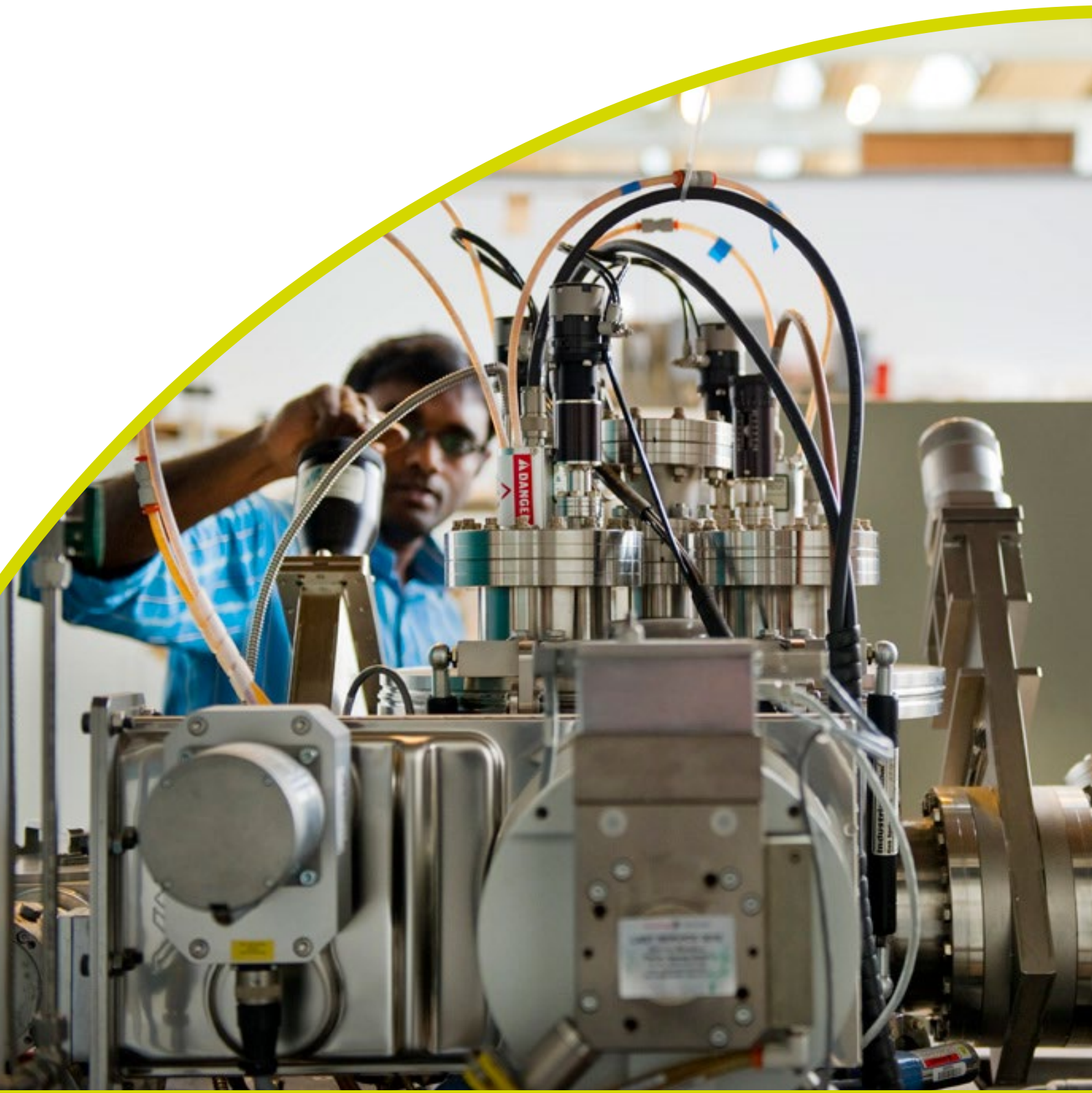
CIRCULAIRE
MAAKINDUSTRIE

ROUTEKAART CIRCULAIRE EN WEERBARE MACHINEBOUW



Inhoud

Leeswijzer **4**

Nederland Circulair Machineland: Meer verdienen met minder (managementsamenvatting) **5**

1 Context: Concurreren in een sector onder druk **7**
1.1 Grondstoffenstrategie, circulaire doelen, en industriebeleid 7
1.2 Een routekaart voor en met de sector 7

2 Visie en doelen: Met circulariteit meer waarde, meer weerbaarheid, en minder milieudruk **9**
2.1 In 2035 blinkt de Nederlandse maakindustrie uit met slim materiaalgebruik als norm 9
2.2 Indicatieve doelen dragen bij aan landelijke ambities 11

3 Scope: De machine centraal **14**
3.1 Machinebouw in Nederland: Een factor van betekenis 14
3.2 Scope: alle relevante marktsegmenten, met speciale aandacht voor machines in semicon, medtech, agrifood, energie en defensie 15
3.3 Scope: De hele machine, met speciale aandacht voor (elektro)motoren en besturing & software 16

4 Analyse: Knelpunten en kansen voor circulariteit in de machinebouw **20**
4.1 Drie belangrijke knelpunten en kansen 20
4.2 Politiek: Relevant beleid in Nederland 21
4.3 Politiek: Relevant beleid in de EU 23
4.4 Economie: Verdienvermogen 25
4.5 Economie: Leveringszekerheid 26
4.6 Environment: Klimaat- en milieu-effecten 27

5 Deep dive: Elektromotoren en permanente magneten **29**
5.1 De motor als kritieke schakel 29
5.2 Circulaire strategieën prioriteren op impact en haalbaarheid 31

6 Oplossingsrichtingen en actielijnen **35**
6.1 Samenhang van oplossingsrichtingen 35
6.2 Zes inhoudelijke actielijnen en componentenaanpak 35
6.3 Vijf marktprogramma's en een initiator 41

7 Van routekaart naar gerichte actie **45**
7.1 Wie is aan zet voor wat? 45
7.2 Overall coördinatie, nationaal en regionaal 46
7.3 Van Routekaart naar investeringsaanpak 47
7.4 Impact en monitoring 48
7.5 Gewenste vervolgacties 52

8 Bijlagen 53

Bijlage 1: Profielen productteamleden 54

Bijlage 2: Doelensystematiek 56

Bijlage 3: Uitgebreide PESTEL-analyse 59

Bijlage 4: Kritieke materialen in robotica 63

Bijlage 5: Aanvullende toelichting permanente magneten in motoren 65

Bijlage 6: Klimaat- en milieu-impact productieketen 68

Bijlage 7: Details actielijnen 69

Bijlage 8: Prioritair programma: opschaling remanufacturing 73

Bijlage 9: Governance - KetenkrachtNL 75

Bijlage 10: Lopende initiatieven en projecten 77

Bijlage 11: NEN Factsheet – machinebouw 83

Bijlage 12: Praktijkvoorbeelden circulaire machinebouw 85

Bijlage 13: Afkortingenlijst 87

Leeswijzer

De route naar circulaire en weerbare machinebouw

Zo zit de routekaart in elkaar

Deze leeswijzer laat in één oogopslag zien hoe de routekaart is opgebouwd en waar de belangrijkste aangrijpingspunten liggen.



1 Context

Concurreren in een sector onder druk

Internationale concurrentie, schaarste aan grondstoffen en componenten, geopolitieke onzekerheid, krapte op de arbeidsmarkt en druk op klimaat en milieu.

2 Visie en doelen

Richting voor 2035

Slim materiaalgebruik wordt steeds meer de norm. Machines gaan langer mee, onderdelen houden langer waarde en informatie reist mee over de levenscyclus.

3 Scope

De machine centraal

Alle markten, met nadruk op Semicon, MedTech, Agri/Food, Energie en Defensie.

Alle machineonderdelen, met nadruk op elektromotoren en besturing.

Semicon · MedTech · Agri/Food · Energie · Defensie

4 Analyse

Knelpunten en kansen

Drie centrale opgaven: concurrentiekracht, leveringszekerheid en impact op klimaat en milieu.

5 Deep-dive

Elektromotoren en permanente magneten

Een concreet voorbeeld waarin materiaalgebruik, ketenrisico's en circulariteit samenkomen.

6 Oplossingsrichtingen

Twee samenhangende sporen voor uitvoering

Zes inhoudelijke actielijnen + componentenaanpak

- Leveranciersmanagement
- Ontwerp
- Levensduurverlenging
- Hergebruik
- Business-strategie
- Digitalisering

Componentenaanpak

Beginnen met elektromotoren en permanente magneten

Vijf marktprogramma's + een initiator

- Semicon
- MedTech
- Agri/Food
- Energie
- Defensie
- **Initiator**

7 Uitvoering

Wie is aan zet, hoe organiseren we de coördinatie, wat is de investeringsaanpak, hoe meten en monitoren we impact en welke vervolgacties zijn er?



Bestemming 2035

- slim materiaalgebruik als norm
- sterkere concurrentiepositie
- minder afhankelijkheid
- lagere klimaat- en milieudruk
- informatie reist mee met de machine



Richtinggevende doelen 2035

18%	6,5%	15%
minder grondstoffengebruik	vervanging van primaire grondstoffen	hoogwaardige recycling

Inhoud in één oogopslag

1 Context
2 Visie en doelen
3 Scope
4 Analyse
5 Deep-dive
6 Oplossingsrichtingen
7 Uitvoering
8 Bijlagen

Kernboodschap: meer waarde met minder materiaal.

Nederland Circulair Machineland: Meer verdienen met minder (managementsamenvatting)

Deze routekaart is opgesteld in opdracht van het ministerie van Economische Zaken en Klimaat, binnen het Uitvoeringsprogramma Circulaire Maakindustrie. Een productteam uit bedrijfsleven, regio en overheid heeft haar samen met de sector ontwikkeld, via stakeholderbijeenkomsten, interviews en reviewrondes. De sector ziet kansen en zoekt samenwerking en support om met circulariteit als kernstrategie substantieel bij te dragen aan de nationale ambities van economische groei, strategische autonomie en impact op klimaat en milieu. Deze routekaart is daarom het begin van een traject om tot uitvoering en impact te komen.

Nederland is een land van machinebouwers. Zo'n 3.700 bedrijven zijn goed voor ruim 100.000 banen en € 21 miljard bruto toegevoegde waarde. Niet voor niets is machinebouw één van de zes kansrijke markten in het nieuwe industriebeleid, met als eerste focus semicon, agrifood, medtech en energie. Het rapport-Wennink beoogt voor de sector 1,5 tot 2% reële groei per jaar. Tegelijk staat de sector onder druk. Kosten stijgen en de concurrentie uit Azië groeit. Grondstoffen, onderdelen en kritieke componenten zijn minder vanzelfsprekend beschikbaar: één niet-leverbaar onderdeel kan een complete machine stilzetten. En de machinebouw is materiaal- en energie-intensief, met een materiaalgebonden klimaatimpact van circa 14 Mton CO_2-equivalenten per jaar.

Voor de machinebouw is circulariteit een economische strategie, veel breder dan alleen een duurzaamheidsvraagstuk. Het raakt direct aan marges, leveringszekerheid en concurrentiekracht. Een machine staat vaak tien, twintig jaar of langer bij de klant. Wie die installed base beter benut met onderhoud, upgrades, revisie en hergebruik, verdient meer, staat steviger in de keten en is minder kwetsbaar voor schaarste en geopolitiek. Slim materiaalgebruik is daarmee een strategie voor verdienvermogen, én een directe bijdrage aan de nationale doelen voor grondstoffen, klimaat en milieu.

Qua scope van de routekaart hebben we de complete machine met al zijn onderdelen als vertrekpunt genomen, met extra aandacht voor elektromotoren met permanente magneten: klein in gewicht, groot in impact, en met een sterke geopolitieke afhankelijkheid. Machinebouw strekt zich uit over alle markten en deze routekaart is dus ook breed toepasbaar. Qua uitvoering richten we ons prioritair op de groeimarkten semicon, medtech, agrifood, energie en defensie.

Visie en potentiële impact

Op weg naar vergaande doorvoering van circulaire economie in onze economie en samenleving, hebben we voor de machinebouw een heldere stip op de horizon gezet:

In 2035 is slim materiaalgebruik in de hele keten de norm voor de Nederlandse machinebouw: een sector die duurzaam, concurrerend en weerbaar is, en goed voor mens en werk.

Slim betekent in dit geval: meer waarde creëren, economisch, ecologisch én sociaal, met zo min mogelijk verbruik van energie en schaarse grondstoffen. De installed base wordt een kernbron van omzet, hergebruik op industriële schaal wordt een verdienmodel.

Bij een visie hoort ook een richting. Voor harde sectordoelen is het echter nog te vroeg. Wel zijn, aansluitend bij de nationale tussendoelen, richtinggevende doelen (potenties) bepaald:

- **18% minder grondstoffenverbruik**, waarvan 16 procentpunt door levensduurverlenging.
- **6,5% van de materiaalinput vervangen** door secundaire, biotische of aantoonbaar duurzamere grondstoffen.
- **minimaal 15% hoogwaardige recycling** van de vrijkomende materiaalstromen.

Als deze potentie gerealiseerd wordt, kan daarmee **impact** bereikt worden van **1,5 tot 2% reële economische groei, 42 tot 49% hogere materiaalproductiviteit** en **circa 2,5 Mton vermeden CO_2-uitstoot** in de keten.

Route en uitvoering

Op basis van een grondige analyse van knelpunten en kansen aangedragen door de sector, hebben we een routekaart opgesteld rond zes inhoudelijke actielijnen en vijf concrete marktprogramma's.

- **Inhoudelijke actielijnen** vormen samen een end-to-end aanpak van de keten: van inkoop tot klantlevering tot end-of-use management: 1) inkoop en leveranciersmanagement; 2) circulair ontwerp en standaardisatie; 3) installed base en levensduurverlenging; 4) hergebruik; 5) businessstrategie; 6) digitalisering. Daar overheen stellen we een **componentenaanpak** voor, te beginnen bij de motor, om de inhoud in samenhang aan te pakken.
- **Marktprogramma's**: a) semicon, b) medtech, c) agrifood, d) energie en e) defensie. Het al bestaande Circular Business Program Semicon laat zien hoe over een keten heen kan worden geoptimaliseerd voor impact. Dit programma moet verder worden opgeschaald. Naar voorbeeld van semicon moeten gelijksoortige programma's worden gestart in de andere markten. Een **initiator** kan daarbij helpen om nieuwe marktprogramma's aan te jagen vanuit concrete bedrijfsvraagstukken.

In de machinebouw wordt op veel plekken al aan circulariteit en waardebehoud gewerkt. Deze routekaart biedt handvatten om daar een versnelling en opschaling in aan te brengen. Door onbenut potentieel over ketens en markten heen te ontsluiten en barrières daarvoor weg te nemen. De sector is er klaar voor, maar heeft support en samenwerking nodig om de volgende fase in te zetten. We zien vijf kortetermijnvervolgstappen om de uitvoering van de routekaart op te starten:

- Een **roadshow** om het brede veld mee te nemen en coalities te vormen
- Een **ketentafel machinebouw** om de noodzakelijke governance te borgen
- Een **heldere inbedding** in het nationaal industriebeleid, met een goede landing binnen het ministerie van Economische Zaken en Klimaat.
- Een **financiële investering** van ca € 10 miljoen programmatische middelen, als hefboom voor circa € 100 miljoen aan private en publieke investeringen. Met een potentiële impact van € 0,5 tot 1 miljard extra toegevoegde waarde per jaar in 2035
- Een **monitoringsinstrument** om voortgang zichtbaar te maken en tijdig bij te sturen. Helder en beknopt, en aansluitend bij nationale en internationale meetinstrumenten

Gestut door bovenstaande randvoorwaarden, kan een begin worden gemaakt met de opstart van individuele projecten en keten- en marktprogramma's. Zo wordt Nederland Circulair Machineland en gaan we meer verdienen met minder. Voor welvaart en autonomie, met aandacht voor mens en planeet.

1 Context: Concurreren in een sector onder druk

1.1 Grondstoffenstrategie, circulaire doelen, en industriebeleid

Nederland is een land van machinebouwers. Met ruim € 20 miljard bruto toegevoegde waarde en ruim 100.000 banen, speelt de machinebouw een grote rol van betekenis. Tegelijk staat de sector onder grote druk om internationaal concurrerend te blijven, terwijl toegang tot grondstoffen, onderdelen en kritieke componenten minder vanzelfsprekend wordt en marges onder druk staan. Circulaire verdienmodellen kunnen helpen om meer waarde te creëren en behouden, minder afhankelijk te worden van ketenverstoringen, en de druk op klimaat en milieu te verkleinen. Maar dat lukt niet vanzelf.

Deze Routekaart Circulaire en Weerbare Machinebouw beoogt praktische handvatten te bieden, aan bedrijven, brancheorganisaties en overheden, om samen kansen te benutten en barrières naar circulariteit weg te nemen. Hiermee kan Nederland **productiviteit en verdienvermogen vergroten, internationale afhankelijkheden en risico's verkleinen en de druk op klimaat en milieu verminderen**. In concrete actielijnen wordt weergegeven wat er al gebeurt, welke initiatieven daar nog bij zouden moeten komen en welke partijen bij welke acties het voortouw zouden moeten nemen. We nemen hierbij een implementatiehorizon van 5 tot 10 jaar als uitgangspunt.

De routekaart sluit naadloos aan bij het landelijke beleid:

- De **Nationale Grondstoffenstrategie (NGS)** richt zich op het verhogen van de leveringszekerheid van kritieke grondstoffen. Circulariteit en ketensamenwerking zijn daarin kernelementen.
- Het **Nationaal Programma Circulaire Economie (NPCE)** stelt als doel dat Nederland in 2050 volledig circulair is, om milieudruk te verlagen en leveringszekerheid te verhogen.
- Het **Uitvoeringsprogramma Circulaire Maakindustrie (UPCM)** is gepositioneerd op het snijvlak van NGS en NPCE. Binnen dit uitvoeringsprogramma is machinebouw geïdentificeerd als één van de acht prioritaire productgroepen.
- Het **landelijk industriebeleid machinebouw** is momenteel in ontwikkeling. De eerste focus ligt daarbij op vier toepassingsgebieden: de semiconductor-toeleveringsketen, landbouw- en voedsel-technologie, medische technologie en machines en systemen voor de energiesector. Robotica/fysieke AI en circulariteit lopen hier als twee doorsnijdende thema's doorheen. Binnen de routekaart nemen we dezelfde focusgebieden als uitgangspunt.

1.2 Een routekaart voor en met de sector

Met deze routekaart willen we praktische handvatten bieden, zowel voor beleidsmakers als voor de industrie zelf. Daarom is een brede afstemming gezocht met het werkveld en zijn gedurende het proces meerdere reviewmomenten ingebouwd om feedback op te halen en het verhaal aan te scherpen. Wat ons betreft is de oplevering van de routekaart niet een eindpunt, maar een ankerpunt in het proces waarbij de uitvoering ter hand wordt genomen door verschillende spelers in het veld. Er gebeurt al heel veel, maar initiatieven lopen vaak tegen barrières aan of worstelen met opschaling. De routekaart is richtinggevend in waar extra aandacht, middelen en actie nodig is, en kan als 'levend document' op latere momenten verder worden aangescherpt en doorontwikkeld.

Opdrachtgeverschap en betrokkenheid ministeries

De Routekaart Circulaire en Weerbare Machinebouw is opgesteld in opdracht van het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat (EZK), uit hoofde van de beleidsverantwoordelijkheid voor de NGS en het UPCM binnen het NPCE. Verschillende beleidsdirecties van EZK waren tijdens het proces betrokken, te weten Innovatie & Industrie (I&I), Economische veiligheid en weerbaarheid (EVW) en Circulaire

Economie (onderdeel van Klimaat en Groene Groei (KGG)). Daarnaast hebben het Nederlands Normalisatie-instituut (NEN) en het Nederlands Materialen Observatorium (NMO) ondersteund met analyses.

Productteam

Voor het opstellen van deze routekaart is een productteam samengesteld. Dit team bestond uit experts die de overheid en de sector vertegenwoordigen, waardoor kennis en ervaring vanuit verschillende expertises (onder andere medische technologie en semiconductor, digitalisering, regionale ontwikkeling) zijn gebundeld. De profielen van de productteamleden zijn beschreven in bijlage 1.

- Harald Tepper (Philips, tot juli 2026; H.O.E.) Voorzitter
- Esther Kersten (ImpactX) Productteamlid
- Jan Westra (Janura, projectleider DACE) Productteamlid
- Joost Kuijper (Provincie Overijssel) Productteamlid
- Alejandra Roetenberg en Marije Mossel (RVO) Secretaris

Opdrachtgevers:

- Loeki Schaeffers en Mattheüs van de Pol (EZK) Gedelegeerd opdrachtgevers

Ondersteuning:

- Jeannette Levels-Vermeer (Circonnect) Begeleiding proces en inhoud
- Ton Bastein (TNO, NMO) Analyses
- Bridget Baker en Giles Bangoyina (NEN) Analyses

Stakeholderbetrokkenheid in het proces

Tijdens een aantal stakeholderbijeenkomsten zijn verschillende versies van de routekaart getoetst en is input en feedback opgehaald:

- **Congres Circulair ondernemen (Utrecht, 19 maart 2026)**
  Tijdens dit congres is de actietafel 'circulariteit en grondstoffenzekerheid in de machinebouw' georganiseerd. In deze bijeenkomst is bij circa 15 bedrijven input opgehaald op de scope, visie, knelpunten en mogelijke oplossingsrichtingen.
- **Stakeholdersbijeenkomst (Utrecht, 11 mei 2026)**
  Op 11 mei is een tweede stakeholdersbijeenkomst gehouden, waarbij circa 10 deelnemers aanwezig waren. Tijdens een werksessie zijn vier prioritaire oplossingsrichtingen uitgewerkt.
- **Jaarevent Circulaire Maakindustrie (Woerden, 17 juni 2026)**
  Tijdens het jaarevent Circulaire Maakindustrie, georganiseerd door Stichting Circulaire Maakindustrie en Circonnect, heeft een toetsingssessie plaatsgevonden van de oplossingsrichtingen en beoogde actielijnen. Bij deze sessie waren circa 35 deelnemers aanwezig.

Naast gerichte bijeenkomsten is er gebruik gemaakt van het netwerk van het productteam (onder andere Stichting Circulaire Maakindustrie en brancheorganisaties) en de werkgroep Ketens (Krachtenbundeling rijk-regio) om relevante sleutelspelers in de sector en lopende initiatieven in kaart te brengen. Ook heeft het productteam verschillende bedrijven geïnterviewd om uitkomsten te toetsen en feedback op te halen. In de laatste fase hebben verschillende stakeholders meegelezen met conceptversies van de routekaart.

Het productteam dankt alle personen die hebben bijgedragen aan de totstandkoming van deze routekaart. Speciaal dank aan de deelnemers aan de drie stakeholdersbijeenkomsten, de geconsulteerde en geïnterviewde bedrijven en de leden van het reviewpanel.

Stakeholderbetrokkenheid na oplevering

Een routekaart krijgt pas waarde als je ook samen op pad gaat. We hopen dat deze routekaart richting geeft en inspiratie biedt om bestaande initiatieven verder uit te breiden of op te schalen, nieuwe initiatieven te ontplooien en ondersteuning te bieden (coördinatie, financiering en beleid) die daarvoor nodig is. Het grootste deel van het werk moet nog komen. Juist pilots en concrete bedrijfscases moeten laten zien wat werkt, welke randvoorwaarden nodig zijn en welke aanpak zich leent voor opschaling naar andere bedrijven en ketens. In hoofdstuk 7 beschrijven we welke partijen voor welke activiteiten logischerwijs het voortouw zouden moeten nemen. Zodat we samen werken naar een florerende duurzame economie met meer waarde, meer weerbaarheid en minder milieudruk.

2 Visie en doelen: Met circulariteit meer waarde, meer weerbaarheid, en minder milieudruk

2.1 In 2035 blinkt de Nederlandse maakindustrie uit met slim materiaalgebruik als norm

Voor de Nederlandse machinebouw is circulariteit geen apart duurzaamheidsvraagstuk. Het raakt direct aan marges, leveringszekerheid, concurrentiekracht en toekomstige omzet. De kernvraag is simpel: hoeveel waarde weten bedrijven vast te houden uit de grondstoffen, onderdelen en machines die ze in omloop brengen? Wie daar het beste in wordt, verdient beter, staat steviger in de keten en is minder kwetsbaar voor schaarste en geopolitiek. **Slim materiaalgebruik is een strategie voor verdienvermogen**. De economische waarde ontstaat daarbij niet alleen op het moment van verkoop, maar kan gedurende de hele levenscyclus worden behouden, verloren én opnieuw gecreëerd.

De inzet is groot. De machinebouw is één van de motoren van de Nederlandse economie: ruim € 20 miljard bruto toegevoegde waarde, meer dan 100.000 banen en zo'n 3.700 bedrijven, overwegend mkb. Tegelijk staat de sector voor een dubbele opgave: nieuwe groeimarkten bedienen en internationaal concurrerend blijven, terwijl toegang tot grondstoffen, onderdelen en kritieke componenten minder vanzelfsprekend wordt en marges onder druk staan. Veel machinebouwers leunen nog sterk op de verkoop van nieuwe machines en ondervinden problemen om door middel van circulariteit meer waarde te creëren en de afhankelijkheid van materialen en componenten te verkleinen. Voor kapitaalgoederen begint na levering immers een tweede economische fase: vaak staat een machine nog tien, twintig jaar of langer bij de klant, waarbij onderhoud, onderdelen, upgrades en prestaties bepalen hoeveel waarde behouden blijft. Juist daar biedt circulariteit een uitweg: meer waarde halen uit wat er al is, in plaats van steeds afhankelijker worden van wat schaarser wordt. Zo creëert de sector méér waarde, wordt hij weerbaarder én verlaagt hij de druk op klimaat en milieu.

In het jaar 2050 willen Nederland en de Europese Unie (EU) klimaatneutraal zijn. Mede daarvoor zal de circulaire economie mainstream moeten zijn geworden. 2050 lijkt ver weg, maar is in feite morgen. Machines die vandaag worden ontworpen, draaien voor een deel immers in 2050 nog bij de klant. De keuzes van nu bepalen grotendeels de circulaire economie van straks. Daarom kiezen we een concrete tussenhalte:

In 2035 is slim materiaalgebruik in de hele keten de norm voor de Nederlandse machinebouw: een sector die duurzaam, concurrerend en weerbaar is, en goed voor mens en werk.

Slim betekent voor ons: meer waarde creëren - economisch, ecologisch én sociaal - met zo min mogelijk energie en schaarse grondstoffen. Concreet betekent dat het verdienvermogen vergroten, risicovolle strategische afhankelijkheden terugdringen, de druk op klimaat, milieu en natuur verlagen, en de arbeidsproductiviteit en -omstandigheden verbeteren.

Figuur 1: Visie circulaire en weerbare machinebouw 2035



Hoe ziet circulaire en weerbare machinebouw eruit in 2035?

Het grootste verdienpotentieel staat bij de klant. Veel machinebouwers verdienen vooral aan de machines die dit jaar de fabriek verlaten, terwijl er honderden tot duizenden machines bij klanten in het veld staan. In 2035 is die 'installed base' geen naverkoop-bijzaak meer, maar een kernbron van omzet. Met data, monitoring, onderhoud, upgrades en revisie blijven machines langer presteren en ontstaan doorlopende inkomsten uit service en levensduurverlenging — verankerd in businessmodellen die een lange levensduur belonen in plaats van afstraffen. Een machinebouwer weet dan niet alleen hoeveel machines hij heeft verkocht, maar ook waar relevante machines en componenten zich bevinden, in welke configuratie zij draaien en wanneer onderhoud, upgrading of vervanging economisch zinvol wordt.

Hergebruik op industriële schaal wordt een verdienmodel. Aan het einde van de gebruiksfase is weggooien de uitzondering geworden. Een substantieel deel van de machines keert terug in de keten. Door hele machines, modules of componenten opnieuw in te zetten - na repair, refurbishment of remanufacturing - verzilveren bedrijven de energie, materialen en het vakmanschap die al in het product zitten. Kortere cycle times en herkwalificatie van producten maken hergebruik niet alleen duurzaam, maar ook snel en rendabel.

Minder afhankelijk, steviger in de keten. Eén niet-leverbaar onderdeel kan vandaag een complete machine stilzetten. In 2035 dempen modulair ontwerp, standaardisatie, substitutie en hergebruik van kritieke componenten dat risico. Zo wordt de sector minder gevoelig voor geopolitieke schokken. En doordat waarde langer in de keten blijft, worden risico's én marges eerlijker over die keten verdeeld.

Schoner, met werk voor vakmensen. Minder verbruik van primaire materialen en langer functioneel gebruik kunnen over het algemeen de CO_2-voetafdruk verlagen en afval verminderen. Tegelijk verankert circulariteit werkgelegenheid in Nederland: levensduurverlenging, revisie en remanufacturing zijn arbeids-intensief en vragen om vakmanschap dat hier blijft en groeit.

Gericht industriebeleid als vliegwiel. In 2035 plukt de sector de vruchten van tien jaar hernieuwd, gericht industriebeleid. De inzet op kansrijke groeimarkten - chipmachines, agrifood, energietechnologie en medtech - geeft de Nederlandse economie een boost in concurrentiekracht en verdienvermogen. Sterke inbedding van circulariteit in die sectoren, maakt machinebouw toekomstbestendig in langetermijn waardecreatie en weerbaarheid.

Vijf kernprincipes van visie naar uitvoering

Een visie geeft richting, maar wordt pas werkelijkheid als er een concrete agenda is om aan te werken. Circulariteit vraagt daarbij actie langs de hele levenscyclus van de machine, van inkoop en leveranciersmanagement, ontwerp en productie, via slim gebruik naar hergebruik, gedragen door nieuwe businessmodellen en met data en digitalisering als verbindende rode draad. We bouwen de agenda op langs vijf kernprincipes:

- **Slim materiaalgebruik als basis.** Elke ontwerp- en inkoopkeuze begint bij de vraag hoe je met zo min mogelijk schaars en kritiek materiaal zoveel mogelijk waarde levert. Materiaal is geen sluitpost, maar een strategische keuze die marges, risico en milieudruk tegelijk bepaalt.
- **Ontwerpen voor langdurige inzetbaarheid.** Modulaire, gestandaardiseerde en goed gedocumenteerde ontwerpen maken machines makkelijker te onderhouden, upgraden, repareren en hergebruiken. Standaardisatie is bedrijfsgebonden en niet overal haalbaar, maar waar het lukt verlaagt het kosten én afhankelijkheden.

- **Levensduurverlenging als norm.** Een machine die langer betrouwbaar presteert, levert langer waarde, voor de klant én voor de bouwer. Onderhoud, monitoring, upgrades en revisie worden standaard onderdeel van het aanbod, niet een bijzaak na verkoop.
- **Circulaire omzet als verdienmodel.** Service, levensduurverlenging, refurbishment en remanufacturing zijn geen kostenposten maar nieuwe, terugkerende inkomstenstromen. Het verdienmodel verschuift van 'zoveel mogelijk nieuwe machines verkopen' naar 'zoveel mogelijk waarde uit elke machine halen'.
- **Streven naar minder afhankelijkheid van kritieke importmaterialen.** Door substitutie, hergebruik van kritieke componenten en slimmer ontwerp wordt de sector minder kwetsbaar voor schaarste en geopolitieke schokken. En houdt hij meer strategische waarde binnen de eigen keten.

Onder deze principes ligt een digitale informatielaag die ontwerp, gebruik, service en hergebruik met elkaar verbindt; zonder die verbinding blijft levenscyclussturing vaak beperkt tot losse optimalisaties.

2.2 Indicatieve doelen dragen bij aan landelijke ambities

Een route bestaat niet zonder een bestemming, een richting. Heldere doelen helpen bedrijven en overheden om te prioriteren, te investeren en hun inspanningen gericht in te zetten. Hoe beter de impact (economisch, sociaal, ecologisch) gemeten kan worden, hoe gemakkelijker hij kan worden meegenomen in bedrijfsstrategieën, rapportage, en aansprekende proposities naar de klant.

De bijdrage van machinebouwers is substantieel. De sector is één van de motoren van de Nederlandse economie. Tegelijk is de sector een intensief gebruiker van grondstoffen, kritieke materialen en energie en kan daarmee dus ook substantieel bijdragen aan de impact voor Nederland.

De nationale ambities zijn helder: het verdienvermogen versterken, strategische autonomie vergroten en de druk op klimaat en milieu verlagen. Ze zijn verankerd in een samenhangend geheel van kaders: de NGS, het NPCE en het industrie- en innovatiebeleid (met onder meer het groeimarktenrapport), de Nationale Technologie Strategie (NTS) en het Actieprogramma Duurzame Digitalisering 2026-2028. Het beleidsevaluatiekader van de NGS, met daarin de circulariteitsdoelen uit het NPCE, vormt het startpunt waaraan we de doelen voor de machinebouw ophangen.

Toch is het nog te vroeg om nu harde, kwantitatieve doelen voor de sector vast te leggen. De doelen die we hieronder beschrijven zijn gebaseerd op een potentiemethodiek, bottom-up ingeschat met een beperkte vertegenwoordiging van het werkveld. Daarom moeten de doelen in deze routekaart worden beschouwd als **richtinggevende doelen (potenties)** en niet als al vastgestelde en gezamenlijk overeengekomen sectordoelen. Wellicht dat overheid en industrie langs bovengenoemde lijnen over enkele jaren wel concrete doelen en wederzijdse commitments overeen kunnen komen, maar nu is dat nog te vroeg.

Richtinggevende doelen (potentie): 1. Grondstofverbruik

Voor het bepalen van het circulaire potentieel van de machinebouw is aangesloten bij het adviesrapport *Circulaire economie tussendoelen 2035*[1] waarin het basisjaar 2016 als referentiepunt dient voor het CE-beleid. In dit rapport van KplusV en CE Delft is voor verschillende clusters berekend welk circulair potentieel in 2035 kan worden gerealiseerd per circulaire strategie.

