wel graag gebruiken, maar is voorzichtiger en meer risicomijdend. Zij stappen pas in wanneer duidelijk is dat de innovatie betrouwbaar is en meerwaarde biedt.
- Wanneer ongeveer de helft van de potentiële gebruikers de innovatie heeft omarmd en deze 'gebruikelijk' begint te worden, volgt de **late majority**. Deze groep is sceptischer en adopteert pas wanneer er voldoende sociale druk is of wanneer het product de standaard is geworden.
- Tot slot is er de groep **laggards**. Zij hechten sterk aan bestaande routines en producten en nemen een innovatie pas over wanneer alternatieven verdwijnen of wanneer adoptie onvermijdelijk wordt.

De cumulatieve adoptie volgt doorgaans een S-curve (zie Figuur 2): een trage beginfase, een versnellingsfase, en een afvlakkende fase richting marktsaturatie. Het bereiken van kritieke massa is cruciaal, vanaf dat moment – meestal tijdens de overgang van de early adopters naar de early majority – verspreidt de innovatie zich grotendeels autonoom, bijvoorbeeld via sociale beïnvloeding of mond-tot-mondreclame. De snelheid waarmee het gebruik van nieuwe producten of diensten opschaaft is niet voor elke innovatie gelijk. Rogers identificeert vijf factoren die van invloed zijn op de adoptiesnelheid. De bereidheid tot adoptie neemt toe naar mate een innovatie positiever 'scoort' op deze criteria. Zie Tabel 3.

Tabel 3: Adoptiecriteria bepalen de bereidheid van gebruikers om een nieuw product of dienst te omarmen.

ADOPTIECRITERIA	BESCHRIJVING	EFFECT OP ADOPTIE
RELATIEF VOORDEEL	Hoeveel beter de innovatie is ten opzichte van bestaande alternatieven.	Hoe groter het voordeel, hoe sneller de adoptie.
COMPATIBILITEIT	De mate waarin de innovatie aansluit bij bestaande waarden, ervaringen en behoeften van gebruikers.	Hoe beter de aansluiting, hoe sneller de adoptie.
COMPLEXITEIT	Hoe moeilijk de innovatie te begrijpen of te gebruiken is.	Hoe eenvoudiger, hoe sneller de adoptie.
TESTBAARHEID	De mate waarin de innovatie op kleine schaal uitgetest kan worden.	Hoe makkelijker te testen, hoe sneller de adoptie.
OBSERVEERBAARHEID	De mate waarin zichtbaar is hoe anderen de innovatie gebruiken en welke voordelen zij ervaren.	Hoe zichtbaarder, hoe sneller de adoptie.

Welke dimensies en routes zien we terug?

Samenvattend gaat Rogers' adoptie- en diffusietheorie dus in op het opschalingsproces vanuit een productcontext. Het beschrijft hoe innovatieve producten en diensten zich door een netwerk van potentiële adopters verspreiden en maatschappelijk geïmplementeerd worden. De richting van deze opschaling loopt via een kleine groep initiële gebruikers naar bredere en maatschappelijke adoptie, tot (markt)saturatie is bereikt.

De productcontext is daarmee sterk verweven met een specifieke dimensie van opschaling:

- **Kwantitatieve (horizontale) opschaling:** meer gebruikers, bredere marktverspreiding, uitbreiding naar nieuwe doelgroepen en marktsegmenten.

Hoewel Rogers zijn theorie primair kwantitatieve verspreiding verklaart, zijn verschillende opschalingsroutes hierin te herkennen:

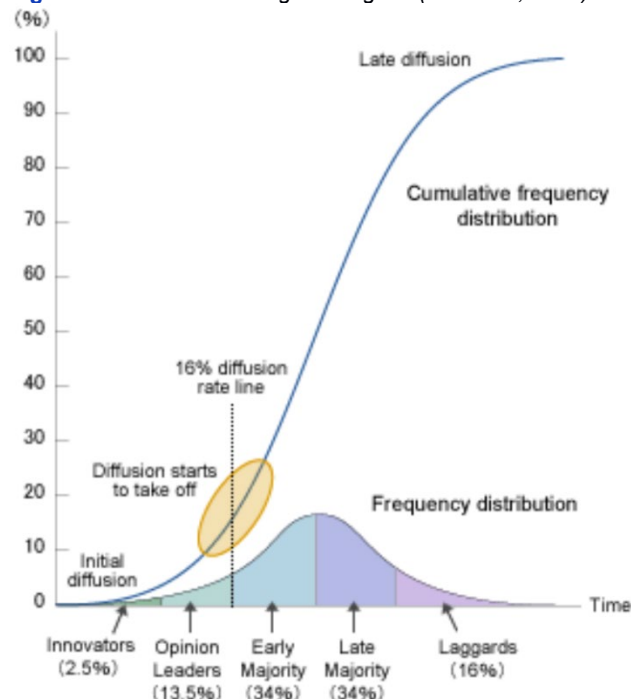
- **Groei:** sluit aan bij de uitbreiding van adoptie van innovators naar bredere gebruikersgroepen, waarbij het netwerk van gebruikers en de zichtbaarheid van de innovatie toenemen.³
- **Replicatie:** herkenbaar wanneer een innovatie wordt toegepast in nieuwe contexten of segmenten, waarbij soms aanpassingen nodig zijn om aan lokale behoeften te voldoen.

³ Reflectie van reviewer Roos de Jonge: Interessante vraag is hoe dit werkt als je geen gebruikelijke groep consumenten hebt, maar eerder landen die middels beleidskeuzes andere landen kopiëren, waarbij de landen zelf eigenlijk de early adopters kunnen zijn in tegenstelling tot individuele bedrijven of gebruikers. Dit ligt eigenlijk meer op het niveau van het innovatiesysteem..

- **Circulatie:** doet zich voor wanneer niet het volledige product, maar specifieke onderdelen of principes zich verspreiden en door gebruikers in hun eigen context worden geïnterpreteerd of toegepast.
- **Institutionalisering:** correspondeert met de latere fasen van diffusie, waarin een innovatie gebruikelijk wordt, ingebed raakt in routines en soms wordt ondersteund door normen of regelgeving.

Deze opschalingsroutes laten zien dat diffusie in de praktijk meer omvat dan alleen groei in aantallen; het betreft ook verbreding, aanpassing en structurele verankering van innovaties.

Figuur 2: Diffusiecurve volgens Roger's (D'Auoust, 2012).



Handelingsperspectief

Relevante actoren: Technologieontwikkelaars, leveranciers, marketing- en salespartners, gebruikers, beleidsmakers.

Type beslissingen: In deze context draait opschaling vooral om het vergroten van gebruikersadoptie. Belangrijke beslissingen zijn: investeren in schaalbare en betrouwbare productontwikkeling (kwantitatieve dimensie), het modulair ontwerpen van producten voor eenvoudige uitrol (route: groei en replicatie), en het vroegtijdig anticiperen op normering en certificering (institutionalisering). Het is daarbij essentieel om gebruikers goed te kennen en actief te betrekken bij het opschalingsproces. Flexibiliteit in strategie is belangrijk, omdat opschaling vaak gepaard gaat met onverwachte uitdagingen en leermomenten. In deze context draait het om het sturen op kwantitatieve groei, replicatie en uiteindelijk institutionalisering, waarbij gebruikersparticipatie een doorslaggevende rol speelt.

3.2 Bedrijven en businessmodellen

Ook binnen de bedrijfscontext is opschaling een belangrijk thema, met name voor ondernemingen die innovatieve producten of diensten ontwikkelen in een dynamische markt. Bedrijven staan hierbij voor de uitdaging om niet alleen hun technologie of product te ontwikkelen, maar ook hun interne organisatie, marktbereik en verdienmodel op te schalen.

Wat schaal er op?

Opschaling binnen bedrijven kent verschillende vormen en dimensies. Allereerst kan een bedrijf kwantitatief groeien: meer omzet, hogere winst, een groeiend aantal klanten, uitbreiding van het personeelsbestand en een breder aanbod aan producten of diensten. Deze groei gaat vaak samen met de verdere ontwikkeling en validatie van het businessmodel; een schaalbaar businessmodel betekent dat de waardepropositie aan een grotere doelgroep kan worden aangeboden zonder dat de kosten onevenredig toenemen. Dit raakt direct aan de kwantitatieve én functionele dimensie van opschaling: niet alleen het aantal klanten groeit, maar vaak ook het aanbod en de reikwijdte van producten en diensten. Door meer hernieuwbare energiebronnen die flexibele opwek hebben, ontstaat de behoefte aan het controleren van de toevoer en dus aan batterijen, elektrolyzers en demand flexibility.

Daarnaast betekent opschaling in de bedrijfscontext dat de onderliggende technologie of het product verder wordt ontwikkeld, geoptimaliseerd en in grotere volumes geproduceerd. Dit vereist investeringen in productiecapaciteit, logistiek, distributie en kwaliteitsborging. Hier komt de organisatorische dimensie in beeld: bedrijven moeten hun interne processen, samenwerkingen en structuren versterken om deze groei te faciliteren. In sommige gevallen is ook institutionele opschaling nodig, bijvoorbeeld wanneer bedrijven actief bijdragen aan het opstellen van nieuwe standaarden of regelgeving om verdere groei mogelijk te maken.

Voor startups en scale-ups zijn validatie en opschaling cruciale fasen in hun ontwikkelingstraject. Een startup wordt doorgaans omschreven als een innovatief bedrijf, meestal jonger dan vijf jaar, dat zich kenmerkt door een kennisintensief profiel en een hoge mate van technologische en/of marktgerelateerde onzekerheid (Ries, 2011). In de beginfase richt een startup zich op het ontwikkelen en testen van een waardepropositie: welk probleem wordt opgelost, voor wie, en op welke manier? Dit proces vraagt om veel experimenteren, bijstellen en leren van feedback uit de markt.

Zodra een waardepropositie gevalideerd is oftewel is bewezen dat het product aansluit bij de behoeften van een substantiële groep klanten—komt het bedrijf in de scale-upfase terecht. In deze fase verschuift de focus van experimenteren naar opschalen: het bedrijf investeert dan gericht in groei, bijvoorbeeld door het aantrekken van extra personeel, het uitbreiden naar nieuwe markten of het vergroten van de productiecapaciteit. Dit brengt nieuwe uitdagingen met zich mee, zoals het organiseren van interne processen, het waarborgen van kwaliteit op grotere schaal en het aantrekken van voldoende financiering.

Tussen de startup- en scale-upfase bevindt zich de beruchte ‘valley of death’: een periode waarin de kosten voor ontwikkeling en marktintroductie vaak hoog zijn, terwijl de inkomsten nog onvoldoende zijn om deze te dekken (Auerswald & Branscomb, 2003). Het succesvol overbruggen van deze fase vraagt om een integrale benadering van opschaling, waarbij niet alleen kwantitatieve groei centraal staat, maar ook functionele, organisatorische en soms institutionele aanpassingen nodig zijn om duurzaam te kunnen doorgroeien.

Hoe schaal het op?

Opschaling binnen bedrijven is doorgaans gericht op het vergroten van marktaandeel en winstgevendheid, en op het bereiken en behouden van een grotere doelgroep waarvoor de waardepropositie relevant is. Bedrijven groeien dus niet alleen 'breder' (meer klanten, meer producten), maar ook 'dieper' (hogere klantwaarde, sterkere merkpositie).

Voor startups en scale-ups is deze richting vaak gefaseerd. Aanvankelijk ligt de focus op het vinden en valideren van een marktprobleem (problem-solution fit) en de bijpassende oplossing. Vervolgens wordt opgeschaald richting bredere marktintroductie (product-market fit) en daarna structurele groei (scale-up) (Ries, 2011).

De opschalingsrichting is daarbij niet altijd lineair: bedrijven kunnen ook tijdelijk inkrimpen of hun focus bijstellen ('pivotten') als blijkt dat marktomstandigheden veranderen of de waardepropositie niet (meer) aansluit bij de doelgroep. In dat geval kan scaling down of herstructurering noodzakelijk zijn om opnieuw te focussen en weer duurzaam te groeien.

Welke dimensies en routes zien we terug?

In de bedrijfscontext zijn verschillende opschalingsdimensies en -routes herkenbaar. Bedrijven benutten vaak:

- **Kwantitatieve (horizontale) opschaling:** meer klanten, bredere markttoegang, uitbreiding naar nieuwe regio's.
- **Functionele opschaling:** uitbreiding van de propositie, bijvoorbeeld door aanvullende producten of diensten te ontwikkelen of nieuwe markten te betreden.
- **Organisatorische opschaling:** versterking van interne capaciteit en externe samenwerkingsverbanden, bijvoorbeeld via strategische partnerschappen, investeerdersnetwerken of consortiumvorming.
- **Politieke/institutionele opschaling:** in sommige gevallen proberen bedrijven institutionele belemmeringen weg te nemen door regelgeving te beïnvloeden of mee te werken aan de ontwikkeling van technologische standaarden (bijvoorbeeld in opkomende technologieën zoals AI of biotechnologie).

Er zijn in de bedrijfscontext verschillende opschalingsroutes zichtbaar:

- **Groei:** bedrijven breiden hun activiteiten en marktpositie uit door meer klanten aan te trekken, omzet te verhogen en nieuwe marktsegmenten te betreden. Deze route is kenmerkend voor startups die na het vinden van product-market fit doorstoten naar de scale-upfase.
- **Replicatie:** succesvolle bedrijfsmodellen, processen of producten worden herhaald in andere geografische gebieden of marktsegmenten. Franchisemodellen, regionale expansie of het uitrollen van identieke vestigingen zijn typische voorbeelden.
- **Circulatie:** specifieke onderdelen van een innovatie—zoals technologiecomponenten, data-oplossingen of ontwerpen—worden gedeeld of gelicenseerd zodat andere bedrijven

ze kunnen toepassen. Dit versnelt verspreiding zonder dat het oorspronkelijke bedrijf zelf volledig hoeft te groeien.