Voor de machinebouw wordt uitgegaan van het gemiddelde potentieel van twee clusters van productgroepen: Cluster 10 (Machines) en Cluster 11 (Voertuigen exclusief auto's). Cluster 10 sluit rechtstreeks aan bij de machinebouw. Cluster 11 is aanvullend relevant omdat deze productgroep, evenals veel machines, bestaat uit kapitaalintensieve en technisch complexe producten met een relatief lange levensduur en mogelijkheden voor onderhoud, reparatie, revisie en hergebruik.

De uitkomsten zijn vertaald naar **drie operationele doelen**, overeenkomstig de indeling van het nationale tussendoelenrapport: **besparen, vervangen** en **behouden van grondstoffen**. De doelen worden hieronder beschreven. Zie bijlage 2 voor een uitgebreidere weergave van de onderbouwing.

1 Bron: Rapport 'Circulaire economie tussendoelen 2035', KplusV en CE Delft (in opdracht van min. I&W)

Doel 1a. Besparen van grondstoffen

In 2035 kan het grondstoffengebruik van de machinebouw met 18% zijn verminderd ten opzichte van de referentiesituatie, waarvan 2 procentpunt door efficiënter grondstoffengebruik en 16 procentpunt door levensduurverlenging.

Levensduurverlenging levert binnen deze benadering de grootste bijdrage. Machines, modules en componenten worden langer functioneel in gebruik gehouden, bijvoorbeeld door onderhoud, reparatie, upgrading, revisie, remanufacturing en hergebruik van machines en onderdelen. Daardoor neemt de behoefte aan nieuwe productie en dus nieuwe grondstoffen af. Daarnaast kan directe vermindering van grondstoffenverbruik worden bereikt door bijvoorbeeld materiaal-efficiënt ontwerp, vermindering van productie-uitval en vermijden van overdimensionering. De bijdrage van circulair ontwerpen loopt door deze strategieën heen: ontwerpkeuzes ondersteunen zowel directe materiaalbesparing als een langere gebruiksduur. Veel grondstoffenwinst ontstaat dus al vroeg in de levenscyclus. Minder uitval, minder onnodige varianten en scherper ontwerpen op materiaalgebruik voorkomen verlies dat later nauwelijks nog is terug te verdienen.

Doel 1b. Vervangen van primaire grondstoffen

In 2035 kan 6,5% van de voor de machinebouw relevante materiaalinput vervangen zijn door secundaire, duurzame biotische of aantoonbaar duurzamere alternatieve grondstoffen, ten opzichte van de referentiesituatie.

Dit betreft het vervangen van primaire, fossiele of schaarse grondstoffen door secundaire grondstoffen, duurzaam geproduceerde biotische grondstoffen of alternatieve materialen met een lagere milieu-impact en een kleiner leveringsrisico. Voor de machinebouw ligt het accent naar verwachting vooral op het vergroten van het aandeel secundair staal, aluminium en kunststoffen, het beperken of vervangen van kritieke en strategische grondstoffen en het toepassen van hergebruikte onderdelen en componenten. Substitutie moet steeds worden beoordeeld in samenhang met technische prestaties, veiligheid, levensduur, repareerbaarheid en hoogwaardige verwerkbaarheid.

Doel 1c. Behouden van grondstoffen in de economie

In 2035 kan minimaal 15% van de vrijkomende materiaalstromen uit machines en machineonderdelen hoogwaardig worden gerecycled, waarbij de materialen zoveel mogelijk opnieuw worden ingezet in gelijkwaardige toepassingen.

Dit doel richt zich op het behouden van de functionele en economische waarde van materialen nadat hergebruik, reparatie, revisie of remanufacturing niet meer mogelijk is. Ook als substantiële successen zijn bereikt met levensduur verlengende strategieën, dan komt er nog altijd een moment waarop dat niet meer mogelijk is. Hoogwaardige recycling betekent dat de materialen die dan nog weer vrijkomen, zoveel mogelijk worden teruggebracht in toepassingen met een gelijkwaardige kwaliteit en functie. Dit vraagt onder meer om demontabel ontwerp, materiaalidentificatie, gescheiden inzameling, zuivere materiaalstromen en samenwerking tussen machinebouwers, gebruikers, onderhoudsbedrijven, demontagebedrijven en recyclers.

Richtinggevende doelen (potentie): 2. Impact op verdienvermogen, leverings-zekerheid en klimaat/milieu

Circulariteit is geen doel, maar een middel. Een middel om impact te creëren op economie en maat-schappij. Daarom maakt ook het NPCE onderscheid tussen operationele doelen (hoe snel worden we meer circulair?) en impactdoelen (wat levert het op?). De nationale tussendoelen voor de CE zijn in deze routekaart vertaald naar (impact)doelen voor verdienvermogen, leveringszekerheid en klimaat- en milieu-impact.

Doel 2a. Verdienvermogen

Circulariteit draagt in belangrijke mate bij aan toekomstige waardecreatie. Onderhoud, reparatie, upgrading, remanufacturing en digitale dienstverlening maken het mogelijk meer economische waarde te realiseren met minder materiaal. In het rapport-Wennink wordt gestreefd naar een gemiddelde reële groei van de bruto toegevoegde waarde van 1,5-2% per jaar. Hierdoor neemt niet alleen de toegevoegde waarde per werknemer toe, maar kan de materiaalproductiviteit richting 2035 met 42-49% verbeteren. Zo verbindt de routekaart economische groei aan een absolute vermindering van grondstoffenverbruik, ketenemissies en leveringsrisico's. Materiaalproductiviteit verbindt grondstoffen-verbruik rechtstreeks met economische prestaties. Een hogere materiaalproductiviteit betekent dat dezelfde hoeveelheid materiaal gedurende de levenscyclus meer toegevoegde waarde oplevert. Voor verdien-vermogen in de machinebouw nemen we de potentie van 1,5-2% reële groei van Wennink over.

Doel 2b. Leveringszekerheid

Een daling van 18% in materiaalverbruik verkleint de totale blootstelling van de sector aan kritieke materialen; 6,5% substitutie vermindert de afhankelijkheid van primaire grondstoffen; hoogwaardige recycling creëert binnenlands aanbod. Hiermee draagt de machinebouw bij aan het Europese streven van minder dan 65% afhankelijkheid van productie van een enkel land, en meer dan 25% beschikbaarheid van strategische grondstoffen voor recycling. Voor machinebouwers ligt een belangrijk deel van het leveringsrisico op componentniveau. De kwetsbaarheid wordt bepaald door vervangbaarheid, levertijd, leveranciersafhankelijkheid en de gevolgen van uitval voor de complete machine.

Voor een deel zal de daling van materiaalgebruik komen uit conventionele materialen (staal, plastics, etc.), voor een deel ook uit de hoogwaardige componenten die langer worden gebruikt, of hoogwaardig lokaal gerecycled. Omdat in deze verschillende stromen in meer of minder mate kritieke grondstoffen voorkomen, is het op dit moment niet mogelijk om een specifiek richtinggevend doel te formuleren voor (afhankelijkheid van) kritieke grondstoffen.

Doel 2c. Klimaat

Met een gemiddeld kengetal voor broeikasgasemissies van 3,5 kg CO_2-equivalenten per kilogram machine vertegenwoordigt het huidige materiaalgebruik een indicatieve ketenimpact van 13,9 Mton CO_2-equivalenten. De grondstoffenbesparing van 18% kan daarvan circa 2,5 Mton vermijden over de hele keten (scope 3). Aanvullende klimaatwinst door substitutie en hoogwaardige recycling wordt materiaalspecifiek bepaald. Naast deze scope 3-opgave streeft de sector naar een reductie van scope 1-emissies met 40–50% en scope 2-emissies met 80–90% in 2035 ten opzichte van 2025. Scope 1 en 2-reducties komen meer uit energie- en brandstofverbruik. De impact van circulariteit hierop zal beperkt zijn.

Doel 2d. Milieu

De materiaaldoelen geven inzicht in de hoeveelheid gebruikte grondstoffen en in het aandeel secundaire, biotische en hoogwaardig gerecyclede materialen. Deze indicatoren beschrijven echter niet de volledige milieuprestatie. Twee aanvullende invalshoeken zijn daarom nodig: de integrale levenscyclusimpact via Milieukostenindicator (MKI) en het afzonderlijk beheersen van Zeer Zorgwekkende Stoffen (ZZS). Deze doorrekening heeft nog niet plaatsgevonden. Op basis daarvan kunnen later richtinggevende doelen worden toegevoegd op totale milieu-impact en reductie van ZZS.

Tabel 1: Vertaling van circulariteitsdoelen machinebouw naar impact

Maatschappelijk effect	Richtinggevend doel (potentie) voor 2035	Bijdrage circulaire doelen	Mogelijke KPI's voor monitoring
Verdienvermogen	De reële bruto toegevoegde waarde jaarlijks met gemiddeld **1,5–2,0%** laten groeien, terwijl het absolute gebruik van ruwe materialen afneemt.	Verschuiven waardecreatie van materiaalvolume naar prestaties, dienstverlening en technisch waardebehoud.	Reële bruto toegevoegde waarde; toegevoegde waarde per ton materiaal; aandeel omzet uit circulaire producten en diensten.
Leveringszekerheid	De afhankelijkheid van kritieke materialen en componenten verminderen blootstelling aan schaarse en geconcentreerde grondstoffenketens verminderen.	**18% minder materiaalvraag** verkleint de totale blootstelling; **6,5% substitutie** vermindert de afhankelijkheid van primaire grondstoffen; hoogwaardige recycling creëert binnenlands aanbod.	Aandeel kritieke grondstoffen; aandeel secundair materiaal; aandeel hergebruik van kritieke componenten; beschikbaarheid voor recycling.
Klimaat	Minimaal **2,5 Mton materiaalgebonden emissies over de gehele keten** vermijden (met name scope 3).	**18% grondstoffenbesparing** levert indicatief **2,5 Mton CO_2-eq. ketenreductie** op; substitutie en hoogwaardige recycling leveren aanvullende, nog te berekenen reducties.	Scope 1, 2 en 3 in ton CO_2-eq.; materiaalgebonden CO_2 per kg materiaal.
Milieu	Materiaalgebonden milieu-impact (MKI) over de gehele keten reduceren (doel later kwantificeren); Toepassing van ZZS zodanig reduceren dat emissie van deze stoffen wordt voorkomen en de aanwezigheid van ZZS geen belemmering vormen voor hoogwaardige recycling.	Het materiaalgebruik met **18%** verminderen, het aandeel secundaire en duurzame biotische grondstoffen naar minimaal **6,5%** brengen en minimaal **15%** van het afval hoogwaardig recyclen.	Totale MKI-impact voor sector machinebouw (extrapolatie); toepassing ZZS in machinebouw (kg); emissies ZZS in machinebouw (CO_2 eq).

Voor de uiteindelijke doelen en monitoring moeten definities, indicatoren, systeemgrenzen en meetmethoden worden gekozen die aansluiten bij mondiale circulariteitskaders, waaronder het Global Circularity Protocol (GCP). Dit vergroot de internationale vergelijkbaarheid en voorkomt dat internationaal opererende organisaties met uiteenlopende methodieken en rapportagevereisten worden geconfronteerd.

3 Scope: De machine centraal

3.1 Machinebouw in Nederland: Een factor van betekenis

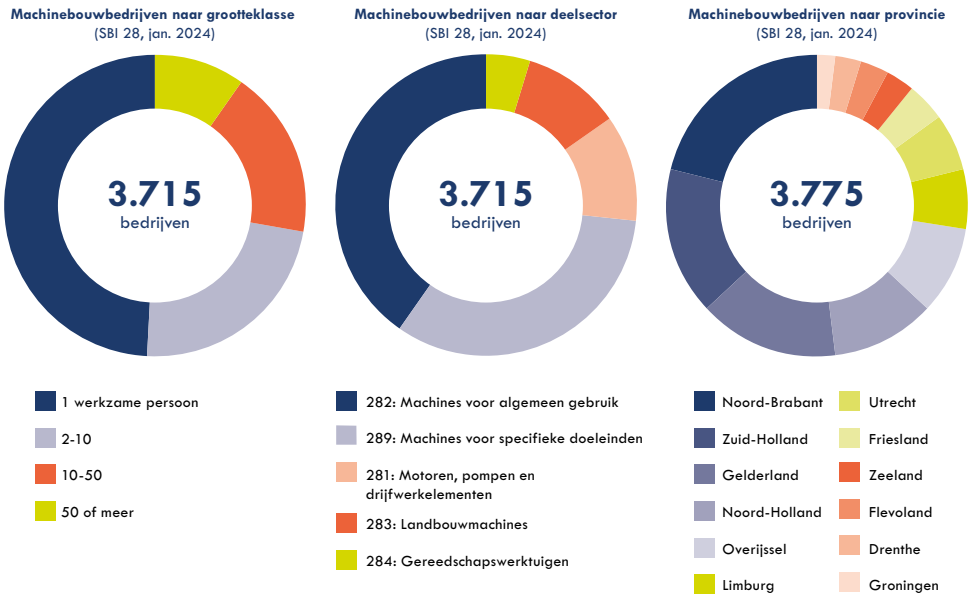
Machinebouw (SBI-code 28[2]) is de industriële sector die zich bezighoudt met het ontwerpen, ontwikkelen, produceren, assembleren, installeren en onderhouden van machines en productiesystemen voor andere bedrijven. Het gaat meestal om kapitaalgoederen en productiemiddelen: machines die worden ingezet om producten te maken, te bewerken, te verpakken, te vervoeren of te testen. Zij leveren een grote bijdrage aan de werkgelegenheid, het verdienvermogen en, door het intensieve grondstoffenverbruik, ook aan de negatieve impact op klimaat en milieu.

Aantal en spreiding machinebouwbedrijven: circa 108.000 banen

De Nederlandse machinebouwsector bestaat uit circa 3.700 bedrijven, waarvan bijna 99% tot het mkb behoort. Samen zijn deze bedrijven goed voor ongeveer 108.000 werknemersbanen, circa 13,6% van de werkgelegenheid binnen de Nederlandse industrie.

Machinebouwers leveren onder meer aan de voedsel- en verpakkingsindustrie, landbouw, hightech en semicon, bouw, logistiek, energie en de bredere maakindustrie. De sector is over heel Nederland verspreid, met de grootste concentraties in Noord-Brabant, Zuid-Holland en Gelderland. Deze drie provincies omvatten samen ongeveer 52% van alle machinebouwvestigingen.

Figuur 2: Omvang machinebouw in Nederland: ca. 3700 bedrijven. (a) Aantallen machinebouwbedrijven naar grootte. (b) Aantallen machinebouwbedrijven naar klantsegment. (c) Aantallen machinebouwbedrijven naar provincie. (bron: CPA-analyse Circonnect)

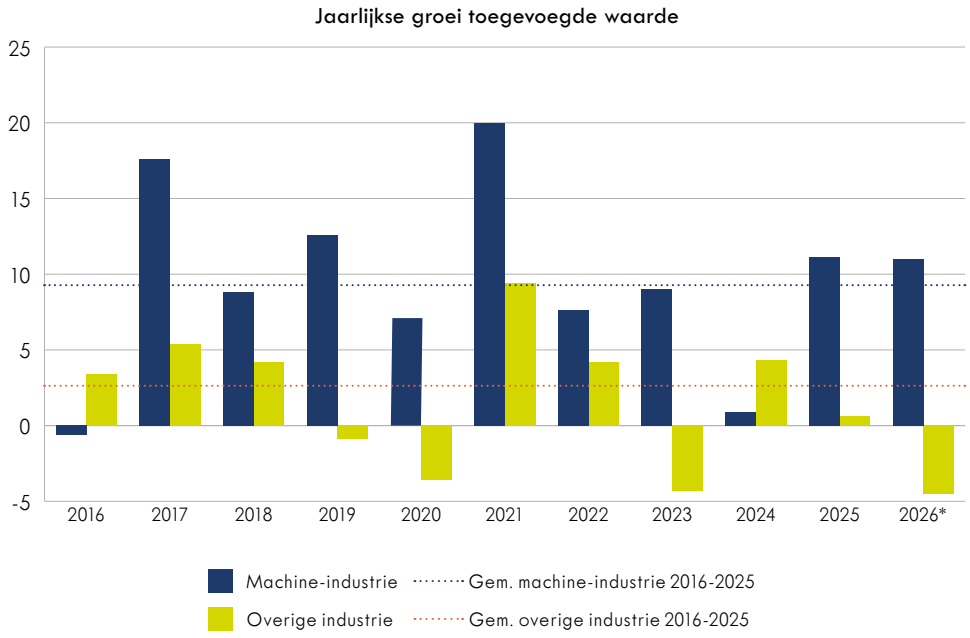


2 SBI (Standaard Bedrijfsindeling) - subcodes : vervaardiging van machines en apparaten voor algemeen gebruik; 282: vervaardiging van overige machines en apparaten voor algemeen gebruik; 283: vervaardiging van machines en werktuigen voor de land- en bosbouw; 284: vervaardiging van niet-verspanende machines voor de metaalbewerking en van gereedschapswerktuigen; 289: vervaardiging van overige machines, apparaten en werktuigen voor specifieke doeleinden. Bron: CBS

Economische waarde machinebouwbedrijven: circa € 21 miljard bruto toegevoegde waarde

De machinebouw in Nederland levert gezamenlijk een bruto toegevoegde waarde van 21 miljard euro per jaar, ruim 18% van de industrie. Daarmee behoort het, samen met chemie en voedingsmiddelen, tot de grootste subsectoren binnen de industrie. De machinebouw groeit ook bovengemiddeld sterk: gemiddeld 9,5% per jaar, tegen 2% per jaar voor de industrie als geheel, figuur 3.

Figuur 3: Toegevoegde waarde machine-industrie vs. overige industrie. Jaar-op-jaar, in constante prijzen.[3])



Grote impact op milieu en klimaat door intensief grondstoffengebruik

De machinebouw is materiaal- en energie-intensief en heeft daardoor een grote impact op klimaat en milieu. Met een totale materiaalstroom van 4,9 miljoen ton heeft de machinebouw een materiaal-gebonden klimaatimpact van ca 14 Mton CO_2-equivalenten. Een betrouwbare koppeling aan de mate van vervuiling, uitgedrukt in MKI, is nog niet te geven. In hoofdstuk 4 gaan we uitgebreider in op deze klimaat- en milieu-impact.

3.2 Scope: alle relevante marktsegmenten, met speciale aandacht voor machines in semicon, medtech, agrifood, energie en defensie

De meeste knelpunten en oplossingsrichtingen die in deze routekaart worden besproken, zijn generiek toepasbaar op een breed scala aan machines. In principe hebben we daarom alle marktsegmenten in scope genomen, behalve een aantal productsegmenten waar al aparte routekaarten voor zijn gemaakt (zoals klimaatinstallaties, wind op zee). Vanwege het belang voor Nederland en/of vanwege al veel bestaande activiteit, geven we extra aandacht aan de machinebouw in de segmenten semicon, medtech, agrifood, energie en defensie.

3 Bron: ING-rapport Facts & figures industry- machinebouw, 2026

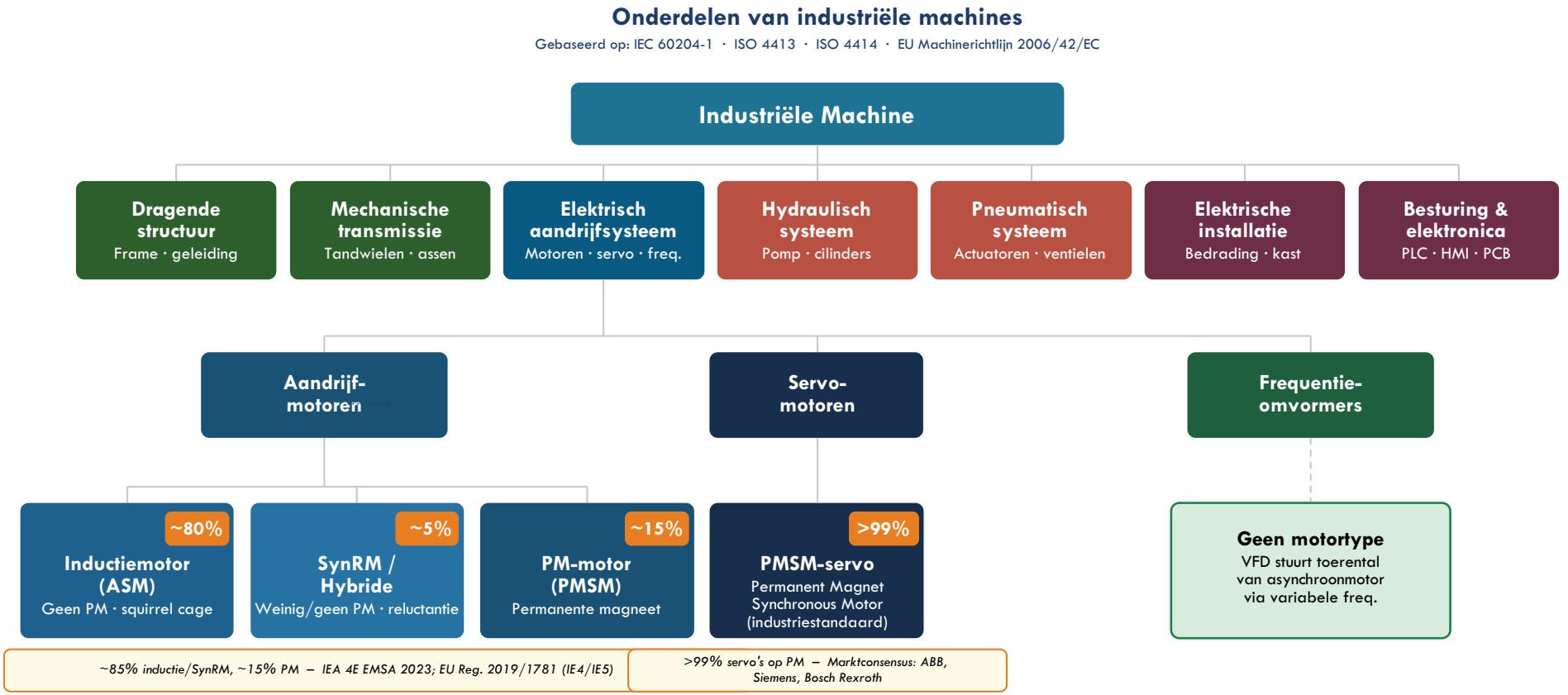
Tabel 2: Scope marktsegmenten routekaart machinebouw, met SBI-codering

SBI-code	Marktsegment
Productie- en bewerkingsmachines, inclusief machines voor semicon (chipmachines), energietechnologie en defensie	
28.41	Gereedschapswerktuigen voor metaalbewerking
28.49	Overige gereedschapswerktuigen
28.91	Machines voor de metallurgie
28.94–28.96	Machines voor textiel, papier, kunststof en rubber
28.99	Overige machines voor specifieke doeleinden, waaronder chipmachines
Medische en laboratoriummachines (medtech)	
26.51	Meet-, regel- en controleapparatuur
26.60	Elektromedische en elektrotherapeutische apparatuur
32.50.2	Medische instrumenten en hulpmiddelen, exclusief tandtechniek
Landbouwmachines en voedingsmiddelenmachines (agrifood)	
28.30	Machines en werktuigen voor de land- en bosbouw
28.93	Machines voor de productie van voedings- en genotmiddelen
Transport- en logistieke machines (inclusief voor defensie)	
28.22	Hijs-, hef- en transportwerktuigen
28.29	Overige machines en apparaten voor algemeen gebruik
28.99	Overige machines voor specifieke doeleinden
Bouw- en infrastructuurmachines	
28.92	Machines voor de bouw en winning van delfstoffen
28.22	Hijs-, hef- en transportwerktuigen

3.3 Scope: De hele machine, met speciale aandacht voor (elektro)motoren en besturing & software

Er zijn veel verschillende soorten machines, maar bijna elke machine bestaat grofweg uit dezelfde drie typen subsystemen, zie de figuur 4: constructie (groen), mechatronica (blauw en bruin), en elektrische besturing (paars). Bij die machine hoort overigens ook haar informatiegeschiedenis. Configuratiegegevens, softwareversies, gebruik, onderhoud en wijzigingen bepalen mede welke mogelijkheden er later zijn voor service, upgrades en hergebruik.

Figuur 4: schematische weergave van machineonderdelen



In principe beschouwen we alle onderdelen van de machine in scope. Als het gaat over remanufacturing, ontwerp en andere thema's richt zich dat in principe ook op de hele machine en al zijn onderdelen. Toch richten we speciale aandacht op twee onderdelen: de elektromotoren in de elektrische aandrijfsystemen en de besturingselektronica.

Speciale aandacht: Elektromotoren, met permanente magneten

Binnen de elektrische aandrijfsystemen bevinden zich motoren van verschillende typen, zie figuur 4. In bepaalde types wordt magnetisme opgewekt door koperen windingen, in andere door permanente magneten. Deze zijn van bijzonder belang, omdat vrijwel alle permanente magneten kritieke materialen bevatten.

Uit consultatie bij bedrijven blijkt dat motoren met permanente magneten (PM-motoren) vooral ingezet worden in de automotive sector, windturbines en bepaalde machineonderdelen. Verder blijkt dat ongeveer 85% van de elektromotoren-markt niet gebaseerd is op permanente magneten. PM-motoren worden in de industrie ingezet voor met name grote vermogens > 375 kW (veel energiebesparing mogelijk door hoge efficiëntie) in combinatie met lage toerentallen. De PM-motor draait dan vaak continue en heeft door het lage toerental geen dure tandwielkast nodig. Servomotoren zijn uitsluitend PM-gebaseerd. Meer gedetailleerde info over motoren en permanente magneten is te lezen in bijlage 5.

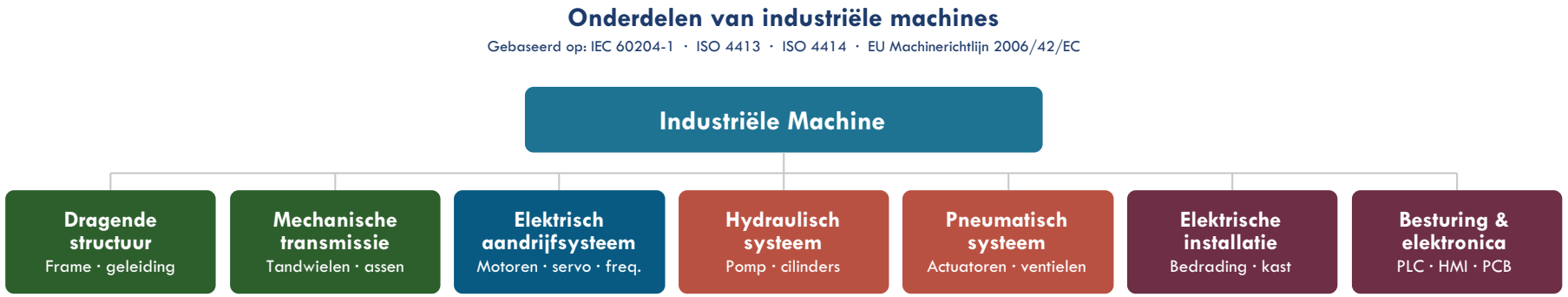
Speciale aandacht: Besturing en elektronica

De elektronische besturing van machines bevat veelal chips, printplaten en andere hoogwaardige elektronica. Deze bevatten kritieke materialen en zijn daarom relevant voor leveringszekerheid. Elektronische onderdelen hebben doorgaans een grote klimaat- en milieu-impact, vanwege de complexe fabricage en mijnbouw die ervoor nodig is. Bij machines met een lange technische levensduur kan besturing of software de bruikbare levensduur eerder begrenzen dan de mechanische constructie. Toegankelijke software, vervangbare elektronica en upgradebare besturing vergroten daarom de mogelijkheden om machines langer inzetbaar te houden.

Verschillende onderdelen, uiteenlopende materialen

Zoals uit de focusgebieden blijkt, is de relatieve impact (op het gebied van klimaat, milieu of leveringszekerheid) van verschillende onderdelen sterk afhankelijk van het type materiaal waar ze van gemaakt zijn. In figuur 5 zijn de dominante materialen per onderdeel weergegeven, en hun relatieve impact (onder 'bijzonderheden').

Figuur 5: Schematische weergave machineonderdelen per subsysteem



Materiaalindicatie per subsysteem

Subsysteem	Dominant materiaal	Secundaire materialen	Bijzonderheden (circulariteit)
Dragende structuur	Staal / gietijzer (~70%)	Aluminium, rubber (afdichtingen)	Hoog recyclaat-%; weinig zeldzame stoffen
Mechanische transmissie	Staal / gehard staal	Kunststof (glijlagers), koper	Remanufacturing tandwielen/assen gangbaar
El. aandrijfsysteem	Koper (wikkelingen), staal	Aluminium, NdFeB-magneten	Kritisch: NdFeB in servo's (>99% PM)
Hydraulisch systeem	Staal (pomp, cilinders)	Rubber/PU (slangen), vloeistof	Vloeistof: milieurisico; slangen: bep. levensduur
Pneumatisch systeem	Aluminium (blokken, cilinders)	Staal, kunststof/rubber	Energieverlies luchtnet; actuatoren herbruikbaar
Elektrische installatie	Koper (kabels, bussen)	Staal (schakelkast), kunststof (isolatie)	Koper: hoge recycleerbaarheid en restwaarde
Besturing & elektronica	PCB/PCBA (koper, glas, epoxy)	Zeldzame metalen, kunststof, glas	Hoge CO_2/kg; obsoletie door software

4 Analyse: Knelpunten en kansen voor circulariteit in de machinebouw

4.1 Drie belangrijke knelpunten en kansen

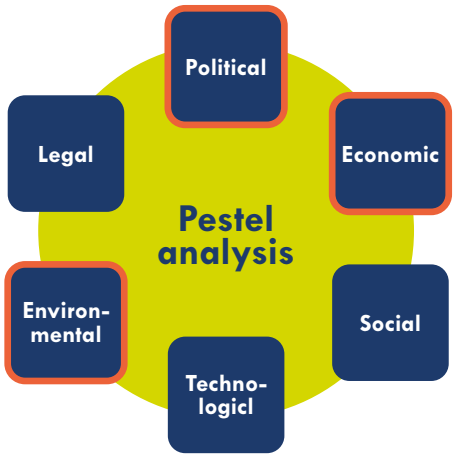
De transitie naar een toekomstbestendige machinebouwsector in Nederland wordt beïnvloed door een samenspel van factoren die zowel uitdagingen als kansen bieden. Deze factoren zijn in kaart gebracht met de PESTEL-methode, een strategisch analysemodel dat helpt om externe factoren te identificeren die invloed hebben op een organisatie, sector of ontwikkeling. Een uitgebreidere omschrijving van de analyse is te vinden in bijlage 3. Hier beperken we ons tot de belangrijkste conclusies.

Op basis van de PESTEL-analyse en consultaties in de sector worden de volgende drie belangrijkste knelpunten en trends geconstateerd:

1. **Verdienvermogen en concurrentiepositie.** Deze staan onder druk onder andere vanwege stijgende en/of fluctuerende kosten.
2. **Beschikbaarheid en leveringszekerheid van grondstoffen, materialen en componenten.** Deze staan onder druk als gevolg van geopolitieke verschuivingen en ketenverstoringen. Overheden en bedrijven proberen daarom ketens van globaal naar meer regionaal te verschuiven, maar dat is in complexe industrieën met lange complexe ketens vaak erg moeilijk.
3. **Klimaat- en milieueffecten**. De machinebouw is materiaal- en energie-intensief. Als gevolg daarvan draagt zij, over de gehele keten, in belangrijke mate bij aan CO_2-uitstoot, vervuiling van grond, water en lucht en verbruik van grondstoffen.

In de praktijk grijpen deze opgaven direct in elkaar. Een moeilijk leverbaar onderdeel kan leiden tot stilstand, hogere kosten en vervroegde vervanging van een installatie die technisch nog jaren mee had gekund. De beschikbaarheid, kosten en klimaat- en milieu-impact gaan dan hand in hand.

Figuur 6: PESTEL-analyse. De belangrijkste factoren voor de machinebouw zijn politiek, economie en milieu.



De sterkste onderliggende factoren die de machinebouwsector beïnvloeden zijn **politiek** (Europese en nationale klimaat- en milieudoelstellingen, industriebeleid gericht op strategische autonomie en innovatie in kernsectoren), **economie** (verschuivende internationale concurrentieposities, internationale afhankelijkheden en kosten van arbeid en materialen) en **milieu** (invloed van de keten op klimaat en milieu, en vice versa, adaptatie aan veranderend klimaat). Deze drie externe factoren bieden zowel knelpunten als kansen. Zo biedt bijvoorbeeld de nieuwe EU-wetgeving met betrekking tot CE kansen om met nieuw Nederlands beleid innovatieve en circulaire producten te stimuleren. In de komende paragrafen gaan we nader in op deze drie factoren.

4.2 Politiek: Relevant beleid in Nederland

De routekaart sluit naadloos aan bij het landelijke beleid: de **Nationale Grondstoffenstrategie,** het **Nationaal Programma Circulaire Economie** en het **industrie- en innovatiebeleid** (met onder meer het groeimarktenrapport), de **Nationale Technologie Strategie** en de **Nederlandse Digitaliserings-strategie,** inclusief het actieprogramma Duurzame Digitalisering en de European Digital Innovation Hubs (EDIH).

Al deze beleidskaders vormen voor de sector zowel aandachtspunten als kansen. Machinebouwers die vooroplopen binnen landelijk en regionaal beleid, kunnen maximaal profiteren en waar mogelijk concurrentievoordeel opdoen. Hieronder gaan we op de belangrijkste nationale beleidskaders nader in.

Nationaal Programma Circulaire Economie

Het NPCE stelt als doel dat Nederland in 2050 volledig circulair is, om milieudruk te verlagen en leveringszekerheid te verhogen.

Het NPCE benoemt prioritaire productgroepen en stimuleert richtinggevende en uiteindelijk verplichtende maatregelen om de komende jaren zuiniger om te gaan met grondstoffen. In 2025 is het NPCE geactualiseerd.[4] De volgende doelen zijn opgenomen in dit programma:

- In 2035 wordt minimaal 82% van het Nederlandse afval gerecycled en minimaal 15% wordt hoogwaardig gerecycled.
- Het aandeel duurzame biotische en secundaire grondstoffen binnen ons grondstoffengebruik is in 2035 minimaal 55%.
- In 2035 is ons grondstoffengebruik 15% lager dan in 2016.

In het coalitieakkoord heeft het kabinet aangegeven het NPCE te willen versterken en in de recente kamerbrief[5] zegt de minister Nederlandse inzet toe in de Europese Circular Economy act (CEA). Daarnaast wordt de arbeidskrapte in technologische en uitvoerende beroepen onderkend en moet de marktvraag naar circulair opgeleide professionals vergroot worden.

Het **Uitvoeringsprogramma Circulaire Maakindustrie** is gepositioneerd op het snijvlak van NGS en NPCE. Binnen dit uitvoeringsprogramma is machinebouw geïdentificeerd als een van de acht prioritaire productgroepen.

Nationale grondstoffenstrategie

*De **NGS** richt zich op het verhogen van de leveringszekerheid van kritieke grondstoffen. Circulariteit en ketensamenwerking zijn daarin kernelementen.*

Met de NGS zet Nederland in op leveringszekerheid kritieke grondstoffen en vijf handelingsperspectieven: circulariteit & innovatie; EU mijnbouw & raffinage; diversificatie; verduurzaming ketens; kennis & monitoring). De NGS legt geen nieuwe streefcijfers vast, maar geeft wel een aantal oplossingsstrategieën,[6] die in tabel 3 worden beschreven.

Tabel 3: Oplossingsstrategieën uit de Nationale Grondstoffenstrategie

Circulariteit en innovatie	EU mijnbouw & raffinage	Diversificatie	Strategische Autonomie	Kennisopbouw & monitoring
• Herontwerp • Gebruik van nieuwe technologie en data • Langer en beter gebruik van machines, componenten en materialen • Refurbishment en remanufacturing	• Ontwikkelen van een strategische voorraad • Ontwikkelen van raffinage en recycling technologie • Ontwikkelen van een slimme inzamelstructuur	• Ontwikkelen van alternatieve toeleveringen • Strategische partnerschappen op kritieke technologie • Slimme vraagbundeling	• Handelsdiplomatie • Regelgeving • Handelsbeperkingen	• Monitoring van eigen toeleveringsketen, digitaal productpaspoorten • Monitoring algemene verstoringen in toeleveringsketens op NL / EU schaal

4 Bron: NPCE 2025, Nederland circulair in 20250 (Rijksoverheid.nl)
5 Bron: Brief regering: Versterking voor een circulaire economie, juni 2026 (Rijksoverheid.nl)
6 Bron: Kamerbrief 'Grondstoffen voor de grote transities', dec. 2022 (Rijksoverheid.nl)

De Nederlandse lijst van 17 kritieke grondstoffen[7] geeft de prioriteit aan binnen de bredere Europese inzet, en dient beter de specifieke Nederlandse belangen en industrie. De lijst zal jaarlijks worden herijkt door het NMO op basis van actuele geopolitieke en economische omstandigheden. In de recente kamerbrief[8] geeft de minister aan de NGS te willen versnellen door focus aan te brengen voor de korte termijn op leveringszekerheid van permanente magneten, batterijen, en de defensie-industrie. Dit maakt de urgentie van deze routekaart groter en concreter. Het kabinet constateert dat geopolitieke ontwikkelingen en de concentratie van productie in een beperkt aantal landen de leveringszekerheid van kritieke grondstoffen, halffabricaten en componenten steeds verder onder druk zetten. De beleidsagenda voor circulariteit van kritieke grondstoffen zet daarom expliciet in op levensduurverlenging, hergebruik en herfabricage, circulair ontwerp en informatie over de aanwezigheid en locatie van kritieke grondstoffen in producten.

Nationale technologie strategie

*De **NTS** geeft bouwstenen voor een strategisch technologiebeleid door sleuteltechnologieën te identificeren waar het Nederlandse kennisveld en het Nederlandse bedrijfsleven een positieve impact mee kan maken en waar een unieke Nederlandse positie op mogelijk is.*

De NTS prioriteert 10 sleuteltechnologieën[9] die een grote bijdrage leveren aan ons verdienvermogen, cruciaal zijn voor maatschappelijke uitdagingen, belangrijk zijn voor de nationale veiligheid en Nederlands technologisch leiderschap mogelijk maken.[10]

Landelijk industriebeleid machinebouw

Het nieuwe industriebeleid van EZK focust op zes markten, waarvoor we als Nederland een sterke uitgangspositie hebben. Eén van die markten is machinebouw, omdat machines voor bijvoorbeeld de agrifoodsector (17,1% groei per jaar), medtech (5,2% groei per jaar) en chipmachines, bijdragen aan zorgoplossingen, automatisering en verduurzaming. Dit betekent dat de Nederlandse overheid programma's gaat creëren ter versterking van deze markt.[11] Het **landelijk industriebeleid machinebouw** wordt momenteel uitgewerkt. De eerste focus ligt daarbij op vier toepassingsgebieden: de semiconductor-toeleveringsketen, landbouw- en voedseltechnologie, medische technologie en machines en systemen voor de energiesector. Robotica & fysieke AI en circulariteit lopen hier als twee doorsnijdende thema's doorheen. Binnen de routekaart nemen we dezelfde focusgebieden als uitgangspunt.

Nederlandse Digitaliseringsstrategie (NDS)

De NDS vormt samen met de Strategie Digitale Economie en de Nederlandse Cybersecurity Strategie (NLCS) het fundament van het digitaliseringsbeleid van het kabinet. Het kabinetsbeleid kent de volgende uitgangspunten:

- Nederland moet de kansen pakken die digitalisering biedt. Met de NDS moeten we vernieuwen en blijven investeren in ons digitaal fundament. Dit om grote maatschappelijke opgaven te laten slagen, in bijvoorbeeld de zorg, ruimtelijke ordening en arbeidsmarkt.
- Nederland focust (samen met de EU) op de eigen strategische autonomie, ook in de digitale wereld. Dat betekent niet dat we alles zelf gaan doen, maar wel dat we onze kritieke processen en gegevens beter onder controle krijgen.
- Nederland zoekt intensiever de samenwerking met het bedrijfsleven, de wetenschap en kennisinstituten om de digitale economie en overheid op elkaar aan te sluiten en samen te werken aan de doelen van de NDS.
- Nederland zal waar nodig bestaande overheidsprocessen herontwerpen om de kansen van digitalisering volledig te benutten, in plaats van papieren processen digitaal te maken. Hierbij hoort ook de transitie om echt datagedreven te gaan werken als één overheid.[12]

7 Bron: Nieuwbericht 'NMO adviseert nationale lijst 17 kritieke grondstoffen (NMO)
8 Bron: Brief regering: Kabinetsinzet nationale grondstoffenstrategie (Rijksoverheid.nl)
9 De sleuteltechnologieën zijn: 1. optica en geïntegreerde fotonica; 2. quantum; 3. groene chemische productieprocessen; 4. biotechnologie gericht op moleculen en cellen; 5. beeldvormingstechnologie; 6. (opto)mechatronica (industriële systemen/machines en apparaten); 7. kunstmatige intelligentie (AI) en data; 8. energiematerialen; 9. halfgeleiders en 10. cybersecurity.
10 Bron: Beleidsnota Nationale Technologiestrategie (Rijksoverheid.nl)
11 Bron: Kamerbrief over industriebeleid met focus (Rijksoverheid.nl)
12 Bron: Rapport de Nederlandse Digitaliseringsstrategie – samen versnellen (Rijksoverheid.nl)

Actieprogramma Duurzame Digitalisering 2026-2028

Dit programma zorgt voor onafhankelijke monitoring en informatievoorziening, het faciliteren van publiek-private samenwerking en het deelnemen aan relevante internationale samenwerkings-verbanden. Vanuit deze basis wordt in publiek-private samenwerking toegewerkt naar twee doelen:
1) de Nederlandse digitale sector wordt duurzaam Europees koploper, bijvoorbeeld door innovaties voor energie-efficiëntie van datacenters aan te jagen en overheidsdatacenters te verduurzamen.
2) AI en digitalisering staan op de kaart als innovatiemotor voor verduurzaming, bijvoorbeeld door over sectoren heen de kansen van data en Digitale Product Paspoorten (DPP) voor nieuwe circulaire businessmodellen te ontwikkelen.

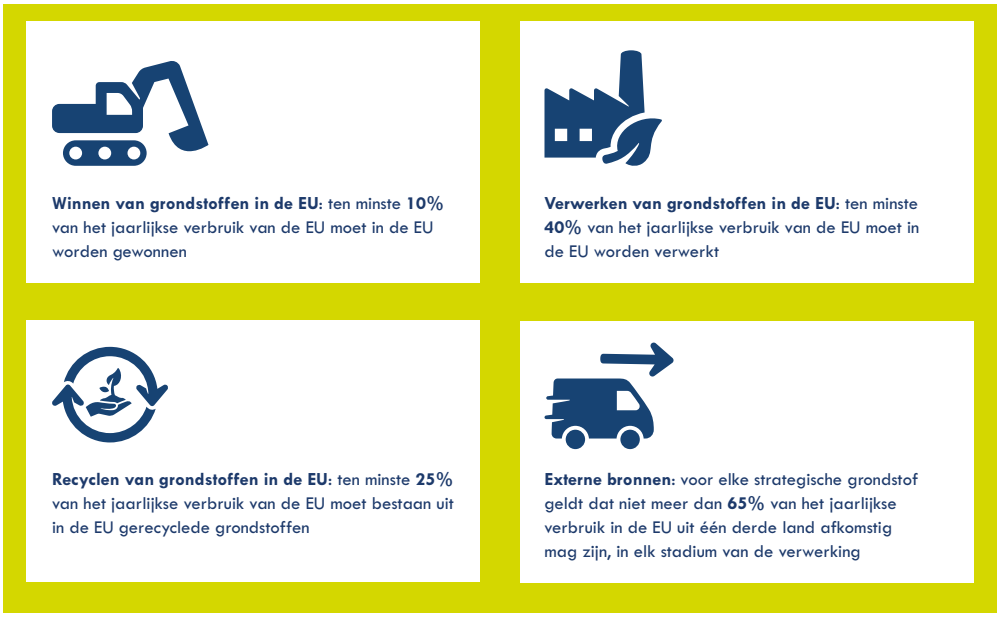
4.3 Politiek: Relevant beleid in de EU

In de EU is ook veel beleid in de maak dat zich richt op circulariteit (CE Act, Ecodesign), kritieke grondstoffen (CRMA), verduurzaming (onder andere Net-Zero Industry Act) en digitalisering. Daarnaast wordt naar aanleiding van het Draghi rapport gewerkt aan het vergroten van de Europese concurrentiepositie ten opzichte van bijvoorbeeld China. Dit komt ook tot uiting in het industrie- en handelsbeleid.

Critical Raw Materials Act (CRMA)

De EU heeft de CRMA opgesteld om de toegang tot kritieke grondstoffen te borgen. Deze wet noemt 34 kritieke grondstoffen die van groot economisch belang zijn en waarvoor het risico op leveringsproblemen het grootst is. 17 daarvan zijn strategisch, omdat ze cruciaal zijn voor de energietransitie, digitalisering, ruimtevaart en defensie. De CRMA stelt hiervoor concrete doelen, zoals beschreven in figuur 7.

Figuur 7: CRMA doelstellingen voor 2030[13]



Het onlangs aangekondigde RESourceEU ondersteunt de CRMA dat alleen beleidsdoelen stelt. Het plan zet onder meer in op grote investering in raffinage en recyclingcapaciteit, strategische voorraadvorming en vraagaggregatie alsook coördinatie in de keten. In juli 2026 is het wetsvoorstel ingediend welke de uitvoering van deze EU-verordening[14] over kritieke grondstoffen regelt in Nederland.[15]

13 Bron: Verordening kritieke grondstoffen : EU wil meer grondstoffen van eigen bodem (Europese Raad)
14 Verordening (EU) 2024/1252)
15 Wetsvoorstel: Uitvoeringswet verordening kritieke grondstoffen

EU Circular Economy Act (CEA)

De CEA is een Europese wet die in 2026 nog van kracht moet gaan in de EU. Het doel van deze act is minder afval, meer hergebruik en een grotere markt voor gerecyclede materialen. Dit is onderdeel van de Europese Green Deal en bouwt voort op eerdere plannen, zoals het EU Actieplan Circulaire Economie uit 2020.

Kwantitatieve doelstelling is om het EU circulariteitspercentage te verdubbelen van 11,8% naar 24% in 2030. Dit wordt bereikt door strengere eisen aan productontwerp, zoals repareerbaarheid en duurzaamheid. En met de Uitgebreide producentenverantwoordelijkheid (UPV) worden producenten verantwoordelijk gemaakt voor inzameling en recycling van hun producten.[16] De wet volgt op aanbevelingen uit de rapporten Letta en Draghi, het bedrijfsleven (in de Verklaring van Antwerpen), de Europese Raad (Verklaring van Boedapest) en het Europees Parlement.[17]

Ecodesign for Sustainable Products Regulation (ESPR)

Ecodesign[18] zal producteisen stellen op het gebied van onder andere CO_2-voetafdruk en materiaalgebruik. De ESPR vormt het centrale regelgevingskader voor ecodesign-maatregelen voor productgroepen, waarna product specifieke maatregelen worden uitgewerkt. De verordening is op 18 juli 2024 in werking getreden. Met de ESPR wordt ook het Digitaal Product Paspoort (DPP) geïntroduceerd die onder andere informatie moet bevatten over de recyclebaarheid van het product en de milieu-impact. Ecodesign eisen voor elektrische motoren moeten in 2028 worden geïmplementeerd.

Machineverordening

De Europese Machineverordening is op 29 juni 2023 gepubliceerd. Deze verordening is definitief van toepassing vanaf 20 januari 2027 en vervangt de huidige Machinerichtlijn. De Machineverordening draagt bij aan een gelijk speelveld voor fabrikanten, importeurs, distributeurs en leveranciers voor het op de markt brengen van veilige machines. In de Machineverordening staan de essentiële veiligheids- en gezondheidseisen waaraan producten moeten voldoen. Ook is er sprake van een protocol voor het op de markt brengen van deze machines en producten.

Net-zero Industry Act (NZIA)

Deze wet richt zich op het opschalen van productie van schone technologie in Europa (zoals warmtepompen). De NZIA stimuleert de vraag naar Europese productie, zodat deze tegen 2030 40% van de eigen markt beslaat; en tegen 2040 15% van de wereldwijde productie van nettonultechnologieën. De uitwerking van de NZIA naar concrete beleidsmaatregelen in de lidstaten is nu gaande. In ieder geval wordt bekeken hoe weerbaarheidscriteria kunnen worden toegevoegd aan publieke aanbestedingen en tenders (zoals de CfD - Contract for Difference). Daarnaast wordt een 'Made in Europa' criterium overwogen. Met name die laatste interventie zal naar verwachting een grote stimulans zijn voor de Europese maakindustrie.

Europees industrie- en handelsbeleid

Het **Draghi-rapport** (2024) stelde dat de Europese **maakindustrie en machinebouw** kampen met een ernstige stagnatie in productiviteit en een groeiende innovatiekloof ten opzichte van de Verenigde Staten (VS) en China. Om de internationale concurrentiepositie te behouden, adviseert het rapport om massaal te investeren in **digitalisering, AI-integratie en robotisering** binnen productieprocessen. Daarnaast waarschuwt het dat de sector zwaar wordt belemmerd door de **hoge Europese energieprijzen** en complexe regelgeving, wat vraagt om een gecoördineerde Europese industriestrategie en betere toegang tot kapitaal.

Het handelsbeleid van de EU voor de machinebouw is sterk gericht op het openen van wereldwijde markten en het wegnemen van handelsbarrières via ambitieuze vrijhandelsverdragen. Omdat de machinebouw één van de belangrijkste exportsectoren van de EU is, streeft Brussel naar internationale harmonisatie van technische normen, zodat Europese machines wereldwijd gemakkelijk gecertificeerd en verkocht kunnen worden. Tegelijkertijd hanteert de EU een beschermende en strategische koers: met instrumenten tegen oneerlijke concurrentie (zoals subsidies uit derde landen) en strenge regels voor de

16 Bron: Circular Economy - Environment - European Commission
17 Bron: Nieuwsbericht 'Commission launches consultation for upcoming Circular Economy Act' (Europese Commissie)
18 Bron: Ecodesign for Sustainable Products Regulation (EU)

export van *dual-use* technologieën (machines die ook militair gebruikt kunnen worden) bewaakt zij haar concurrentiepositie en veiligheid.

Europees digitaliseringsbeleid

Met het **Beleidsprogramma voor het digitale decennium 2030** streeft de EU naar een veilige, mensgerichte en innovatieve interne markt die de grondrechten waarborgt en de Europese digitale soevereiniteit versterkt. Ter realisatie en financiering van deze beleidsdoelstellingen is het programma **Digital Europe (DIGITAL)** ingericht als het centrale uitvoeringsinstrument. Een fundamenteel onderdeel hiervan is het netwerk van **EDIH's**, waarmee de Europese Commissie een dekkende regionale ondersteuningsstructuur biedt om de digitale transformatie en concurrentiekracht van overheden en het mkb te versnellen.

4.4 Economie: Verdienvermogen

Machinebouw is sterk innovatief, met maar liefst 40% van de R&D-uitgaven: € 3 miljard in de totale industrie. De sector is wereldwijd actief en 75% van de productie(waarde) wordt geëxporteerd. De verdiensten aan de export van machines en machineonderdelen zijn de afgelopen 10 jaar meer dan verdubbeld tot meer dan € 26 miljard. Dit is ruim 2% bijdrage van het Nederlands bbp. De groei van de machine-industrie - tussen 2013 en 2023 met 9,5% per jaar - komt vooral voort uit een deelsegment van de sector met enkele grote spelers, dat zijn de chipmachinefabrikanten. Het aandeel van de chipmachinefabrikant is ongeveer de helft van de omzet van de totale machine-industrie.[19] In deze routekaart is de semicon-sector daarom ook één van de focuspunten.

Export. De belangrijkste EU-afzetlanden zijn Duitsland, Verenigde Staten (VS), China, Frankrijk, België, Verenigd Koninkrijk, Italië en Zuid-Korea. Daarnaast is de **VS** in de afgelopen jaren belangrijker geworden en de tweede afzetmarkt na **Duitsland**. Een deel van de machine-export zal echter door Amerikaanse invoerheffingen worden geraakt die ook afgeleide producten van staal en aluminium bevat.[20] [21]

Import. Concurrentie vanuit China neemt snel toe: van 2014-2024 is de Nederlandse import van machines uit China met 14% per jaar gestegen (tegen 7% per jaar gemiddeld over alle import[22]).

Kosten. Door inflatie en schaarste aan personeel, vanwege sterke groei in de technologische industrie, zijn de **loonkosten** sterk gestegen. (Hoewel het aantal werkenden in de sector in 10 jaar met een derde gegroeid is, behoort de sector nog steeds bij de drie industrietakken met de grootste personeelskrapte.[23]) Daarbij komt dat **energiekosten** in Europa hoger zijn dan vroeger en in Nederland ook hoger dan omringende landen waar industriële grootverbruikers compensatie krijgen.[24]

Kansen. Kansen liggen er met name voor machinebouwers in de ook door de overheid aangewezen groeimarkten, zoals semicon, medtech, agrifood, energie en defensie. Deze industrieën profiteren van AI, digitalisering, elektrificatie en verduurzaming. Gezien het grote gebruik van materiaal en energie, en ook de relatief hoge kostenbasis ten opzichte van andere continenten, vormt **circulariteit een hefboom voor extra verdienvermogen**: minder gebruik van materiaal, langer en beter gebruik van machines en onderdelen, en verdere optimalisering door digitalisering leiden allemaal tot meer waardecreatie met minder gebruik van resources. De bestaande machinebasis vertegenwoordigt daarbij een markt op zichzelf. Onderdelen, onderhoud, upgrades, revisie en dienstverlening rond beschikbaarheid kunnen jarenlang omzet en klantwaarde opleveren nadat een machine is geleverd. Het is dan ook niet meer dan logisch dat de actielijnen en voorgestelde vervolgstappen uit deze routekaart een gedegen inbedding krijgt in het industriebeleid om Nederland concurrerender te maken.

19 Bron: Facts & figures van de machinebouw (ING)
20 Bron: Artikel 'Veranderende invoerrechten VS: dit moet u weten als ondernemer' (RVO.nl)
21 Bron: Artikel 'Grote wijzigingen rond importheffingen VS op staal, aluminium en afgeleide producten' (FME)
22 Bron: Eurostat/ING Research
23 Bron: ING sectorstudie machine-industrie 2025
24 Bron: Artikel 'Kosten elektriciteit industrie schrikbarend hoger dan omringende landen' (VNO-NCW)

4.5 Economie: Leveringszekerheid

Veranderingen in het geopolitieke speelveld zorgen voor **risico's in toegang tot materialen en componenten**. Landen gebruiken materialen, componenten en kritieke technologie actief als onderhandelingsmiddel. Uit cijfers van het CBS[25] blijkt dat ongeveer 30% van de Nederlandse bedrijven significante problemen ondervindt in de toeleveringsketen. Er zijn diverse oorzaken van verstoringen, zoals geopolitieke spanningen, handelsbeperkingen en logistieke knelpunten. Ook de toegenomen complexiteit van in te voeren machines speelt een grote rol. Toeleveringsketens zijn lang, complex en globaal, waardoor veel afhankelijkheden ontstaan.

Leveringszekerheid van componenten

Bij leveringszekerheid en strategische autonomie, wordt vaak in eerste instantie gedacht aan schaarse materialen. Nederland is echter vooral een assemblageland en koopt dus relatief weinig ruwe grondstoffen in. Veel machinebouwers geven aan dat hun afhankelijkheid van schaarse en kritieke materialen er wel is, maar niet altijd direct zichtbaar of anders ook moeilijk beïnvloedbaar, omdat het zo ver weg in de keten aangrijpt.[26] Als gevraagd wordt naar schaarste en afhankelijkheden, dan ondervinden veel machinebouwers meer direct last van de (on)beschikbaarheid van voor hen kritieke componenten, zoals elektronische componenten (zoals duidelijk werd bij het chiptekort in de corona-periode) en/of specifieke machineonderdelen (waarvan bijvoorbeeld de aanlevering stokte tijdens de afsluiting van het Suezkanaal of de straat van Hormuz). Dit kan gaan om alle onderdelen van de machine, van motoronderdelen tot constructie-onderdelen (staal, aluminium).

Hoewel dit niet primair om grondstoffenschaarste gaat, leidt het tot dezelfde problemen, namelijk niet kunnen leveren aan klanten, risico van prijsopdrijvende effecten en concurrentie om schaarse componenten. Circulaire strategieën kunnen ook hier een uitkomst bieden: analyse van welke componenten het meest schaars zijn, voorraadvorming van kritieke componenten, langer gebruik, hergebruik, etc. Deze komen dan ook expliciet in onze oplossingsrichtingen terug. De voorbereiding op verstoringen begint voordat een tekort optreedt. Alternatieve onderdelen, materialen en leveranciers moeten technisch bekend, beoordeeld en waar nodig gekwalificeerd zijn om snel te kunnen schakelen.

Leveringszekerheid van kritieke en strategische materialen

Voor de machinebouw zitten kritieke grondstoffen voornamelijk in de **elektronica en printplaten** (PCB/PCBA) voor halfgeleiders en chips, en in **permanente magneten** (PM). Qua volumes / tonnage een klein deel van de machine, maar qua strategische afhankelijkheid zijn deze een grote factor. Ook de klimaat- en milieu-impact van deze onderdelen is per kilogram hoger dan van bulk-onderdelen. Bij printplaten gaat het bijvoorbeeld onder andere om **kobalt**, waarvan landen als Taiwan en China een grote leverancier aan het begin van de keten zijn. Bij permanente magneten gaat het onder meer over **neodynium**. In de overige onderdelen van de machines vinden we veel van de strategische materialen **aluminium** en **koper** en als toevoegingen in legeringen **titanium**, **berylium** en **chroom**.

Het verbruik van deze kritieke materialen zal in de toekomst alleen maar groter worden, omdat de technologieën onder andere **elektromotoren**, **robotica**, **drones en digitale technologieën** van belang zijn voor strategische toepassingsgebieden als hernieuwbare energie, mobiliteit en defensie in de EU.[27] De machinebouw is voor al deze gebieden een essentiële toeleverancier.

Voor machines betekent dit dat leveringsrisico's zich kunnen concentreren in kleine, moeilijk vervangbare elektronische onderdelen (controllers, sensoren, vermogensmodules), terwijl de terugwinning van kritieke metalen uit printplaten en chips in de praktijk complex is door lage concentraties en sterke materiaal- en componentmix. Voor permanente magneten geldt dat er steeds meer technologie komt voor terugwinning en recycling, maar dat die zich veelal buiten Europa bevindt.

Het verkrijgen van zicht op de exacte samenstelling van de materialen in machines is op dit moment uitdagend en kan variëren per machine. In de data, die beschikbaar is op componentniveau, valt deze groep vaak onder generieke clusteringen met andere elektronische apparatuur en/of componenten.

25 Bron: Artikel '3 op de 10 bedrijven ondervinden problemen in toeleveringsketen' (CBS)
26 Bron: Rapport 'Leveringsonzekerheid in de maakindustrie' (TNO)
27 Bron: Rapport 'CRMs for Strategic Technologies and sectors in the EU 2020' (JRC Europe)

In bijlage 4 is een studie toegevoegd over een specifieke analyse voor robotica, waarbij alle bovengenoemde materialen duidelijk naar voren komen.

Samenvattend bevat de constructie van de machines bulkmaterialen, zoals ferro, aluminium en koper. Door hun grote volumes kan hier veel impact bereikt worden door hergebruik, refurbishment en hoogwaardige(r) recycling. Kritieke grondstoffen zitten voornamelijk in de elektronica, printplaten, permanente magneten. Daarnaast vind je ze ook in legeringen en metallurgische coatings (bijvoorbeeld nikkel). Circulariteit geeft handelingsperspectief omdat het gebruik en de afhankelijkheden van strategische- en kritieke materialen kan verminderen, met machines die ontworpen zijn voor vervanging, reparatie, upgrades en hergebruik.

Elektromotoren en permanente magneten zijn één van de meest kwetsbare schakels voor de leveringszekerheid van de machinebouw. Hoofdstuk 5 gaat hier in een deep dive uitgebreid op in.

4.6 Environment: Klimaat- en milieu-effecten

De milieu-impact in de machinebouw is tweeledig: de gebruiksfase en de productiefase. In de gebruiksfase veroorzaakt de sector aanzienlijke milieubelasting door de uitstoot van mobiele werktuigen en verontreiniging door olie- en vetlekkages. In de productiefase wordt de milieubelasting veroorzaakt door hoge grondstof- en energieconsumptie tijdens de fabricage, transport en assemblage. Circulaire strategieën kunnen met name de impact van het grondstofverbruik in de productiefase sterk verminderen.

Klimaat- en milieu-impact tijdens gebruik

Mobiele machines, zoals landbouwvoertuigen, graafmachines en wielladers, hebben een grote impact op de leefomgeving door **uitstoot**:

- Stikstofoxiden (NO_x). Vooral in de bouw en grondverzet is de uitstoot van mobiele werktuigen aanzienlijk, wat in 2015 leidde tot strengere normen en speciale stikstofberekeningen in AERIUS (het officiële rekeninstrument van de Nederlandse overheid waarmee stikstofemissies en -deposities worden berekend). Zware belasting en stationair draaien van de voertuigen dragen flink aan bij aan deze uitstoot.
- Fijnstof en CO_2. Oudere machines en zware dieselmotoren stoten veel fijnstof en broeikasgassen uit.

Mobiele en vaste machines kunnen, tijdens gebruik en onderhoud, hydraulische oliën, smeervetten en brandstoffen lekken in het veld of op hun stationaire locatie. Ook kunnen tijdens gebruik (en bij einde levensduur) **zeer zorgwekkende stoffen** (ZZS) bijkomen die bij de fabricage zijn toegepast. In machines kunnen deze stoffen voorkomen in smeermiddelen, afdichtingen, coatings of elektronica. Het vrijkomen en/of weglekken van schadelijke stoffen kan leiden tot **verontreiniging van lucht, bodem en water**:

- Lekkages en slijtage. Smeermiddelen of hydraulische oliën kunnen weglekken.
- Dampen en nevels. Bij hoge temperaturen of snelle bewegingen kunnen olienevels of stofdeeltjes in de lucht komen.
- Onderhoud en afval. Bij reparaties of het afdanken van machines komen monteurs en het milieu direct in aanraking met de componenten.

Duurzaam en circulair ontwerp van machines kan bijdragen aan het verminderen van afval, lekkage, en uitstoot van schadelijke stoffen, wat de milieubelasting in de gebruiksfase vermindert.

Klimaat- en milieu-impact in de productieketen

Om een machine te bouwen, van de winning van het ruwe materiaal, tot verwerking, transport, en assemblage tot componenten en hele systemen, is veel energie en materiaal nodig. Daarmee is de klimaat- en milieu-impact van de hele productieketen substantieel:

- Materiaalverbruik. De winning en verwerking van staal, ijzer, aluminium en koper zorgt wereldwijd voor een hoge CO_2-voetafdruk. Dat geldt ook voor de kritieke grondstoffen die worden gebruikt in onder andere de elektronica en de elektromotoren. Los van de CO_2-emissies is de winning en verwerking van deze metalen ook nog eens zeer vervuilend.
- Fabricage en afwerking. Het verspanen, lassen, assembleren en spuiten van machines in fabrieken kost veel energie, wat ook weer leidt tot veel CO_2-uitstoot. Bij de fabricage en afwerking

(bijvoorbeeld oppervlaktebehandeling of spuitwerk) komen vaak chemische afvalstoffen (inclusief ZZS) vrij, met milieubelasting als gevolg.[28]

Bij productie-uitval gaat meer verloren dan het materiaal van het afgekeurde onderdeel.
Ook bewerkingstijd, energie, capaciteit en eerder toegevoegde waarde verdwijnen uit het proces.

Klimaatimpact door materiaalverbruik

Volgens de CBS-Materiaalmonitor gebruikt de Nederlandse machine-industrie jaarlijks circa 3,8 miljoen ton niet-energetische producten en materialen. Wanneer ook afval en gerecyclede producten worden meegerekend, bedraagt de materiaalstroom circa 4,45 miljoen ton. Inclusief energiedragers en de statistische balanspost komt de totale bruto materiaalstroom uit op circa 4,93 miljoen ton.

Op basis van het productievolume en een gemiddeld kengetal van 3,5 kg CO_2-equivalenten per kilogram machine vertegenwoordigt de sector een indicatieve materiaalgebonden klimaatimpact van circa 13,3 Mton CO_2-equivalenten. Een betrouwbare koppeling aan de mate van vervuiling, uitgedrukt in MKI, is nog niet te geven.

Voor het bepalen van de materiaalgebonden klimaat-impact zijn vier archetypemachines geselecteerd die samen de belangrijkste typen machines en de variatie binnen de onderzochte marktsegmenten vertegenwoordigen: een metaalbewerkings- en productiemachine, een doseer- en verpakkingsmachine, een melkrobot en een klinische analyser. Voor ieder archetype is ingeschat wat het (gewichts)aandeel is van de belangrijkste materialen: ferro-metalen, aluminium, koper, kunststoffen en elastomeren, elektronica, glas en keramiek, overige materialen en permanente magneten. Voor ieder materiaal is de klimaat-impact bepaald. De resultaten geven een grove inschatting van de relatieve bijdrage van ieder materiaal over de gehele machinebouw, en zijn weergegeven in tabel 4.

Tabel 4: Gemiddelde klimaat-impact van materiaalverbruik voor machinebouw (zie bijlage 6 voor detailberekening)

Materialisatie verzameling machinebouw

	min	max	gemiddeld	kg per kg	CO_2 eq.
Ferro (staal/gietijzer/RVS)	0,49	0,88	0,69	0,685	1,357
Aluminium	0,01	0,1	0,06	0,055	0,312
Koper	0,01	0,03	0,02	0,02	0,143
Kunststoffen/elastomeren	0,01	0,23	0,12	0,12	0,56
Elektronica (PCB/PCBA)	0,004	0,04	0,02	0,022	1,062
Glas/keramiek	0	0,02	0,01	0,01	0,025
Overig	0,07	0,14	0,11	0,105	0
PMM	0,0003	0,0035	0	0,002	0,061

Uit de analyse blijkt dat **elektronica** en **permanente magneten** een relatief grote klimaat-impact hebben (samen 36% CO_2-equivalent), terwijl hun bijdrage in absoluut gewicht gering is. Dat geldt ook voor koper, dat doorgaans in de periferie van de elektronica wordt toegepast (kabels, spoelen). Vandaar dat we in deze routekaart speciale aandacht richten op deze elektronica en permanente magneten.

Een ongeveer even groot aandeel in de klimaat-impact komt van de ferro-metalen, die met veel volume en gewicht worden toegepast in behuizing, constructie- en ophangingsonderdelen. Veel van de circulaire strategieën in deze routekaart zien toe op langer en vaker gebruik van deze onderdelen, en dus reductie van hun impact.

28 Bron: Overheid.nl, TNO.

5 Deep dive: Elektromotoren en permanente magneten

Een machine bestaat uit duizenden onderdelen, maar niet ieder onderdeel is even bepalend voor circulariteit en leveringszekerheid. We hebben in paragraaf 4.5 gezien dat **elektronica** (in de besturing) en **permanente magneten** (in elektromotoren) een relatief grote milieu-impact hebben, in verhouding tot hun absoluut gewicht. Ze bevatten ook een onevenredig aandeel kritieke en strategische materialen, waarvoor leveringszekerheid een issue is. Voor permanente magneten gaat het dan vooral om neodymium en dysprosium.