- **Institutionalisering:** bedrijven verankeren hun innovatie in standaarden, waardeketens, regulering of sectorbrede afspraken. Hierbij kan worden gedacht aan het vestigen van nieuwe industriestandaarden, het creëren van platformecosystemen of het beïnvloeden van regelgeving zodat de innovatie breed toepasbaar wordt.

Handelingsperspectief

Relevante actoren: Ondernemers, management, investeerders, partners, beleidsmakers.

Type beslissingen: Bedrijven moeten keuzes maken over het opschalen van hun organisatie, marktpositie en businessmodel. In de exploratiefase zijn ondernemerschap en validatie van de waardepropositie leidend (functionele en organisatorische dimensie). In de opschalingsfase draait het om investeren in interne capaciteit, partnerschappen en internationale expansie (kwantitatieve en organisatorische dimensie; routes: groei, replicatie, circulatie). Cruciale beslissingen zijn hoe kapitaal aan te trekken, welke activiteiten intern of via partners worden opgeschaald, en hoe risico's worden gespreid. In de consolidatiefase is het stabiliseren van het businessmodel en inbedding in regulering essentieel (institutionalisering).

3.3 Industrieën en waardeketens

Opschaling in de context van industrieën heeft betrekking op de ontwikkeling en groei van een gehele sector, in plaats van een individueel product of afzonderlijk bedrijf. Utterback (1975) en Abernathy & Utterback (1978) beschrijven hoe industrieën 'evolueren' via opeenvolgende fasen waarin de aard van innovatie verandert: van radicale productinnovatie in de vroege fase naar procesoptimalisatie en schaalvoordelen in latere fasen. Het opschalingsproces in industrieën wordt hiermee gekenmerkt door het ontstaan van dominante productontwerpen, standaardisatie en de industrialisering van productieprocessen.

Wat schaalst er op?

In de industriecontext schaalst vooral de capaciteit van de industrie om producten efficiënt, gestandaardiseerd en op grote schaal te produceren op. Waar in de vroege fase van een industrie veel variatie bestaat in productontwerpen en bedrijven experimenteren met verschillende configuraties, ontstaat gaandeweg convergentie richting één productvorm die breed wordt geaccepteerd als dominant design.

Vanaf het moment dat zo'n dominant design ontstaat, verschuift de aandacht van productinnovatie naar procesinnovatie. De bedrijven richten zich in toenemende mate op het verbeteren en opschalen van hun productieprocessen, bijvoorbeeld door automatisering, seriematige productie en logistieke optimalisatie. Hierdoor neemt de efficiëntie toe, dalen de kosten per geproduceerde eenheid en groeit de totale industriële productiecapaciteit. Tegelijkertijd verandert ook de structuur van de industrie: naarmate standaardisatie toeneemt en schaalvoordelen belangrijker worden, treden minder efficiënte bedrijven uit ('shake-out') en consolideren de marktposities van grotere spelers.

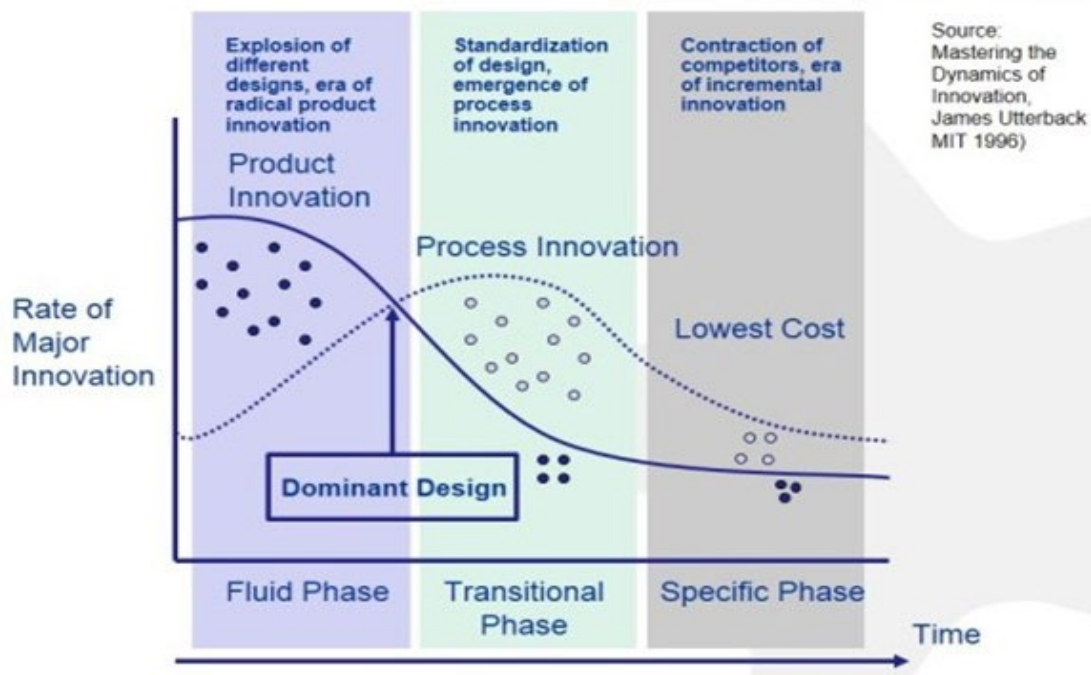
Opschaling in industrieën betreft daarmee dus niet alleen de verspreiding van een product (productcontext), maar vooral de evolutionaire ontwikkeling van product en proces in wisselwerking met de markten, producenten en gebruikers. Wat er dus in essentie opschaaft, is de industriële efficiëntie, productiecapaciteit en schaal van de sector als geheel.

Hoe schaaft het op?

De richting van opschaling in industrieën kan geduid worden volgens de fasen van de innovatielevenscyclus die Abernathy & Utterback (1978) onderscheiden. In de eerste fluid phase wordt de industrie gekenmerkt door een grote mate van variatie in productontwerpen en intensief experimenteren. Bedrijven zoeken naar werkbare configuraties en richten zich op radicale productinnovatie, omdat nog onduidelijk is welke productvorm uiteindelijk dominant wordt.

Zodra een bepaald ontwerp zich echter ontwikkelt tot dominant design, gaat de industrie over in de transitional phase. Dit vormt een kantelpunt: de nadruk verschuift van het vernieuwen van het product naar het optimaliseren van het productieproces. Bedrijven ontwikkelen steeds efficiëntere manieren om het dominante ontwerp te vervaardigen, en schaalvoordelen worden belangrijker. Uiteindelijk volgt de specific phase, waarin de industrie zich kenmerkt door sterk geoptimaliseerde productie, hoge volumes en concurrentie op prijs, efficiëntie en betrouwbaarheid. Tijdens deze fase vindt vaak een shake-out plaats: bedrijven die niet kunnen meeprofiten van schaalvoordelen of onvoldoende efficiënt kunnen produceren, verdwijnen uit de markt.

De richting van opschaling verloopt daarmee van variatie en experimenteren, via convergentie en procesoptimalisatie, naar grootschalige, gestandaardiseerde massaproductie en industriële consolidatie.



Figuur 3: Ontwikkelingsfasen volgens Utterback (1996)

Een voorbeeld van het opschalingsproces volgens de theorie van Utterback is de ontwikkeling van de auto-industrie in het begin van de twintigste eeuw. In de *fluid phase* werd de markt gekenmerkt door verschillende ontwerpen en benaderingen. In deze fase stond productinnovatie centraal: bedrijven experimenteerden volop met nieuwe technologieën en gebruikersinterfaces, en er was nog geen vaste standaard.

De overgang naar de *transitional phase* werd ingezet toen één specifieke productconfiguratie breed geaccepteerd raakte. De benzineauto met een verbrandingsmotor aan de voorzijde, pedaalbediening en een stuurwiel bleek het meest succesvol. Rond deze vaste structuur begon de nadruk te verschuiven van product- naar procesinnovatie: fabrikanten zoals Ford introduceerden de lopende band en schaalden de productie op om aan de toenemende vraag te voldoen. Efficiëntie en kostenverlaging werden leidende principes.

In de *specific phase* optimaliseerden bedrijven hun productieprocessen verder: ze automatiseerden waar mogelijk en verminderden variatie in productlijnen om schaalvoordelen te benutten. Concurrentie verschoof naar prijs, levertijd en betrouwbaarheid. Kleine producenten die zich niet konden aanpassen aan deze industriële standaarden en schaalvergroting verdwenen uit de markt.

Welke dimensies en routes zien we terug?

In de industriecontext zijn meerdere opschalingsdimensies en -routes te herkennen:

Opschalingsdimensies:

- **Kwantitatieve opschaling:** groei van productievolume, marktbereik en aantal gebruikers, massaproductie mogelijk door schaalvoordelen.
- **Organisatorische opschaling:** groei en consolidatie van bedrijven, opkomst van complexe waardeketens, industrialisering van productie.
- **Politieke/institutionele opschaling:** ontstaan van standaarden, certificering, regulering en industriële normen die het dominant design bestendigen.
- **Functionele opschaling** (in beperkte mate): verbreding van productlijnen of aanvullende diensten als gevolg van volwassenwording van de industrie.

Opschalingsroutes:

- **Groei:** toename in industriële capaciteit, marktvolume en aantal toepassingen, mede mogelijk gemaakt door standaardisatie en schaalvoordelen.
- **Replicatie:** verspreiding van succesvolle productontwerpen naar nieuwe markten of sectoren; aanpassing van het ontwerp voor andere toepassingen.
- **Circulatie:** verspreiding van onderdelen of principes uit een innovatie (bijv. assemblagetechnieken) die in meerdere bedrijven of submarkten worden toegepast.
- **Institutionalisering:** verankering van een dominant design in standaarden, regelgeving, opleidingen en routines; vorming van sectorale infrastructuren.

Handelingsperspectief

Relevante actoren: Industriebedrijven, ketenpartners, brancheorganisaties, overheden.

Type beslissingen: De vroege fase wordt gekenmerkt door variatie en experimenteren (organisatorische dimensie), gevolgd door het expliciet maken van dominant design en het investeren in productiecapaciteit en infrastructuur (kwantitatieve en organisatorische dimensie; routes: groei, institutionalisering). Opschaling op industriënniveau vraagt om coördinatie van beslissingen op het gebied van standaardisatie, (gedeelde) infrastructuur en ketenintegratie (circulatie). In de consolidatiefase ligt de nadruk op het verhogen van toetredingsdrempels, procesoptimalisatie en het borgen van standaarden.

3.4 Innovatiesystemen

Opschaling in de context van innovatiesystemen richt zich niet op één product, bedrijf of industrie, maar op de ontwikkeling van de 'collectieve capaciteit' van een systeem om innovaties te laten ontstaan, zich te laten verspreiden en uiteindelijk maatschappelijk te laten inbedden. Innovatiesystemen – of het nu gaat om nationale innovatiesystemen (Freeman,

1987; Lundvall, 1992), sectorale innovatiesystemen (Malerba, 2002) of technologische innovatiesystemen (Hekkert et al., 2007) – benadrukken dat innovatie geen geïsoleerde activiteit is, maar ontstaat door interactie tussen actoren, netwerken, infrastructuur en instituties. Vanuit dit perspectief gaat opschaling dus over het opbouwen en/of versterken van samenhang en functioneren van een ecosysteem dat in zijn geheel bepalend is voor de vernieuwing in onze economie en samenleving. In een belangrijk deel van deze literatuur ligt de nadruk op technologische innovatie. Met name de Technologische Innovatie Systeem benadering (TIS) stelt specifiek de vraag hoe innovatiesystemen ontstaan, ontwikkelen en opschalen. Deze sectie is gebaseerd op die literatuur.

Wat schaaft er op?

Opschaling binnen technologische innovatiesystemen draait om het versterken van de collectieve capaciteit van een netwerk van actoren, infrastructuren en instituties om technologische innovatie te ontwikkelen, te verspreiden en te verankeren. De literatuur benadrukt dat succesvolle opschaling niet het resultaat is van individuele acties, maar van het samenspel tussen actoren, netwerken en instituties. Dit samenspel wordt geconceptualiseerd in termen van activiteiten, ofwel systeemfuncties die essentieel zijn voor het voortbrengen van kennis en innovatie. Suurs (2009) onderscheidt zeven kernfuncties:

- **Ondernemersactiviteiten** – Initiatieven van bedrijven en organisaties die nieuwe technologieën ontwikkelen en toepassen.
- **Kennisontwikkeling** – Onderzoek en experimenten die technologische vooruitgang mogelijk maken.
- **Kennisdiffusie via netwerken** – Actieve uitwisseling van kennis tussen actoren, bijvoorbeeld via consortia, workshops en allianties.
- **Richting geven aan zoekprocessen** – Het formuleren van gedeelde visies, verwachtingen en doelen die investeringen en beleid sturen.
- **Marktcreatie** – Het ontwikkelen van nieuwe markten en het wegnemen van belemmeringen voor adoptie.
- **Mobiliseren van middelen** – Het aantrekken van financiering, subsidies en andere resources die groei mogelijk maken.
- **Legitimatie** – Het verkrijgen van maatschappelijke en politieke steun voor de innovatie, bijvoorbeeld via beleid, regelgeving en publieke acceptatie.

Hoe schaaft het op?

Opschaling ontstaat wanneer deze systeemfuncties elkaar versterken in een proces van cumulatieve causatie. Succesvolle experimenten vergroten verwachtingen, leiden tot beleidssteun en mobiliseren middelen, waardoor nieuwe ondernemersactiviteiten en kennisontwikkeling worden gestimuleerd. Dit creëert een zichzelf versterkende dynamiek die het innovatiesysteem doet groeien in omvang, diversiteit en legitimiteit (Jacobsson & Bergek, 2004; Suurs et al., 2009). In zijn proefschrift onderscheidt Suurs vier innovatiemotoren oftewel vier typische dynamieken die de opbouw en opschaling van een Technologisch Innovatie Systeem (TIS) aanjagen. Elk van de motoren bestaat uit een karakteristieke

interactie tussen de zeven systeemfuncties van een TIS en correspondeert met een bepaalde fase of ontwikkelingsstadium van het systeem.