Een machinebouwer koopt nooit neodymium of dysprosium als ruwe grondstof. Hij koopt een servomotor, een aandrijving of een complete module. Toch kan juist de beschikbaarheid van zo'n grondstof bepalen of de motor geleverd wordt, en daarmee of een machine kan worden gebouwd of onderhouden.
De vraag is daarom waar in de machine de afhankelijkheid zit en op welk niveau ingrijpen het meeste oplevert. Dit hoofdstuk analyseert die vraag. De aanpak die hieruit volgt, staat in paragraaf 6.2.

5.1 De motor als kritieke schakel

Elektromotoren zitten in vrijwel ieder deel van de machinebouw. Ze drijven pompen, ventilatoren, transportbanden, robots, gereedschapsmachines en compressoren aan. Qua gewicht zijn ze vaak bescheiden, maar voor het functioneren van de machine zijn ze onmisbaar. Het grootste deel van een machine bestaat uit staal, aluminium, koper en andere bulkmaterialen. Kritieke grondstoffen zijn juist geconcentreerd in elektronica, printplaten en permanente magneten. De hoeveelheden zijn klein, maar een ontbrekende controller, vermogensmodule of servomotor kan een complete machine stilzetten.

Niet iedere elektromotor is even kritisch, want veel industriële motoren werken zonder permanente magneten. Volgens de analyse voor deze routekaart bevat ongeveer 15 procent van de aandrijfmotoren een permanente magneet. Bij servomotoren is dat vrijwel altijd het geval, en juist die worden veel toegepast in hoogwaardige machinebouw, automatisering en robotica.

De markt voor complete motoren is nog breed

Zie de tabel hieronder voor wat het aandeel van motoren met permanente magneten betekent voor het relatieve belang voor leveringszekerheid en voor klimaat- en milieu-impact.

Tabel 5: materiaalinhoud en circulariteitsimpact per motortype

	Inductiemotor (ASM)		SynRM / Hybride		PM-motor (PMSM)		PMSM-servo	
MATERIALEN	**~4.500 t/jr**		**~136 t/jr**		**~551 t/jr**		**~1.000 t/jr**	
Staal	(laminaten, frame)	**~60%**	(laminaten, frame)	**~65%**	(laminaten, frame)	**~55%**	(laminaten, frame)	**~50%**
Koper	(wikkelingen)	**~25%**	(wikkelingen)	**~20%**	(wikkelingen)	**~20%**	(wikkelingen)	**~25%**
Aluminium	(huis, koeling)	**~10%**	(huis)	**~12%**	(huis)	**~12%**	(huis)	**~10%**
NdFeB-magneten ⚠						**~8%**		**~10%**
Overig	(isolatie, lagers)	**~5%**		**~3%**		**~5%**		**~5%**
IMPACTINDICATOREN								
Klimaat (CO_2e)	◑		◔		◕		◕	
Milieudruk	◑		◔		◕		◕	
Virgin materiaalgebruik	◑		◑		◕		◕	
Kritieke mat. (EU CRMA)	◔		◔		◕		●	
Materiaalwaarde (€/ton)	◑		◑		◕		●	

⚠ = bevat NdFeB (EU CRMA kritieke materiaal: Nd, Dy, Pr) ·
Materiaalwaarde: hogere Harvey bal = hogere economische waarde

Harvey bal: ○ geen ◔ beperkt ◑ matig ◕ hoog ● zeer hoog

Het NMO heeft een marktanalyse gedaan voor elektromotoren, op basis van exportcijfers. Hier bespreken we de belangrijkste conclusies.

Servomotoren worden wereldwijd geproduceerd door een mix van grote multinationals en gespecialiseerde merken, met name uit Japan, Duitsland, de VS, China, Zuid-Korea en andere landen met een sterke industrie voor machineautomatisering.

- **Japan** is historisch gezien de grootste speler in servomotoren en servosystemen.
- **Duitse bedrijven** leveren servomotoren voor industriële automatisering, machinebouw en automotive.
- **Amerikaanse spelers** zijn vaak geïntegreerd met besturingen, CNC (Computer Numerical Control) en robotica.
- **Zuid-Korea** levert servosystemen vooral voor automotive, elektronica en productieautomatisering.
- **China** heeft sterke spelers in servomotoren voor machinebouw, robotica en automatisering, en groeit snel. Daarnaast produceert China ook PM-motoren voor onder meer automotive.
- **Tsjechië** heeft diverse kleinere specialisten en lokale fabrikanten voor de machinebouw.
- **Taiwan** heeft eigen servomotormerken en is actief in industriële automatisering, vaak als OEM-leverancier (Original Equipment Manufacturer).

China is in veel gevallen de grootste exporteur, maar blijft in de meeste gevallen onder de 30% van de mondiale export. In Europa speelt vooral Duitsland een belangrijke rol. Daarnaast is in enkele gevallen grote export te zien vanuit Tsjechië, Italië, Hongarije, Finland en Frankrijk. De VS zijn in alle gevallen 's werelds grootste importeur. Nederland is in de meeste gevallen een aanzienlijke importeur, in ieder geval aanzienlijk groter dan zijn aandeel van 1% in het mondiale bbp. Dit is waarschijnlijk een gevolg van de relatief grote rol die Nederland speelt in de machinebouw, waarin elektromotoren een belangrijke plek innemen.

Op het niveau van de complete motor is de markt dus redelijk breed. **Leveranciers van motoren concurreren daarmee vooral op prijs en functionaliteit.** Deze brede concurrentiepositie verandert zodra verder wordt ingezoomd. Verschillende motorfabrikanten kunnen voor hun permanente magneten afhankelijk zijn van dezelfde, veel smallere grondstoffenketen.

Bij permanente magneten wordt de keten smaller en afhankelijkheid groter

Permanente magneten maken het mogelijk om elektromotoren compact, krachtig en nauwkeurig te ontwerpen. Dat is vooral aantrekkelijk waar hoge eisen gelden voor snelheid, acceleratie, positionering en vermogensdichtheid. Daarom komen ze veel voor in servomotoren, robotica, elektrische voertuigen, windturbines en drones.

Permanente magneten bevatten onder meer zeldzame aardmetalen, zoals neodymium en dysprosium, en daarnaast (half)metalen als boor, kobalt, mangaan, koper. Welke samenstelling nodig is, verschilt per toepassing. Een motor die bij hoge temperaturen moet functioneren, stelt andere eisen dan een motor onder lichtere omstandigheden. Bijlage 5 gaat verder in op deze technische verschillen. Zie ook de Routekaart Kritieke Materialen – Circulaire Maakindustrie.

Hier wordt de afhankelijkheid groter. China heeft een dominante positie in delen van de keten voor zeldzame aardmetalen en permanente magneten. De recente exportrestricties en verplichte export-vergunningen hebben geleid tot vertragingen bij hightechbedrijven in Nederland en bij automotive bedrijven elders in Europa. Bestaande Europese magneetproducenten kunnen dat nauwelijks opvangen: ze zitten vol en nemen weinig nieuwe klanten aan. De Chinese exportcontrole geldt bovendien niet alleen voor magneten, maar ook voor de technologie, productiemachines en kennis om ze te maken. Dat bemoeilijkt de opbouw van een primaire keten buiten China.

De afhankelijkheid heeft ook een prijs die niet in euro's is uit te drukken. Voor elke order uit China moeten bedrijven een exportlicentie aanvragen. Daarvoor leveren ze onder meer een eindgebruikers-verklaring, foto's en procesbeschrijvingen aan van het eindproduct en het productieproces. Voor hightech-bedrijven is die informatie IP- en concurrentiegevoelig. Een groot toekomstig risico is uitbreiding van de exportcontrole naar de halfgeleidersector. In de defensiesector bestaat daarvoor al een precedent. Leveringszekerheid is hier dus ook een kwestie van bescherming van industriële kennis.

De groei van drones vergroot de druk verder. Daarin komen permanente magneten, batterijen en specifieke microchips samen in één product. Omdat dezelfde materialen ook elders in de maakindustrie nodig zijn, kan groei in de ene markt direct gevolgen hebben voor beschikbaarheid en prijs in een andere.

5.2 Circulaire strategieën prioriteren op impact en haalbaarheid

Om de doelen te bereiken, willen we grondstoffen zo efficiënt mogelijk gebruiken en zo lang mogelijk (op waarde) in de keten houden. De circulaire strategieën die daaraan kunnen bijdragen zijn voor motoren en magneten dezelfde, en vormen de basis voor de actielijnen in het volgende hoofdstuk. Echter, de prioriteiten (waar focus je het eerst op), kunnen verschillen.

Geordend naar **maximaal waardebehoud**, komen we tot de volgende volgorde:

1. Levensduurverlenging van de motor
2. Remanufacturing met hergebruik van de rotor
3. Hergebruik van de magneet (al dan niet door te hermagnetiseren)
4. Recycling van het materiaal van de motor en de magneet

Hoe hoger op deze ladder, hoe meer waarde behouden blijft en hoe minder energie en verwerking nodig zijn. Circulair ontwerp ligt aan de basis van alle bovengenoemde strategieën en is daarom een aparte actielijn.

Bovenstaande routes zijn echter niet altijd de **snelste weg naar impact.** Als je kijkt naar wat nu technisch haalbaar is en het eerst tot meetbare impact leidt, dan verschuift het beeld.

Aandrijfsystemen gaan volgens de stakeholderconsultatie tien tot vijftien jaar mee. De huidige groei van servotoepassingen en hoogrenderende motoren leidt daardoor pas over tien tot vijftien jaar tot substantiële retourstromen van industriële motoren. Recycling kan nu al gebruikmaken van schroot uit bestaande stromen. Voor de keten als geheel is **recycling daarmee de snelste route naar impact**, als het gaat om bijdragen aan leveringszekerheid. Remanufacturing levert op termijn meer waardebehoud, maar biedt geen antwoord op de acute problemen door de exportrestricties. Levensduurverlenging

kan voor een deel wel direct bijdragen aan minder gebruik van nieuw materiaal, door fors in te zetten op reparatie en (preventief) onderhoud. Verregaande optimalisatie van het gebruik van de 'installed base' vraagt echter wel weer langetermijninvesteringen voor herontwerp, van de motoren en/of hun controlesystemen. Overigens betekent een langere route naar impact niet dat we met die strategieën moeten wachten. Om over 10-15 jaar impact te hebben, moet er immers nu geïnvesteerd worden.

Remanufacturing: technisch kan veel, maar er is nog geen brede markt

Behoud van de functie van een motor is meestal waardevoller dan terugwinning van de grondstoffen. Dat geldt vooral voor servomotoren. Uit de stakeholderconsultatie blijkt dat de rotor (draaiende deel van een machine) met permanente magneten vaak nog bruikbaar is. Slijtage zit eerder bij lagers en afdichtingen. Bij remanufacturing blijft de rotor intact en wordt die opnieuw ingezet. Omsmelten en opnieuw produceren zijn dan niet nodig. Rotoren die niet direct herbruikbaar zijn, kunnen alsnog worden gehermagnetiseerd of de materiaalroute in gaan.

Dat het technisch kan, betekent nog niet dat er een markt is. Belemmeringen zijn vooral economisch en organisatorisch:

- De businesscase. Bij kleinere motoren is die krap.
- Verhandelbaarheid. Klantspecifieke uitvoeringen zijn moeilijk opnieuw te verkopen, waardoor een open tweedehandsmarkt ontbreekt.
- Standaarden. Fabrikanten gebruiken verschillende rotorontwerpen en standaarden. Dat maakt terugname over fabrikantgrenzen heen vrijwel onmogelijk.
- Vakmanschap. Het werk vraagt specialistische kennis, bijvoorbeeld voor het veilig hanteren van sterke magneetkrachten en het afstellen van resolvers.

De praktijk laat zien dat remanufacturing commercieel kan werken als het wordt aangeboden als gestandaardiseerde dienst in plaats van als reparatie per geval. Dat betekent een vaste prijslijst, kwaliteit gelijkwaardig aan nieuw en een prijs onder de nieuwprijs. Garantie blijkt daarbij een sterk acceptatie-instrument. Een even goede (of soms zelfs ruimere) garantie op geremanufactureerde producten als op nieuwe producten neemt het belangrijkste koopbezwaar weg.

Levensduurverlenging: De installed base als huidige bron van waarde en als voorraad van morgen

Bij leveringszekerheid kijken bedrijven vooral naar nieuwe inkoop. Tegelijk staan bij klanten duizenden machines waarin motoren, rotoren en permanente magneten al aanwezig zijn. Die installed base is in de eerste plaats een markt voor service en onderhoud. Als (nieuwe) systemen beperkt leverbaar zijn, kan fors inzetten op reparatie, (preventief) onderhoud en/of upgrades van bestaande machines een goede strategie zijn. De strategie verkleint afhankelijkheid van nieuwe materialen, vergroot waarde voor bedrijf én klant, en verlaagt de milieudruk.

De installed based vormt ook een toekomstige voorraad van hoogwaardige componenten en materialen. Motoren en magneten die nu in machines in het veld staan, kunnen op termijn worden hergebruikt in nieuwe (remanufactured) apparaten en daarmee een volgende gebruiksfase in gaan.

Voor zowel langer gebruik als hergebruik is echter een goed zicht nodig op de status en potentie van de installed based. Deze is vaak slecht zichtbaar. Machines worden aangepast, motoren vervangen en configuraties veranderen. Jaren later is niet altijd duidelijk welk type motor waar zit en in welke conditie. Serienummers, configuratiegegevens, onderhoudshistorie en conditiedata kunnen zichtbaar maken welke motoren met welke conditie in het veld staan. Hiermee kan hun gebruik (inclusief reparatie en upgrades) worden geoptimaliseerd én kan worden bepaald wanneer ze waarschijnlijk tegen het eind van hun gebruiksduur lopen. Dan kan eerder worden besloten of een motor wordt geremanufactured, teruggenomen, opnieuw ingezet of gerecycled.

Conclusie: hoewel er enige potentie is voor inzet op langer gebruik van de installed base is de impact op korte termijn van hergebruik van de voorraad gering. Het huidige zicht op de installed base als bron van waarde is gering, en er is weinig uniformiteit / gestandaardiseerd ontwerp (zie volgende paragraaf). Daarnaast leidt de huidige groei in toepassingen (windturbines, elektrische auto's, drones) pas over 10-15 jaar tot grote retourstromen. Om al deze redenen lijkt een sectorbreed terugname-systeem voor industriële motoren met permanente magneten in Nederland op dit moment niet haalbaar. De volumes zijn vooralsnog te laag en geconcentreerde eindgebruikers ontbreken. Natuurlijk moet hier voor de lange termijn wel op worden ingezet.

Het ontwerp bepaalt wat later mogelijk is

Veel keuzes worden gemaakt voordat een machine gebouwd is:

- Is in deze toepassing een motor met permanente magneten nodig?
- Hoeveel kritisch materiaal is werkelijk nodig?
- Laat het ontwerp een economisch rendabelere remanufacturing toe?
- Is de motor bereikbaar voor onderhoud, en kan hij later eenvoudig worden verwijderd en vervangen?

Ook binnen permanente magneten zijn ontwerpkeuzes mogelijk. De hoeveelheid zware zeldzame aardmetalen kan worden beperkt door ze alleen toe te passen waar dat technisch nodig is. De precieze keuze hangt af van temperatuur, prestaties en levensduur (zie bijlage 5).

De inbouw telt ook mee. Een motor die alleen bereikbaar is nadat een groot deel van de machine is gedemonteerd, is op papier vervangbaar, maar in de praktijk lastig te onderhouden of terug te nemen.

Standaardisatie kan veel opleveren. Veel verschillende motoren, rotoren, aansluitingen en stekkers vragen extra voorraad, documentatie en servicekennis. Minder varianten maken onderhoud eenvoudiger en vergroten de kans op langer gebruik en hergebruik.

Hoewel bedrijven vaak al bewuste keuzes maken en reparatie en onderhoud centraal stellen in veel ontwerpen, zal impact pas op langere termijn merkbaar zijn. We pleiten voor grote inzet op een **ontwerpprogramma** voor elektromotoren met permanente magneten, waarin aandacht is voor minder afhankelijkheid van kritieke materialen en langer waardebehoud, met standaardisatie waar die aantoonbaar helpt. Meer gestandaardiseerd ontwerp ondersteunt de toepassing later van bovenstaande strategieën voor hoog waardebehoud. Voor dergelijk ontwerp moeten prestaties, energiegebruik, levensduur, kosten, repareerbaarheid en leveringszekerheid samen worden gewogen.

Recycling van permanente magneten: Een urgente industriële opbouwopgave

In de R-ladder staat recycling onderaan. Voor permanente magneten is het wel **de snelste route naar nieuwe Europese productiecapaciteit**. De recyclingtechnologie hoeft niet te worden uitgevonden. Er bestaan routes die de laboratoriumfase voorbij zijn: ze draaien bij Europese partijen, hebben de proof of concept gehaald en worden nu opgeschaald. De meest uitontwikkelde routes vermijden zware chemische processtappen en zijn daardoor relatief goed te vergunnen. Ze zijn ook niet aan een specifieke locatie gebonden. Daar staat tegenover dat de technologie bij een beperkt aantal partijen ligt en onder patent valt, dus toegang loopt via licenties.

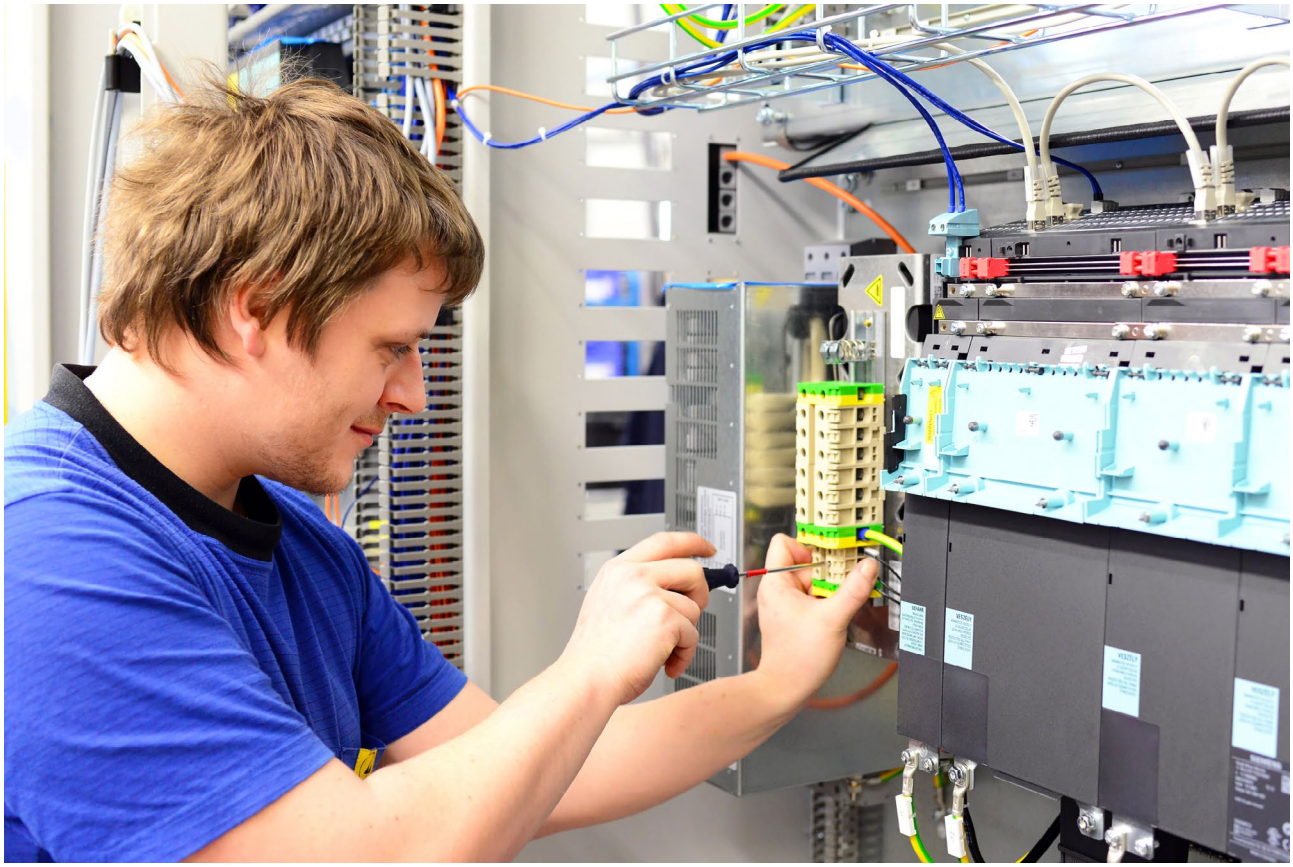
Om tot uitvoering en opschaling te komen, zien we vier knelpunten:

- **Opwerking van gerecycled materiaal.** Hoogwaardige recycling levert een halffabricaat op: magneetmateriaal in ruwe blokvorm. Voor een gekwalificeerde industriële magneet volgen daarna nog de nabewerking naar de juiste geometrie, oppervlaktebehandeling, inspectie, kwalificatie en levensduurtesten. Dit is feitelijk de tweede helft van een magneetfabriek, en die ontbreekt in Nederland als samenhangende keten. De afzonderlijke competenties zijn grotendeels aanwezig, maar niet ingericht op gerecycled materiaal en niet op elkaar aangesloten. De oppervlaktebehandeling is technisch en qua vergunningverlening de zwaarste schakel, en daarmee de schakel met het hoogste faalrisico. Naast deze vorm van shortloop recycling, wordt ook technologie ontwikkeld voor het terugbrengen van magneetmateriaal tot grondstofniveau (longloop recycling), maar daar is ook nog meer ontwikkeling nodig.
- **Aanvoer van magnetisch materiaal**. Het beschikbare schroot komt nu vooral uit consumentenstromen, met harde schijven als belangrijkste bron. Dat is een smalle basis voor een industriële fabriek. Nederland alleen is te klein; aanvoer op Benelux- of Europese schaal is nodig. Of er structureel genoeg schroot is om een fabriek te dragen, is nog onbeantwoord. Magneetmateriaal in Nederlandse afvalstromen wordt nu nauwelijks herkend of apart ingezameld.
- **Ontbrekende gegarandeerde afzetmarkt**. Geen partij investeert in technologie en infrastructuur zonder gebonden afnemers. Een volledige magneetfabriek vraagt een investering in de orde van tientallen miljoenen euro's. Aanvoer en afzet moeten daarom tegelijk zeker zijn voordat kapitaal loskomt.
- **Kennishiaat.** Ten slotte is er een kennisgat. Nederland heeft beperkte magneetkennis, ook op universitair niveau, anders dan Duitsland en het Verenigd Koninkrijk. Dat geldt vooral voor coating, hechting, levensduur en materiaalkarakterisering. Daarnaast ontbreekt praktische kennis over veilig werken met sterke magneetkrachten. Verkeerde behandeling vernietigt magnetische eigenschappen onherstelbaar, en dat raakt inzameling en transport net zo goed als de fabriek.

De machine blijft het vertrekpunt

De verdieping op motoren en permanente magneten verandert niets aan het uitgangspunt van deze routekaart: de complete machine staat centraal. De motor is integraal onderdeel van het ontwerp, de prestaties, het onderhoud en de waarde van die machine. Daarom wordt in deze routekaart stapsgewijs ingezoomd: eerst de machine, dan de aandrijving, de motor, de rotor, de magneet en uiteindelijk het materiaal.

Dit hoofdstuk maakt duidelijk dat we een grondstoffenstrategie niet alleen op het niveau van de grondstoffen zelf moeten aanpakken. Nederland is een assemblageland en daarmee is een **specifieke benadering op het niveau van componenten** nodig. Elektromotoren met permanente magneten vormen een logische insteek. In het volgende hoofdstuk wordt dit verder uitgewerkt tot acties en prioritaire keuzes voor investeringen.



Bron: iStock via Stichting Circulaire Maakindustrie

6 Oplossingsrichtingen en actielijnen

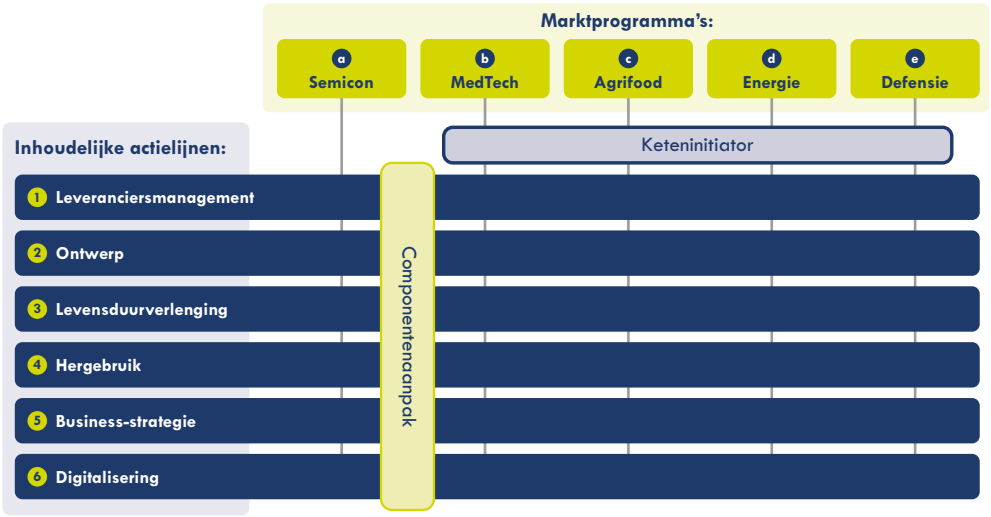
6.1 Samenhang van oplossingsrichtingen

Bij de ontwikkeling van deze routekaart zijn verschillende oplossingsrichtingen geïdentificeerd. Deze richten zich op de belangrijkste kansen en knelpunten om te komen tot meer waardecreatie, grotere leveringszekerheid en minder druk op klimaat en milieu. Samen vormen zij het inhoudelijke vertrekpunt voor verdere prioritering en uitvoering.

We onderscheiden twee samenhangende sporen voor de uitvoering: zes inhoudelijke actielijnen met daarbij een overstijgende componentenaanpak, en vijf marktprogramma's met de noodzaak van een initiator. Deze worden beschreven in de volgende paragrafen.

In figuur 8 zijn de inhoudelijke actielijnen en marktprogramma's in samenhang weergegeven.

Figuur 8: Samenhang van inhoudelijke actielijnen en marktprogramma's



De inhoudelijke actielijnen en marktprogramma's staan niet los van elkaar. Juist op het snijvlak ontstaan concrete projecten. Binnen een marktprogramma kan bijvoorbeeld worden gewerkt aan circulair ontwerp, levensduurverlenging, remanufacturing, leveringszekerheid of digitalisering. Tegelijk kan een kritieke component aanleiding zijn voor samenwerking tussen bedrijven uit verschillende markten. Oplossingen die in één markt, keten of componentgroep worden ontwikkeld, kunnen vervolgens breder in de machinebouw worden toegepast.

6.2 Zes inhoudelijke actielijnen en componentenaanpak

De **zes inhoudelijke actielijnen** zijn marktoverstijgend en geven aan op welke thema's binnen de machinebouw structurele ontwikkeling nodig is. Zij vormen daarmee de programmalijnen voor de uitvoering van de routekaart. De eerste vier volgen de levenscyclus van de machine: van inkoop en leveranciersmanagement, via ontwerp en gebruik naar hergebruik. Businessstrategie en digitalisering zijn verbindende actielijnen die deze levenscyclus ondersteunen en helpen om oplossingen op grotere schaal toepasbaar te maken.

Samen richten de actielijnen zich op het langer behouden van technische en economische waarde, het verminderen van afhankelijkheden in de keten en het versterken van verdienvermogen. Daarbij gaat het niet alleen om technische oplossingen, maar ook om andere manieren van samenwerken, organiseren en sturen op data, risico's en waarde over de productlevenscyclus.

De **componentenaanpak** richt zich op onderdelen en componenten die voor meerdere markten van strategisch belang zijn en waar leveringsrisico, schaarste of afhankelijkheid aanleiding geven voor gezamenlijke actie. Door specifiek een kritieke component als uitgangspunt te nemen, worden de inhoudelijke actielijnen concreet, en leveren ze impact voor alle markten waarvoor die component kritiek is.

Hieronder beschrijven we per actielijn kort de opgave en de beoogde richting. De gedetailleerde uitwerkingen (met doel en beoogd resultaat, aanpak, activiteiten en aansluiting op bestaande initiatieven en beleid) zijn opgenomen in bijlage 7.

1. Inkoop en leveranciersmanagement

De machinebouw is afhankelijk van internationale ketens voor grondstoffen, elektronica en andere onderdelen, die niet altijd gemakkelijk te vervangen zijn. Als één kritisch onderdeel niet beschikbaar is, kan dat de productie, levering of service van een complete machine stilleggen. Daarom is het belangrijk om niet alleen naar prijs, kwaliteit en levertijd te kijken, maar ook naar herkomst, afhankelijkheden, vervangbaarheid en de financiële gezondheid van leveranciers. Ook inzicht in onderliggende leveranciers en productielocaties helpt om risico's eerder te herkennen.

Vervolgens kunnen bedrijven per risico bepalen welke maatregel het beste past. Dat kan bijvoorbeeld een tweede leverancier zijn, een strategische voorraad of een alternatief materiaal of onderdeel. Ook circulaire oplossingen kunnen de leveringszekerheid vergroten. Door onderdelen langer te gebruiken, te repareren, opnieuw in te zetten of gereviseerde componenten te gebruiken, neemt de afhankelijkheid van nieuwe aanvoer af. Waar mogelijk kunnen alternatieven vooraf worden getest en goedgekeurd, zodat bij een verstoring sneller kan worden omgeschakeld. Permanente magneten zijn binnen deze routekaart een voorbeeld van zo'n kritieke component.

Bij tal van bedrijven is dit strategisch instrumentarium al gemeengoed. Maar voor veel van deze vraagstukken is meer samenwerking in de keten nodig. Bedrijven kunnen bijvoorbeeld gezamenlijk leveranciers en markten analyseren, informatie over herkomst en risico's delen of samen voldoende vraag creëren voor een alternatief. Bij sommige strategische componenten kan ook samenwerking tussen bedrijven en overheid nodig zijn om beschikbaarheid in Nederland of Europa te versterken. Zo wordt inkoop- en leveranciersmanagement niet alleen een kwestie van kosten en levertijd, maar ook van leveringszekerheid, weerbaarheid en het langer benutten van bestaande waarde.

Duurzaamheid en circulariteit moeten nog meer gemeengoed worden bij elke inkoopbeslissing. Waar mogelijk en relevant zou circulariteit moeten worden opgenomen in publieke en private inkoopcriteria. Daarvoor moeten binnen de EU proportionele publieke inkoopcriteria voor circulaire machines en diensten worden ontwikkeld en geharmoniseerd. Hier ligt ook voor de overheid een grote rol. Als één van de grootste inkopers zou de overheid, in lijn met eigen doelstellingen en beleid, machines (voor bijvoorbeeld grond- weg- en waterbouw of defensie) circulair moeten inkopen. In het verlengde van hun rol als inkoper, kunnen overheden ook als launching partner optreden.

2. Circulair ontwerpen, modulariteit en standaardisatie

Veel mogelijkheden voor onderhoud, reparatie, upgrades en hergebruik worden al bepaald wanneer een machine of component wordt ontworpen. Circulair ontwerp richt zich daarom op het langer behouden van technische waarde door onderdelen bereikbaar, vervangbaar, demontabel en waar mogelijk uitwisselbaar te maken. Modulariteit en standaardisatie kunnen daarbij helpen, evenals 'fit for function' en het beperken van onnodige materiaal- en ontwerpvariatie. Zo kunnen materiaalverlies, servicekosten en doorlooptijden worden verminderd en worden onderhoud, upgrades en hergebruik beter mogelijk.

De aanpak vraagt om toepassing op verschillende niveaus: van complete machines tot modules, subassemblages en afzonderlijke onderdelen en interfaces. Daarbij moet steeds een balans worden gevonden met prestaties, veiligheid, robuustheid, maatwerk, intellectueel eigendom en concurrentiekracht. Ook normalisatie en standaardisatie, eenduidige ontwerpregels en meetbare

criteria voor bijvoorbeeld repareerbaarheid, modulariteit en upgradebaarheid kunnen helpen om circulaire ontwerpprincipes beter in de reguliere ontwikkelpraktijk te verankeren.

Belangrijk is bovendien dat ontwerp geen eenmalige stap is. Ervaringen uit productie, gebruik, onderhoud, storingen, repair en remanufacturing moeten systematisch worden teruggebracht naar nieuwe ontwerpen. Zo ontstaat een leerproces waarin machines niet alleen efficiënter worden ontworpen, maar ook beter zijn voorbereid op onderhoud, aanpassing en een volgende gebruikscyclus. Hierbij kan worden voortgebouwd op de tools die zijn ontwikkeld in het recent opgeleverde project ESED (Early-Stage Environmental Decision-Making for Effective Circular Product Designs).[29]

Prioritair uitvoeringsprogramma: Standaardisatie en normalisatie van ontwerp

Standaardisatie van ontwerpkeuzes en richtlijnen kan enorm helpen om tot meer modulair ontwerp te komen, vraag te creëren voor circulaire producten (via heldere richtlijnen voor circulaire inkoop), en meer uniform aanbod te creëren van systemen en componenten die kunnen worden hergebruikt. Er zijn nationaal en internationaal veel initiatieven om circulaire ontwerpcriteria verder te ontwikkelen.

Initiatieven als CEN-CLC/JTC 10 houden zich bezig met zaken gerelateerd aan ecodesign, labelling en traceerbaarheid, aansluitend bij het doel om hergebruik te stimuleren. Normen als ISO 55000, ISO 55001 en ISO 55002 zijn toegespitst op assetmanagement. Een belangrijk initiatief uit de design community is de Circular Electronics Design Guide (CEDG) vanuit het Circular Electronics Partnership (CEP). Vergelijkbare initiatieven zijn er ook op internationaal niveau. Het is belangrijk om nationale en internationale initiatieven te coördineren, omdat zij input gaan vormen voor (inter)nationaal beleid, zoals de machineverordening, rapportage eisen vanuit de CSRD) en de Circular Economy Act.

Dit vraagt om een gericht programma in Nederland om alle initiatieven bij elkaar te brengen en te borgen dat uitkomsten in lijn zijn met internationale standaarden.

3. Installed base, conditiebewaking en levensduurverlenging

Een groot deel van de potentiële circulaire en economische waarde van de machinebouw bevindt zich al bij klanten in de vorm van de installed base. Machines, modules en kritieke componenten kunnen vaak langer technisch en economisch relevant blijven wanneer inzicht bestaat in locatie, configuratie, gebruik en technische conditie. Goed inzicht in de installed base maakt het mogelijk onderhoud, vervanging en service planmatig te sturen op beschikbaarheid, prestaties, levensduur en technische waarde.

Deze actielijn brengt onderhoud, conditiebewaking, sensoren, monitoring, servicegegevens, retrofit, upgrades en spare parts management samen in een aanpak voor actief levensduurbeheer. Onderhoud kan daardoor verschuiven van reactief of tijd gestuurd naar conditie- en prestatiegestuurd. Ook betrouwbare methoden voor het bepalen van resterende levensduur en technische en economische restwaarde zijn daarbij belangrijk, evenals tijdige aandacht voor veroudering en beschikbaarheid van onderdelen. Reeds ingezette ontwikkelingen op dit gebied (zoals NextGenHighTech en Smart Industry) kunnen verder uitgebreid en gedeeld worden, zie hoofdstuk 6.3.

Data uit gebruik en assetmanagement kunnen bovendien worden benut om service, ontwerp en bedrijfsvoering verder te verbeteren. Dat biedt ruimte voor prestatiegerichte dienstverlening en nieuwe service- en verdienmodellen. Zo draagt actief beheer van de installed base bij aan minder stilstand, lager materiaalgebruik en CO_2-uitstoot, grotere leveringszekerheid en sterkere klantrelaties.

4. Hergebruik

Na de eerste gebruiksfase kan een belangrijk deel van de technische en economische waarde van machines, modules en componenten behouden blijven door hergebruik, repair, refurbishment en remanufacturing. Afhankelijk van de technische staat kunnen producten of onderdelen opnieuw worden ingezet, hersteld, opgeknapt of geüpgraded. Dit biedt vaak ook commerciële kansen.

29 Bron: TU Delft

Veel machinebouwers hebben al een grote groep klanten met machines en componenten die jarenlang in gebruik blijven. Juist daar kunnen mogelijkheden liggen voor extra dienstverlening, upgrades, revisie, terugname en hergebruik. Deze invalhoek leidt vaak tot verdiepte relaties met de klant, omdat bij klant én leverancier meer waarde wordt toegevoegd.

Waar hergebruik, repair, refurbishment of remanufacturing niet meer mogelijk of zinvol is, komt hoogwaardige recycling in beeld. Daarmee blijven materialen, energie en eerder toegevoegde waarde zo lang mogelijk behouden en kan ook de beschikbaarheid van strategische componenten worden vergroot.

Praktijkvoorbeelden hergebruik in de automotive- en luchtvaartsector

Automotive

Het bedrijf AWL ziet een groeiende vraag naar het hergebruik en de modernisering van productiecellen in de automotive-industrie. Na circa 7 tot 15 jaar worden bestaande lascellen aangepast door robots te voorzien van nieuwe gereedschappen en besturingen, versleten onderdelen te vervangen en software te vernieuwen. Momenteel moderniseert AWL jaarlijks 10 tot 15 cellen. Waar voorheen één moderniseringsronde gebruikelijk was, wordt steeds vaker een extra retrofit-ronde uitgevoerd.

Efficiënt omgaan met materialen, energie en besturing vormt een belangrijk uitgangspunt. Kwaliteit, betrouwbaarheid, onderhoud, monitoring en een langere technische levensduur zijn essentieel om concurrerend te blijven, zeker in de machinebouw voor de automotive. Hergebruik van onderdelen is mogelijk wanneer de eindafnemer hiermee instemt en aan de kwaliteitseisen wordt voldaan.

Standaardisatie kan ontwerpvariëteit en productiekosten beperken, maar wordt bemoeilijkt door bedrijfsgebonden keuzes en afhankelijkheden van verschillende leveranciers. Voor een verdere ontwikkeling van de circulaire maakindustrie is eenvoudige wet- en regelgeving belangrijk. Daarnaast moeten hergebruikte materialen en componenten een kwaliteit bieden die gelijkwaardig is aan nieuwbouw. Door automatisering te combineren met een hogere materiaalproductiviteit ontstaan kansen om zowel de arbeidsproductiviteit als de circulariteit in de maakindustrie te verbeteren.

Bron: interview met Piet Mosterd, AWL

Luchtvaart: Juridische maatregelen om onderhoudsinformatie vrij toegankelijk te maken

Onderhouds- en revisiecontracten die in de luchtvaarttoelevering gebruikt worden zijn (bij Amerikaanse tier-1 bedrijven) marktgevoelige en proprietary informatie. In CMM (Component Maintenance Manual) staan alle handelingen en onderdelen die nodig zijn om te inspecteren, repareren en monteren voor bijvoorbeeld een gehele motor, APU, Aire Turbine starter etc. De CMM schrijft inspectiecriteria voor. Valt een onderdeel binnen bepaalde grenzen, dan wordt het onderdeel als herbruikbaar, repareerbaar of afkeur geïdentificeerd. Dat betekent in de praktijk dat alle herbruikbare onderdelen worden gereinigd, alle repareerbare gerepareerd en alle afkeuronderdelen vervangen door spare parts. Gezien de hoge prijzen van spare parts wordt er in de aerospace veel gerepareerd wat bijdraagt aan duurzaamheid.

Het probleem is dat de CMMs zijn niet vrij toegankelijk zijn. Deze worden in aerospace-land door de OEMers voor geld verkocht aan repair shops als een manier om de hoge ontwikkelingskosten in de aftermarket terug te verdienen, of worden verkregen bij afname van een vliegtuig. Een overheidsverplichting zou hier (ook gezien vanuit handelspolitiek) circulaire machinebouw aanmerkelijk kunnen beïnvloeden.

Opschaling vraagt om meer dan alleen technische mogelijkheden. Retourstromen moeten worden georganiseerd en machines en componenten moeten kunnen worden geïdentificeerd, geïnspecteerd en beoordeeld op hun geschiktheid voor een volgende gebruiksfase. Betrouwbare productinformatie, test- en revisiecapaciteit, validatie, kwaliteitsborging en waar nodig certificering en garanties zijn belangrijk om vertrouwen in gebruikte en gereviseerde producten te vergroten. Ook moet duidelijk zijn wie verantwoordelijk is voor terugname, logistiek, demontage en verdere bestemming. Ook zijn soms nieuwe verdienmodellen nodig, om te zorgen dat de leverancier die investeert in design voor langer gebruik en hergebruik, ook een deel van die waarde als verdiensten terugziet (zie ook de volgende paragraaf).

Daarnaast zijn schaal- en marktontwikkeling nodig. Bundeling van retourstromen op keten-, sector- of regioniveau kan voldoende volume creëren voor rendabele businesscases en professionele marktkanalen voor tweedehands, gerepareerde, refurbished en geremanufactured producten. Daarbij moeten hergebruik, ontwerp, gebruik en data sterker met elkaar worden verbonden, zodat historie, conditie en geschiktheid voor een volgende cyclus bekend zijn. Voor strategische- of dual-use componenten kan daarbij ook publiek-private samenwerking nodig zijn.

Prioritair uitvoeringsprogramma: Landelijke opschaling remanufacturing machinebouw

In Nederland is de afgelopen jaren een stevige praktijkbasis voor remanufacturing ontstaan, onder meer via de Routekaart Remanufacturing en het Remanufacturing Collectief. De volgende stap is om remanufacturing van afzonderlijke bedrijfscases en regionale initiatieven naar bredere industriële toepassing te brengen.

Daarbij komen verschillende vraagstukken uit deze routekaart samen: het organiseren van retourstromen, inspectie en diagnose, testen en kwaliteitsborging, revisie- en remanufacturingcapaciteit, beschikbaarheid van productinformatie en ontwikkeling van rendabele businessmodellen. Een landelijke programmatische aanpak kan bestaande kennis, bedrijven en initiatieven verbinden en succesvolle toepassingen over regio's en marktsegmenten heen verder opschalen. In bijlage 8 wordt deze opschaling in meer detail uitgewerkt.

5. Businessstrategie

Een circulaire economie komt pas echt tot ontwikkeling als zij onderdeel vormt van een bedrijfsstrategie en de business- en verdienmodellen. Ontwikkelingen rond veerkracht, meer autonomie en waardebehoud stimuleren die transitie. In de afgelopen jaren is onder andere door EZK, in samenwerking met universiteiten en hogescholen, gewerkt aan een overzicht van duurzame en circulaire businessmodellen.[30] Recent is dit, op basis van die inzichten, in opdracht van Invest-NL verder uitgewerkt in een overzicht van 150 circulaire verdienmodellen.[31]

De aangereikte modellen bieden de mogelijkheid om van éénmalige verkoop toe te werken naar waardecreatie over de volledige levenscyclus van producten, bijvoorbeeld via service, prestaties, levensduurverlenging, terugname, refurbishment en hergebruik. Systematische kennis over welke strategieën er zijn en hoe deze elkaar versterken of tegenwerken ontbreekt nochtans.

Business strategie, businessmodel en verdienmodel vormen de dynamische basis voor het toekomstige verdienvermogen. Niet in de laatste plaats moeten daarin de mogelijkheden en zorgen rond AI een plaats krijgen. Door te zoeken naar nieuwe combinaties kunnen nieuwe modellen van verdienvermogen ontstaan. Om dat te bereiken verdient het aanbeveling dat gewerkt wordt aan een bedrijfsgerichte AI-applicatie waarin strategie, business- en verdienmodellen tegen de achtergrond van langetermijn beleidsontwikkelingen in Nederland en Europa een actueel, dynamisch en voor bedrijven praktisch doorzoekbaar actueel geheel vormen.

30 Bron: Quickscan circulaire businessmodellen (www.circulairemaakindustrie.nl) en boek 'Duurzaam organiseren' van Jan Jonker en Niels Faber

31 Bron: Nieuwsbericht 'Hoe sterkere verdienmodellen bijdragen aan financierbare groeimarkten' (Invest-NL)

6. Digitalisering

Digitalisering vormt de verbindende basis onder de andere actielijnen. Om beter te kunnen sturen op materiaalgebruik, leveringszekerheid, onderhoud, levensduurverlenging en hergebruik is betrouwbare, toegankelijke en uitwisselbare informatie nodig over producten, componenten, materialen, gebruik, service, technische conditie en retourstromen gedurende de hele productlevenscyclus. Het gestructureerd vastleggen en benutten van deze gegevens maakt het mogelijk ketenrisico's beter te beheersen, onderhoud te optimaliseren en nieuwe circulaire diensten te ontwikkelen.

Deze actielijn combineert digitale productinformatie en traceerbaarheid met sensoren, monitoring, data-analyse en datastructuren die uitwisseling tussen systemen en ketenpartners mogelijk maken. Daarbij zijn ook afspraken nodig over datakwaliteit, eigenaarschap, toegang, vertrouwelijkheid, intellectueel eigendom en cybersecurity. Concrete toepassingen liggen onder meer bij installed-base-management, condition monitoring, assetmanagement, spare-partsplanning en het beoordelen en kwalificeren van machines en componenten voor hergebruik.

De eerste stap is het op orde brengen van bestaande machine-, configuratie- en onderhoudsgegevens, veelal verspreid over ERP (Enterprise Resource Planning) - en servicesystemen. Datakwaliteit vraagt blijvende aandacht, met als uitgangspunt: goed genoeg voor de beslissing, niet perfect. Sensoren en monitoring bouwen voort op deze basis. Datagovernance borgt daarbij de verantwoordelijkheden voor kwaliteit, actualiteit en gegevensdeling, binnen bedrijven en in de keten. Dit moet ook voor kleinere bedrijven praktisch uitvoerbaar zijn.

Bij de uitvoering wordt voortgebouwd op bestaande digitale infrastructuur, standaarden, kennis en ondersteuningsstructuren. De Routekaart Digitaal Circulair Werken, ontwikkeld door de provincie Noord-Brabant, biedt hiervoor aanknopingspunten. Initiatieven en voorzieningen zoals het Digitaal Productpaspoort, DigiGO, Smart Connected Supplier Network (SCSN) en Smart Maintenance ondersteunen de beschikbaarheid, uitwisseling en toepassing van gegevens. Via de EDIH's kunnen bedrijven digitale expertise en test-before-invest benutten om vanuit concrete bedrijfsproblemen toepassingen te ontwikkelen en te testen. Een concrete toepassing hiervan is control-roomsturing.

Prioritair uitvoeringsprogramma: Control-roomsturing over de productlevenscyclus
(Project Control Room of the Future (CRoF))

Binnen het programma DACE (Digitalisering en Automatisering voor een Circulaire Economie), in opdracht van het ministerie van EZK uitgevoerd door de Brabantse Ontwikkelingsmaatschappij (BOM) en Oost NL vanuit de EDIH's Zuid en Oost, is control-roomsturing naar voren gekomen als een belangrijke vervolgstap. Door bestaande gegevens over onder meer ontwerp, installed base, gebruik en prestaties, onderhoud, kritieke onderdelen en hergebruik met elkaar te verbinden, kunnen bedrijven beter zien waar waarde verloren dreigt te gaan, waar risico's ontstaan en waar kan worden bijgestuurd. De kern is daarbij niet méér data verzamelen, maar bestaande en nu vaak gefragmenteerde data vertalen naar betere beslissingen en meer waarde over de gehele productlevenscyclus.

De volgende stap is deze aanpak in de praktijk verder te ontwikkelen en op te schalen in het Control Room of the Future project (CRoF). Oost NL werkt met de provincie Overijssel en het Fraunhofer Innovation Platform aan de Universiteit Twente aan een eerste pilot in Oost-Nederland. De BOM start vanuit DACE een tweede pilot in Brabant. Op basis van deze ervaringen kunnen BOM, Oost NL en de EDIH's Oost en Zuid een praktische aanpak ontwikkelen die ook breder binnen de machinebouw kan worden toegepast en die via de EDIH-infrastructuur kan worden aangeboden aan de industrie in Nederland. Daarmee kan control-roomsturing bijdragen aan hogere beschikbaarheid, lagere kosten, minder materiaalverlies, langere levensduur, betere leveringszekerheid en nieuwe service- en verdienmogelijkheden.

Componentenaanpak: beginnen met elektromotoren en permanente magneten

Nederland is een assemblageland. Zoals eerder beschreven gaat leveringszekerheid voor machine-bouwers daarom vaak niet primair om grondstoffen, maar meer om kritieke componenten. Door leverings-onzekerheid van essentiële componenten kunnen zij soms niet of minder goed aan hun klanten leveren.

Die leveringsonzekerheid is soms terug te leiden op kritieke materialen in die componenten, maar soms ook op disrupties in de toeleveringsketen van de kritieke componenten zelf, zoals bijvoorbeeld chips of elektromotoren. Het is daarom logisch om de inhoudelijke actielijnen in samenhang aan te pakken, voor één of meer kritieke componenten.

Sommige onderdelen komen in veel verschillende machines en markten terug en zijn tegelijk bepalend voor leveringszekerheid, milieu-impact en hergebruik. Als schaarste of afhankelijkheid bij zo'n onderdeel speelt, levert een gezamenlijke aanpak meer op dan wanneer ieder bedrijf of iedere markt afzonderlijk hetzelfde vraagstuk uitzoekt. Elektromotoren (al dan niet met permanente magneten) zijn hiervan een logisch eerste voorbeeld. Ze komen voor in veel machines in onze prioritaire markten. Ook verbinden ze verschillende opgaven uit deze routekaart met elkaar.

Belangrijk is om structureel meer zicht te krijgen op de (verborgen) kwetsbaarheden in de toeleveringsketens voor de maakindustrie. Het NMO kan via zogeheten 'stress tests' achterhalen waar specifieke kwetsbaarheden zich bevinden.

6.3 Vijf marktprogramma's en een initiator

Naast de zes inhoudelijke actielijnen onderscheiden we vijf marktprogramma's en een initiator. De marktprogramma's richten zich op specifieke markten en waardeketens waarin bedrijven en andere partijen gezamenlijk aan concrete circulaire en strategische vraagstukken kunnen werken. De inhoudelijke actielijnen uit paragraaf 6.2 vormen daarbij het inhoudelijke vertrekpunt: per markt kan worden bepaald welke thema's het meest urgent zijn en waar gezamenlijke actie de meeste impact kan hebben. De marktprogramma's sluiten aan op prioritaire markten voor de Nederlandse machinebouw: semicon, medtech, agrifood, energie en defensie.

De initiator heeft richting de markten een aanjagende functie: vanuit concrete bedrijfsvraagstukken wordt verder ingezoomd op specifieke ketens, machines, modules of componenten om kansen, knelpunten en mogelijke samenwerkingsprojecten zichtbaar te maken. Dit kan uiteindelijk uitgroeien tot een marktprogramma.

De marktprogramma's bieden zo een omgeving waarin inhoudelijke actielijnen kunnen worden vertaald naar gezamenlijke projecten, passend bij de kenmerken en opgaven van een specifieke markt of keten.

a. Semicon

Binnen de semicon-equipmentketen is de programmatische aanpak al het verst ontwikkeld. Het Circulair Business Program Semicon (CBPS) is ontstaan vanuit concrete vragen van OEM's en toeleveranciers en wordt inmiddels uitgevoerd in een triple-helix-opzet met kennisinstellingen, provincie Noord-Brabant, BOM, Brainport Industries en ImpactX als onafhankelijke ketenregisseur. Daarmee is de stap gezet van afzonderlijke circulaire projecten naar een meerjarige samenwerking waarin bedrijven, kennisinstellingen en overheden gezamenlijk werken aan circulariteit, leveringszekerheid en concurrentiekracht. Het programma is gebaseerd op behoeften uit de keten en richt zich op minder gebruik van primaire grondstoffen, langere levensduur van onderdelen, modules en equipment en hoogwaardig hergebruik.

De aanpak wordt concreet in projecten rond onderdelen en modules. Zo worden gebruikte machineonderdelen in een triage- en demontagecentrum beoordeeld, onderzocht, gerepareerd en doorgeleid naar een volgende toepassing. Daarnaast wordt een digitale tool ontwikkeld om beter te bepalen welke onderdelen herbruikbaar zijn en worden methoden ontwikkeld voor circulair ontwerp, circulaire waardecreatie en businessmodellen. Andere belangrijke opgaven zijn het organiseren van retourstromen en het beschikbaar maken van product- en levenscyclusdata. CBPS versnelt door samen experimenteren, samen investeren en samen implementeren.

Prioritair uitvoeringsprogramma: Opschaling CBPS naar landelijk en Europees niveau

CBPS is opgebouwd in de Brainport-regio en heeft daar een werkende praktijk neergezet: pre-competitieve samenwerking tussen OEM's en toeleveranciers, een governance die functioneert en een actief netwerk van ketenpartijen. Met een lab naar markt-aanpak levert het programma blauwdrukken op die ketenbreed toepasbaar zijn: repair- en reuseprocessen, circulaire design rules, datastructuur en Product Lifecycle Management (PLM)-koppelingen, en synchronisatie van vraag en aanbod van retourstromen.

De semicon-equipmentketen is echter landelijk en niet Europees georganiseerd, waardoor de volgende stap opschaling vraagt. Die stap bestaat uit één landelijk programma waarbij alle regio's met een semicon-sector zich kunnen aansluiten, met behoud van regionale uitvoeringskracht. Eerste stap is aansluiting van de regio's Gelderland en Overijssel met Oost NL en Zuid Holland met Innovation Quarter. Parallelle vervolgstap is een programmalijn op kritieke grondstoffen. De opschaling volgt een mijlpaalgerichte aanpak waarin vervolgprojecten worden gebaseerd op de voortgang, inzicht en resultaten uit voorgaande fases. Daarmee wordt CBPS het vliegwiel voor circulair produceren op industriële schaal: een gunstiger Cost of Technology en daarmee toekomstig verdienvermogen, langere levensduur van onderdelen, modules en equipment, minder gebruik van primaire grondstoffen en grotere leveringszekerheid. Van daaruit kan Nederland zijn werkwijze inbrengen in de Europese semicon- en grondstoffenagenda's en de standaard zetten voor circulaire semicon-equipment in Europa - een concrete stap naar Europese strategische autonomie en een sterke semicon-sector.

b. Medtech

Medtech is een prioritaire markt voor de Nederlandse machinebouw en kent hoogwaardige apparatuur waarin veel materiaal, technologie en kennis is vastgelegd. Juist daardoor ligt er veel waarde in het langer benutten van bestaande apparatuur en componenten. Tegelijk stellen veiligheid (voor patiënt en zorgpersoneel), kwaliteit, regelgeving en de organisatie van de zorg hoge eisen aan onderhoud, aanpassing en hergebruik. Dat maakt medtech anders dan veel andere machinebouwmarkten: technische mogelijkheden moeten steeds samengaan met aantoonbare kwaliteit, betrouwbare informatie en acceptatie door gebruikers. Standaardisatie, modulariteit en data-uitwisseling kunnen circulariteit ondersteunen, maar mogen innovatie, intellectueel eigendom, cybersecurity of bescherming van klant- en patiëntgegevens niet beperken. Datadeling moet daarom doelgericht, proportioneel en gebaseerd op duidelijke afspraken over eigenaarschap en toegang zijn.

Een marktprogramma Circulaire medtech kan bedrijven en andere ketenpartijen bijeenbrengen rond concrete cases voor levensduurverlenging, upgrades, refurbishment, remanufacturing en hoogwaardig hergebruik. Daarbij gaat het bijvoorbeeld om de vraag welke apparatuur of componenten langer kunnen worden gebruikt, welke upgrades vervanging kunnen voorkomen en hoe gebruikte of gereviseerde onderdelen betrouwbaar opnieuw kunnen worden ingezet.

Net als bij semicon vraagt dit om samenwerking in de keten. Naast de technische oplossing zijn ook kwaliteitsborging, product- en onderhoudsinformatie, businesscases en marktacceptatie bepalend voor opschaling. Het programma kan zo concrete bedrijfscases ontwikkelen waarin economische waarde, materiaalbesparing en langere inzetbaarheid van medische apparatuur samenkomen. Het markt-programma MedTech kan voortbouwen op lessen uit lopende initiatieven, zoals o.a. ESCH-R, het Platform Duurzaamheid en Medische Hulpmiddelen en initiatieven onder de Green Deal Duurzame Zorg.

c. Agrifood

Agrifood kent een omvangrijke installed base van machines en productielijnen met vaak een lange technische levensduur. In de praktijk spelen daarbij specifieke vraagstukken rond intensief en soms seizoensgebonden gebruik, onderhoud, beschikbaarheid van onderdelen, technologische veroudering en investeringsmomenten. Juist omdat complete machines vaak nog technisch bruikbaar zijn, liggen er kansen om bestaande installaties langer productief te houden via onderhoud, retrofit, upgrades en vervanging of hergebruik van onderdelen.

Voor de machinebouw voor voedselproductie ligt bovendien een directe koppeling met de prestaties van de klant. Circulair ontwerp, levensduurverlenging en remanufacturing kunnen worden gecombineerd met procesoptimalisatie, lager energie- en materiaalgebruik en nieuwe serviceproposities.

Data en digitalisering kunnen daarbij ondersteunen, bijvoorbeeld door gebruik en conditie van machines beter te volgen en onderhoud en onderdelenvoorziening gerichter te organiseren. In Brabant is hiervoor al een basis aanwezig in de samenwerking tussen voedselverwerkende bedrijven, machinebouwers en hightechtoeleveranciers, onder meer rond Next Tech Food Factories.

Een marktprogramma circulaire agrifood kan deze praktijk verder ontwikkelen rond concrete bedrijfscases voor circulair ontwerp, retrofit, levensduurverlenging, onderdelenhergebruik en remanufacturing. Daarbij ligt het accent op oplossingen die zowel de levensduur en beschikbaarheid van machines vergroten als aantoonbare economische waarde opleveren voor machinebouwer én gebruiker.

d. Energie

De energiesector is een belangrijke markt voor de Nederlandse machinebouw. Machinebouwers en toeleveranciers leveren onderdelen, productiesystemen en technologie voor onder meer windenergie, zonnestroomsystemen, elektrolysers, batterijen en klimaatinstallaties. Voor bijvoorbeeld dunnefilmapplicaties (zoals elektrolysers en brandstofcellen) worden er in Nederland machines ontwikkeld en gebouwd. Voor stacks en Balance of Plant (BoP) wordt veelal gebruikgemaakt van bestaande apparatuur, maar bij nieuwe materialen, ontwerpen en dergelijke is de situatie waarschijnlijk zeer vergelijkbaar met de productie van batterijen.

Veel van deze toepassingen zijn bovendien afhankelijk van metalen en kritieke grondstoffen en hebben een lange gebruiksduur, waardoor ontwerp, onderhoud, levensduurverlenging en hergebruik direct raken aan zowel leveringszekerheid als economische waarde.

Voor de productgroepen klimaatinstallaties, elektrolysers, zonnestroomsystemen, wind op zee en batterijen zijn inmiddels afzonderlijke circulaire routekaarten opgesteld. Deze routekaarten richten zich op de specifieke keten en technische opgaven van de betreffende productgroep. Het marktprogramma circulaire Energie moet deze trajecten daarom niet overdoen, maar juist de overkoepelende rol van machinebouwers en hun toeleveranciers versterken. Vraagstukken die in meerdere energieketens terugkomen, zoals kritieke componenten, circulair ontwerp, beschikbaarheid van onderdelen, onderhoud en levensduurverlenging, productdata en hoogwaardig hergebruik, kunnen gezamenlijk worden opgepakt. Zo kunnen oplossingen uit de afzonderlijke routekaarten breder worden toegepast en kan de machinebouw bijdragen aan een energie-infrastructuur die niet alleen duurzamer, maar ook minder grondstofafhankelijk en beter onderhoudbaar is.

e. Defensie

De defensiemarkt stelt andere eisen aan machines en systemen dan veel civiele markten. Beschikbaarheid, snelle inzetbaarheid, leveringszekerheid en aanpasbaarheid zijn bepalend. Systemen moeten langdurig bruikbaar blijven, terwijl technologie snel verandert en onderdelen of materialen schaars kunnen worden. Dat maakt modulair ontwerp, vervangbare en vooraf gekwalificeerde componenten, reparatie en upgrades direct relevant voor zowel operationele beschikbaarheid als weerbaarheid. De Defensie Strategie voor Industrie en Innovatie 2025–2029 zet tegelijkertijd sterk in op innovatie, opschaling van Nederlandse productiecapaciteit en nauwere samenwerking tussen het ministerie van Defensie, bedrijven en kennisinstellingen.

Een marktprogramma circulaire Defensie kan zich daarom richten op concrete machines, voertuigen en subsystemen waarin leveringsrisico en levenscycluswaarde samenkomen. Daarbij gaat het bijvoorbeeld om kritieke onderdelen en batterijsystemen, maar ook om de vraag hoe systemen zo worden ontworpen dat beschadigde of verouderde modules snel kunnen worden vervangen, gerepareerd of geüpgraded. Hergebruik en herkwalificatie van onderdelen kunnen daarbij niet alleen materiaal besparen, maar ook een extra mogelijkheid bieden wanneer nieuwe onderdelen moeilijk beschikbaar zijn.

Een specifiek aandachtspunt is sturing over de gehele levensduur. Productie-, configuratie-, gebruiks- en onderhoudsdata kunnen helpen om te weten waar systemen zich bevinden, in welke conditie zij verkeren en wanneer onderhoud, vervanging, upgrade of herinzet nodig is. Daarmee verschuift de aandacht nog verder van productie en aanschaf naar blijvende beschikbaarheid van materieel, een onderwerp dat sowieso al topprioriteit is bij defensie. Juist op dat snijvlak van machinebouw, leveringszekerheid, onderhoud en lifecycle-sturing kan het programma concrete samenwerkingsprojecten ontwikkelen.

Initiator

Veel problemen ontstaan op het snijvlak van meerdere bedrijven in een keten, omdat ontwerp, productie, componenten, gebruik, onderhoud, terugname en hergebruik vaak bij verschillende ketenpartijen liggen. Een succesvolle aanpak begint dan ook vaak bij een specifieke keten. Binnen die keten wordt dan een concreet optimalisatievraagstuk onderzocht en worden alle relevante ketenpartijen betrokken. Voorbeelden van zulke ketenbenaderingen zijn de aanpak van KetenkrachtNL in de circulaire maakindustrie en de ketenaanpak van circulaire gezondheidszorg in trajecten als het onderzoekstraject ESCH-R[32] en het programma Digital Health in the Circular Economy (DiCE).

Alvorens tot integrale marktprogramma's te komen, is het dus nuttig en relevant om klein te beginnen, met een project of pilot met een paar bedrijven langs een keten, al dan niet gecombineerd met overheden en kennisinstellingen. Vaak begint dat met een bepaalde partij of actor die als initiator optreedt om de partijen bij elkaar te brengen. Er zijn verschillende tools beschikbaar om dit te doen, bijvoorbeeld CIRCO (Keten-)tracks en/of de aanpak Ketenverkenner.

De Ketenverkenner is een aanpak die begint bij een concreet bedrijfsvraagstuk en onderzoekt vervolgens welke andere partijen nodig zijn om dat vraagstuk daadwerkelijk op te lossen. Wanneer meerdere bedrijven tegen hetzelfde probleem aanlopen, kan een eerste verkenning doorgroeien naar een gezamenlijk ketenproject en, als de economische opgave en de behaalde impact groot genoeg blijkt, naar een programmatische aanpak voor een hele markt. Belangrijk is dat er ook gekeken wordt naar de benodigde regionale interventies van (mede)overheden (denk aan Vergunningen, Toezicht, Handhaving (VTH) of circulair inkopen) om het ketenvraagstuk te helpen oplossen.

32 Het ESCH-R onderzoekstraject ***(Evidence-based Strategies to create Circular Hospitals: Applying the 10-Rs framework to healthcare)*** heeft als missie om de adoptie van circulaire interventies in ziekenhuizen te versnellen en daarmee de ecologische voetafdruk van de zorgsector te verkleinen in termen van CO_2-uitstoot, materiaalwinning en afval. Bron: Greendeal duurzame zorg – Samen naar circulaire ziekenhuizen.

7 Van routekaart naar gerichte actie

In dit hoofdstuk beschrijven we de vervolgstappen om tot praktische uitvoering te komen. Want een routekaart is mooi, maar alleen als je hem gebruikt om ook op weg te gaan en een bestemming te bereiken.

In het voorgaande hoofdstuk is een matrix van zes actielijnen en vijf marktprogramma's beschreven die onderling samenhangen. De actielijnen zijn in bijlage 7 in detail uitgewerkt en vormen samen de basis van een projectenportfolio die de komende jaren ten uitvoer gebracht zou moeten worden.

In dit hoofdstuk gaan we nader in op welke stakeholders aan zet staan voor wat, wat er nodig is voor overall coördinatie en voortgangsmonitoring, en welke investeringen in grote lijnen nodig zijn om optimaal economisch, sociaal en ecologisch rendement te behalen.

7.1 Wie is aan zet voor wat?

Vanwege de reikwijdte en impact over een hele keten, of over verschillende markten heen, kunnen de actielijnen en de marktprogramma's uit het vorige hoofdstuk het best programmatisch worden aangepakt.

Vanwege de hoge mate van specialisatie in de machinebouw in verschillende productmarkten en toepassingen moet de route binnen de marktprogramma's nader worden gespecifieerd op het niveau van een enkele toeleveringsketen (detail SBI 4-6) tot en met de eindgebruikers. Door het inzicht op verbetermogelijkheden op dit concrete niveau van de ketenpartners te organiseren, neemt de haalbaarheid van en deelname aan acties enorm toe.

De uitvoering binnen actielijnen en marktprogramma's kan wel vaak klein beginnen: met één product, één keten, één kritieke component of één terugkerend bedrijfsprobleem. Vanuit zo'n concrete eerste stap kan een aanpak worden ontwikkeld die vervolgens binnen een markt (bijvoorbeeld medtech) of voor een circulaire strategie (bijvoorbeeld remanufacturing) wordt opgeschaald (zie het vorige hoofdstuk onder 'Initiator en 'componentenaanpak').

We onderscheiden drie niveaus:

1. Individuele bedrijven op weg met de routekaart

Bedrijven geven zelf aan waar zij mee aan de slag willen en in welke keten en markt zij opereren. De meeste van deze acties vragen om advies en ondersteuning om praktisch stappen te zetten. Daarvoor ligt een taak weggelegd voor organisaties, zoals Circonnect, RVO en de ROM's. MKB-ondernemers kunnen in meerdere provincies voor hulp ook terecht bij diverse regionale loketten van eerstelijnsorganisaties. De stichting Circulaire Maakindustrie kan laagdrempelige informatie bieden via training, webinars en haar web-platform, en kan ook haar grote achterban inspireren en mobiliseren om in relevante projecten in te stappen. (Zie praktijkvoorbeelden in bijlage 12).

2. Inhoudelijke actielijnen

Op het niveau van het uitvoeringsprogramma circulaire maakindustrie, zullen de zes inhoudelijke actielijnen over de routekaarten moeten worden opgepakt met tools en middelen. Per actielijn is ook echt een programmatische aanpak nodig, omdat de actielijnen breed impact over alle markten kunnen hebben. Binnen de actielijnen hebben we 4 prioritaire programma's geïdentificeerd:

- gericht componentenprogramma voor elektromotoren en permanente magneten;
- standaardisatie, circulair ontwerpen en modulariteit;
- landelijke opschaling van remanufacturing;
- digitaliseringsprogramma, onder meer via project Control Room of the Future (CRoF) en de EDIH's;

3. Marktprogramma's

Voor de analyse en aanpak op een hele productmarkt is ook een programmatische aanpak nodig. Een succesvol voorbeeld hiervan is het Circular Business Programma Semicon (CBPS) in de regio Brainport Eindhoven. Dit programma is publiek-privaat gefinancierd en georkestreerd door een onafhankelijke partij.