Science & Technology Push Motor (WT-motor): Deze motor wordt gedomineerd door kennisontwikkeling, kennisdiffusie, richtinggeving aan het zoekproces en mobilisatie van middelen. De dynamiek start meestal met een kleine groep onderzoekers en technologieontwikkelaars die, vaak samen met beleidsmakers, een veelbelovende technologie naar voren schuiven. Door het opzetten van R&D-programma's en het communiceren van positieve verwachtingen, ontstaat een golf van onderzoeksactiviteiten en pilots. De nadruk ligt op het creëren van een kennisbasis en het opbouwen van een visie, maar marktforming en ondernemersactiviteiten zijn nog zwak ontwikkeld. Deze motor is typisch voor de vroege, formatieve fase van een TIS.

Entrepreneurial Motor (Ondernemersmotor): De ondernemersmotor kenmerkt zich door een sterke aanwezigheid van ondernemersactiviteiten, kennisontwikkeling, richtinggeving, mobilisatie van middelen en vooral ondersteuning door belangengroepen (advocacy coalitions). Hier nemen bedrijven, lokale overheden of nutsbedrijven het initiatief om de technologie in de praktijk te brengen via experimenten en demonstratieprojecten. Ze lobbyen voor subsidies en institutionele steun, en slagen er soms in om nichemarkten te creëren. Deze motor ontstaat wanneer de technologie enigszins is gerijpt en er kansen zijn voor commerciële toepassing, maar structurele barrières (zoals marktfalen of institutionele onzekerheid) nog aanwezig zijn. De motor is essentieel voor het opbouwen van een brede basis van actoren en het versterken van netwerken binnen het TIS.

System Building Motor (Systeemmotor): De systeemmotor bouwt voort op de ondernemersmotor, maar voegt daar een sterke focus op marktforming aan toe. Ondernemers en andere actoren organiseren zich in platforms en coalities, en richten hun lobby niet langer op individuele projecten, maar op het creëren van structurele randvoorwaarden voor het hele systeem (zoals marktstimuleringsbeleid, standaarden, infrastructuur). De systeemmotor leidt tot de opschaling van het TIS: regionale initiatieven groeien uit tot nationale netwerken, institutionele structuren worden aangepast, en steeds meer actoren (waaronder grote bedrijven en overheden) sluiten zich aan. Dit is de fase waarin het TIS zich voorbereidt op grootschalige marktintroductie.

Market Motor (Marktmotor): De marktmotor ontstaat wanneer formele instituties (zoals wet- en regelgeving, subsidies, verplichtingen) een commerciële markt voor de technologie creëren. Hierdoor worden ondernemersactiviteiten, kennisontwikkeling, richtinggeving en investeringen direct gekoppeld aan marktvraag. De rol van lobby en belangengroepen neemt af, omdat marktforming geen politiek strijdpunt meer is, maar onderdeel van reguliere bedrijfsvoering. De marktmotor zorgt voor snelle diffusie en grootschalige toepassing van de technologie, en markeert het einde van de formatieve fase van het TIS.

Tabel 4: Motoren van Innovatie volgens Suurs (2009)

Motor	Kenmerken & Focus	Fase in Innovatiesysteem	Voorbeeldactiviteiten
Wetenschap & Technologie Push motor	- Kennisontwikkeling en -diffusie - Richting geven aan zoekproces - Mobilisatie van middelen - Start met kleine groep onderzoekers en beleidsmakers - Focus op R&D, visie en pilots	Vroege, formatieve fase	R&D-programma's, pilots, visieontwikkeling
Ondernemersmotor	- Sterke ondernemersactiviteiten - Kennisontwikkeling - Richting geven - Mobilisatie van middelen - Steun van belangengroepen - Experimenten en demonstratieprojecten	Opkomende commerciële toepassing	Experimenten, demonstratieprojecten, lobby voor steun
Systeembouw-motor	- Focus op marktvorming - Organisatie in platforms/coalities - Lobby voor structurele randvoorwaarden - Opschaling van regionale naar nationale netwerken	Opschalings-fase	Marktstimulerings-beleid, standaardisatie, infrastructuur-ontwikkeling
Marktmotor	- Formele instituties creëren commerciële markt - Koppeling van activiteiten aan marktvraag - Minder rol voor lobby - Snelle diffusie en grootschalige toepassing	Volwassen fase, Grootschalige marktintroductie	Wet- en regelgeving, subsidies, commerciële uitrol

De vier motoren vormen samen een “succession model”: in de praktijk volgen ze elkaar vaak op, waarbij elke motor de structurele basis legt voor de volgende. In de vroege fase is vooral de WT-motor actief, gericht op kennisopbouw en visie. Naarmate het systeem groeit, nemen ondernemers het voortouw (ondernemersmotor), gevolgd door collectieve systeemopbouw (systeemmotor) en uiteindelijk grootschalige marktintroductie (marktmotor).

Elke motor draagt bij aan de opschaling van het TIS door nieuwe actoren, instituties en technologieën te integreren, en door structurele barrières te slechten. Effectieve opschaling vraagt dus om het herkennen, ondersteunen en – waar nodig – transformeren van deze motoren.

Welke dimensies en routes zien we terug?

De innovatiesysteemcontext omvat meerdere dimensies van opschaling:

- **Organisatorische opschaling:** groei van netwerken, versterking van samenwerking tussen actoren, opkomst van nieuwe coalities en platformen.
- **Politieke/institutionele opschaling:** ontstaan van ondersteunend beleid, standaardisatie, nieuwe regelgeving, verschuivende normen en verwachtingen (inclusief *scaling deep*).
- **Functionele opschaling:** verbreding van systeemfuncties, van R&D en experimenteren naar marktcreatie, legitimering, middelenmobilisatie en ondernemerschap.

- **Kwantitatieve opschaling:** toename van experimenten, demonstratieprojecten, infrastructuur en gebruikers, vooral in latere systeemfasen.

Daarnaast zijn er duidelijke **opschalingsroutes** herkenbaar:

- **Groei:** versterking en toename van systeemfuncties, waardoor het innovatiesysteem robuuster wordt.
- **Replicatie:** herhaling van succesvolle experimenten of pilots op verschillende locaties of in verschillende sectoren, vaak noodzakelijk om marktcreatie op gang te brengen.
- **Circulatie:** verspreiding van bouwstenen (bijv. kennis, ontwerpprincipes, beleidsinstrumenten) tussen actoren en domeinen, ook wanneer volledige replicatie niet mogelijk is.
- **Institutionalisering:** verankering van de innovatie in beleid, standaarden, routines en bredere maatschappelijke structuren – het moment waarop niche-innovaties in regimes beginnen door te dringen.

Handelingsperspectief

Relevante actoren: Overheden, kennisinstellingen, netwerkorganisaties, financiers, bedrijven.

Type beslissingen: In deze context draait opschaling om het versterken van systeemfuncties. In de exploratiefase zijn daarvoor het opbouwen van netwerken, kennisontwikkeling en legitimatie cruciaal (functionele en organisatorische dimensie; route: groei). In de opschalingsfase moeten beleidsmakers en netwerkorganisaties zorgen voor beleidsconsistentie, middelenmobilisatie en replicatie van succesvolle pilots (routes: groei, replicatie, circulatie). In de consolidatiefase is het tijdig institutionaliseren van succesvolle niches en het aanpassen van regelgeving en infrastructuur essentieel (institutionalisering). Stakeholders moeten beslissen welke systeemfuncties prioriteit krijgen, wanneer nichebeleid wordt afgebouwd en hoe internationale afstemming wordt georganiseerd.

4 Casestudie offshore windenergie

In deze case studie kijken we specifiek naar de offshore windindustrie, gericht op het bouwen van windparken op zee. Deze casestudie is bedoeld om het begrippenkader uit Hoofdstuk 3 te demonstreren. Hierbij maken we gebruik van goed gedocumenteerde voorbeelden uit de wetenschappelijke literatuur. Onze intentie is niet om een systematische analyse te geven over de opschaling van windenergie maar om aan te tonen en tegelijkertijd te testen of het begrippenkader helpt bij het begrijpen en duiden van deze geschiedenis.

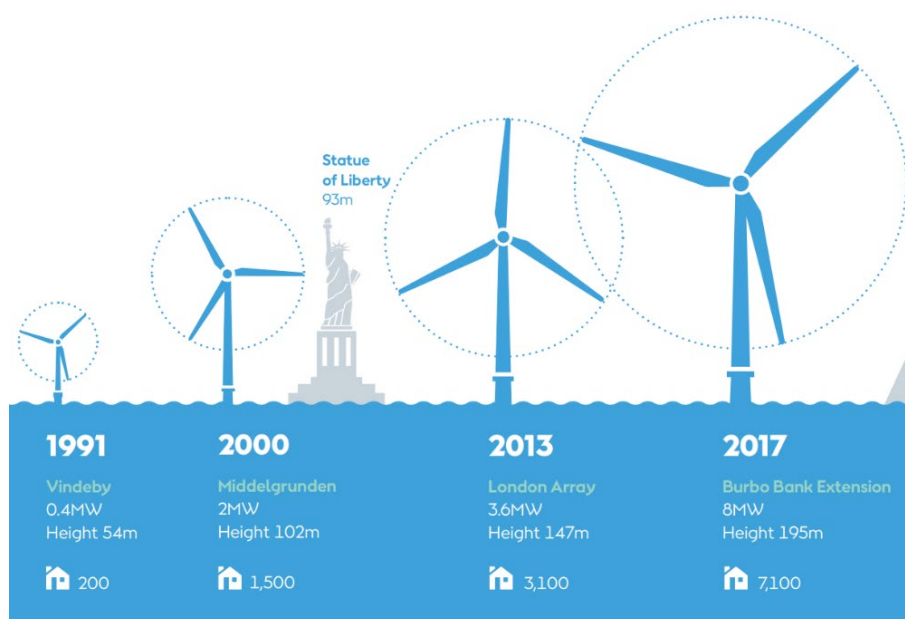
4.1 Producten en diensten

De eerste experimenten met het genereren van elektriciteit op basis van wind dateren aan het einde van de negentiende en het begin van de twintigste eeuw. Denemarken was daarbij initieel een van de meest succesvolle landen op het gebied van windenergie (Karnoe en Garud, 2012). Andere landen zoals het VK en Nederland volgen vrij snel.

De technologie kwam op door ontwikkelingen in het geopolitieke landschap. Na de tweede wereldoorlog waren er beperkingen op de import van dieselbrandstof dat vooral voor rurale gebieden een belangrijke bron van energie was. In deze gebieden werden daarom de eerste windmolens gebouwd. Vervolgens volgden de twee oliecrises in 1973 en 1979 die leidden tot een grote stijging van de brandstofprijzen. Tegen deze achtergrond werd steeds meer geïnvesteerd in het ontwikkelen van windenergie als alternatief voor fossiel, door de Deense overheid maar ook door de boeren die de eerste gebruikers waren (Karnoe en Garud, 2012).

De eerste windturbines werden in de Deense context ontwikkeld en gebruikt voor en door lokale stakeholders, met name gedreven door het belang van de boeren. De grote bedrijven stappen in vanaf de jaren 90 (Lema et al., 2024) als ze zien dat de industrie veel potentie heeft en er meer klimaatbewustzijn komt. Dit is ook het begin van de offshore windindustrie waarvoor grotere investeringen nodig zijn. Het eerste offshore windpark, Vindeby, wordt gebouwd in 1991 door Orsted (het vroegere Deense olie en gasbedrijf) en Bonus Energy. Dit is een pilotproject van 5 MW dat grotendeels wordt gefinancierd met subsidies.

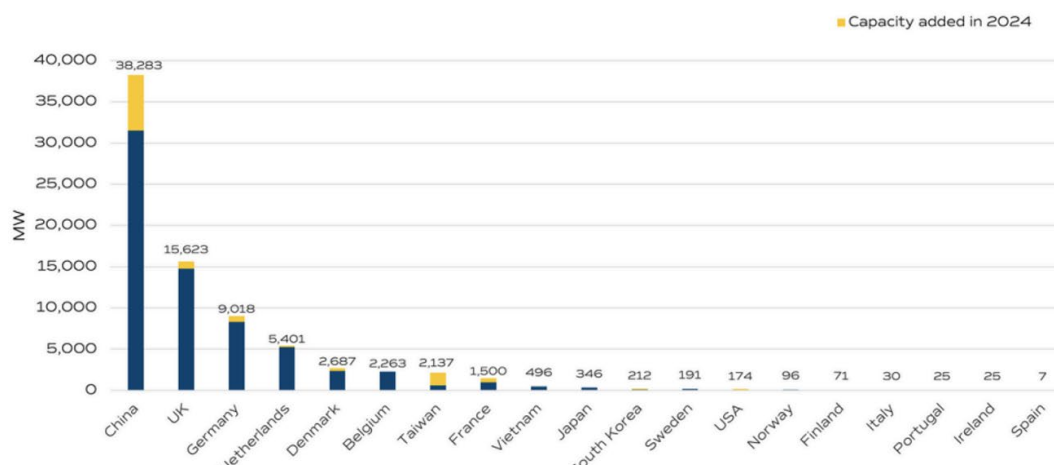
In de beginfase, rond de jaren negentig, waren turbines relatief klein, met een vermogen van circa 0,4 MW, en werden ze toegepast in demonstratieprojecten dicht bij de kust. Deze projecten dienden als proof-of-concept en waren sterk afhankelijk van subsidies en experimentele beleidskaders. Naarmate de technologie zich ontwikkelde, nam de schaal van turbines spectaculair toe. In de jaren 2010 lag de focus sterk op het vergroten van de capacity factor, wat in praktijk alsmaar grotere windturbines betekende, om de LCOE naar beneden te brengen om de parken subsidievrij te maken. Er is dus een exponentiële groei in de periode 2010 en verder. Moderne offshore turbines hebben een capaciteit van 8 tot 15 MW en bereiken hoogtes van ruim 250 meter. Er zijn inmiddels ook Chinese windturbines van 26MW. De turbines die nu gebruikt worden voor Ecowende en OranjeWind zijn 11 MW.