We stellen voor dat er een gerichte opschaling komt van het CBPS-programma. En dat daarnaast deze aanpak wordt vertaald naar de andere prioritaire markten met nieuwe marktprogramma's voor medtech, agrifood, energie en defensie. Per sector zal nader moeten worden bepaald wie het programma initieert (zie vorige hoofdstuk onder 'Initiator'), hoe besturing en financiering worden geregeld, en hoe randvoorwaarden zoals intellectueel eigendom worden ingericht.

Daar waar specifieke machines, apparatuur of grondstoffen worden gebruikt door overheden, zoals bijvoorbeeld Rijkswaterstaat, waterschappen of ministerie van Defensie, zal de inkoopkracht van de overheid als sturingsmechanisme een belangrijke component moeten zijn van de marktprogramma's. Dat geldt in het bijzonder voor strategische voorraadvorming van kritieke componenten voor infrastructuur.

7.2 Overall coördinatie, nationaal en regionaal

Zoals herhaaldelijk betoogt in dit document, moeten de inhoudelijke actielijnen en de marktprogramma's in samenhang worden bezien. Het is daarom essentieel om overall regie te organiseren. Dit is nodig voor prioritering in focus en tijd, keuzes voor financiële investeringen, en borgen van de impact via monitoring en bijsturing.

Het productteam stelt voor om voor de overall regie een **ketentafel** in te richten, zoals benoemd in het geactualiseerde NPCE van oktober 2025. De **ketentafel machinebouw** zou onderdeel moeten worden van het UPCM. In de **regiegroep circulaire maakindustrie** wordt de afstemming georganiseerd met de productteams van andere prioritaire productgroepen. In de **productgroep machinebouw** zit idealiter een 'linking pin' vanuit het gerichte programma machinebouw.

Daarnaast biedt de aanpak **KetenkrachtNL** (zie bijlage 10) een landelijke structuur voor sturing en coördinatie voor alle routekaarten. Hierin is via de ROM's borging en regionale bedding mogelijk en ruimte voor marktinitiatieven, mits passend binnen de scope en focus van de routekaarten. Het biedt een gerichte aanpak voor een verkenning naar Europese opschaling via 6 stappen. De brede landelijke regie mist nu, waardoor veel initiatieven ad hoc starten, te regionaal gefocust zijn, onderling concurreren en veel moeite hebben met de vervolgstap. KetenkrachtNL is een getoetste werkwijze waarin dit verholpen wordt.

Voorbeeld van initiatie naar opschaling: KetenkrachtNL

KetenkrachtNL (in oprichting) is door ROM-Nederland ontwikkeld binnen het circulaire maakindustrie onderdeel van het programma ROM4ward in opdracht van EZK. Met een kleine groep bedrijven wordt ingezoomd op een specifieke machine, module, component of materiaalstroom. Daarbij wordt zichtbaar waar in de keten de belangrijkste belemmering zit en welke gezamenlijke interventie mogelijk is. Dat kan bijvoorbeeld gaan om retourlogistiek, beschikbaarheid van kritieke componenten, uitwisseling van product- en onderhoudsinformatie, repair en hergebruik of gezamenlijke afspraken over testen en kwaliteitsborging. De aanpak blijft bewust praktisch: niet de hele keten analyseren, maar gericht zoeken naar de plek waar samenwerking daadwerkelijk verschil kan maken.

KetenkrachtNL is daarmee ook een ontwikkelinstrument voor nieuwe projecten en voor opschaling van bedrijf, naar keten, naar markt.

Ons advies voor noodzakelijke regie is ook een oproep aan de overheid om bestaande sturingsstructuren, die instrumenteel geweest zijn voor de totstandkoming van het NPCE, UPCM, en uiteindelijk van de routekaarten, niet te ontmantelen. De regie blijft nodig, maar kan in de aard en uitvoering veranderen, zoals hierboven geschetst.

Inbedding in nationaal beleid is ook cruciaal om de benodigde focus en aandacht te borgen. Deze routekaart zou daarom een goede inbedding moeten krijg bij een of meerdere relevante beleidsdirecties van het Ministerie van EZK. Specifiek is er al afstemming geweest met het gerichte integrale programma Machinebouw (i.o.) binnen de nieuwe directie Innovatie & Industrie (I&I), onderdeel van DG Bedrijfsleven en Innovatie (B&I). In dat programma staan de volgende interventies: ecosystemen bouwen, financiering, regelgeving, ruimte, infrastructuur, water & gebouwen, internationalisering & acquisitie, menselijk kapitaal, en marktcreatie. Deze routekaart geeft invulling aan de **grondstoffenstrategie voor het nieuwe industriebeleid** en biedt aanknopingspunten met alle bovengenoemde thema's.

Inbedding in regiostructuur. De machinebouw is verspreid over heel Nederland. Initiatieven worden in diverse regio's genomen. Vanwege de relatie met materiaalstromen, recycling, retourlogistiek en ruimtebeslag kennen veel provincies een transitieagenda die aansluit op het nationale beleid voor grondstoffen en CE. De ROMs - gebundeld in ROM-Nederland - kunnen regionale initiatieven opstarten en opschalen tot nationale ketenprojecten (onder andere via het programma KetenkrachtNL). Geadviseerd wordt om de actielijnen uit de routekaart te verbinden met het nationale en regionale innovatie- en industriebeleid van EZK en de provincies.

Inbedding onderwijs. Voor veel van de in deze routekaart genoemde innovaties is kennisontwikkeling nodig. We horen van machinebouwers dat ze veel en intensief samenwerken met universiteiten en hogescholen, maar dat vaak niet bekend is wat er allemaal aan onderzoeksprogramma's loopt. Het zou goed zijn om dit ook breder in kaart te brengen (en waar mogelijk te coördineren), om kennis sneller en breder te verspreiden en dubbeling te voorkomen.

7.3 Van Routekaart naar investeringsaanpak

Een routekaart krijgt pas betekenis als bedrijven daadwerkelijk anders gaan ontwerpen, produceren en verdienen. Daar zijn investeringen voor nodig. Daarom wordt voorgesteld om vanuit deze routekaart circa €10 miljoen aan programmatische middelen beschikbaar te maken om de uitvoering op gang te brengen. Deze investering moet circa €90 miljoen aan aanvullende investeringen mobiliseren van bedrijven, Rijk, regio's, kennisinstellingen en Europa. Zo ontstaat een investeringsvolume van ongeveer €100 miljoen, met als richtinggevende ambitie om richting 2035 bij te dragen aan €0,5 tot 1 miljard extra toegevoegde waarde per jaar in de Nederlandse machinebouw.

Waarom is collectieve financiering nodig?

Bedrijven kunnen de transitie niet alleen voor elkaar krijgen: Leveringszekerheid is een publiek belang dat de markt onvoldoende inprijst. Het risico van een leveringsstop weegt voor individuele bedrijven zelden op tegen de kosten van alternatieven. Circulaire ketens vragen coördinatie die niemand alleen kan organiseren. Investeringen zullen nodig zijn bij de ene partij, terwijl baten bij de andere partij vallen. De eerste beweger draagt ook vaak het risico. Zolang referentieprojecten en kengetallen ontbreken, is de businesscase voor individuele bedrijven moeilijk rond te krijgen. Dat geldt vooral voor het mkb.

Een gerichte hefboom: van investeringsagenda naar publieke waarde

De voorgestelde €10 miljoen is geen nieuw fonds naast bestaande programma's, maar een hefboom. Het geld wordt over 4 jaar ingezet voor orkestratie, het ontwikkelen van businesscases, het vormen van consortia en het investeerbaar maken van projecten. De projecten zelf worden publiek-privaat gefinancierd via bestaande regelingen.

Het eerder genoemde CBPS laat zien dat één marktprogramma projecten van circa €9 miljoen kan genereren, gefinancierd in een verhouding van ongeveer 50/50 publiek-privaat. Het programma ontwikkelt zich inmiddels door met nieuwe projecten richting een programma van €13 miljoen; een vliegwieleffect. Vijf marktprogramma's en de componenten-aanpak maken een investeringsvolume in de orde van €100 miljoen realistisch. De bedragen zijn indicatief en maken de schaal van de opgave zichtbaar.

Het vertrekpunt zijn bedrijven die zelf kansen zien en bereid zijn tijd, capaciteit en geld te investeren. Publieke middelen vervangen die bedrijfsinvesteringen niet, maar helpen om ze eerder en op grotere schaal tot stand te brengen.

De **waarde** ontstaat over de hele levenscyclus van machines, door kostenreductie, meer waardebehoud en nieuwe commerciële kansen. Tegelijkertijd wordt de weerbaarheid van de industrie en de economie als geheel versterkt (strategische autonomie). Tenslotte zal slim materiaalgebruik een essentiële bijdrage leveren aan de nationale doelen op klimaat- en milieu-impact.

Nederlandse koplopers laten zien wat mogelijk is. ASML haalde in 2025 een kwart van zijn omzet uit service en upgrades,[33] en Philips bijna 28 procent uit producten en diensten, die bijdragen aan circulariteit.[34] De publieke meerwaarde zit in het verspreiden van deze aanpak naar de brede middengroep en het mkb, en het aansluiten van de keten op de strategische richting. Daarmee verschuift het verdienmodel van alleen machines verkopen naar waarde leveren gedurende de hele levenscyclus.

De routekaart draagt bij aan minder afhankelijkheid van kritieke grondstoffen en aan meer verdienvermogen. De richtinggevende ambitie van €0,5 tot 1 miljard extra toegevoegde waarde per jaar in 2035 is circa 2 tot 5 procent van de huidige toegevoegde waarde van de machine-industrie. Dat komt neer op 0,3 tot 0,7 procentpunt extra groei per jaar, en is daarmee een realistische bijdrage aan de 1,5 tot 2,0 procent reële groei die het rapport-Wennink voor de sector beoogt. Hoe de voortgang wordt gevolgd, staat in paragraaf 7.4.

Zo verbindt de routekaart grondstoffenzekerheid met verdienvermogen: een investeringsagenda voor weerbaarheid, circulariteit en economische structuurversterking.

7.4 Impact en monitoring

Monitoring ondersteunt de uitvoering van de routekaart door zichtbaar te maken waar voortgang ontstaat en waar bijsturing nodig is. Voor bedrijven kan dat gaan om beschikbaarheid, levensduur, service-omzet, kritieke onderdelen en materiaalgebruik. In ketens spelen leveringsrisico's, retourstromen en hergebruik een rol. Op sectorniveau gaat het om de bijdrage aan verdienvermogen, leveringszekerheid en grondstoffendoelen. Een beperkte set bruikbare indicatoren is een logisch startpunt, liefst gevoed vanuit gegevens die bedrijven al beschikbaar hebben. Naarmate projecten zich ontwikkelen kan de monitoring meegroeien.

Naar analogie van andere ketentafels, zou een nieuw op te richten ketentafel voor machinebouw een deel van de voortgangsmonitoring (op project- en programmaniveau) zelf moeten oppakken. Daarnaast pleiten wij er sterk voor dat bij de landelijke monitoring en ICER (Integrale Circulaire Economie Rapportage, opgesteld door het PBL) een verdieping wordt aangebracht op de bijdrage van (sub)sectoren aan de landelijke doelen. In onze ogen is dat essentieel om ook op nationaal beleid te kunnen bijsturen, en de jarenlange 'stand-stil' van voortgang op circulariteit vlot te trekken.

Hieronder zijn enkele visuals toegevoegd om aan te geven welke impact vanuit welke initiatieven verwacht wordt, en hoe projecten in onderlinge afhankelijkheid in de tijd geplaatst moeten worden. Dit kan een basis vormen voor de in te richten monitoringssystematiek.

33 ASML, Annual Report 2025
34 Philips, Annual Report 2025

Figuur 9: impact van actielijnen op de doelen van deze routekaart

Actielijn met kernoplossingen/voorbeeldacties	Verdienvermogen Bruto toegevoegde waarde / technisch waardebehoud	Leveringszekerheid Minder afhankelijkheid van kritieke materialen en componenten	Klimaat Materiaalgebonden CO_2 (scope 3) / energiegebruik	Milieu MKI / materiaalgebruik / ZZS / hoogwaardig recyclaat
IK **Inkoop & leveranciersmanagement** • Keteninzicht en risicoclassificatie • Strategische sourcing en leveranciersontwikkeling • Voorraad en vooraf gekwalificeerde alternatieven • Circulaire inkoop en gezamenlijke vraagbundeling	◕	●	◑	◕
OP **Circulair ontwerp & standaardisatie** • Modulariteit, demontage en standaardisatie • Fit for function; materiaal- en variatiereductie • Ontwerpen voor onderhoud, upgrade en hergebruik • Feedback uit gebruik, service en remanufacturing	●	◕	◔	●
GE **Levensduurverlenging (installed base)** • Installed base, configuratie en conditie in beeld • Conditiegestuurd onderhoud en diagnose • Retrofit, upgrades en spare-partsmanagement • Prestatiegerichte service en levensduurbeheer	●	◕	●	◕
HG **Hergebruik & remanufacturing** • Retourstromen, ketenregie en triage • Repair, refurbishment en remanufacturing • Kwaliteitsborging, testen en garanties • Hoogwaardige recycling als hergebruik niet kan	●	◕	●	●
BS **Businessstrategie** • Levenscyclusproposities en circulaire verdienmodellen • Financiële KPI's en investeringsbeslissingen • Contracten, klantwaarde en ketensamenwerking • AI-ondersteuning voor strategie en verdienmodellen	●	◑	◕	◑
DD **Data & digitalisering** • Bestaande machine- en onderhoudsdata op orde • Datagovernance, toegang, IP en cybersecurity • Interoperabiliteit en traceerbaarheid • Control-roomsturing en opschaling via EDIH's	◕	◕	◔	◕

Leeswijzer: ○ beperkt ◑ matig ◕ hoog ● zeer hoog | Donkerder symbool = sterkere verwachte bijdrage; kolomkleur = soort doel.

Bijdragescores zijn kwalitatieve werkinschattingen; ook indirecte en faciliterende bijdragen. Geen gemeten effecten of optelbare impact.

Figuur 10: KPI-matrix per actielijn – visuele heatmap

Actielijn en voorstel-KPI's			Verdienvermogen Bruto toegevoegde waarde / technisch waardebehoud	Leveringszekerheid Minder afhankelijkheid van kritieke materialen en componenten	Klimaat Materiaalgebonden CO_2 (scope 3) / energiegebruik	Milieu MKI / materiaalgebruik / ZZS / hoogwaardig recyclaat
Inkoop & leveranciersmanagement						
IK	% kritieke componenten met herkomst- en risico-inzicht	% kritieke componenten met gekwalificeerd alternatief	◕	●	◑	◕
Circulair ontwerp & standaardisatie						
OP	% componenten dat voldoet aan circulaire ontwerpcriteria	Materiaalinput (kg) per functionele machine-eenheid	●	◕	◕	●
Levensduurverlenging (installed base)						
GE	Gemiddelde gebruiksduur per machinetype (jaren)	Beschikbaarheid van machines (% uptime)	●	◕	●	◕
Hergebruik & remanufacturing						
HG	% retourmassa hergebruikt; reststroom naar recycling	Netto vermeden kg CO_2-eq. versus functioneel alternatief	●	◕	●	●
Businessstrategie						
BS	% omzet uit circulaire producten en diensten	Bruto toegevoegde waarde per ton materiaal (€/ton)	●	◑	◕	◑
Data & digitalisering						
DD	% relevante installed base met actueel levens-cyclusdossier	% ketenpartners met bruikbare, uitwisselbare gegevens	◕	◕	◕	◕

Leeswijzer: ○ beperkt ◑ matig ◕ hoog ● zeer hoog | Donkerder symbool = sterkere verwachte bijdrage; kolomkleur = soort doel.

Bijdragescores zijn kwalitatieve werkinschattingen; ook indirecte en faciliterende bijdragen. Geen gemeten effecten of optelbare impact.

Figuur 11: Swimlane -actielijnen 2027-2032



7.5 Gewenste vervolgacties

De routekaart ligt er. Als productteam zijn we blij met alle input die we hebben gekregen en de positieve feedback vanuit het veld op eerdere versies van de tekst. Maar nu begint het werk pas echt. Economische en maatschappelijke impact zal worden gecreëerd door het starten en gefaseerd uitvoeren van de actielijnen, programma's en projecten uit deze routekaart. Maar dat gaat niet vanzelf. In deze paragraaf vatten we de belangrijkste eerste stappen samen om tot uitvoering te komen.

- **Routekaart bespreken met het brede veld.** De routekaart is tot stand gekomen met input van een goede representatie van bedrijven en organisaties. De groep stakeholders voor wie dit grote kansen biedt en die ermee aan de slag zouden moeten, is echter veel groter. Met een gerichte roadshow, samen met de Stichting Circulaire Maakindustrie, branche-organisaties en de ROM's zal de routekaart besproken moeten worden met machinebouwers in alle regio's. Om daarmee de bedrijven te inspireren, concrete vragen en kansen te bespreken en partijen te mobiliseren voor gezamenlijke projecten.
- **Regie borgen.** De actielijnen en marktprogramma's hangen nauw samen en vragen om overall regie: voor prioritering, investeringskeuzes, monitoring en bijsturing. Wij stellen een ketentafel machinebouw voor als onderdeel van het UPCM, met afstemming in de regiegroep circulaire maakindustrie. Voor die ketentafel zou een productteam circulaire machinebouw in een of andere vorm in stand moeten blijven, met helder mandaat en bestuurlijke backing. De aanpak van KetenkrachtNL kan daarbij een landelijke structuur bieden met regionale bedding.
- **Inbedden in beleid.** De routekaart geeft invulling aan de grondstoffenstrategie voor het nieuwe industriebeleid. Daarom moet zij stevig worden verankerd in het gerichte programma Machinebouw (i.o.) van de directie Innovatie & Industrie van EZK, en verbonden met het innovatie- en industriebeleid van rijk en provincies. Waar overheden zelf machines inkopen, zoals bijvoorbeeld bij Rijkswaterstaat, waterschappen en Defensie, dient de overheid zelf bij te dragen aan vraagcreatie door circulaire inkoop.
- **Financiering ontsluiten.** Bedrijven kunnen de transitie niet alleen dragen: economische weerbaarheid is een publiek belang en kosten en baten liggen vaak bij verschillende ketenpartijen. Een grove inschatting laat zien dat circa € 10 miljoen aan programmatische middelen over vier jaar zal moeten worden ingezet als hefboom voor orkestratie, businesscases en consortiumvorming. Dit moet op zijn beurt circa € 90 miljoen aan aanvullende publieke en private investeringen mobiliseren.
- **Uitvoering starten en opschalen.** Gestut door bovenstaande vier activiteiten als randvoorwaarde, kan de uitvoering beginnen. Enerzijds met individuele projecten, rond één product, één keten of één kritieke component. Anderzijds met een programmatische aansturing via de prioritaire programma's: componentenaanpak van elektromotoren en permanente magneten, standaardisatie en circulair ontwerp, opschaling van remanufacturing en digitalisering via de Control Room of the Future.
  Aan de marktkant zal CBPS landelijk en Europees moeten worden opgeschaald, en zullen nieuwe marktprogramma's moeten worden gestart voor medtech, agrifood, energie en defensie. Aansluitend bij en in afstemming met bestaande structuren zoals het landelijke Groeiplan MedTech.

8 Bijlagen

Bijlage 1: Profielen productteamleden

Bijlage 2: Doelensystematiek

Bijlage 3: Uitgebreide PESTEL-analyse

Bijlage 4: Kritieke materialen in robotica

Bijlage 5: Aanvullende toelichting permanente magneten in motoren

Bijlage 6: Klimaat- en milieu-impact productieketen

Bijlage 7: Details actielijnen

Bijlage 8: Prioritair programma: opschaling remanufacturing

Bijlage 9: Governance - KetenkrachtNL

Bijlage 10: Lopende initiatieven en projecten

Bijlage 11: NEN Factsheet – machinebouw

Bijlage 12: Praktijkvoorbeelden circulaire machinebouw

Bijlage 13: Afkortingenlijst

Bijlage 1:
Profielen productteamleden

Harald Tepper - voorzitter productteam

Harald Tepper was tot de zomer van 2026 senior directeur duurzaamheid bij Philips, waar hij verantwoordelijk was voor Circulaire Economie, EcoDesign en ESG Strategie. Vanaf november 2026 is hij aangesteld als Decaan Industrieel Ontwerp, bij de TU Delft. Harald is sinds de start betrokken bij het Uitvoeringsprogramma Circulaire Maakindustrie en is ook voorzitter van de Stichting Circulaire Maakindustrie. Voor Harald is de transitie naar een circulaire economie essentieel om verantwoord materiaalgebruik te bevorderen, klimaatverandering tegen te gaan en de negatieve impact op milieu en natuur te verminderen. Tegelijkertijd ziet hij het ook als een aanjager van innovatie en economische waarde. Machinebouw speelt voor hem een sleutelrol in de transitie. De producten zijn immers vaak zwaar in materiaalgebruik en vertegenwoordigen ook vaak een grote intrinsieke waarde. Dit biedt allerlei kansen voor levensduurverlenging, optimaliseren van gebruik, refurbishment en hergebruik van onderdelen. Harald brengt in het productteam zijn expertise in op circulaire economie, ecodesign, en systeemtransitie. Via Stichting Circulaire Maakindustrie betrekt hij relevante bedrijven van Metaalunie, FME, en NRK.

Esther Kersten – lid productteam

Esther is CEO van ImpactX en bestuurslid bij het Topconsortium Kennis en Innovatie voor het programma High Tech Systemen en Materialen (TKI HTSM). Vanuit haar rol als oprichter en CEO van ImpactX ondersteunt Esther hightech ketens bij gezamenlijke innovatie en de transitie naar circulariteit op industriële schaal. Ze beschikt over expertise in circulariteit en strategische transities binnen de hightech maakindustrie, met ruime ervaring in het opzetten en leiden van publiek-private samenwerkingen in complexe waardeketens. Vanuit deze expertise neem Esther deel aan het productteam voor deze routekaart. Daarbij ligt de focus op economische waardecreatie door circulariteit én het borgen van toegang tot kritieke grondstoffen, essentieel voor de Nederlandse en Europese hightechsector.

Jan Westra – lid productteam

Jan heeft zijn eigen adviesbureau Janura. Verder is hij lid van het innovatieteam CE van TKI HTSM en projectleider Digitalisering en Automatisering voor de Circulaire Economie (DACE). Als zelfstandig adviseur werkt Jan op dit moment in opdracht van BOM en Oost NL, ondersteund door het ministerie van Economische Zaken en Klimaat, aan de versnelling van de circulaire maakindustrie. Binnen het project verkent en ontwikkelt hij hoe digitalisering, data en automatisering concreet kunnen bijdragen aan grondstofzekerheid, levensduurverlenging en nieuw verdienvermogen in de machinebouw. Daarbij werkt hij nauw samen met de European Digital Innovation Hubs (EDIH's) in Oost- en Zuid-Nederland en bezoekt hij maakbedrijven om praktijkervaringen, knelpunten en werkende oplossingen op te halen. In het productteam breng Jan deze praktijkinzichten samen met nationale beleidsdoelen, met als insteek om te komen tot een routekaart die richting geeft én houvast biedt voor uitvoering in de praktijk.

Joost Kuijper – lid productteam

Joost is strateeg/senior beleidsadviseur maakindustrie bij de Provincie Overijssel. De machinebouw bedenkt, ontwerpt en maakt de productiesystemen in de wereld. Voor Joost is het daarmee de belangrijkste schakel in economische ketens om veranderingen in die systemen in gang te zetten, of het nu gaat om productiviteit, product levensduur, milieu- of klimaatimpact. De machinebouw is belangrijk voor Nederland als eerste aanjager en integrator van vernieuwingen op functioneel en materiaalkundig vlak. Er zijn vele specialismen bij betrokken en een groot deel van de sector heeft een thuisbasis in Oost-Nederland. Joost is daarom gemotiveerd om de abstractie van circulaire economie praktisch toepasbaar te maken.

Loeki Schaeffers - gedelegeerd opdrachtgever EZK

Loeki Schaeffers werkt, vanuit een flexibele POOL, aan wisselende maatschappelijke opgaven voor het ministerie van EZK en het ministerie van Landbouw, Visserij, Voedselzekerheid en Natuur (LVVN). Voor deze routekaart was zij tot juli 2026 gedelegeerd opdrachtgever namens EZK. Haar focus ligt op transitiemanagement, leiderschap en innovatie. Vanaf juni 2026 is Loeki ook MT-lid bij de POOL.

Matthéüs van de Pol - gedelegeerd opdrachtgever EZK

Matthéüs van de Pol werkt bij het ministerie van EZK, directie Economische Veiligheid en Weerbaarheid (EVW), team kritieke grondstoffen en strategische materialen. Hij is namens de directie Innovatie en Industriebeleid gedelegeerd opdrachtgever voor deze routekaart.

De Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO) vervult binnen het productteam de rol van het secretariaat. Alejandra Roetenberg en Marije Mossel zijn als adviseur werkzaam binnen het team Duurzame industrie & Circulaire economie.

Bijlage 2:
Doelensystematiek

Circulair potentieel en doelen voor de machinebouw

Voor het bepalen van het circulaire potentieel van de machinebouw is aangesloten bij het advies-rapport *Circulaire economie tussendoelen 2035*.[35] In dit rapport is met de Circulaire Potentie Methodiek (CPM) voor verschillende clusters berekend welk circulair potentieel in 2035 kan worden gerealiseerd. Daarbij worden vier circulaire strategieën onderscheiden: vermindering van het grondstoffengebruik, levensduurverlenging, substitutie van grondstoffen en hoogwaardige recycling.

Voor de machinebouw wordt uitgegaan van het gemiddelde potentieel van:
- cluster 10: **Machines;**
- cluster 11: **Voertuigen exclusief auto's**.

Cluster 10 sluit rechtstreeks aan bij de machinebouw. Cluster 11 is aanvullend relevant omdat deze productgroep, evenals veel machines, bestaat uit kapitaalintensieve en technisch complexe producten met een relatief lange levensduur en mogelijkheden voor onderhoud, reparatie, revisie en hergebruik. Door het ongewogen gemiddelde van beide clusters te gebruiken, ontstaat een richtinggevende inschatting voor een bredere machinebouwsector.

Tabel 6: richtinggevende inschatting van de potentie voor een bredere machinebouwsector

Circulaire strategie	Cluster 10: Machines	Cluster 11: Voertuigen excl. auto's	Gemiddeld potentieel 2035	Aandeel van wereldmarkt
Substitutie van grondstoffen	3%	10%	6,50%	100%
Vermindering van grondstoffengebruik	4%	0%	2%	
Levensduurverlenging	4%	28%	16%	10%
Hoogwaardige recycling	4%	26%	15%	1%

Toelichting: De potentiemethodiek clustert de productgroepen (machines en overige machines, inclusief voertuigen exclusief auto's) net iets breder dan de scope van deze routekaart (SBI 281–283 en 289). Voor levensduur en hoogwaardige recycling hebben we het gemiddelde genomen van cluster 10 en 11. Hoeveel van die potentie kan worden waargemaakt, moet in de praktijk blijken. Eerst moeten de kritische activiteiten op gang komen, moeten voldoende partijen aanhaken en moet de gerealiseerde impact worden gemonitord. Ook is de huidige verdeling over 14 clusters grofmazig en pragmatisch en daarmee niet gelijk geschikt om tot realistische sectordoelen te komen. Voor praktische toepassing zou het wel nodig zijn om per sector (semicon, medtech, agrifood, etc.) specifieke baselines, potentie en doelen te bepalen.

De uitkomsten zijn vertaald naar drie doelen, overeenkomstig de indeling van het nationale tussendoelenrapport: **besparen, vervangen** en **behouden van grondstoffen:**

Doel 1 – Besparen van grondstoffen

In 2035 wordt binnen de machinebouw een mogelijke grondstoffenbesparing van **18%** ingeschat ten opzichte van de referentiesituatie. Dit richtinggevend doel bestaat uit:
- **2% besparing door vermindering van het directe grondstoffengebruik**, bijvoorbeeld door materiaal-efficiënt ontwerp, gewichtsreductie, vermindering van productie-uitval en het vermijden van overdimensionering;
- **16% besparing door levensduurverlenging**, bijvoorbeeld door onderhoud, reparatie, upgrading, revisie, remanufacturing en hergebruik van machines en onderdelen.

35 Bron**:** Ahsmann, N., & Bouwknegt, J. (2025). Circulaire economie tussendoelen 2035. KplusV en CE Delft

Levensduurverlenging levert binnen deze benadering de grootste bijdrage. Door machines, modules en componenten langer functioneel in gebruik te houden, neemt de behoefte aan nieuwe productie en daarmee aan nieuwe grondstoffen af.

Doelformulering:
In 2035 kan het grondstoffengebruik van de machinebouw met 18% zijn verminderd ten opzichte van de referentiesituatie, waarvan 2 procentpunt door efficiënter grondstoffengebruik en 16 procentpunt door levensduurverlenging.

Doel 2 – Vervangen van primaire grondstoffen

Voor substitutie bedraagt het gemiddelde circulaire potentieel **6,5%**. Dit betreft het vervangen van primaire, fossiele of schaarse grondstoffen door secundaire grondstoffen, duurzaam geproduceerde biotische grondstoffen of alternatieve materialen met een lagere milieu-impact en een kleiner leveringsrisico.

Voor de machinebouw ligt het accent naar verwachting vooral op het vergroten van het aandeel secundair staal, aluminium en kunststoffen, het beperken of vervangen van kritieke grondstoffen en het toepassen van hergebruikte onderdelen en componenten. Substitutie moet steeds worden beoordeeld in samenhang met technische prestaties, veiligheid, levensduur, repareerbaarheid en hoogwaardige verwerkbaarheid.

Doelformulering:
In 2035 kan 6,5% van de voor de machinebouw relevante materiaalinput vervangen zijn door secundaire, duurzame biotische of aantoonbaar duurzamere alternatieve grondstoffen, ten opzichte van de referentiesituatie.

Doel 3 – Behouden van grondstoffen in de economie

Voor hoogwaardige recycling bedraagt het gemiddelde potentieel **15%**. Dit doel richt zich op het behouden van de functionele en economische waarde van materialen nadat hergebruik, reparatie, revisie of remanufacturing niet meer mogelijk is.

Hoogwaardige recycling betekent dat materialen zoveel mogelijk worden teruggebracht in toepassingen met een gelijkwaardige kwaliteit en functie. Dit vraagt onder meer om demontabel ontwerp, materiaalidentificatie, gescheiden inzameling, zuivere materiaalstromen en samenwerking tussen machinebouwers, gebruikers, onderhoudsbedrijven, demontagebedrijven en recyclers.

Doelformulering:
In 2035 kan minimaal 15% van de vrijkomende materiaalstromen uit machines en machineonderdelen hoogwaardig worden gerecycled, waarbij de materialen zoveel mogelijk opnieuw worden ingezet in gelijkwaardige toepassingen.

Status en toepassing van de doelen

De percentages moeten worden beschouwd als richtinggevende potenties en niet als reeds vastgestelde sectordoelen. De CPM is gebaseerd op producteigenschappen, expertinschattingen en een clustering van productgroepen. Ook het gehanteerde ongewogen gemiddelde van cluster 10 en 11 is een pragmatische keuze en geen gewogen sectorberekening.

Voor toepassing als meetbare doelen voor de machinebouw moeten daarom nog systeemgrenzen, indicatoren en een monitoringsmethode worden vastgesteld. De definities, indicatoren, systeemgrenzen en meetmethoden zouden moeten aansluiten bij mondiale circulariteitskaders, waaronder het Global Circularity Protocol (GCP). Dit vergroot de internationale vergelijkbaarheid en voorkomt dat internationaal opererende organisaties met uiteenlopende methodieken en rapportagevereisten worden geconfronteerd.

Daarbij moet ook worden voorkomen dat effecten tussen strategieën dubbel worden geteld. Zo kan levensduurverlenging zowel tot minder materiaalgebruik als tot minder afval leiden. De voorgestelde percentages vormen daarmee een onderbouwd vertrekpunt voor verdere uitwerking in een routekaart en voor afspraken met de sector.

De nationale tussendoelen voor de circulaire economie zijn in de routekaart machinebouw vertaald naar doelen voor klimaat, milieu, leveringszekerheid en verdienvermogen. Uitgaande van het gemiddelde circulaire potentieel van de clusters Machines en Voertuigen exclusief auto's wordt voor 2035 gestreefd naar 18% grondstoffenbesparing, een aandeel van minimaal 6,5% secundaire en duurzame biotische grondstoffen en hoogwaardige recycling van minimaal 15% van het beschikbare afval. Bij een jaarlijks materiaalgebruik van 3,8 miljoen ton betekent de besparingsdoelstelling een afname van de materiaalvraag met circa 0,7 miljoen ton.

Met een gemiddeld kengetal van 3,5 kg CO_2-equivalenten per kilogram machine vertegenwoordigt het huidige materiaalgebruik een indicatieve ketenimpact van 13,3 Mton CO_2-equivalenten. De grondstoffenbesparing kan daarvan circa 2,5 Mton vermijden. Aanvullende klimaatwinst door substitutie en hoogwaardige recycling wordt materiaalspecifiek bepaald. Naast deze Scope 3-opgave streeft de sector naar een reductie van Scope 1-emissies met 40–50% en Scope 2-emissies met 80–90% in 2035 ten opzichte van 2025. Bij scope 1 en scope 2-emissies speelt circulariteit doorgaans een ondergeschikte rol.

Circulariteit wordt niet uitsluitend als milieudoel benaderd, maar ook als basis voor toekomstige waardecreatie. Onderhoud, reparatie, upgrading, remanufacturing en digitale dienstverlening maken het mogelijk meer economische waarde te realiseren met minder materiaal. Aansluitend bij het rapport-Wennink wordt gestreefd naar een gemiddelde reële groei van de bruto toegevoegde waarde van 1,5-2% per jaar. Hierdoor neemt niet alleen de toegevoegde waarde per werknemer toe, maar kan de materiaalproductiviteit richting 2035 met circa 42–49% verbeteren. Zo verbindt de routekaart economische groei aan een absolute vermindering van grondstoffengebruik, ketenemissies en leveringsrisico's.