Figuur 4. Bron: Ontwikkeling in de richting van grotere en hogere turbines (Orsted, 2019)

Gebruikers van de technologie zijn hier niet de boeren en lokale gemeenschappen die aan de basis liggen van het Deense succes maar de steeds meer internationaal opererende energiebedrijven (Lema et al. 2025). Onshore Wind werd gekenmerkt door lokaal eigenaarschap terwijl offshore wegens de hoge investeringskosten en de benodigde technische kennis over werken op zee werd gedreven door energie-, olie en. Vanaf 2000 worden er specifieke turbines ontworpen voor offshore toepassingen die veel groter zijn en tegen omstandigheden op zee moeten kunnen.

De industrie is de laatste tien jaar wereldwijd gegroeid en er worden nu ook veel windparken gebouwd in Aziatische landen. China is nu wereldwijd koploper in offshore wind capaciteit. Daarachter komen de Noord Europese landen. In 2023 maakte windenergie (onshore en offshore) 8% van de totale elektriciteitsgeneratie uit. De verwachting is dat dit in 2030 14% wordt (IEA, 2024) Op dit moment staan de nieuwe projecten vooral gepland in China, VS, Taiwan en Korea.



Figuur 5: Wereldwijde diffusie van opwekcapaciteit voor offshore windenergie (WFO 2024).

De succesvolle opschaling van offshore windenergie is in belangrijke mate bepaald door een aantal adoptiekenmerken van de technologie.

Relatief voordeel: Offshore windenergie bood een relatief voordeel ten opzichte van conventionele energiebronnen: het leverde duurzame elektriciteit zonder directe CO₂-uitstoot en maakte gebruik van de grote windpotentie op zee. Naarmate de technologie zich ontwikkelde, daalden de kosten per opgewekte megawattuur aanzienlijk, mede dankzij schaalvergroting en technologische innovatie. Dit maakte offshore wind steeds aantrekkelijker voor nieuwe eigenaren of investeerders, met name grote energiebedrijven.⁴

Compatibiliteit: De technologie sloot goed aan bij de groeiende maatschappelijke behoefte aan alternatieven voor fossiele energie. In landen als Denemarken, Nederland en het VK was er bovendien ervaring met windenergie op land, waardoor de overstap naar offshore relatief eenvoudig was. Bestaande kennis en infrastructuur konden worden benut. Niet alleen was er ervaring met onshore turbines, belangrijker nog was dat er door de grote olie- en gasindustrie ervaring was met offshore structuren. Daarnaast was er door de O&G industrie veel kennis over de zeebodem van de Noordzee.

Complexiteit: Hoewel offshore windenergie technisch complexer is dan onshore wind werd deze complexiteit in de beginfase opgevangen door sterke publiek-private samenwerking, pilots en demonstratieprojecten. Naarmate de sector groeide, ontstonden gespecialiseerde bedrijven en standaarden die de implementatie vereenvoudigden.⁵

Testbaarheid: De technologie kon in de praktijk op kleine schaal worden getest via pilotprojecten en demonstratieparken. Deze projecten boden waardevolle leerervaringen en maakten het mogelijk om technische en organisatorische uitdagingen in een gecontroleerde omgeving aan te pakken voordat werd opgeschaald.

Observeerbaarheid: De voordelen van offshore windenergie waren goed zichtbaar: succesvolle pilotprojecten en de snelle groei van geïnstalleerde capaciteit in pionierslanden trokken internationale aandacht. De zichtbare daling van de kosten en de schaalvergroting van windparken versterkten het vertrouwen bij investeerders, beleidsmakers en andere landen om ook in offshore wind te investeren. Tegelijkertijd was er ook veel scepsis in het begin. De uitspraak van Rutte dat windmolens op subsidie draaien komt zo vaak terug dat het een gedeeld trauma lijkt te zijn in de sector.⁶

Hoewel offshore windenergie op veel adoptiekenmerken positief scoort zijn er ook belangrijke barrières die de opschaling kunnen vertragen. Op de eerste plaats is de kapitaalintensiteit van het bouwen van een offshore windpark een factor. Het kost miljarden Euro's om een windpark te realiseren, terwijl de elektriciteitsmarkt volatiel blijft.

Verder vormt de complexiteit van offshore technologie een drempel, met hoge eisen aan engineering, logistiek en onderhoud, waardoor implementatie in de beginfase vaak afhankelijk is van gespecialiseerde kennis en sterke publiek-private samenwerking. De regulering en het verkrijgen van vergunningen voor offshore projecten zijn vaak langdurige en complexe trajecten, waardoor de snelheid van adoptie wordt geremd. Belangrijk hierin is dat

⁴ Reflectie van reviewer Roos de Jonge: Eigenlijk ook vooral omdat de kapitaalkosten laag waren in de jaren 2010 vanwege de financiële crisis van 2008. Daarnaast werden overheden beter in het maken van beleid dat zekerheid gaf voor ontwikkelaars (het one-stop-shop principe in Nederland is daar een voorbeeld van) (zie Verhees et al. (2015))

⁵ Reflectie van reviewer Roos de Jonge: Er is ook snel een dominant design gekomen in de vorm van bottom-fixed met een monopile als fundatie. In andere innovatiesystemen zien we vaak een scala aan opties in het begin met een vernauwing over de tijd. Bij Offshore Wind was die er al heel snel. (Van der Loos et al. (2020) Low carbon lock-in).

⁶ Reflectie van reviewer Roos de Jonge: Dat initiële scepticisme wordt ook vaak genoemd als de reden dat er zo hard gewerkt is om de LCOE naar beneden te krijgen.

de lange procedures vereisen dat de parken decennia van te voren gepland worden, terwijl de elektriciteitsvraag in de toekomst nog onduidelijk is, omdat we niet weten in hoeverre industriële bedrijven gaan elektrificeren.

Tot slot kunnen maatschappelijke weerstand (bijvoorbeeld vanwege kabels door de Waddenzee, uitbreiding van hoogspanningsnetten en ruimte voor de visserij) en beperkte infrastructuur (compatibiliteit) voor netaansluiting de brede uitrol van offshore windenergie belemmeren.

De belangrijkste beslissingen in deze context waren investeringen in grotere turbines en het stroomlijnen van de uitrol met goed ontwikkelde vergunningsverleningsprocedures en routekaarten. Deze keuzes hebben de productiviteit verhoogd en de kosten verlaagd, waardoor offshore wind een aantrekkelijke optie is geworden voor grootschalige energieopwekking.

Ontwikkelingen richten zich verder op nog grotere turbines (>20 MW), verbeterde opslagtechnologieën en mogelijk in de toekomst integratie met waterstofproductie op zee.

De ontwikkeling richting nog grotere turbines vindt vooral in Azië plaats. In Europa is de trend nu standaardisatie rond de 15 MW, omdat steeds grotere turbines vragen om steeds grotere fabrieken en installatieschepen en die ontwikkeling nu zo snel gaat dat die niet meer afgeschreven kunnen worden. Daarnaast wordt er ook gesproken over kwaliteitsproblemen als gevolg van (te) snelle ontwikkelingen, waardoor de OEMs graag eerst hun turbines willen doorontwikkelen alvorens met een volgende ontwerp te komen. (Ontwikkeling gaan zo snel dat ze niet meer eerst offshore getest kunnen worden voor ze in een project gebruikt worden, wat voor technische problemen zorgt).

4.2 Bedrijven en businessmodellen

De vroege industrie werd gekenmerkt door veel individuele ondernemers en kleine bedrijven die experimenteerden en van elkaar leerden. Dit samenwerkende MKB vormde een cluster rondom windenergie in Denemarken en deze fase kan gekarakteriseerd worden als 'doing, using, interacting'. Het MKB was een mix van nieuwe bedrijven van ondernemers in de windindustrie en bestaande bedrijven die zich toelegden op deze nieuwe industrie, deze bedrijven hadden bestaande vaardigheden vanuit bijvoorbeeld de landbouwindustrie die ze konden toepassen op windenergie (Karnoe en Garud, 2012). Het businessmodel van deze bedrijven draait om het uitvoeren van pilots en demonstratieprojecten, vaak met steun van lokale overheden en subsidies. De kracht van het MKB ligt in het snel kunnen inspelen op technologische ontwikkelingen en het benutten van nichemarkten.

Staatsenergiebedrijven treden toe in de offshore windindustrie op het moment dat de technologie zich heeft bewezen en grootschalige investeringen noodzakelijk worden. Deze bedrijven beschikken over aanzienlijke financiële middelen en hebben een centrale rol in de nationale energie-infrastructuur. Hun business aanpak is formeler en sterk verweven met overheidsbeleid en publieke belangen. Zij zijn in staat om grootschalige projecten te initiëren, zoals de bouw van havens, netaansluitingen en grootschalige windparken. Verticale integratie is een veelgebruikte strategie: ontwerp, bouw, exploitatie en onderhoud worden in eigen hand genomen om risico's te beheersen en kosten te reduceren. De samenwerking met overheden is intensief, bijvoorbeeld bij het verkrijgen van vergunningen, subsidies en het vormgeven van beleid.

Offshore-industrie wordt belangrijker naar mate windturbines hoger en groter worden. Een voorbeeld van een (Nederlands) bedrijf dat een sleutelrol speelt bij de opschaling van offshore windturbines is Sif Group. Vanaf 2000 maakt Sif zogeheten 'monopiles', funderingen voor windmolens. Sif Group is opgericht in 1948 als fabrikant van dikke, stalen buizen, die aanvankelijk vooral werden gebruikt voor constructies voor de winning van olie en gas op zee. Doordat de investeringen in de olie- en gasmarkt terugvielen, richt Sif Group zich tegenwoordig uitsluitend op de offshore windenergiemarkt. Al enkele jaren geleden zag Sif de noodzaak tot de bouw van een nieuwe, veel grotere fabriek om de vraag naar steeds grotere monopiles aan te kunnen. Sif Group bouwde daarom op de Maasvlakte een nieuwe fabriek waar monopiles met een doorsnede van 11,5 meter worden gemaakt voor windturbines die 15-18 megawatt kunnen leveren. Met deze fabriek is Sif Group de enige speler die monopiles op deze schaal kan produceren.

De laatste decennia is de energiemarkt steeds meer geïnternationaliseerd. Europese spelers als Vestas, Orsted en Siemens Gamesa, samen met installateurs als Van Oord en Heerema (zou bouwen kranen) domineren de offshore windindustrie. Zij breiden uit naar Azië en Noord-Amerika, vaak via joint ventures. Dit vergroot niet alleen de schaal, maar ook de diversiteit van markten en technologieën. Deze bedrijven beschikken over enorme financiële middelen, technologische knowhow en een breed netwerk van partners. Zij richten zich op nieuwe businessmodellen zoals geïntegreerde energiehub's op zee, waarbij windenergie wordt gecombineerd met waterstofproductie en batterijopslag. Dit biedt kansen voor verdere waardecreatie en systeemintegratie. Hun businessmodel is gericht op schaalvoordelen, standaardisatie van componenten en consolidatie van de waardeketen.⁷

Ook financieringsmodellen evolueerden. Waar aanvankelijk overheidssubsidies tarieven voor

⁷ Aanvulling van reviewer Roos de Jonge: In Azië deden deze bedrijven de initiële windparken en wordt dat nu overgenomen door veelal Chinese bedrijven. Omdat de offshore in Amerika nog niet heel erg ontwikkeld is spelen Europese bedrijven daar nog wel een rol, al wordt die markt wegens het politieke klimaat niet meer als heel viable gezien.

pilots en demonstraties cruciaal waren, zien we een verschuiving naar Power Purchase Agreements (PPA's) en meer marktgebaseerde mechanismen. Deze verandering heeft geleid tot een grotere betrokkenheid van private investeerders en institutionele beleggers, die offshore wind zagen als een stabiele en duurzame investering. Inmiddels krijgen ontwikkelaars het niet meer voor elkaar om hun windpark volledig te dekken met PPAs, dus verkopen ze hun stroom noodgedwongen op de spotmarkt. Daarnaast zien we een ontwikkeling naar CfD's.

Strategische partnerships en risicospreiding via consortia waren sleutelbeslissingen die deze opschaling mogelijk maakten. Door samenwerking tussen energiebedrijven, investeerders en technologiepartners konden grote projecten worden gerealiseerd zonder dat één partij alle risico's droeg. De strategie van deze partijen is gericht op het veroveren van nieuwe markten, het optimaliseren van productieprocessen en het beïnvloeden van internationale standaarden. Hiermee zijn ze in staat om innovatie te versnellen en wereldwijd te verspreiden.

4.3 Industrieën en waardeketens

De opschaling van offshore windenergie gaat gepaard met de ontwikkeling van een industrie en waardeketen. In de fluid stage van windenergie kenmerkt de industrie zich door een grote mate van variatie. Verschillende bedrijven en uitvinders proberen uiteenlopende ontwerpen en technologieën uit, zonder dat er al een vaste standaard is. In deze fase draait het om radicale productinnovatie: bedrijven zoeken naar werkbare configuraties en experimenteren volop met nieuwe technologieën en gebruikersinterfaces.

Voor windenergie zagen we dat in de jaren 80-90 verschillende typen windturbines en funderingen worden ontwikkeld en getest, vaak in kleinschalige pilotprojecten. De nadruk ligt op het vinden van een oplossing die technisch en economisch haalbaar is, en die aansluit bij de behoeften van de eerste gebruikers (de Deense pioniers). Naarmate de technologie zich verder ontwikkelt en bepaalde ontwerpen zich als succesvol bewijzen, ontstaat er een dominant design. Voor windenergie was dit bijvoorbeeld de focus op grotere turbines met een specifieke configuratie. Dit ontwerp wordt vanaf de jaren 2000 breed geaccepteerd en vormt het uitgangspunt voor verdere opschaling van offshore windenergie.