Milieudoelen

De MKI drukt de milieubelasting van een product of systeem over de levenscyclus uit in één score in euro's. De score bundelt meerdere milieueffectcategorieën uit een levenscyclusanalyse (LCA), waardoor alternatieven niet alleen op klimaatimpact, maar op hun bredere milieuprofiel kunnen worden vergeleken.

ZZS zijn stoffen met zeer ernstige eigenschappen, waaronder kankerverwekkendheid, mutageniteit, reproductietoxiciteit, persistentie en bioaccumulatie of een vergelijkbare zorg, zoals hormoonverstoring. Voor de machinebouw worden ZZS geïnventariseerd in materialen, onderdelen en procesmiddelen, bijvoorbeeld in oppervlaktebehandelingen, lijmen en afdichtingen, kunststoffen, elektronica, smeermiddelen en koelmiddelen. Per stof worden ten minste de toepassing, locatie in de machine, massa of concentratie, mogelijke emissieroute en mogelijkheden voor substitutie vastgelegd. De voorkeursvolgorde is: voorkomen en substitueren, vervolgens emissies en blootstelling minimaliseren en ten slotte een beheerste verwerking aan het einde van de levensduur. Voor meldings- en vergunningsverplichtingen milieubelastende activiteiten sluit dit aan op de minimalisatieplicht binnen het Besluit activiteiten leefomgeving (Bal).

Bijlage 3:
Uitgebreide PESTEL-analyse

Hieronder een uitgebreide omschrijving van de PESTEL-analyse uit hoofdstuk 4.

1. Politiek

De politieke factoren die invloed hebben op circulariteit bij machinebouw zijn zowel nationaal als internationaal van aard.

Geopolitieke spanningen en conflicten

De veranderende verhoudingen in de geopolitiek hebben steeds meer invloed op de handelspolitiek, in relatie tot bijvoorbeeld China en de VS. Ook conflicten in het Midden-Oosten en andere regio's hebben invloed op de levering van essentiële grondstoffen. Strategische autonomie en leveringszekerheid worden steeds crucialer, want de EU heeft zelf weinig kritieke grondstoffen. EU en Nederland moeten dus onafhankelijker worden en zorgen dat we toegang behouden/krijgen tot grondstoffen en technologie.

Ambitieus beleid

De Nederlandse overheid heeft ambitieuze doelen gesteld: 'Volledig Circulair in 2050' en '95% CO_2-reductie in 2050'. Deze doelstellingen zijn onderdeel van het bredere Europese beleid, waarin Ecodesign en de regulering van grondstoffen centraal staan.

Instabiliteit in politiek en nieuw kabinet

Nederland heeft baat bij een consistent langetermijnbeleid voor ondernemers, want onder invloed van politieke verschuivingen kan het beleid veranderen en vormt daarmee een risico voor (groene) investeringen, innovatie en ons toekomstige verdienvermogen. Ook snelle besluitvorming is wenselijk. Het nieuwe coalitieakkoord van kabinet Jetten I zal van invloed zijn voor de industrie, want het kabinet heeft onder andere de ambitie uitgesproken de transitie naar circulaire economie te willen versnellen. Daarnaast borduurt het akkoord voort op het rapport-Wennink, waarin nadruk ligt op de concurrentiepositie en het verdienvermogen van het Nederlandse bedrijfsleven.

2. Economisch

De concurrentiepositie en economische haalbaarheid van circulaire machinebouw wordt beïnvloed door diverse marktfactoren.

Handelsbelemmeringen

Door geopolitieke ontwikkelingen heeft de EU te maken met mondiale handelsbelemmeringen en restricties. China heeft ketenmonopolie van kritieke materialen en componenten voor machinebouw, dus we zijn in Europa erg afhankelijk.

Beschikbaarheid- en leveringszekerheidsrisico's

De beschikbaarheid en leveringszekerheid van strategische materialen en onderdelen zijn van groot belang. In de afgelopen jaren is gebleken dat te grote afhankelijk van sommige landen tot grote problemen kan leiden. We moeten niet wachten op een systeemschok, waardoor we serieus langere tijd geen kritieke grondstoffen, onderdelen en/of producten meer krijgen. Sense of urgency van grondstoffenafhankelijkheid begint te komen, maar gaat nog te langzaam - ook in de industrie.

Concurrentiepositie onder druk

Door toenemende kostendruk ('total cost of goods' + technology) is het lastig voor Europese fabrieken om te concurreren met goedkope Chinese land-, arbeids-, milieu-, en energiekosten, zeker gegeven de onzekerheid rond elektriciteitsprijzen en nettarieven in Nederland. Waardecreatie wordt leidend in concurrentiepositie en verdienvermogen: in design ('beginning of life'), levensduurverlenging ('middle of life') en hergebruik ('end of life'). Er ontstaat een nieuwe economie van bedrijven die machines in stand houden en steeds beter worden: onderhoud, reparatie, revisie, reserveonderdelen en hergebruik/remanufacturing.

Prijsontwikkeling

Prijsontwikkeling van nieuwe, niet circulaire machines (of onderdelen) speelt een belangrijke rol: wanneer deze nieuwe machines goedkoper worden, komt de business case voor circulaire alternatieven onder druk te staan, omdat die op dit moment nog duurder zijn. Alleen als circulaire machine(onderdelen) de standaard worden zal dit geen knelpunt meer zijn. True pricing, waaronder het zwaarder belasten van virgin materials, kan ook een uitkomst bieden, maar is complex.

Vestigingsklimaat voor bedrijven

Nederland biedt een aantrekkelijk vestigingsklimaat door de goede infrastructuur, gunstige fiscale regelingen voor innovatie, het sterk ontwikkelde kennis-ecosysteem en EU-subsidies. Tegelijkertijd zijn de energieprijzen in Nederland hoog en spelen ruimtegebrek, netcongestie en trage vergunnings-procedures mee in de besluitvorming van bedrijven om zich in Nederland te vestigen.

Arbeidskosten

De arbeidskosten in Nederland liggen aanzienlijk hoger dan in Azië. Dit maakt productie in Nederland minder concurrerend. Nederland kan dit compenseren door hoogwaardige productie, automatisering en te focussen op specialistische toepassingen. Omdat de arbeidskosten hoog zijn, is het vaak niet rendabel machines te repareren of remanufacturing. (Verhouding belasting op kapitaal versus arbeid)

Krapte op arbeidsmarkt

Er is een tekort aan juiste arbeidskrachten op de juiste plek. Vergrijzing zorgt voor een uitstroom van ervaren werknemers. In krimpregio's hebben bedrijven moeite om nieuwe krachten aan te trekken. Daarnaast is er een algemeen tekort aan mbo- en hbo-opgeleide technici terwijl de vraag naar praktijkgerichte vaardigheden groeit. Verder is inzet van internationale studenten en werknemers belangrijk voor de innovatiekracht van bedrijven. Door beleidswijzigingen, zoals het beperken van Engelstalig onderwijs, strengere migratie-eisen en huisvestingsproblemen, wordt Nederland minder aantrekkelijk voor internationaal talent, waaronder kenniswerkers.

Verandering markt

Servitization, strategische verschuiving van alleen producten verkopen naar het aanbieden van een combinatie van producten en diensten ('service-in-product') – is een wereldwijde trend in de maak-industrie. Klanten van machinebouwers willen niet meer nieuw, maar ontzorgd worden en een machine die werkt en aangepast wordt op de (duurzame) wensen van de klant en eisen van dat moment.

Gebrek aan (hoogwaardige) verwerkingscapaciteit

In Europa is er momenteel onvoldoende capaciteit om kritieke grondstoffen en onderdelen, zoals permanente magneten, te verwerken. De verwerkingscapaciteit is beperkt en de keten bestaat uit veel verschillende stappen. De verwerking vindt ook vaak laagwaardig plaats. Vooral de kwaliteit is slecht, waardoor het hergebruik percentage en financiële rendement beperkt blijft.

3. Sociaal

Maatschappelijk bewustzijn

De maatschappelijke dimensie van circulariteit in de maakindustrie/machinebouw krijgt meer aandacht, maar nog niet genoeg. Er ontstaat wat bewustzijn rond circulariteit, maar het vertaalt zich nog niet op alle vlakken naar duurzame keuzes en actie. Bewustwording en gedragsverandering rond duurzaam-heid en circulariteit zijn fundamenteel voor een succesvolle transitie. In relatie tot machines zal dit met name gaan over hoe bedrijven hun machines onderhouden en de commerciële levensduur verlengen tot aan het einde van de technische levensduur.

Waardering beroepsgroep en inbedding gemeenschap

Ondanks het feit dat het werk van mensen vaker wordt overgenomen door robots en computers (automatisering), worden in de maatschappij praktische beroepen (makers) de laatste jaren steeds meer gewaardeerd. Machinebouw wordt als een zinvol en interessant vak gezien. In bepaalde regio's in Nederland is de machinebouw een belangrijk onderdeel van de economisch geografische structuur en cultuur.

Maatschappelijke druk m.b.t. Maatschappelijk Verantwoord Ondernemen (MVO)

Slechte arbeidsomstandigheden, zoals kinderarbeid in de landen waar grondstoffen gewonnen worden, wordt maatschappelijk niet meer geaccepteerd. Maatschappelijke druk, certificeringen en wetgeving dwingen bedrijven om hun toeleveringsketens te verduurzamen en transparant te rapporteren over onder andere milieu- en klimaatimpact en arbeidsomstandigheden in de keten. Dit biedt kansen voor Nederlandse bedrijven om een onderscheidende propositie in de markt te zetten waarin dit geborgd is.

4. Technologisch

Automatisering en digitalisering

Er is wereldwijd steeds meer aandacht voor ICT technologie, datatoepassingen, sensoren en slimme algoritmes. Nederland heeft sterk ontwikkelde technische kennis op het gebied van robotica en AI. Dit biedt kansen voor de vergaande automatisering en optimalisatie van productie-, assemblage- en recyclingprocessen. Nieuwe dienstverlenging vanuit ICT, software, sensoren, data platforms, etc. die de maakindustrie helpen meer circulair te worden. Met minder grondstoffen produceren, producten en onderdelen langer in leven houden, hoogwaardig hergebruik. Er is geld te verdienen met upgrades en revisies, zodat machines langer meegaan. Kosten kunnen gedrukt worden en de kwaliteit verhoogd. Deze ontwikkelingen zijn cruciaal om de hoge arbeidskosten te compenseren en concurrerend te blijven ten opzichte van Azië.

Knelpunten bij opschaling en toepasbaarheid

- Onduidelijke verdienmodellen vertragen opschaling. Hoewel technologieën zoals AI en data platforms beschikbaar zijn, is het verdienmodel vaak nog niet uitgekristalliseerd. Bedrijven zoeken naar manieren om waarde te creëren en te monetariseren, maar deze modellen zijn nog niet breed doorontwikkeld of dominant.
- Veel technologieën blijven hangen in experimenten en pilots. De stap naar robuuste, schaalbare toepassingen die breed inzetbaar zijn in de maakindustrie blijkt complex. Hierdoor blijft de impact van sleuteltechnologieën achter bij hun potentie.
- Sleuteltechnologieën worden vaak ontwikkeld buiten de context van de maakindustrie. Hierdoor sluiten ze niet altijd aan op de concrete vragen van bedrijven. Voor mkb-ondernemers blijft technologie daardoor regelmatig abstract en moeilijk toepasbaar.

Kapitaal voor opschaling en innovatie

Technologische innovatie is een drijvende kracht achter circulariteit in de machinebouw. Innovatie vereist grote investeringen die vaak moeilijk te financieren zijn. Verlaging van de drempels, zoals het delen van risico's en lange termijn denken, is nodig om technologische innovaties succesvol op de markt te brengen en op te schalen.

Bereidheid tot samenwerking en kennisdeling

Samenwerking en kennisdeling kunnen innovatie versnellen en Nederland heeft een sterk ecosysteem voor kennisdeling. Toch zijn er barrières. Binnen bedrijven ontstaan veel slimme oplossingen, maar deze worden zelden gedeeld of opgeschaald. Hierdoor blijft kennis versnipperd en wordt potentieel niet benut. Wat lokaal werkt, groeit niet automatisch door naar sectorbrede toepassing. Daarnaast kunnen intellectueel eigendom kwesties en commerciële belangen vertragend werken. Het stimuleren van samenwerking met duidelijke kaders, vertrouwen en heldere afspraken zijn dan ook essentieel. Samenwerking moet ook op Europees niveau alsmede gelijkgestemde landen buiten de EU worden gezocht.

Design-for-circularity

Door al bij het ontwerp rekening te houden met de volledige levenscyclus, kunnen machines eenvoudiger gedemonteerd, gerepareerd of gerecycled worden. Innovaties in recyclingtechnologieën maken het mogelijk om op hoogwaardige manier waardevolle materialen terug te winnen. Echter: Data wordt nog onvoldoende gekoppeld aan materiaal en levensduur. Hoewel technologie het mogelijk maakt om inzicht te krijgen in gebruik en prestaties, wordt deze data nog beperkt gebruikt om te sturen op grondstoffen, levensduur en hergebruik. Hierdoor blijft een belangrijk deel van de waarde van technologie onbenut.

5. Environmental (Klimaat en milieu)

Ruimtegebrek

Fabrieken en recyclingbedrijven hebben grote terreinen nodig – voor productiehallen, opslag van grondstoffen en logistieke hubs – met de juiste milieu- en veiligheidseisen, maar die zijn schaars en duur. Er is concurrentie om dezelfde schaarse ruimte met andere maatschappelijke opgaven.
Bovendien kunnen vergunningsprocedures, in combinatie met maatschappelijke weerstand een project doen vertragen of stranden.

Negatieve milieu-impact bij winning en raffinage

Het winnen en raffineren van strategische en kritieke grondstoffen gebeurt vaak op een manier met een negatieve impact op het milieu. Dit moet ook meegewogen worden in de productie en aanschaf van machines. Het beperken van negatieve impact zou veel explicieter kunnen worden meegenomen in net-zero ambities van zowel overheid als bedrijfsleven.

Klimaatverandering

Klimaatverandering heeft negatieve impact op de biodiversiteit en de water-, lucht- en bodemkwaliteit. Ook de beschikbaarheid van hulpbronnen en grondstoffen komt door klimaatverandering onder druk te staan. Er ontstaat steeds meer urgentie om schoner te produceren om zo de natuur en het milieu te beschermen en schaarste van grondstoffen te voorkomen.

6. Legal (Juridisch)

Europese wet- en regelgeving

Het juridische kader rond circulariteit en kritieke grondstoffen ontwikkelt zich snel, vooral vanuit Brussel. Met wetgeving als EU Circular Economy Act, Ecodesign/materiaalpaspoort en recht op reparatie stuurt de EU op design, levensduurverlenging, hergebruik en remanufacturing. De CRMA moet zorgen voor meer strategische autonomie en leveringszekerheid. Voor de machinebouwsector is de machine-verordening relevant. Verder heeft de EU versimpeling en versoepeling van CSRD (Corporate Sustainability Reporting Directive) en CSDDD (Corporate Sustainability Due Diligence Directive) wetgeving aangekondigd via de Omnibus wetgeving, maar transparantie in de keten zal belangrijker worden.

Belemmerende regelgeving

Hoewel er veel (Europese) regelgeving in de maak is om de circulaire economie te versnellen, is er ook regelgeving die circulariteit juist in de weg staat. Zo gelden voor levensmiddelen machines strenge hygiëne-eisen vanuit de NVWA (Nederlandse Voedsel- en Warenautoriteit), omdat lak kan afbladderen door agressieve schoonmaakmiddelen. Machines worden daarom afgewezen, terwijl motoren op zich nog prima zijn en nog wel 20 jaar meekunnen.

Arbo en veiligheid

Machinebouw is essentieel voor arbo- en consumentenveiligheid. Een punt van zorg zijn de ZZS, zoals pfas (poly- en perfluoralkylstoffen) en andere giftige materialen, maar ook microplastics die kunnen vrijkomen bij slijtage van machineonderdelen. Machineveiligheid is een cruciaal aspect van zowel de industriële werkomgeving als de consumentenmarkt, bedoeld om letsel en gezondheidsrisico's te voorkomen. Fabrikanten moeten voldoen aan strenge Europese eisen om veilig gebruik te garanderen.

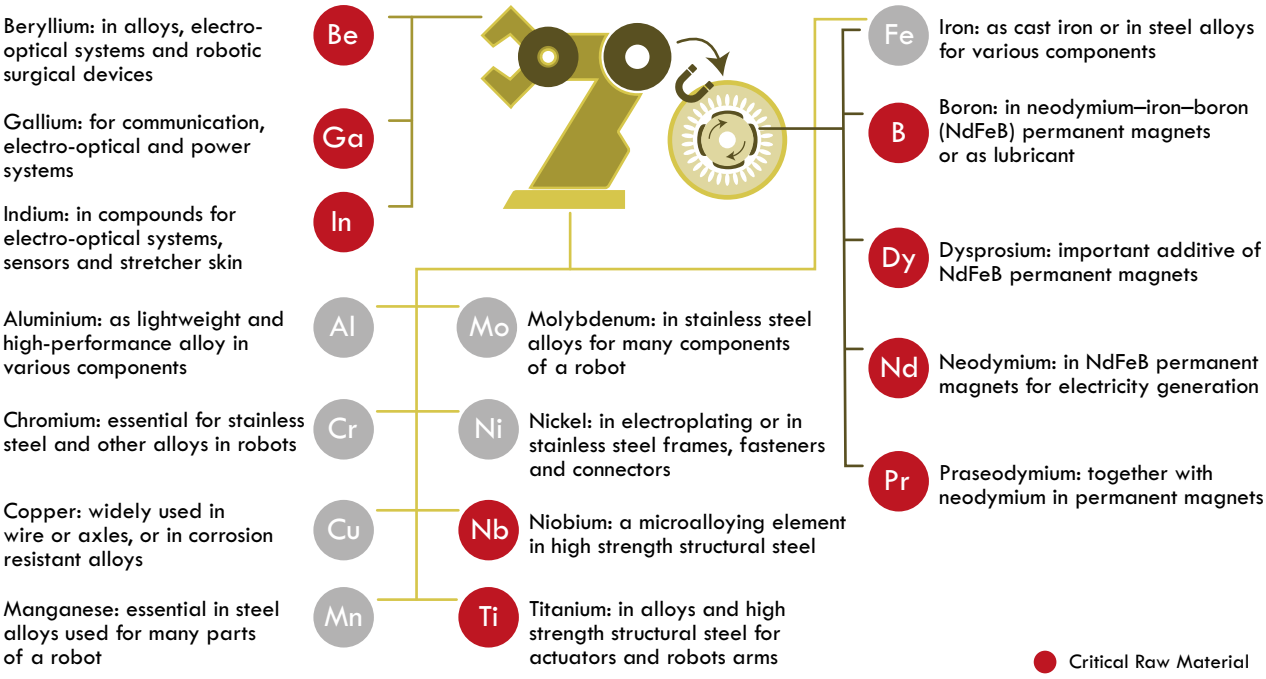
Kennisbescherming

Met zijn open innovatie-ecosysteem, is Nederland kwetsbaar voor industriële spionage en oneerlijke concurrentie. In reactie daarop heeft de overheid wetgeving aangescherpt om kennis te beschermen. De uitdaging is een balans vinden tussen open innovatie en bescherming van intellectueel eigendom.

Bijlage 4:
Kritieke materialen in robotica

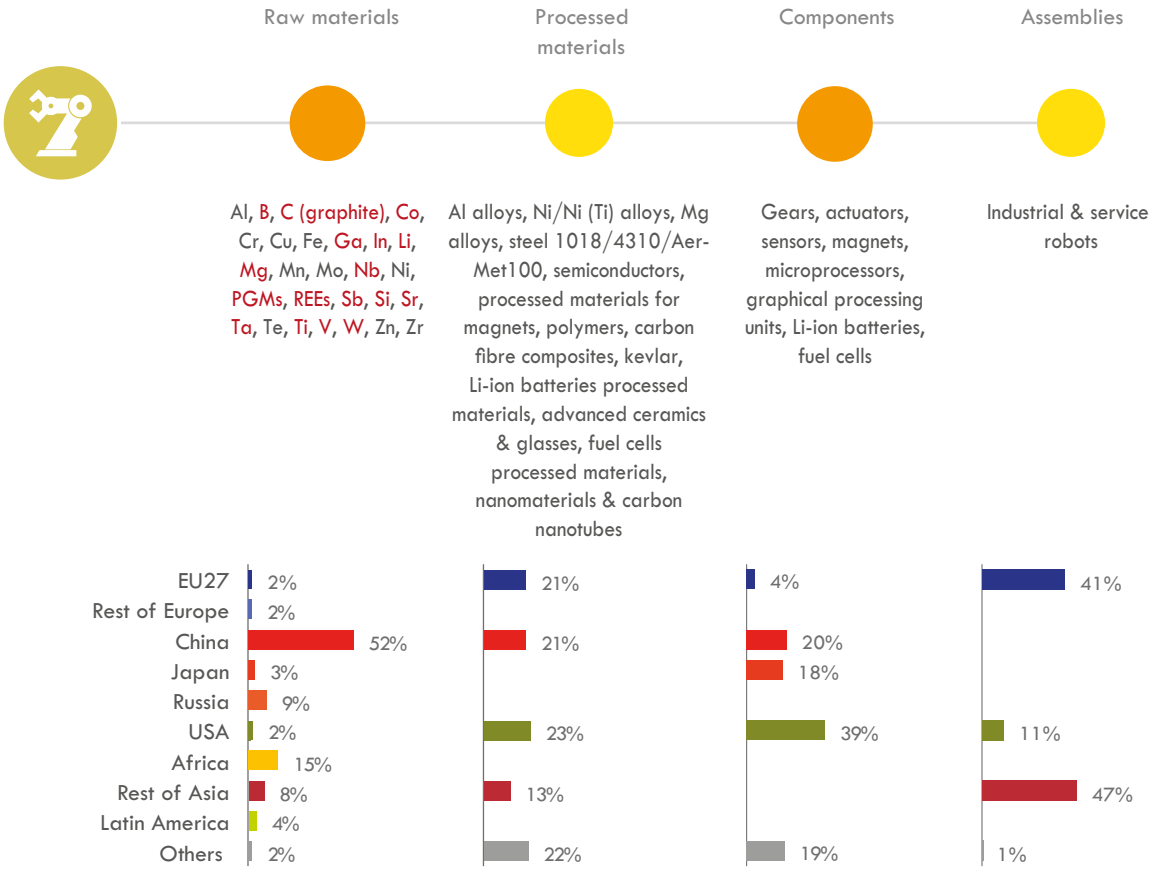
In een studie van het Europese Joint Research Centre[36] staat een analyse specifiek voor robotica:

Figuur 12: Relevante ruwe materialen in robotica



36 Bron: JCR-rapport 'CRMs for strategic technologies and sectors in the EU 2020'

Figuur 13: Huidige knelpunten in toeleveringsketen



Bijlage 5:

Aanvullende toelichting permanente magneten in motoren

In hoofdstuk 3 is een beschrijving gegeven van de machinemotoren. In deze bijlage wordt nadere toelichting gegeven over de verschillende type motoren.

Figuur 14: Aandrijfmotoren – marktvergelijking & NL productieschatting

~80% aandrijfmotoren **Inductiemotor (ASM)**	**~3-5%** aandrijfmotoren **SynRM / Hybride**	**~15%** aandrijfmotoren **PM-motor (PMSM)**	**>99%*** van servo's **PMSM-servo**
Vermogensbereik **0,37–1.000 kW**	Vermogensbereik **0,75–1.000 kW**	Vermogensbereik **0,37–500 kW**	Vermogensbereik **0,05–100 kW**
Typisch gewicht/unit **5–5.000 kg**	Typisch gewicht/unit **5–4.000 kg**	Typisch gewicht/unit **5–2.000 kg**	Typisch gewicht/unit **0,5–200 kg**
NL eenheden/jaar * **40.000–80.000**	NL eenheden/jaar * **1.500–4.000**	NL eenheden/jaar * **7.000–15.000**	NL eenheden/jaar * **100.000–300.000**
NL gewicht/jaar * **3.000–6.000 t**	NL gewicht/jaar * **75–200 t**	NL gewicht/jaar * **350–750 t**	NL gewicht/jaar * **500–1.500 t**
NL markt / export * **~48% / ~52%**	NL markt / export * **~48% / ~52%**	NL markt / export * **~48% / ~52%**	NL markt / export * **~40% / ~60%**

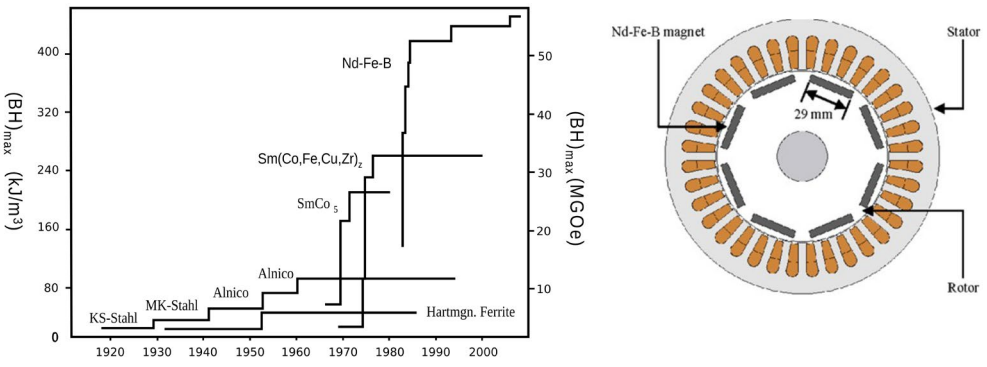
* Schatting o.b.v.: EU-marktaandeel NL ~1% (CBS/Eurostat), FME exportratio 52% (FME Jaarbericht 2023), IEA 4E EMSA 2023

* Marktaandeel >99% geldt voor PM-technologie binnen de servomotorsegment, niet als aandeel van de totale motormarkt

Elektromotoren gebaseerd op permanente magneten – basics

Het kenmerk van permanente magneten is dat zij van alle bekende magnetische materialen het sterkste magneetveld per volume-eenheid genereren en dat, afhankelijk van de samenstelling, ook de coërciviteit (de mate waarin magnetisme in een sterk elektromagnetisch veld gehandhaafd blijft) bij hogere temperaturen in stand blijft. Dat maakt toepassingen mogelijk bij hogere werktemperaturen en waarbij slechts beperkte volumes beschikbaar zijn.

Figuur 15: a. Materialen voor permanente magneten b. Basis model van een elektromotor gebaseerd op permanente magneten



In elektromotoren worden deze magneten - afhankelijk van designkeuzes - in de rotor of de stator aangebracht. Een voorbeeld is hier weergegeven. Dit simpele beeld is echter complexer wanneer we kijken naar de totale ontwerpruimte voor permanente magneten.

Heavy Rare Earth Elements (HREE) in magneten

In de 'Magnet roadmap' (op te vragen bij NMO) wordt een totaal scala geschetst van types permanente magneten met een sterk variërende Heavy Rare Earth Elements (HREE) inhoud en dus ook een sterk toenemende coërciviteit (en dus temperatuurbestendigheid). Zowel qua kostenopbouw als qua kwetsbaarheid voor verstoringen in de keten zal een ontwerper in de regel een bewuste keuze maken voor het type magneet, waarbij de magneten zonder HREE de voorkeur zullen genieten. De zorgen omtrent de kosten en leveringszekerheid van HREE leiden tot ontwerpkeuzes op basis van Grain Boundary Diffusion (GBD), waarbij voor slechts die gebieden van een magneet die aan hogere temperaturen onderhevig zijn, een verhoogd HREE-gehalte wordt toegepast. Deze ontwikkelingen laten al zien dat producenten van elektromotoren op een zeer bewuste manier omgaan met hun ontwerpkeuzes. Overdimensionering zal voorkomen, maar de recente crisis rond de levering van permanente magneten heeft al een stimulans betekend voor onderzoek naar het afschalen van die overdimensionering.

Brushless motors en permanente magneten

De meeste brushless motoren (zonder mechanische borstels) zijn gebaseerd op permanente magneten, maar er zijn uitzonderingen. Een aantal soorten werden al in een vorig hoofdstuk toegelicht (onder andere drones en servomotoren). Daarentegen zijn er ook brushless DC motoren zonder permanente magneten. Deze staan bekend als motoren die gebaseerd zijn op magnetic reluctance of electro-magnetische inductie. Voorbeelden zijn de Switched Reluctance Motor (SRM), de Synchronous Reluctance Motor (SynRM) (vooral in industriële pompen en compressoren) en de Induction Motor (Asynchronous Motor) (gebaseerd op geleidende staven (squirrel cage) in plaats van magneten.

Servomotoren en permanente magneten

Servomotoren worden in het **Harmonized System (HS)** meestal geclassificeerd onder **HS-code 8501** – dit is de categorie voor **elektrische motoren en generatoren (behalve generator-sets)**. Servomotoren vallen meestal onder één van deze:

- **8501.31** – DC-motoren met een vermogen ≤ 750 W
- **8501.32** – DC-motoren met een vermogen > 750 W tot ≤ 75 kW
- **8501.51** – AC-motoren (meerfasig) ≤ 750 W
- **8501.52** – AC-motoren > 750 W tot ≤ 75 kW
- **8501.53** – AC-motoren > 75 kW

Typische servomotoren voor industriële robotica (zoals gebruikt in robotarmen, CNC-machines en automatisering) zijn ontworpen voor hoge nauwkeurigheid, snelle respons en gesloten-lusregeling. Veel kleine servo's voor robots, CNC-machines en automatisering vallen vaak onder 8501 31. De meeste industriële servomotoren (400 W – 5 kW) zijn AC-gebaseerd en worden daarom vaak verhandeld onder CN code 8501 51 00 of 8501 52 00.

Naast een Brushless AC of DC motor (BLDC / PMSM) bestaan servocontrollers ook uit onder andere Encoders voor positiefeedback, een Servodrive (versterker) die de motor aanstuurt en een 'closed-loop' regelalgoritme (PID of geavanceerdere regelingen). De encoder geeft continu positie- en snelheidssignalen terug, waardoor de controller exacte bewegingen kan uitvoeren.

Producenten van PM-motoren (inclusief servomotoren)

Servomotoren worden wereldwijd geproduceerd door een mix van **grote multinationals en gespecialiseerde merken, met name uit Japan, Duitsland, VS, China, Zuid-Korea en andere landen met sterke machine-automatiseringsindustrieën.**

Bron: TNO

Bijlage 6:

Klimaat- en milieu-impact productieketen

Op basis van CBS materialenmonitor is vastgesteld dat het materiaalgebruik in de machinebouwsector 3,8 miljoen ton is (zie tabel 4 in hoofdstuk 4.6).

Voor het bepalen van de materiaalgebonden milieu-impact zijn vier archetypemachines geselecteerd die samen de belangrijkste typen machines en de variatie binnen de onderzochte marktsegmenten vertegenwoordigen: een metaalbewerkings- en productiemachine, een doseer- en verpakkingsmachine, een melkrobot en een klinische analyser. De archetypen verschillen in massa, functie en verhouding tussen werktuigbouwkundige, elektrische en elektronische onderdelen. Hierdoor geven zij een indicatief beeld van zowel relatief zware staalgedomineerde machines als lichtere machines met een groter aandeel kunststoffen en elektronica.

Voor ieder archetype is een materialisatie opgesteld waarin de machine is verdeeld over ferro-metalen, aluminium, koper, kunststoffen en elastomeren, elektronica, glas en keramiek, overige materialen en permanente magneten. De hoeveelheden zijn gebaseerd op beschikbare productspecificaties, materiaallijsten en technische inschattingen. De materiaalhoeveelheden zijn vervolgens gekoppeld aan representatieve achtergrondprocessen uit Ecoinvent. De materiaalgebonden milieu-impact per machine is berekend door de massa van ieder materiaalcluster te vermenigvuldigen met het bijbehorende milieuprofiel en de uitkomsten op te tellen.

De resultaten geven een onderbouwde ordegrootte voor de materiaalgebonden impact van verschillende typen machines. Het betreft geen volledige productspecifieke LCA: variaties in materiaalkwaliteit, herkomst, gerecyclede content, elektronica, productielocatie en levensduur kunnen de werkelijke impact beïnvloeden. De archetypen zijn daarom vooral geschikt voor het bepalen van dominante materiaal- en impactcategorieën, het vergelijken van circulaire strategieën en het opschalen naar een indicatieve impact voor de sector.

Uit analyse (op basis van 4 archetypes machines -metaalbewerking, verpakkingsmachine, melkrobot en klinische analyse apparaat - en hun Bill of Materials[37] blijkt dat **elektronica** (een som van koper elektronica en permanenten magneten samen) een klein aandeel heeft in massa (2% per kilo), maar een **groot aandeel qua milieubijdrage** met 36% CO_2-equivalent van het totaal. Vanuit klimaatoogpunt is het dus relevant om naar elektronica te kijken.

37 Bill of materials (BOM) in het Nederlands stuklijst genoemd, is een uitgebreide en gestructureerde lijst van alle grondstoffen, onderdelen, assemblages en subonderdelen die nodig zijn om een eindproduct te maken. Het fungeert als een blauwdruk voor de productie, inclusief hoeveelheden en instructies.

Bijlage 7:

Details actielijnen

Actielijn 1: Inkoop en leveranciersmanagement

Doel en beoogd resultaat

Deze actielijn vermindert de kwetsbaarheid van de machinebouw voor schaarste aan kritieke grondstoffen, materialen en componenten, geopolitieke spanningen en verstoringen in internationale toeleveringsketens. Het resultaat is een aantoonbaar robuustere keten, met inzicht in afhankelijkheden, onderbouwde sourcingkeuzes, beschikbare alternatieven en gezamenlijke handelingsmogelijkheden.