Het ontstaan van een dominant design markeert het einde van de fluid stage en het begin van de incrementele fase. Hierbij verschuift de aandacht van productinnovatie naar procesinnovatie. Door componenten te standaardiseren en modulair te ontwerpen, kunnen fabrikanten schaalvoordelen realiseren en onderhoud vereenvoudigen. Innovatie is daarbij gericht op het verder verhogen van de grootte en hoogte van de windturbines. Dit leidt tot een sterke daling van de Levelized Cost of Energy (LCOE). Innovaties zoals drijvende funderingen maken het mogelijk om windparken te bouwen in diepere wateren, terwijl digitalisering (predictive maintenance, remote monitoring) zorgt voor efficiënter onderhoud en lagere operationele kosten. Het ingewikkelde is dat een complex systeem als een offshore windpark nooit helemaal modulair kan zijn. Nog steeds wordt iedere turbine en monopile specifiek ontworpen voor de zeebodem waar hij in komt te staan.

De focus van ontwikkelingen ligt op prijs, levertijd en betrouwbaarheid. Dit leidt tot consolidatie in de industrie: kleinere spelers verdwijnen en grote bedrijven domineren de markt (Lema et al. 2025). Zo koopt Siemens het Deense Bonus Energy in 2004 en gaat het samen met het Spaanse Gamesa in 2017. Vestas volgt een vergelijkbaar pad als het in 2004 samengaat met NEG Micon en in 2015 UpWind Solutions en Avallon koopt. Daarnaast zien

we dat vanaf 2018 de markt steeds internationaler wordt en het hebben van een bepaalde grootte een voorwaarde is om internationaal te kunnen opereren.

In de leveranciersketen ontstaat een andere dynamiek. De vraag naar gespecialiseerde componenten zoals turbines, kabels en installatieschepen leidt tot vernieuwde dynamiek. Met name de eisen die gesteld worden aan de mast en funderingen vormen aanleiding voor ontwikkeling van nieuwe technologie in de offshore windindustrie. De funderingen moeten continu worden aangepast omdat de windparken in steeds dieper water worden gebouwd. Alhoewel er in het begin meerdere mogelijke technologieën zijn zoals tripods, gravity-based foundations en monopile foundations, wordt uiteindelijk de monopile foundation een steeds 'dominantere' oplossing. Op dit moment zijn monopile foundations dus het dominante design, maar er zijn nog wel ontwikkelingen gaande om de parken in nog dieper water te kunnen zetten met drijvende funderingen (Bento & Fontes, 2019).

Alhoewel er nog steeds wordt gewerkt aan het creëren van grotere turbines, loopt deze ontwikkeling tegen zijn grenzen aan. Dit heeft er mee te maken dat de turbines ook steeds zwaarder en groter worden en moeilijker zijn te vervoeren. Dat kost meer en er is ook een praktisch probleem dat de schepen op een duur de haven niet meer binnen kunnen lopen. De operationele voordelen van een iets grotere turbine worden zo steeds kleiner ten opzichte van de toenemende kosten in de productieketen (NREL, 2024). Daar komt bij dat kapitaalinvesteringen nodig zijn die alleen kunnen worden terugverdiend als er een zeker productievolume wordt gerealiseerd.

Op basis van een patentanalyse van technologieën in de windindustrie (zowel onshore als offshore) laten Lema, Bonaglia, en Hansen (2024) zien dat deze sector steeds volwassener is geworden. Zo was er een verschuiving van primair de ontwikkeling van technologie voor de windturbines zelf naar óók de technologie eromheen voor bijvoorbeeld onderhoud en monitoring. Dit laat zien dat er een verschuiving is geweest van product innovatie naar meer proces innovatie, conform het Utterback model. Daarnaast wordt de technologische concurrentie in de sector steeds breder. Waar eerst veel innovatie plaatsvond in Denemarken en andere Noordwest Europese landen is er nu veel internationale concurrentie uit landen zoals China, Singapore en India (Lema et al., 2024).

Wat betreft besluitvorming is de afstemming in de keten, tussen ontwikkelaars van windturbines en leveranciers van equipment en infrastructuur. Daarnaast zien we een toenemende focus op duurzaamheid in de keten. Leveranciers worden aangespoord om circulaire materialen te gebruiken en CO₂-reductie in hun processen door te voeren. Dit is ook onderdeel van de standaardisatie van tendervoorwaarden in de Net Zero Industry Act van de EU.

Hoewel Utterback een waardevol denkkader biedt om de evolutie van industrieën te begrijpen, past de offshore windindustrie niet volledig in het patroon waarin procesinnovatie dominant wordt zodra een dominant design is ontstaan. In de offshore windsector blijft productinnovatie - met name de voortdurende schaalvergroting van turbines - bepalend voor de ontwikkeling van de industrie. De productinnovaties forceren aanpassingen in logistiek, installatiecapaciteit en productieprocessen. Daardoor is procesinnovatie in offshore wind meer reactief dan leidend. Dit betekent dat de sector, ondanks het vroege ontstaan van een dominant design (o.a. bottom-fixed monopiles), niet de stabiliserende fase bereikt waarin procesinnovatie de motor wordt. De voortdurende productvergroting houdt de sector als het ware in een verlengde 'transitional phase'.

4.4 Innovatiesystemen

De opkomst van offshore windenergie in Europa is een schoolvoorbeeld van een technologische innovatie die niet alleen afhankelijk is van technologische ontwikkeling, maar vooral van de opbouw van een sterk innovatiesysteem (TIS) en de interactie met de bredere context. Van der Loos et al. (2021) vergelijken de ontwikkeling van het offshore wind TIS in Nederland en Noorwegen. Beide landen hebben een sterke maritieme en olie- en gastraditie, maar kenden een zwakke thuismarkt voor offshore wind. Toch zijn hun opschalingspaden en het succes van hun innovatiesystemen sterk uiteen gaan lopen. Voor het doel van dit hoofdstuk verwijzen we volledig naar de analyse van Van der Loos (2021) met specifiek de focus op Nederland. In **Nederland** werd vanaf 2010 namelijk sterk door de nationale overheid ingezet op het bouwen van een compleet innovatiesysteem.

In de eerste fase lag de nadruk in Nederland op kennisontwikkeling en het opbouwen van netwerken. Universiteiten zoals Delft (DUWIND) speelden een centrale rol in het genereren van nieuwe kennis over offshore windtechnologie. Nederlandse bedrijven met een achtergrond in de maritieme en olie- en gasindustrie investeerden in materieel en expertise, vaak met het oog op internationale markten. Kennisuitwisseling werd gestimuleerd via platforms als FLOW, waar bedrijven, kennisinstellingen en overheid samenwerkten. In deze periode was de innovatiemotor vooral een Science & Technology Push: de focus lag op onderzoek, pilots en het leggen van een kennisbasis, terwijl marktcreatie nog beperkt was.

In de tweede fase kwam er, vanaf 2010, meer richting vanuit de overheid, met ambitieuze doelstellingen voor offshore wind (zoals 6 GW in 2020) en beleidsinitiatieven als het Energieakkoord en de Roadmap 2020. Toch bleef het beleid grillig en waren subsidies en vergunningen niet altijd stabiel. Nederlandse bedrijven bouwden hun internationale positie verder uit door te leveren aan buitenlandse projecten, waarmee ze ervaring opdeden en hun concurrentiekracht versterkten. Zowel publieke als private investeringen in innovatie, materieel en personeel namen toe. In deze periode werd de innovatiemotor gekenmerkt door ondernemerschap: bedrijven diversifieerden, zochten actief naar marktkansen en investeerden in nieuwe technologieën, terwijl de overheid steeds meer richting gaf aan de sector.

Vanaf 2015 kwam de opschaling in een stroomversnelling door overheidsgestuurde tenders, vereenvoudigde vergunningen en investeringen in netaansluiting. Hierdoor ontstond een volwassen thuismarkt, met projecten als Gemini (600 MW) als mijlpalen. Offshore wind werd breed geaccepteerd als essentieel onderdeel van het nationale klimaatbeleid. Nieuwe brancheorganisaties en incubators ondersteunden startups en bevorderden kennisuitwisseling. In deze fase werd de innovatiemotor een combinatie van System Building en Market Motor: beleid, markt en technologie versterkten elkaar, wat leidde tot snelle opschaling en institutionalisering van offshore wind als volwassen sector.

De analyse van Van der Loos (2021) laat zien dat opschaling in beide landen sterk werd beïnvloed door de dynamiek binnen een TIS maar de studie onderstreept ook dat succesvolle opschaling van nieuwe technologieën niet alleen afhankelijk is van het innovatiesysteem zelf, maar vooral van de co-evolutie met sectorale, politieke en geografische context. Contextcondities zijn niet statisch, maar veranderen over tijd en beïnvloeden de richting en snelheid van opschaling. Voor effectieve opschaling is het essentieel om niet alleen het TIS te versterken, maar ook actief te sturen op de onderliggende contextcondities.

Sectorale context: De mate waarin olie- en gasbedrijven en hun toeleveranciers konden diversifiëren naar offshore wind, hing af van de economische druk (prijzdalingen, afnemende productie) en de mate van technologische verwantschap. In Nederland leidde de structurele neergang van offshore olie en gas tot een blijvende druk op diversificatie, terwijl in Noorwegen tijdelijke prijsdalingen slechts kortstondig tot diversificatie leidden.

Politieke context: In Nederland verschoof het beleid richting actieve ondersteuning van offshore wind als onderdeel van de energietransitie, met duidelijke doelen en instrumenten. In Noorwegen bleef olie en gas dominant op de politieke agenda, waardoor structurele opschaling van offshore wind uitbleef. Hierbij was het Energieakkoord (2014) instrumenteel.

Geografische en technologische context: Nederland profiteerde van gunstige ligging, infrastructuur en een ondiepe Noordzee, waardoor het snel kon aansluiten bij de internationale markt. Noorwegen had vooral expertise in diepwatertechnologie, maar minder aansluiting bij de dominante marktstandaarden (monopiles, ondiep water).⁸

Door een combinatie van strategische beleidskeuzes, sterke kennisnetwerken, actieve marktcreatie en een hoge mate van industriële nabijheid, kon het Nederlandse offshore wind TIS snel opschalen en internationaal concurreren. De opschaling verliep via een geleidelijke institutionalisering van beleid, infrastructuur en markttoegang, met een sterke feedback tussen internationale successen en binnenlandse systeemopbouw. Ter vergelijking, in Noorwegen bleef ondanks sterke technologische competenties en enkele grote spelers de opschaling van offshore wind beperkt door het ontbreken van een thuismarkt, wisselende politieke steun en een dominante olie- en gassector.

⁸ Reflectie van reviewer Roos de Jonge: Interessant ook is dat Noorwegen gewend is aan goedkope elektriciteit vanwege hun waterkrachtcentrales, waardoor er ook minder incentive is om te investeren in het vele malen duurdere floating offshore wind.

5 Reflectie en duiding

In de voorgaande hoofdstukken is de opschaling van technologische innovatie geanalyseerd vanuit vier verschillende contexten. Dit inzicht onderstreept dat effectieve sturing op opschaling vraagt om een expliciete koppeling tussen de ontwikkelingsfase van een technologie of innovatie, de dominante opschalingscontext, en de bijbehorende opschalingsdimensies en -routes. Dit hoofdstuk verdiept onze analyse door te laten zien hoe handelingsperspectieven concreet samenhangen met zowel de fase waarin een technologie zich bevindt als de context waarin opschaling plaatsvindt. Het centrale uitgangspunt is dat handelingsperspectieven altijd fase- en contextafhankelijk zijn. Dit betekent dat generieke beleidsmaatregelen of strategieën slechts succesvol zijn wanneer ze worden afgestemd op de specifieke dynamiek van het opschalingsproces. Zie voor een samenvatting van de inzichten Tabel 5. Een uitgebreid overzicht van handelingsperspectieven, gekoppeld aan kritieke beslissingen in de casus, is te vinden in de Appendix.

5.1 Producten en diensten

Dimensies

De opschaling van offshore windenergie op product-/dienstniveau wordt primair gekenmerkt door **kwantitatieve opschaling**: het toenemende aantal turbines, windparken en de totale geïnstalleerde capaciteit. Dit sluit aan bij het productcontextperspectief waarin gebruikersadoptie en volumegroei centraal staan. Daarnaast speelt **functionele opschaling** een rol, doordat windturbines niet alleen groter werden, maar ook nieuwe functies kregen (bijvoorbeeld hogere betrouwbaarheid, digitale monitoring en integratie met net- en opslagoplossingen). In latere fasen is bovendien sprake van **institutionele opschaling**, wanneer technische normen en certificering de technologie verankeren als standaardoplossing voor elektriciteitsopwekking op zee.

Routes

Binnen deze context is de dominante route **groei**: steeds grotere turbines en windparken worden uitgerold naar meer locaties en landen. Daarnaast is **replicatie** zichtbaar wanneer succesvolle ontwerpprincipes en parkconfiguraties worden herhaald in nieuwe geografische contexten (bijvoorbeeld van Noordwest-Europa naar Azië). In latere fasen treedt **institutionalisering** op wanneer productontwerpen worden vastgelegd in standaarden en regelgeving, waarmee offshore wind een genormaliseerde energietechnologie wordt. Denk hierbij ook aan het ontwerp van routekaarten en vergunningsverleningsprocedures.

Handelingsperspectief

De opschaling van offshore windenergie op product- en dienstniveau vraagt vooral om sturing op **kwantitatieve opschaling** via de routes **groei** en **replicatie**, met in latere fasen aandacht voor **institutionalisering**.

- **Voor technologieontwikkelaars en leveranciers:** Richt innovatie-inspanningen op **betrouwbaarheid, kostenreductie en standaardiseerbaarheid**, zodat kwantitatieve opschaling via groei mogelijk wordt. Ontwerp producten modulair en schaalbaar, zodat succesvolle oplossingen eenvoudig kunnen worden **gerepliceerd** naar nieuwe locaties en markten. Anticipeer op toekomstige normering door productontwerpen vroegtijdig af te stemmen op (verwachte) certificering en standaarden (**institutionele dimensie**).
- **Voor beleidsmakers en toezichthouders:** Faciliteer productopschaling via tijdelijke ondersteuning van pilots en demonstratieprojecten, waarmee testbaarheid en leerprocessen worden vergroot (ondersteuning van **groei**). Werk toe naar harmonisatie van technische eisen en certificering, zodat succesvolle oplossingen zich sneller internationaal kunnen verspreiden via **replicatie**. Borg maatschappelijke randvoorwaarden (veiligheid, ecologie) in regelgeving om productinnovaties structureel te **institutionaliseren**.

5.2 Bedrijven en businessmodellen

Dimensies

In de bedrijfscontext zien we een combinatie van **kwantitatieve, organisatorische en functionele opschaling**. Bedrijven groeien in omzet, medewerkers en internationale activiteiten (kwantitatief), bouwen hun interne organisatie en partnerships uit (organisatorisch) en verbreden hun businessmodellen richting geïntegreerde energie-oplossingen en nieuwe markten (functioneel). Daarnaast speelt **institutionele opschaling** een rol wanneer bedrijven, of branche organisaties, actief bijdragen aan standaardisatie, regelgeving en vergunningstrajecten, bijvoorbeeld via brancheorganisaties en publiek-private samenwerking.

Routes

De overheersende route is **groei**, zichtbaar in de transitie van startups en MKB-bedrijven naar grootschalige, internationaal opererende energiebedrijven. **Replicatie** speelt een rol bij internationale expansie, waarbij businessmodellen en projectaanpakken in verschillende landen worden herhaald. **Circulatie** is herkenbaar in licenties, joint ventures en het delen van specifieke technologische componenten of ontwerpen tussen bedrijven. In een latere fase zorgt **institutionalisering** ervoor dat bedrijfsmodellen ingebed raken in stabiele marktstructuren en regelgeving.

Handelingsperspectief

In de bedrijfscontext komen met name **organisatorische, functionele en kwantitatieve opschaling** samen, langs de routes **groei, replicatie en circulatie**, met toenemende **institutionalisering** in latere fasen.

- **Voor ondernemingen en management:** Investeer tijdig in organisatorische capaciteit, governance en partnerschappen om groei te ondersteunen (**organisatorische dimensie, route groei**). Kies bewust welke onderdelen van het businessmodel intern worden opgeschaald en welke via **circulatie** (bijvoorbeeld licenties of joint ventures) kunnen worden verspreid. Ontwikkel flexibele businessmodellen die internationale

replicatie mogelijk maken, met ruimte voor aanpassing aan lokale regelgeving en marktomstandigheden.

- **Voor financiers en investeerders:** Stem financieringsinstrumenten af op de opschalingsfase: risicodragend kapitaal in vroege groeifasen, gevolgd door project- en infrastructuurfinanciering bij verdere opschaling. Stimuleer samenwerking en risicospreiding via consortia, passend bij grootschalige en kapitaalintensieve opschalingsroutes.
- **Voor beleidsmakers:** Verlaag institutionele fricties door vergunningverlening, marktregels en subsidie-instrumenten af te stemmen op schaalbare businessmodellen. Ondersteun internationale expansie door beleidscoördinatie en diplomatieke samenwerking, waarmee **replicatie** en **institutionalisering** worden versneld.

5.3 Industrieën en waardeketens

Dimensies

Op industriënniveau staat **organisatorische opschaling** centraal: de vorming en versterking van internationale waardeketens, ketenintegratie en consolidatie van bedrijven. Tegelijkertijd is er sprake van **institutionele opschaling** door de ontwikkeling van dominante ontwerpen, standaarden en certificeringssystemen. Daarnaast zien we **kwantitatieve opschaling** in de vorm van toenemende productievolumes en industriële capaciteit. **Functionele opschaling** is in deze context beperkter, maar zichtbaar in de verbreding richting ondersteunende diensten zoals onderhoud, monitoring en logistiek.

Routes

De dominante opschalingsroute binnen de industriecontext is **institutionalisering**: het vastleggen van dominante ontwerpen en standaarden die de sector structureren. **Groei** volgt hieruit, doordat schaalvoordelen en standaardisatie massaproductie mogelijk maken. **Replicatie** is zichtbaar wanneer industriële configuraties en waardeketens worden gekopieerd naar andere regio's, terwijl **circulatie** plaatsvindt wanneer specifieke procesinnovaties of componenten zich verspreiden tussen bedrijven en sectoren.

De casus laat ook zien dat het idee van een verschuiving van productinnovatie naar procesinnovatie - een kernpunt in Utterback's industrie-evolutie - in offshore wind niet geheel volgens de theorie verloopt. Door de aanhoudende schaalvergroting van turbines blijven productinnovaties leidend in het vormgeven van waardeketen, infrastructuur en investeringsbeslissingen. Hierdoor ontstaat een dynamiek waarin procesinnovatie vooral volgt op productinnovatie in plaats van een zelfstandige opschalingsmotor te zijn.

Handelingsperspectief

Opschaling op industriënniveau is gericht op **organisatorische** en **institutionele opschaling**, via de routes **institutionalisering** en **groei**, aangevuld met **replicatie** en **circulatie**.

- **Voor industrieën en ketenpartijen:** Werk actief samen aan standaardisatie van componenten, interfaces en processen om schaalvoordelen te realiseren (**institutionele dimensie**). Investeer gezamenlijk in infrastructuur (havens, schepen, netaansluitingen) die grootschalige groei mogelijk maakt (**kwantitatieve dimensie, route groei**). Faciliteer

kennisdeling en verspreiding van best practices in de keten, zodat procesinnovaties kunnen **circuleren** tussen bedrijven.

- **Voor brancheorganisaties:** Neem een coördinerende rol bij het ontwikkelen en uitdragen van dominante ontwerpen en industriestandaarden. Vertegenwoordig collectieve belangen richting overheden en internationale normalisatie-instituten om institutionele opschaling te versnellen.
- **Voor overheden:** Programmeer beleid dat investeringszekerheid biedt over langere tijdshorizonten, essentieel voor kapitaalintensieve industriële opschaling. Ondersteun regionale en internationale **replicatie** van waardeketens via gerichte industrie- en handelsstrategieën.

5.4 Innovatiesystemen

Dimensies

In de innovatiesysteemcontext is opschaling vooral **organisatorisch** en **institutioneel** van aard. Netwerken groeien, actoren diversifiëren en samenwerkingen intensiveren (organisatorisch), terwijl beleid, regelgeving, normen en maatschappelijke legitimiteit zich ontwikkelen en verankeren (institutioneel). Daarnaast is sprake van **functionele opschaling**, doordat systeemfuncties zich verbreden van kennisontwikkeling en experimenteren naar marktcreatie, legitimering en middelenmobilisatie. **Kwantitatieve opschaling** komt vooral in latere fasen naar voren, bijvoorbeeld in het aantal projecten, pilots en infrastructuren.

Routes

Binnen innovatiesystemen is **groei** zichtbaar als versterking van systeemfuncties en actoren. **Replicatie** speelt een belangrijke rol via het herhalen van pilots en beleidsinstrumenten in verschillende regio's. **Circulatie** uit zich in de verspreiding van kennis, beleidsideeën en technologische bouwstenen tussen landen en sectoren. Uiteindelijk leidt dit tot **institutionalisering**, waarbij offshore wind wordt ingebed in stabiele regimes van energiebeleid, infrastructuur en markten.

Handelingsperspectief

In de innovatiesysteemcontext staat opschaling vooral in het teken van **organisatorische**, **functionele** en **institutionele opschaling**, langs alle vier routes: **groei**, **replicatie**, **circulatie** en **institutionalisering**.

- **Voor overheden en beleidsmakers:** Faciliteer systeemgroei door langdurige beleidscommitment en coherente instrumentenmixen die verschillende systeemfuncties versterken. Gebruik pilots en experimenten als leermechanisme en schaal succesvolle interventies via **replicatie** naar andere regio's of sectoren. Zorg voor tijdige **institutionalisering** van succesvolle niches door regelgeving, normen en infrastructuur structureel aan te passen.
- **Voor kennisinstellingen en onderzoeksorganisaties:** Versterk kennisontwikkeling en -diffusie door actieve rol in netwerken en consortia (**organisatorische dimensie**). Ontwikkel overdraagbare kennis en methodieken die kunnen **circuleren** tussen projecten, beleid en sectoren.

- **Voor netwerkorganisaties en financiers:** Stimuleer verbindingen tussen actoren en mobiliseer middelen gericht op systeemdoorbraken in plaats van geïsoleerde projecten. Ondersteun transitiefases waarin niches doorgroeien naar regime-niveau, bijvoorbeeld via schaalbare financieringsprogramma's.

Tabel 5: Opschalingsfasen en dynamiek in de offshore-wind case

Opschalingscontext	Fase 1 – Exploratie & nichevorming	Fase 2 – Versnelling & opschaling	Fase 3 – Consolidatie & institutionalisering
Product / Dienst	<i>Kleinschalige onshore en eerste offshore pilots (Denemarken, jaren '80–'90).</i> • Lage vermogens ($\pm 0,4$ MW), experimentele ontwerpen • Sterke afhankelijkheid van subsidies en lokale gebruikers (boeren) Bepalende factoren: testbaarheid, leerprocessen, publieke steun Dimensies: kwantitatief (beperkt), functioneel Routes: groei (kleinschalig), replicatie (pilots)	<i>Snelle schaalvergroting van turbines en windparken.</i> • Groei naar 8–15 MW turbines, hogere betrouwbaarheid • Internationale uitrol naar Noordwest-Europa en Azië Bepalende factoren: kostenreductie, modulariteit, zichtbaarheid van succes Dimensies: kwantitatief, functioneel Routes: groei, replicatie	<i>Producten worden 'standaardoplossing'.</i> • Dominante ontwerpprincipes • Normen en certificering verankeren technologie Bepalende factoren: standaardisatie, regelgeving, marktvertrouwen Dimensies: institutioneel Routes: institutionalisering

Opschalingscontext	Fase 1 – Exploratie & nichevorming	Fase 2 – Versnelling & opschaling	Fase 3 – Consolidatie & institutionalisering
Bedrijf / Businessmodel	<i>Dominantie van MKB en ondernemende pioniers.</i> • Learning-by-doing, lokale netwerken • Project- en subsidiegedreven businessmodellen Bepalende factoren: ondernemerschap, publieke steun Dimensies: organisatorisch (licht), functioneel Routes: groei (projectmatig)	<i>Intrede van grote energiebedrijven.</i> • Verticale integratie (ontwikkeling, bouw, exploitatie) • Internationale expansie via consortia en joint ventures Bepalende factoren: toegang tot kapitaal, risicospreiding Dimensies: kwantitatief, organisatorisch Routes: groei, replicatie, circulatie	<i>Gevestigde, kapitaalintensieve bedrijven domineren.</i> • Stabiele verdienmodellen (PPA's) • Verweving met beleid en regulering Bepalende factoren: investeringszekerheid, regulatoire stabiliteit Dimensies: institutioneel, organisatorisch Routes: institutionalisering

Opschalingscontext	Fase 1 – Exploratie & nichevorming	Fase 2 – Versnelling & opschaling	Fase 3 – Consolidatie & institutionalisering
Industrie / Waardeketen	<i>Hoge variatie in ontwerpen en technologieën.</i> • Veel kleine spelers, experimentele ketens • Beperkte standaardisatie Bepalende factoren: technologische variatie, experimenteerruimte Dimensies: organisatorisch (fragmentatie) Routes: groei (diffuus)	<i>Ontstaan van dominant design.</i> • Standaardisatie van turbines en funderingen (monopiles) • Opschaling van productiecapaciteit en infrastructuur Bepalende factoren: schaalvoordelen, ketencoördinatie Dimensies: organisatorisch, kwantitatief Routes: institutionalisering, groei	<i>Consolidatie van waardeketens.</i> • Weinig grote spelers, hoge toetredingsdrempels • Focus op procesinnovatie en kostenreductie Bepalende factoren: infrastructuur, contractering, standaarden Dimensies: institutioneel, organisatorisch Routes: institutionalisering, circulatie

Opschalingscontext	Fase 1 – Exploratie & nichevorming	Fase 2 – Versnelling & opschaling	Fase 3 – Consolidatie & institutionalisering
Innovatiesysteem	<i>Fragiel niche-ecosysteem.</i> • Beperkt aantal actoren en netwerken • Overheidsfinanciering cruciaal Bepalende factoren: kennisontwikkeling, eerste coalities Dimensies: functioneel, organisatorisch Routes: groei (systeemfuncties)	<i>Systeemgroei en cumulatieve causaliteit.</i> • Versterkende interactie tussen beleid, markt en technologie • Europese coördinatie en infrastructuurontwikkeling Bepalende factoren: beleidsconsistentie, middelenmobilisatie Dimensies: organisatorisch, functioneel Routes: groei, replicatie, circulatie	<i>Volwassen innovatiesysteem.</i> • Offshore wind ingebed in energiebeleid en markten • Internationale regimes en standaarden Bepalende factoren: institutionele stabiliteit, legitimiteit Dimensies: institutioneel Routes: institutionalisering

6 Conclusie

6.1 Conclusie en reflectie

Dit rapport vertrok vanuit de constatering dat opschaling van technologische innovatie een veelgebruikt, maar ambigu begrip is. In beleid, onderzoek en praktijk wordt de term opschaling vaak impliciet en eenduidig gebruikt, terwijl de onderliggende processen zich juist kenmerken door complexiteit, gelaagdheid en contextafhankelijkheid. Het belangrijkste doel van dit rapport was daarom het ontwikkelen van een **integraal begrippenkader** dat recht doet aan deze complexiteit en tegelijkertijd houvast biedt voor analyse én handelen.

De meerwaarde van het begrippenkader ligt in het expliciet onderscheiden én verbinden van drie analytische perspectieven: **opschalingscontexten** (product/dienst, bedrijf/businessmodel, industrie/waardeketen en innovatiesysteem/niche), **opschalingsdimensies** (kwantitatief, functioneel, organisatorisch en institutioneel) en **opschalingsroutes** (groei, replicatie, circulatie en institutionalisering). Door deze perspectieven niet losstaand, maar in samenhang te benaderen, ontstaat een eenduidige taal om opschaling te duiden zonder de onderliggende diversiteit te reduceren. De toepassing van het begrippenkader op de case study offshore windenergie illustreert concreet hoe deze benadering helpt om opschaling beter te begrijpen. De case laat zien dat succesvolle opschaling niet kan worden teruggebracht tot één dimensie (bijvoorbeeld volumegroei) of één actor (bijvoorbeeld bedrijven), maar het resultaat is van samenlopende processen op verschillende niveaus. Over alle perspectieven heen zien we drie terugkerende typen kritieke beslissingen:

- **Tijdige verschuiving** van beslislogica (van leren → standaardiseren → borgen); In elk opschalingsproces is het essentieel om op het juiste moment de manier van beslissen aan te passen aan de fase waarin de innovatie zich bevindt. In de beginfase draait het vooral om leren: experimenteren, pilots uitvoeren en kennis opdoen. Hier is flexibiliteit belangrijk en worden fouten gezien als leermomenten. Naarmate de innovatie groeit en meer tractie krijgt, wordt het noodzakelijk om te standaardiseren: succesvolle werkwijzen, ontwerpen of processen worden vastgelegd, zodat ze op grotere schaal kunnen worden toegepast. In de laatste fase, als de innovatie breed is geaccepteerd, verschuift de focus naar borgen: het verankeren van standaarden, routines en verantwoordelijkheden, zodat de innovatie duurzaam en betrouwbaar blijft functioneren.
- **Consistentie tussen contexten** (productkeuzes moeten passen bij industrie- en beleidskeuzes); Opschaling vindt plaats in verschillende contexten, zoals producten, bedrijven, industrieën en innovatiesystemen. Een kritieke beslissing is om te zorgen voor samenhang tussen keuzes die in deze verschillende contexten worden gemaakt. Bijvoorbeeld: een productontwerp dat succesvol is op kleine schaal, moet ook aansluiten bij de eisen en standaarden van de industrie als geheel, en bij het beleid dat door overheden wordt gevoerd. Als er geen consistentie is, kunnen er fricties ontstaan: een product dat technisch werkt, maar niet past binnen industriële standaarden of regelgeving, zal moeilijk op te schalen zijn. Daarom is het belangrijk om beslissingen over producten, processen en beleid op elkaar af te stemmen, zodat opschaling soepel en effectief verloopt.

- **Heldere toewijzing van verantwoordelijkheid**, juist wanneer schaalvergroting risico's vergroot. Naarmate een innovatie opschaaft, nemen de complexiteit en de risico's toe. Dit vraagt om een duidelijke toewijzing van verantwoordelijkheden: wie is waar verantwoordelijk voor, wie neemt beslissingen, en wie draagt de risico's? In kleine projecten is dit vaak overzichtelijk, maar bij grootschalige uitrol kunnen onduidelijkheden ontstaan, zeker als meerdere partijen betrokken zijn (bedrijven, overheden, ketenpartners).

Deze drie typen beslissingen zijn in elke opschalingscontext relevant en bepalen in hoge mate het succes van het proces. Ze zorgen ervoor dat leren, standaardiseren en borgen op het juiste moment plaatsvinden, dat keuzes op verschillende niveaus op elkaar aansluiten, en dat betrokken stakeholders weten waar verantwoordelijkheden liggen.

6.2 Van analyse naar handelingsperspectief

Een belangrijke meerwaarde van het begrippenkader is dat het niet alleen beschrijvend, maar ook **handelingsgericht** is. Door expliciet te maken *wat* er opschaaft, *in welke context* en *via welke dimensies en routes*, ontstaat richting voor strategisch handelen. Het kader helpt actoren om:

- onderscheid te maken tussen groeiproblemen (kwantitatief), organisatievraagstukken (organisatorisch) en institutionele barrières (institutioneel);
- te bepalen welke opschalingsroutes op een bepaald moment dominant of wenselijk zijn;
- interventies fase- en contextspecifiek te ontwerpen, in plaats van generieke 'opschalingsoplossingen' toe te passen.

In de offshore-windcase wordt bijvoorbeeld zichtbaar waarom vroege beleidsinterventies gericht waren op pilots en subsidies (functionele en organisatorische opschaling), terwijl latere interventies gericht waren op standaardisatie, marktordening en infrastructuur-ontwikkeling (institutionalisering). Het begrippenkader fungeert daarmee als een **strategisch kompas** dat helpt om keuzes expliciet te maken en onderlinge samenhang tussen interventies te bewaken. De Appendix biedt een handreiking voor het navigeren van opschalingsprocessen in termen van kritieke beslissingen.

6.3 Beperkingen en tekortkomingen

Hoewel het integrale begrippenkader voor opschaling een waardevol analytisch en handelingsgericht instrument biedt, kent de benadering ook beperkingen en tekortkomingen die aandacht verdienen:

Analytische vereenvoudiging van complexe realiteit: Het begrippenkader is bedoeld als hulpmiddel om grip te krijgen op de veelvormige processen van opschaling. Tegelijkertijd blijft het een vereenvoudiging van de werkelijkheid. In de praktijk lopen contexten, dimensies en routes vaak door elkaar en zijn ze moeilijk scherp af te bakenen. Hierdoor bestaat het risico dat het kader te schematisch wordt toegepast, waardoor dynamiek en onverwachte ontwikkelingen onderbelicht blijven. Het model biedt structuur, maar mag niet leiden tot tunnelvisie of het negeren van contextuele nuances.

Beperkte voorspellende waarde: Het kader identificeert patronen en handelingsopties, maar biedt geen garantie op succesvolle opschaling. Het kan niet aangeven welke strategie in een specifieke situatie het beste werkt. De uitkomst van opschalingsprocessen wordt mede bepaald door contextspecifieke factoren, machtsverhoudingen, toevallige gebeurtenissen en

externe invloeden die zich onttrekken aan een generiek model. Het kader ondersteunt analyse en reflectie, maar kan niet fungeren als blauwdruk voor succes.

Empirische onderbouwing en generaliseerbaarheid: De inzichten in dit rapport zijn gebaseerd op een enkel case study, namelijk de opschaling van de offshore windindustrie. Hoewel deze casus rijk en goed gedocumenteerd is, blijft de generaliseerbaarheid van sommige bevindingen beperkt. Andere sectoren, technologieën of geografische contexten kunnen afwijkende dynamieken en knelpunten kennen. Het is raadzaam het kader in vervolgonderzoek te toetsen en te verfijnen aan de hand van diverse praktijkvoorbeelden.

Risico op statische toepassing: Opschaling is een dynamisch proces dat zich over tijd ontwikkelt. Het kader kan verleiden tot een statische benadering, waarbij te weinig aandacht is voor verschuivingen tussen fasen, routes en contexten. In werkelijkheid zijn timing, flexibiliteit en het vermogen om strategieën aan te passen aan veranderende omstandigheden cruciaal voor succes. Het kader moet daarom altijd worden gebruikt als een dynamisch instrument, dat ruimte biedt voor bijsturing en leren.

Beperkte integratie van maatschappelijke waarden: Opschaling is niet waarde vrij. Het begrippenkader focust primair op analytische en strategische aspecten, maar besteedt geen aandacht aan bredere maatschappelijke waarden zoals duurzaamheid, rechtvaardigheid en acceptatie. In de praktijk kunnen verschillende opschalingsroutes bijdragen aan – of juist conflicteren met – maatschappelijke doelen. Toekomstig onderzoek kan het kader verder verdiepen door deze waarden explicieter te integreren in de analyse en besluitvorming.

6.4 Aanbevelingen voor vervolgonderzoek

Op basis van deze reflectie zijn er verschillende richtingen voor verder onderzoek. Een eerste aanbeveling is om het begrippenkader toe te passen op **andere technologieën en sectoren**, zoals elektrische mobiliteit, waterstof of digitale infrastructuren, om de robuustheid en bruikbaarheid ervan te testen in uiteenlopende contexten.

Een specifieke richting zou bijvoorbeeld zijn om ook onderzoek te doen naar hoe technologieën die afhankelijk zijn van een eigen infrastructuur opschalen en hoe dit verschilt van producten die zich zonder al te veel fysieke belemmeringen kunnen verspreiden, zoals de producten waar Utterback over spreekt. Voornamelijk omdat veel technologieën die een grote rol spelen in de energietransitie deze infrastructurele component hebben.

Een tweede aanbeveling is om het kader sterker te verbinden met **tijdsdimensies en beslistmomenten**. Verdere uitwerking van fase-specifieke mechanismen kan helpen om beter te begrijpen wanneer verschuivingen tussen opschalingsroutes noodzakelijk zijn. Ten derde ligt er potentie in het koppelen van het begrippenkader aan **kwantitatieve indicatoren** en monitoringinstrumenten, zodat opschaling niet alleen kwalitatief kan worden geduid, maar ook systematisch gevolgd kan worden.

Tot slot verdient het aanbeveling om het kader verder te verdiepen in relatie tot **maatschappelijke waarden**, zoals duurzaamheid, rechtvaardigheid en maatschappelijke acceptatie. Opschaling is niet waarde vrij, en toekomstig onderzoek kan explicieter maken hoe verschillende opschalingsroutes bijdragen aan – of juist conflicteren met – bredere maatschappelijke doelen.

7 Referenties

Abernathy, W. J., & Utterback, J. M. (1978). Patterns of innovation in technology. *Technology Review*, 80(7), 40–47.

Auerswald, P. E., & Branscomb, L. M. (2003). Valleys of death and Darwinian seas: Financing the invention to innovation transition in the United States. *The Journal of Technology Transfer*, 28(3), 227–239.

Bento, N., & Fontes, M. (2019). Diffusion of floating offshore wind: Deployment drivers and barriers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 107, 145–154.

Breaugh, J., McBride, K., Kleinaltenkamp, M., & Hammerschmid, G. (2021). Beyond diffusion: A systematic literature review of innovation scaling. *Sustainability*, 13(24), 13528.

Broek, J. van den, Elzakker, I. van, Maas, T., & Deuten, J. (2020). Voorbij lokaal enthousiasme – Lessen voor de opschaling van living labs. *Rathenau Instituut*.

D'Aoust, G. (2012). Rogers' theory on the adoption of technology. *EDTech*.

Eelants, M. (z.d.). Productlevenscyclus: productgroepen en de productlevenscyclus.

Frake, A. N., & Messina, J. P. (2018). Toward a common ontology of scaling up in development. *Sustainability*, 10(3), 835.

Geels, F. W. (2002). Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes: A multi-level perspective and a case-study. *Research Policy*, 31(8–9), 1257–1274.

Geels, F. W., & Schot, J. (2007). Typology of sociotechnical transition pathways. *Research Policy*, 36(3), 399–417.

Geerdink, T., de Koning, N., & Suurs, R. (2015). Validatie en verbetering innovatiereis 0-energieomgeving KIEN.

Giller, O., Ellen, G. J., Meijerink, S., Breman, B., & van den Berg, R. (2024). Opschaling van innovaties in het water- en bodembeheer.

Gonsalves, J. F. (2001). Going to scale, what we have garnered from recent workshops. *LEISA Magazine*, 17(3).

Hartmann, A., & Linn, J. (2008). Scaling up: A framework and lessons for development effectiveness from literature and practice. *SSRN*.

Hekkert, M. P., Suurs, R. A., Negro, S. O., Kuhlmann, S., & Smits, R. E. (2007). Functions of innovation systems: A new approach for analysing technological change. *Technological Forecasting and Social Change*, 74(4), 413–432.

IEA. (2024). World Energy Outlook 2024. International Energy Agency.

International Institute of Rural Reconstruction. (2000). Going to Scale: Can We Bring More Benefits to More People More Quickly? Conference highlights April 10–14.

Jacobsson, S., & Bergek, A. (2004). Transforming the energy sector: The evolution of technological systems in renewable energy technology. *Industrial and Corporate Change*, 13(5), 815–849.

Karnoe, P., & Garud, R. (2012). Path creation and wind power: Strategic agency in technological innovation. *Energy Policy*, 38(2), 696–706.

Lema, R., Bonaglia, F., & Hansen, U. (2024). Global competition and technological change in the wind energy sector.

Lundvall, B. A. (1992). National systems of innovation: Towards a theory of innovation and interactive learning. Pinter Publishers.

Malerba, F. (2002). Sectoral systems of innovation and production. *Research Policy*, 31(2), 247–264.

Moore, M. L., Riddell, D., & Vocisano, D. (2015). Scaling out, scaling up, scaling deep: Strategies of non-profits in advancing systemic social innovation.

NREL. (2024). Offshore Wind Turbine Technology Trends 2024. National Renewable Energy Laboratory.

Osterwalder, A., & Pigneur, Y. (2010). Business model generation: A handbook for visionaries, game changers, and challengers. John Wiley & Sons.

Platform31. (2022). Opschaling: belemmeringen en tips.

Ries, E. (2011). The lean startup: How today's entrepreneurs use continuous innovation to create radically successful businesses. Crown Business.

Rogers, E. M. (1962). Diffusion of innovations. Free Press.

Sauser, B., Verma, D., Ramirez-Marquez, J., & Gove, R. (2006). From TRL to SRL: The concept of systems readiness levels.

Schut, M., Leeuwis, C., & Thiele, G. (2020). Science of scaling: Understanding and guiding the scaling of innovation for societal outcomes. *Agricultural Systems*, 184, 102908.

Simmons, R., & Shiffman, J. (2007). Scaling up health service delivery: From pilot innovations to policies and programmes.

Suurs, R. A. A. (2009). Motors of sustainable innovation: Towards a theory on the dynamics of technological innovation systems.

Utterback, J. M. (1975). A dynamic model of process and product innovation. *The International Journal of Management Science*, 3(6).

Utterback, J. M. (1996). Mastering the dynamics of innovation. Harvard Business School Press.

Uvin, P. (1995). Fighting hunger at the grassroots: Paths to scaling up. *World Development*, 23(6), 927–939.

Van Buuren, A., Vreugdenhil, H., van Popering-Verkerk, J., Ellen, G. J., & van Leeuwen, C. (2019). The pilot paradox: Exploring tensions between internal and external success factors in Dutch climate adaptation projects.

Van der Loos, H. Z. A., Negro, S. O., & Hekkert, M. P. (2021). The co-evolution of innovation systems and context: Offshore wind in the Netherlands and Norway. *Technological Forecasting and Social Change*, 170, 120883.

WFO. (2024). Global Offshore Wind Report 2024. World Forum Offshore Wind.

Wiske, M. S., & Perkins, D. (2005). Dewey goes digital: Scaling up constructivist pedagogies and the promise of new technologies.

Woltering, L., Fehlenberg, K., Gerard, B., Ubels, J., & Cooley, L. (2019). Scaling – from “reaching many” to sustainable systems change at scale: A critical shift in mindset. *Agricultural Systems*, 176, 102652.

Appendix: Kritieke beslissingen

Voor deze specifieke analyse is een AI-tool ingezet. Validatie en nadere analyse is nodig om deze inzichten extern te kunnen publiceren

Deze appendix brengt de meest kritieke beslissingen in kaart die actoren tijdens de verschillende fasen van opschaling moeten nemen. Het doel is om inzicht te geven in waar de belangrijkste knelpunten en keuzemomenten liggen, en hoe deze beslissingen het verloop en het succes van opschalingsprocessen beïnvloeden. Door deze beslissingen expliciet te maken, kunnen beleidsmakers, ondernemers en andere betrokkenen hun strategie beter afstemmen op de fase en context waarin zij opereren. De overzichten in deze appendix bieden een overzicht van de kernvragen en afwegingen per opschalingscontext en -fase. Ze zijn bedoeld als praktisch hulpmiddel om lopende processen te diagnosticeren, vergelijkingen te maken tussen verschillende situaties, en strategische keuzes bewuster te maken.

Over alle contexten heen zien we drie terugkerende typen kritieke beslissingen:

- **Tijdige verschuiving** van beslislogica (van leren → standaardiseren → borgen); In elk opschalingsproces is het essentieel om op het juiste moment de manier van beslissen aan te passen aan de fase waarin de innovatie zich bevindt. In de beginfase draait het vooral om leren: experimenteren, pilots uitvoeren en kennis opdoen. Hier is flexibiliteit belangrijk en worden fouten gezien als leermomenten. Naarmate de innovatie groeit en meer tractie krijgt, wordt het noodzakelijk om te standaardiseren: succesvolle werkwijzen, ontwerpen of processen worden vastgelegd, zodat ze op grotere schaal kunnen worden toegepast. In de laatste fase, als de innovatie breed is geaccepteerd, verschuift de focus naar borgen: het verankeren van standaarden, routines en verantwoordelijkheden, zodat de innovatie duurzaam en betrouwbaar blijft functioneren. Het risico is dat een te vroege of te late verschuiving tussen deze fasen kan leiden tot inefficiëntie, gemiste kansen of juist rigiditeit.
- **Consistentie tussen contexten** (productkeuzes moeten passen bij industrie- en beleidskeuzes); Opschaling vindt plaats in verschillende contexten, zoals producten, bedrijven, industrieën en innovatiesystemen. Een kritieke beslissing is om te zorgen voor samenhang tussen keuzes die in deze verschillende contexten worden gemaakt. Bijvoorbeeld: een productontwerp dat succesvol is op kleine schaal, moet ook aansluiten bij de eisen en standaarden van de industrie als geheel, en bij het beleid dat door overheden wordt gevoerd. Als er geen consistentie is, kunnen er fricties ontstaan: een product dat technisch werkt, maar niet past binnen industriële standaarden of regelgeving, zal moeilijk op te schalen zijn. Daarom is het belangrijk om beslissingen

over producten, processen en beleid op elkaar af te stemmen, zodat opschaling soepel en effectief verloopt.

- **Heldere toewijzing van verantwoordelijkheid**, juist wanneer schaalvergroting risico's vergroot. Naarmate een innovatie opschaaft, nemen de complexiteit en de risico's toe. Dit vraagt om een duidelijke toewijzing van verantwoordelijkheden: wie is waar verantwoordelijk voor, wie neemt beslissingen, en wie draagt de risico's? In kleine projecten is dit vaak overzichtelijk, maar bij grootschalige uitrol kunnen onduidelijkheden ontstaan, zeker als meerdere partijen betrokken zijn (bedrijven, overheden, ketenpartners). Heldere afspraken over eigenaarschap, aansprakelijkheid en besluitvorming zijn dan cruciaal om problemen te voorkomen en om snel te kunnen reageren op onverwachte situaties. Juist bij schaalvergroting kan het ontbreken van duidelijke verantwoordelijkheden leiden tot vertragingen, fouten of zelfs het mislukken van het opschalingsproces.

Deze drie typen beslissingen zijn in elke opschalingscontext relevant en bepalen in hoge mate het succes van het proces. Ze zorgen ervoor dat leren, standaardiseren en borgen op het juiste moment plaatsvinden, dat keuzes op verschillende niveaus op elkaar aansluiten, en dat iedereen weet waar de verantwoordelijkheden liggen—zeker als de risico's toenemen door schaalvergroting. In de navolgende secties worden de specifieke beslissingen benoemd.

Tabel I geeft een overzicht van kritieke beslissingen gekoppeld aan de opschalingscontexten en ontwikkelingsfasen.

Producten en diensten

Voor deze specifieke analyse is een AI-tool ingezet. Validatie en nadere analyse is nodig om deze inzichten extern te kunnen publiceren.

Kernvraag: Hoe kan de technologie schaalbaar worden gemaakt zonder haar kernwaarde te verliezen, rekening houdend met de adoptiedynamiek volgens Rogers?

Exploratie & nichevorming

- Bepaal het relatieve voordeel en de compatibiliteit van de innovatie ten opzichte van bestaande alternatieven en de behoeften van eerste gebruikers.
- Selecteer representatieve of beschermde niches voor experimenten en pilots.
- Zorg dat de resultaten van pilots zichtbaar en deelbaar zijn binnen relevante netwerken, zodat opinieleiders overtuigd raken.

Versnelling & gerichte opschaling

- Kies het juiste moment voor standaardisatie, zodat de innovatie aantrekkelijk en betrouwbaar wordt voor bredere gebruikersgroepen.
- Leg ontwerpkeuzes vast zodra voldoende bewijs is dat deze aansluiten bij de behoeften van een bredere gebruikersgroep.
- Faciliteer grootschaligere pilots en deel succesverhalen om de drempel voor bredere adoptie te verlagen.

Consolidatie & institutionalisering

- Bepaal welke normen en certificeringen worden geaccepteerd of beïnvloed, zodat de innovatie als standaardoplossing wordt erkend.
- Beslis waar verdere optimalisatie nog waarde toevoegt en waar stabiliteit belangrijker is dan voortdurende verandering.
- Zorg dat de innovatie breed zichtbaar is en aansluit bij bestaande praktijken, zodat ook de late majority en laggards overgaan tot adoptie.

Reflectie: Het risico in deze context is dat te vroeg of te laat standaardiseren kan leiden tot inefficiëntie, gemiste kansen of juist rigiditeit. Heldere keuzes in elke fase zijn cruciaal voor succesvolle opschaling.

Bedrijven en businessmodellen

Voor deze specifieke analyse is een AI-tool ingezet. Validatie en nadere analyse is nodig om deze inzichten extern te kunnen publiceren.

Kernvraag: Kan de organisatie groei dragen zonder strategische coherentie te verliezen?

Exploratie & nichevorming

- Maak een keuze tussen projectgedreven of platformgedreven groei.
- Bepaal of afhankelijkheid van subsidies wordt geaccepteerd of actief verminderd.
- Neem make-or-buy beslissingen voor kerncompetenties.

Versnelling & gerichte opschaling

- Kies een kapitaalsstrategie (eigen groei, partnerschappen, overnames, private equity).
- Beslis over internationaal repliceren of eerst consolideren.
- Bepaal of risico's worden geïnternaliseerd of geïnternaliseerd (bijvoorbeeld via contracten).

Consolidatie & institutionalisering

- Herijk het businessmodel of stabiliseer het bestaande model.
- Bepaal de afhankelijkheid van specifieke regelgeving.
- Identificeer welke activiteiten kern zijn en welke commodity zijn geworden.

Reflectie: Het risico is dat de organisatievorm niet aansluit bij latere schaalambities of dat men vastzit in een businessmodel dat alleen werkt onder oude randvoorwaarden. Tijdige herijking en duidelijke keuzes zijn essentieel.

Industrieën en waardeketens

Voor deze specifieke analyse is een AI-tool ingezet. Validatie en nadere analyse is nodig om deze inzichten extern te kunnen publiceren.

Kernvraag: Ontstaat een gecoördineerde keten die grootschalige productie aankan?

Exploratie & nichevorming

- Maak een keuze tussen een open ecosysteem of gesloten partnerschappen.
- Bepaal de tolerantie voor parallelle oplossingen in de keten.
- Wijs systeemverantwoordelijkheid toe, ook zonder formele autoriteit.

Versnelling & gerichte opschaling

- Maak dominant design expliciet of laat het organisch ontstaan.
- Investeer vooruit in ketencapaciteit of breid reactief uit.
- Kies voor geografische concentratie of spreiding van productie.

Consolidatie & institutionalisering

- Beslis hoe om te gaan met overcapaciteit.
- Bepaal of nieuwe toetreders worden toegelaten of drempels worden verhoogd.
- Kies voor concurrentie op prijs of op optimalisatie/diensten.

Reflectie: Het risico is dat te veel fragmentatie geen opschalingspad oplevert, terwijl te vroege dominantie kan leiden tot kwetsbaarheid. Balans en timing zijn bepalend voor succes.

Innovatiesystemen

Voor deze specifieke analyse is een AI-tool ingezet. Validatie en nadere analyse is nodig om deze inzichten extern te kunnen publiceren

Kernvraag: Worden leerprocessen structureel ondersteund en geborgd?

Exploratie & nichevorming

- Versterk actief bepaalde systeemfuncties (kennisontwikkeling, experimenteren, legitimiteit).
- Bepaal de mate van bescherming tegen marktdruk.
- Definieer de rol van de overheid: regisseur of facilitator.

Versnelling & gerichte opschaling

- Bouw beleidsinstrumenten af of schaal ze juist op.
- Coördineer tussen verschillende regimes (energie, ruimtelijke ordening, industrie).
- Stimuleer internationale beleidsreplicatie.

Consolidatie & institutionalisering

- Bepaal wanneer nichespecifiek beleid wordt beëindigd.
- Maak keuzes over welke instituties permanent worden.
- Ontwikkel strategieën om systeemvergrendeling te voorkomen.

Reflectie: Het risico is dat te weinig bescherming leidt tot voortijdig afsterven van technologie, of dat lock-in ontstaat in een suboptimale transitieroute. Flexibiliteit en heldere rolverdeling zijn noodzakelijk/

Tabel I Kritieke beslissingen voor opschaling

Voor deze specifieke analyse is een AI-tool ingezet. Validatie en nadere analyse is nodig om deze inzichten extern te kunnen publiceren

<i>Opschalingscontext</i>	<i>Exploratie & nichevorming</i>	<i>Versnelling & gerichte opschaling</i>	<i>Consolidatie & institutionalisering</i>
Product / Dienst	Timing: hoeveel ruimte geven aan experimenten voordat prestaties worden vastgelegd? Reikwijdte: welke functies zijn essentieel en welke nog open? Verantwoordelijkheid: wie is eigenaar van leerervaringen uit pilots?	Timing: wanneer overstappen van maatwerk naar standaardproduct? Reikwijdte: welke ontwerpkeuzes 'bevriezen' (bijv. turbine-klasse)? Verantwoordelijkheid: wie accepteert prestatie- en faalrisico's bij schaalvergroting?	Timing: wanneer optimalisatie belangrijker dan radicale verbetering? Reikwijdte: welke normen worden leidend? Verantwoordelijkheid: wie onderhoudt en actualiseert standaarden?
Bedrijf / Businessmodel	Timing: wanneer investeren in organisatie-opbouw? Reikwijdte: focus op één markt of meerdere niches? Verantwoordelijkheid: welke risico's blijft het bedrijf zelf dragen?	Timing: wanneer internationaal opschalen versus consolideren? Reikwijdte: kernactiviteiten versus uitbesteden? Verantwoordelijkheid: hoe worden investerings- en marktrisico's verdeeld (investeerdere, partners)?	Timing: wanneer businessmodel herijken? Reikwijdte: welke inkomstenstromen zijn structureel? Verantwoordelijkheid: wie borgt stabiliteit bij veranderende randvoorwaarden?
Industrie / Waardeketen	Timing: hoe lang parallelle oplossingen toelaten? Reikwijdte: mate van openheid van de keten? Verantwoordelijkheid: wie neemt systeemregie zonder formele autoriteit?	Timing: wanneer actief sturen op dominant design? Reikwijdte: welke delen van de keten standaardiseren? Verantwoordelijkheid: wie investeert vooruit in ketencapaciteit en infrastructuur?	Timing: wanneer saneren of consolideren? Reikwijdte: barrières voor toetreding verhogen of verlagen? Verantwoordelijkheid: wie bewaakt veerkracht en robuustheid van de keten?
Innovatiesysteem	Timing: hoe lang bescherming tegen marktdruk vasthouden? Reikwijdte: welke systeemfuncties prioriteit krijgen? Verantwoordelijkheid: rolverdeling overheid – markt – kennisinstellingen?	Timing: wanneer nichebeleid afbouwen? Reikwijdte: mate van beleidsreplicatie en internationale afstemming? Verantwoordelijkheid: wie coördineert beleidsinstrumenten over domeinen heen?	Timing: wanneer niche wordt regime? Reikwijdte: welke instituties permanent maken? Verantwoordelijkheid: wie corrigeert systeemvergrendeling en lock-ins?

ICT, Strategy & Policy

Anna van Buerenplein 1
2595 DA Den Haag
tno.vector.nl

TNOvector