Aanpak

De aanpak combineert keten- en risico-inzicht, strategische sourcing, leveranciersontwikkeling, voorraad- en substitutiestrategieën en ketensamenwerking. De analyse bestrijkt materialen, componenten, modules én leveranciers, inclusief herkomst en subtiers. Risico's worden gekoppeld aan leveringszekerheid, vervangbaarheid, doorlooptijd en impact, maar ook aan financiële KPI's en investeringsbeslissingen voor circulariteit.

Activiteiten binnen de actielijn

- Breng materialen, componenten, modules, herkomst, kritieke grondstoffen en leveranciersstructuren in kaart en sluit praktisch aan op beschikbare gegevensbronnen en de Nederlandse kritieke grondstoffenlijst van NMO.
- Classificeer ketenrisico's en vertaal deze naar selectie- en contractcriteria, leveranciersmonitoring, dual/multiple sourcing en alternatieve Europese regio's.
- Bepaal strategische voorraadposities, logistieke keuzes en vooraf gekwalificeerde alternatieve materialen, onderdelen en leveranciers; organiseer snelle omschakeling met engineering, inkoop en service.
- Organiseer gezamenlijke markt- en leveranciersanalyses, vraagbundeling en vraagcreatie, traceerbaarheid en gestandaardiseerde product- en milieudata voorbij first-tier leveranciers.
- Onderzoek voor welke kritieke of dual-use componenten publiek-private borging en behoud binnen Nederland of de EU nodig zijn.
- Ontwikkel praktische ondersteuning voor inkopers, passend bij werkwijzen en behoeften van bedrijven, en verbind circulariteitskeuzes aan financiële KPI's.
- Neem circulariteit waar relevant op in publieke en private inkoopcriteria. Ontwikkel en harmoniseer binnen de EU proportionele publieke inkoopcriteria voor circulaire machines en diensten.

Aansluiting op initiatieven en beleid

Aansluiting is voorzien op Nederlandse lijst kritieke grondstoffen, het industriebeleid en sector-initiatieven, de Grondstoffenscanner, circular-maturity- en quickscans, PCR Machines/MRP1, climate-riskanalyses, de MKB-ketenrisicoanalysetool en initiatieven voor open product- en milieudata, DigiGO en bond agents.

Voor marktcreatie zijn branches, inkopersnetwerken, PIANOo, het uitvoeringsprogramma Maatschappelijk Verantwoord Opdrachtgeven en Inkopen (MVOI) van KGG, WBC-sectorinitiatieven en de overheid als launching customer en ketenregisseur relevant. De werkgroep Financiering (onder andere Invest NL, Nederlandse Vereniging van Banken) kan de koppeling met investeringsbeslissingen helpen uitwerken.

Actielijn 2: Ontwerp en productie

Doel en beoogd resultaat

Deze actielijn maakt machines en componenten structureel geschikt voor een optimale levensduur, onderhoud, reparatie, upgrade, demontage en hergebruik. Het resultaat is een toetsbare set circulaire ontwerpprincipes, modulaire architecturen en gestandaardiseerde interfaces, zonder de noodzakelijke productdifferentiatie en het concurrentievermogen uit het oog te verliezen.

Aanpak

De aanpak combineert circulair en modulair ontwerp, beheersing van onnodige variatie, ontwerpen voor onderhoud en toekomstig gebruik en feedback vanuit repair en remanufacturing. Ontwerpexpertise moet gericht worden opgebouwd en via een platform of competence center toegankelijk worden gemaakt. Daarbij horen eenduidige KPI's, normen, meetmethoden en design rules.

Activiteiten binnen de actielijn

- Definieer en meet repareerbaarheid, modulariteit, demontabelheid en upgradebaarheid en veranker deze in specificaties, leveranciersafspraken en sectorbrede normen.
- Ontwikkel engineering die fit for function is: voorkom overengineering en te strakke specificaties die de opbrengst in productie en reuse verlagen.
- Werk modulariteit uit op systeem-, module- en subassemblyniveau; vereenvoudig en standaardiseer waar mogelijk en beperk productreferenties en variatie in inkoopdelen.
- Ontwerp voor toegankelijk onderhoud, flexibele toekomstige workflows, mono-materialen, minder materiaal- en snijverlies en de stap 'refuse' e.g. kunnen de gevraagde functies met bestaande machines, een upgrade of met minder onderdelen geleverd worden?.
- Organiseer feedbacklussen van gebruik, service, repair en remanufacturing naar herontwerp, inclusief slimme omgang met intellectueel eigendom.
- Ontwikkel onderwijs- en kennisinstrumenten, best practices, tools en mogelijk een keurmerk voor de bekwaamheid van ontwerpafdelingen.

Aansluiting op initiatieven en beleid

Relevante aanknopingspunten zijn EU Ecolabel, Ecodesign en Environmental Footprint, CIRCO-businesstracks, instrumenten voor productlevenscyclusverlenging, de kennisbank recyclebare materialen en technische onderwijsprogramma's. Een koppeling met het smart connected supllier netwerk kan kennisdeling en opschaling ondersteunen; landelijke of Europese competentiecentra kunnen expertise over materialen, slijtage en fatigue bundelen.

Actielijn 3: Gebruik

Doel en beoogd resultaat

Deze actielijn verlengt de technische en economische gebruiksduur van machines, modules en kritieke componenten. Het resultaat is een installed base die aantoonbaar beter presteert door actueel levenscyclusinzicht, conditiegestuurd onderhoud, gerichte upgrades, beschikbare onderdelen en prestatiegerichte dienstverlening.

Aanpak

De aanpak verbindt een betrouwbare datastructuur voor installed-base- en levenscyclusdata met sensoren, monitoring, data-analyse en assetmanagement. Onderhoud verschuift van reactief of tijdgestuurd naar conditie- en prestatiegestuurd. Retrofit, spare-partsmanagement en serviceontwikkeling worden integraal onderdeel van lifecycleplanning.

Activiteiten binnen de actielijn

- Leg configuratie, software, belasting, technische staat en prestaties van de installed base gestructureerd vast en koppel dit waar passend aan het DPP.
- Gebruik sensoren, remote monitoring en data-analyse voor conditiebewaking en combineer onderhoud met prestatie- en energieverbetering.
- Richt voorraadstrategieën, obsolescence monitoring, retrofit en upgrades in; onderzoek 3D-printing op aanvraag, retourmaterialen en kwaliteitsborging voor spare parts.
- Professionaliseer diagnose en samenwerking tussen klant, service en engineering en vertaal dit naar as-a-service- en performancecontracten.
- Benut assetmanagementdata als leerbron voor ontwerp en bedrijfsvoering en bouw gebruiksprocessen expliciet in.

Aansluiting op initiatieven en beleid

Aansluiting is mogelijk op het Control Room of the future -project, gekoppeld aan ketenvragen. Verder zijn het paper van Dutch Sustainable Growth Coalition (DSGC) over assetmanagement in de medische sector,[38] Smart Maintenance, Samotics, UNIS Group en voorbeelden zoals remote monitoring bij Mitsubishi Elevators relevant. Rolls-Royce/GE 'power by the hour' en remanufacturing in combinatie met servitization bieden concrete voorbeelden van businessmodellen.

Actielijn 4: Hergebruik

Doel en beoogd resultaat

Deze actielijn benut machines, modules en componenten opnieuw na een eerste gebruiksfase en houdt de waarde van producten en materialen zo hoog mogelijk. Het resultaat is een schaalbare markt voor reuse, repair, refurbishment en remanufacturing, met georganiseerde retourstromen, toetsbare kwaliteit en passende ruimte en prikkels.

Aanpak

De aanpak organiseert ketenregie en retourlogistiek, selectie en beoordeling, herstelprocessen en markt-ontwikkeling. Collectieve bundeling op keten-, sector- of regioniveau kan volume en schaalvoordelen creëren. Validatie, conformiteitsbeoordeling en normen moeten vertrouwen in gebruikte en gereviseerde componenten ondersteunen.

Activiteiten binnen de actielijn

- Bundel retourstromen en organiseer eigenaarschap, logistiek, demontage, inspectie en bestemming van machines en componenten.
- Ontwikkel transparante criteria en processen voor technische beoordeling, validatie, certificering en garanties; geef NEN en conformity-assessment-instellingen een grotere rol.
- Ontwikkel businesscases en marktkanalen voor tweedehands machines, modules, onderdelen, repair, refurbishment en remanufacturing.
- Koppel hergebruik aan ontwerp-, gebruiks- en datakeuzes zodat historie, conditie en geschiktheid voor een volgende cyclus bekend zijn.
- Onderzoek fiscale prikkels die reparatie, hergebruik en remanufacturing aantrekkelijker maken.

Aansluiting op initiatieven en beleid

De actielijn moet aansluiten op de sectoren uit het industriebeleid en op beleid voor ruimte voor de CE. Voor strategische en dual-usecomponenten kan publiek-private organisatie nodig zijn. Normontwikkeling via NEN en passende conformiteitsbeoordeling kunnen marktacceptatie versnellen.

Actielijn 5: Businessstrategie

Doel en beoogd resultaat

Deze actielijn verankert circulariteit in strategie, marktbenadering, investeringsbesluiten en verdienmodellen. Het resultaat is een uniform en begrijpelijk stelsel waarin bedrijven acties koppelen aan marktontwikkeling en waardecreatie, en waarin leveranciers en machinebouwers gezamenlijk kunnen opschalen.

Aanpak

De aanpak verbindt strategische keuzes over product, service en ketenpositie aan financiële KPI's, marktvraag en sectorale ontwikkelpaden. Een uniforme definitie van het stelsel en een gedeelde taal zijn nodig om prestaties te vergelijken, investeringen te beoordelen en samenwerking te organiseren.

Activiteiten binnen de actielijn

- Ontwikkel circulaire waardeproposities en verdienmodellen rond levensduurverlenging, prestaties, beschikbaarheid, terugname en hergebruik.
- Koppel acties expliciet aan marktontwikkeling, klantvraag, financiële KPI's en investeringscriteria.
- Maak een uniform begrippen- en indicatorenstelsel voor strategie, rapportage en besluitvorming.
- Organiseer samenwerking tussen OEM's, toeleveranciers, financiers, branches en overheden en vertaal sectorale kansen naar concrete programma's.
- Verbind strategische keuzes aan de andere actielijnen, zodat ontwerp, service, data, inkoop en retourstromen één businesslogica vormen.

38 Bron: Nieuwsbericht 'DSGC deepdive optimizing lifecycle asset management' (www.dsgc.nl)

Aansluiting op initiatieven en beleid

Aansluiting is voorzien op Nederlandse lijst kritieke grondstoffen, de sectoren uit het industriebeleid, Brainport en het Smart Connected Supplier Network, en het machinebouwprogramma voor toeleveranciers. De koppeling met marktontwikkeling moet leidend zijn: initiatieven worden niet alleen als technische projecten, maar als schaalbare marktproposities gepositioneerd.

Actielijn 6: Data en digitalisering

Doel en beoogd resultaat

Deze actielijn levert de digitale randvoorwaarden voor de overige actielijnen. Het resultaat is betrouwbare, toegankelijke en uitwisselbare levenscyclusdata waarmee bedrijven ketenrisico's beheersen, circulair ontwerpen, onderhoud optimaliseren, hergebruik valideren en nieuwe diensten ontwikkelen.

Aanpak

De aanpak combineert interoperabele datastructuren, standaarden en digitale productinformatie met governance, cybersecurity, kennisoverdracht en praktische toepassing. Een center of expertise voor digital lifecycle management (digital LCM) kan kennis, voorbeelden en ondersteuning bundelen.

Activiteiten binnen de actielijn

- Borg datakwaliteit en datagovernance als doorlopende activiteiten. Begin met betrouwbare machine-identiteit, configuratie en onderhoudshistorie uit bestaande systemen en zorg dat wijzigingen traceerbaar blijven. Leg verantwoordelijkheden vast voor actualiteit, eigenaarschap, toegang, vertrouwelijkheid, IP en veilige gegevensuitwisseling.
- Ontwikkel een gezamenlijke datastructuur voor product-, component-, materiaal-, gebruiks-, onderhouds- en conditiedata, met duidelijke koppeling aan het DPP.
- Maak toepassingen concreet voor traceerbaarheid, installed-base-management, condition monitoring, assetmanagement, spare parts en validatie voor hergebruik.
- Deel voorbeelden, referentiearchitecturen en lessen en organiseer kennisoverdracht via een center of expertise.
- Gebruik het Smart Maintenance Fieldlab en bestaande digitale keteninitiatieven als experimenteer- en opschalingsomgeving.

Aansluiting op initiatieven en beleid

De actielijn verbindt onder meer DPP-ontwikkelingen, DigiGO/open formats, SCSN, Smart Maintenance Fieldlab en de control-room- en assetmanagementinitiatieven uit actielijn 3. Het beoogde center of expertise voor digital LCM geeft bedrijven één herkenbaar toegangspunt voor kennis en toepassing.

Actielijn: Componentenaanpak

Nederland is een assemblageland. Zoals eerder beschreven gaat leveringszekerheid voor machine-bouwers daarom vaak niet primair om ruwe materialen, maar meer om kritieke componenten. Door leveringsonzekerheid van essentiële componenten kunnen zij soms niet of minder goed aan hun klanten leveren. Die leveringsonzekerheid is soms terug te leiden op kritieke materialen in die componenten, maar soms ook op disrupties in de toeleveringsketen van meer bulkmaterialen. Het is daarom logisch om de inhoudelijke actielijnen in samenhang aan te pakken, voor een of meer kritieke componenten.

Sommige onderdelen komen in veel verschillende machines en markten terug en zijn tegelijk bepalend voor leveringszekerheid, milieu-impact en hergebruik. Als schaarste of afhankelijkheid bij zo'n onderdeel speelt, levert een gezamenlijke aanpak meer op dan wanneer ieder bedrijf of iedere markt afzonderlijk hetzelfde vraagstuk uitzoekt. Elektromotoren (al dan niet met permanente magneten) zijn hiervan een logisch eerste voorbeeld. Ze komen voor in veel machines in onze prioritaire markten. Ook verbinden ze verschillende opgaven uit deze routekaart met elkaar.

De deep dive in hoofdstuk 5 laat zien waarom juist deze componenten interessant zijn. In dat hoofdstuk is deze actielijn ook al in meer detail uitgewerkt, met de volgende 4 prioriteiten:

1. Levensduurverlenging van de motor
2. Remanufacturing met hergebruik van de rotor
3. Hergebruik van de magneet (al dan niet door te hermagnetiseren)
4. Recycling van het materiaal van de motor en de magneet.

Bijlage 8:

Prioritair programma: opschaling remanufacturing

De afgelopen jaren is rondom remanufacturing een beweging ontstaan die laat zien hoe circulariteit op een organische manier kan groeien binnen de machine- en apparatenbouw. Vanuit de eerdere **Routekaart Remanufacturing** zijn bedrijven met elkaar in gesprek gegaan over praktische vraagstukken rond hergebruik, revisie, levensduurverlenging en nieuwe verdienmodellen. Hieruit is het **Remanufacturing Collectief** ontstaan - een vraaggestuurd netwerk van OEM's, toeleveranciers, revisiespecialisten, aanbieders van gebruikte industriële producten, kennisinstellingen en overheden - dat continu inspeelt op actuele vragen uit de markt. Circulariteit staat daarbij niet op zichzelf, maar wordt gekoppeld aan verdienvermogen, leveringszekerheid en concurrentiekracht.

Deze aanpak blijkt aan te slaan omdat remanufacturing voor veel bedrijven een herkenbaar en praktisch startpunt vormt. Vanuit revisie, onderhoud, spare parts en service ontstaan vanzelf bredere vragen over levensduurverlenging, circulair ontwerp, digitale productinformatie en nieuwe businessmodellen. Inmiddels is een groeiend ecosysteem ontstaan met onder meer het Remanufacturing Collectief, de Dag van de Remanufacturing, CIRCO-trajecten, samenwerking met Circonnect en de ontwikkeling van een Kennistafel Remanufacturing. Het gesprek gaat inmiddels niet meer over de vraag óf remanufacturing relevant is, maar hoe verdere opschaling gerealiseerd kan worden.

De beweging is er, de schaal ontbreekt nog

De huidige initiatieven hebben een stevig fundament gelegd, maar veel activiteiten blijven steken in pilots. Zicht op de installed base ontbreekt vaak, retourstromen zijn onvoldoende georganiseerd, gegevens zijn versnipperd en afspraken over kwaliteit, aansprakelijkheid en garantie zijn nog beperkt ontwikkeld. Daarnaast zijn kosten en opbrengsten vaak verdeeld over verschillende partijen in de keten, waardoor individuele bedrijven niet altijd kunnen investeren in oplossingen die collectief voordeel opleveren. Dit zijn vraagstukken die zich niet op bedrijfsniveau laten oplossen en daarom vragen om een nationale aanpak.

Vier werkgebieden voor een nationale aanpak

Om van praktijk naar industriële schaal te komen zijn vier samenhangende werkgebieden nodig:

1. Markt - en competentie ontwikkeling rond bestaande waarde
Remanufacturing wordt pas structurele business wanneer bedrijven de economische waarde van hun installed base kunnen benutten. Dat vraagt om inzicht in restwaarde, service- en onderdelenomzet, kosten van terugname en herstel, en passende contractvormen zoals terugkoopconstructies, leasing en prestatiecontracten. Daarbij moeten OEM's, leveranciers, remanufacturingspecialisten en logistieke partijen gezamenlijk afspraken ontwikkelen over eigendom, data, risico's, kosten en opbrengsten. Ook is marktontwikkeling nodig aan de vraagzijde zodat vertrouwen ontstaat in remanufactured producten.

2. Machines terugvinden en retourstromen organiseren
Remanufacturing begint met inzicht in de installed base. Productgegevens, locatiegegevens, gebruiksdata, conditie, onderhoudshistorie, restwaarde en onderdelenbeschikbaarheid moeten met elkaar verbonden worden. Daarmee ontstaat een basis voor datagedreven diagnose, planning van retourstromen en toekomstige herinzet. Tegelijk moeten terugname, eigendom en logistiek op ketenniveau georganiseerd worden. Niet ieder bedrijf hoeft alles zelf te doen, maar de keten als geheel moet kunnen functioneren.

3. Van vakwerk naar aantoonbare kwaliteit
Opschaling vraagt om reproduceerbare kwaliteit. Daarvoor zijn uniforme begrippen, classificaties, inspectieprotocollen, testmethoden, traceerbaarheid en afspraken over garantie en conformiteit nodig. Daarnaast moeten ervaringen uit revisie en remanufacturing worden teruggekoppeld naar productontwikkeling zodat toekomstige machines beter ontworpen worden voor onderhoud, upgrade en hergebruik. Hiermee ontstaat de basis voor vertrouwen in de markt.

4. Van koplopers naar brede bedrijfspraktijk
De grootste impact ontstaat wanneer niet alleen koplopers, maar ook grote groepen mkb-bedrijven deelnemen. Dat vraagt om praktische ondersteuning in de vorm van scans, begeleiding, opleidingen, fieldlabs en demonstratieprojecten. Tegelijk moeten knelpunten rond regelgeving, CE-markering, productstatus, toegang tot data, circulaire inkoop en stimuleringsinstrumenten worden vertaald naar een gezamenlijke beleidsagenda. De ontwikkeling van de Kennistafel Remanufacturing kan hierin een belangrijke rol spelen door bedrijven, kennisinstellingen en overheden structureel met elkaar te verbinden.

Rol van de kwartiermaker

De vier hierboven beschreven werkgebieden vormen de kern van een nationale aanpak opschaling remanufacturing. Om deze werkgebieden daadwerkelijk in beweging te krijgen is regie nodig. Een tijdelijke kwartiermaker zou de rol kunnen vervullen van verbinder tussen bedrijven, kennisinstellingen, bestaande initiatieven, regionale programma's en overheden. De opdracht van deze kwartiermaker is niet het opzetten van een nieuw initiatief, maar het verbinden en opschalen van wat de afgelopen jaren al is opgebouwd, met als doel te komen tot een uitvoerbaar Remanufacturing Business & Innovatie Programma voor de Nederlandse machinebouw.

Bijlage 9:

Governance - KetenkrachtNL

KetenkrachtNL is een werkwijze om kansrijke keteninitiatieven binnen de circulaire maakindustrie gericht te ontwikkelen, te coördineren en op te schalen. De aanpak verbindt concrete initiatieven uit de markt aan de doelen en actielijnen van de routekaart en organiseert de regie die nodig is om van een eerste bedrijfsvraag tot een schaalbare ketenaanpak te komen.

Het vertrekpunt ligt bij bedrijven en concrete vraagstukken rond een machine, module, component of materiaalstroom. Marktpartijen krijgen daarbij de ruimte om binnen de scope van de routekaart initiatieven te ontwikkelen en uit te voeren. KetenkrachtNL zorgt voor de samenhang: relevante partijen worden verbonden, voortgang en faseovergangen worden bewaakt en passende kennis, instrumenten en financiering worden gekoppeld aan de ontwikkelfase van het initiatief.

De ROM's vervullen hierin een structurele regie- en coördinatierol. Zij beschikken over langdurig opgebouwde kennis van bedrijven, regionale ecosystemen, innovatie en financiering en vormen een stabiele verbinding tussen markt, regio en landelijke programma's. Daarmee wordt kennis niet alleen binnen afzonderlijke projecten opgebouwd, maar ook geborgd en opnieuw benut bij volgende ketens en initiatieven.

KetenkrachtNL combineert zo ruimte voor marktgedreven initiatieven met publieke regie, coördinatie en kennisborging. Om de aanpak daadwerkelijk van verkenning naar uitvoering en opschaling te brengen, zijn naast proces- en regiemiddelen ook inhoudelijke programmabudgetten nodig voor pilots, projecten en opschaling. Zo ontstaat een doorgaande ontwikkellijn van bedrijf → keten → markt → (inter) nationale opschaling. Daarom is KetenkrachtNL nodig: tussen goed initiatief en opschaling mist nu regie, continuïteit, financiering en kennisborging.

Ketens worden ontwikkeld via een gestructureerd groeimodel:

1. Scoping onderwerp – analyse van impactvolle ketens en materiaalstromen.
2. Activatie sleutelspelers – mobiliseren van koplopers en stakeholders.
3. Planvorming – concretisering van circulaire proposities via CIRCO ketentrack.
4. Pilots en experimenten – testen van technische en economische haalbaarheid plannen.
5. Implementatie en opschaling – industrialisatie en marktontwikkeling.
6. Internationale opschaling of dupliceren – structurele inbedding in de (inter)nationale economie.

Deze fasering maakt het mogelijk om:

- gericht te sturen op voortgang;
- knelpunten per fase te adresseren;
- en financiering en instrumenten effectief te koppelen aan de ontwikkelfase.

Een cruciaal onderdeel van Ketenkracht NL is het slim koppelen van bestaande financieringsinstrumenten aan de verschillende fasen van ketenontwikkeling.

Andere partners in Ketenkracht

Er is een nauw partnership met het programma **Circonnect** voor de inhoudelijke ondersteuning en methodische onderbouwing.

- keteninzicht (fase 1) en identificatie sleutelspelers (fase 2 en na 3) en identificatie van impactvolle kansen (fase 1–2);
- inhoudelijke facilitatie en inbreng passende (ontwerp)instrumenten (fase 1 t/m 4) voor participatieve definitie van een passende oplossing;
- feedback loops en kennis cumulatie (fase 1 t/m 6), voor synergie tussen de verschillende ketens en input voor beleid en kennisontwikkeling;
- ontwikkeling en borging van methodiek, inclusief kwaliteitsborging (fase 1 t/m 4);
- vertaling van beleidsdoelen, nieuwe kennisvragen en naar concrete ketenaanpakken.

Hiermee wordt geborgd dat ketenontwikkeling consistent en schaalbaar plaatsvindt.

De **Stichting Circulaire Maakindustrie** is een samenwerking van de FME, de Koninklijke Metaalunie en de NRK en brengt de circulaire activiteiten van de drie branche-verenigingen samen. De drie branches samen vertegenwoordigen duizenden bedrijven in de maakindustrie. De stichting stimuleert en ondersteunt bedrijven op hun weg naar toekomstbestendig circulair ondernemerschap en vervult daarin een coördinerende en verbindende rol binnen de technische maakindustrie. Stichting CMI zal zich richten op:

1. signaleren ontwikkelingen en inbrengen ideeën uit achterban voor selectie en prioritering kansrijke ketens;
2. ontwikkelen en uitvoeren communicatiestrategie voor vergroten zichtbaarheid programma en werving deelnemers;
3. inzet van landelijke platform circulairemaakindustrie.nl voor communicatie en kennisdisseminatie;
4. activeren en verbinden netwerk via brancheorganisaties: bedrijven, branche- en regiomanagers, specialisten innovatie en duurzaamheid
5. bewaken aansluiting programma bij actuele uitdagingen en leefwereld van ondernemers.

Deze rol is essentieel om voldoende kritische massa in ketens te realiseren en de inzichten breed te laten landen in de technische maaksector.

Bijlage 10:

Lopende initiatieven en projecten

Op dit moment loopt al een groot aantal initiatieven rond machinebouw in het algemeen en de semicon sector in het bijzonder. Dat betekent dat deze routekaart een 'vliegende start' kan maken door in de uitvoering hierbij aan te sluiten, ondersteuning te bieden en (mede) vorm te geven. De focus komt daarmee niet alleen te liggen op het aanjagen en opschalen van nieuwe projecten, maar waar dat van toegevoegde waarde is ook op het faciliteren van afstemming en kennisuitwisseling tussen belanghebbenden en bestaande projecten. Daarnaast wordt ook lopend onderzoek meegenomen om invulling te geven aan de circulaire oplossingen. Hier volgt een overzicht van deze lopende initiatieven en relevante projecten. Deze lijst is niet compleet en uitputtend. Het betreft slechts een momentopname.

Initiatieven in onderzoek en ontwikkeling

Nationaal Groeifonds Innovatieprogramma NXTGEN

Binnen het NXTGEN Hightech Innovatieprogramma wordt gewerkt aan ultra-nauwkeurige, hoogtechnologische machines en apparatuur (hightech equipment). Het 7-jarige programma hightech equipment dat bijdraagt aan het concurrentie- en verdienvermogen in Nederland én werkt aan oplossingen voor maatschappelijke uitdagingen. Denk aan de energietransitie, gezondheid, veiligheid en voeding.

Het project ontwikkelt een nieuwe generatie hightech equipment die oplossingen kan bieden voor zes essentiële toepassingsgebieden/domeinen:

- Duurzame energie: groene (waterstof)energie en nieuwe batterijen door efficiënte(re) apparatuur te produceren met dunne film technologie.
- Lasercommunicatie: apparatuur voor datacommunicatie via laserbundels en satellieten, energiezuinig, veilig en met hogere capaciteit.
- Gezondheid: productietechnologie voor nieuwe chips die miniatuur diagnostiek ('Lab-on-Chip') mogelijk maken, waarmee organen nagebootst ('Organ-on-a-Chip') of vervangen (kunstorganen) kunnen worden én de zoektocht naar nieuwe medicijnen en therapieën versnellen, waar mogelijk zonder dierproeven.
- Snellere chips: ontwikkeling van apparatuur om nog snellere en energiezuinigere chips te maken die deels ook met licht schakelen waardoor er meer toepassingen ontstaan, zoals op medisch, voeding en veiligheidsgebied.
- Lichte materialen: machines die met innovatieve composiettechnologie lichtgewicht constructies maken om vervoer (luchtvaart, auto's) energiezuiniger te maken.
- Robotica in land- en tuinbouw: snelle en precieze robots die bijdragen aan een duurzame voedselketen.

Door kennis verder te ontwikkelen en te delen versterken we de Nederlandse kennisposities en het nationale ecosysteem binnen hightech equipment als geheel.[39]

Circular Circuits (NWO)

Circular Circuits is een multidisciplinair samenwerkingsproject gericht op de ontwikkeling van een volledig circulaire generatie elektronica. Het project ontwikkelt oplossingen om technische, economische en maatschappelijke knelpunten voor levensduurverlenging, hergebruik, reparatie, revisie en recycling te overwinnen door de ontwikkeling van een nieuwe generatie elektronische componenten, product-serviceontwerp, nieuwe bedrijfsmodellen en geavanceerde recyclingtechnologie. Het project omvat de productgroepen communicatie-infrastructuur, telecommunicatie, consumentenelektronica, verlichting en vermogenselektronica. Het project werd in 2022 toegekend door de Nederlandse Organisatie voor Wetenschappelijk Onderzoek (NWO).[40]

39 Bron: www.nationaalgroeifonds.nl
40 Bron: www.circulaircircuits.nl

Onderzoeksprojecten

Bij hogescholen, universiteiten en kennisinstellingen vinden diverse onderzoeksprojecten plaats. Daarnaast worden er vanuit NWO meerdere calls op het gebied van CE uitgezet. Zie voor meer info de website van Kennis- en innovatie agenda (www.kia-ce.nl).

Initiatieven vanuit beleid

Andere routekaarten

Op de website van de stichting Circulaire Maakindustrie zijn de routekaarten voor andere productgroepen gepubliceerd, zie Routekaarten - Circulaire Maakindustrie.

- Routekaart Circulaire Klimaatinstallaties
- Routekaart Circulaire Elektrolysers
- Routekaart Circulaire Zonnestroom Systemen
- Routekaart Circulaire Wind op Zee – deze routekaart gaat in op de Rare Earth magneten (REM) die in de wind turbine generators zitten.
- Routekaart Kritieke Materialen – actielijnen voor het terugwinnen van kritieke grondstoffen uit permanente magneten is hierin uitgewerkt.
- Routekaart Circulaire en Weerbare Batterijen.

Digitalisering en automatisering voor een circulaire economie (DACE)

DACE is een initiatief van het Ministerie van EZK, Klikopmorgen.nl en BOOST. In beleid en innovatie-programma's wordt vaak gesproken over de R-ladder en de Z-goals: Zero Harm, Zero Waste, Zero Emissions en Zero Loss. In de dagelijkse praktijk gebruiken ondernemers andere woorden: materiaal-reductie, revisie, voorspelbaar onderhoud, leveringszekerheid en servicecontracten. De uitdaging is om die digitale kracht te benutten voor een economie die niet draait om méér, maar om slimmer: met minder materiaal en meer waarde. Data, sensoren en AI laten zien waar waarde verloren gaat en hoe die behouden kan blijven. Op basis van gesprekken met veertig organisaties laat deze verkenning zien hoe technologie en circulariteit elkaar versterken en hoe mkb-ondernemers met praktische stappen kunnen werken aan een wendbare, digitale en circulaire maakindustrie.[41]

Normeringscommissies

Het Nederlands Normalisatie instituut (NEN) heeft een inventarisatie gemaakt van de normeringscommissies in NL en Europa. Een uitgebreid overzicht is te vinden in bijlage 12 of op te vragen bij NEN/RVO.

Diverse innovatieprojecten vanuit RVO

Projecten en informatievoorziening vanuit RVO voor aandrijfsystemen in de industrie zijn tot dusver voornamelijk gericht op het verbeteren van de energie-efficiëntie en het verlagen van elektriciteits-verbruik in de industrie.[42]

41 Bron: Whitepaper Digitalisering en Automatisering voor een circulaire economie (www.circulairemaakindustrie.nl)
42 Bron: RVO

Tabel 7: Diverse ondersteuningsprojecten vanuit RVO

Naam / initiatief	Toelichting	Relevantie / voorbeeld
Subsidies	• Stimulering Duurzame Energieproductie en Klimaattransitie (SDE++) • Versnelde klimaatinvesteringen industrie (VEKI) • Industrie en Energie-investeringsaftrek (EIA) • Demonstratie Energie- en Klimaatinnovatie (DEI+)	EKOO-project over lagers: "Wij voorspellen hoe lang een windturbine nog meegaat" | RVO.nl
Kennisnetwerk Efficiënte Elektrische Aandrijfsystemen (KEEA)	Het kennisnetwerk bestaat uit vertegenwoordigers van: • Federatie Aandrijf- en Automatiseringstechniek (FEDA) • Techniek Nederland • FME (technologische industrie) • Holland Pompgroep (HPG) • NL Digital (ICT sector) • Federatie van Energieconsulenten (FedEC) • Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO)	Maakt praktische kennis toegankelijk en beschikbare technieken bekend bij beïnvloeders en beslissers bij eindgebruikers. Industriële bedrijven raken zo beter bekend met de efficiëntere technieken die er zijn voor elektrische aandrijfsystemen. De Europese richtlijn EC 2019/1781 stelt sinds 1 juli 2021 eisen aan de minimale efficiency van elektromotoren en snelheidregelaars (VFDs)[1]
Energiebesparingsplicht (EML / ETS)	Onderzoeksplicht energiebesparing rapportage indienen via RVO	Incl. analyse van de elektrische aandrijfsystemen in productieapparatuur en -installaties
Best Practice Elektrische Aandrijvingen industrie	Systematische aanpak tot verbeteren van de efficiency van aandrijfsystemen	Aanbevelingen m.b.t. technologie van de componenten en onderhoud en motor systems tool EMSA
Grondstoffenscanner	Geeft overzicht van de gebruikte materialen in het product en risicoprofiel per materiaal	voor permanente magneten Dysprosium (Dy) Neodymium (Nd), Praseodymium (Pr) Samarium (Sm)

Vanuit EU-fondsen en RVO worden diverse projecten in de machinebouwsector gesubsidieerd. De afgelopen jaren is er door Nederlandse bedrijven en kennisinstellingen in circa 77 innovatie-projecten vanuit Nederlandse en Europese innovatieregelingen gewerkt aan de circulariteit van machines (database geraadpleegd in februari 2026). Hieronder staan de aantallen R&D innovatie-projecten met betrekking tot (componenten van) machines die mede gefinancierd werden.

Tabel 8: R&D innovatieprojecten mede gefinancierd door RVO

Sector	Machine-bouw	Lagers	Permanente magneten	Semicon	Aandrijf systemen
Agrarische sector, Voedings- en genotmiddelen	5				1
Biotechnologie, Medische sector	1				1
Chemie en kunststoffen	1				1
Elektronica-industrie, ICT	16	3	1	8	3
Energiesector	1				1
Tuinbouw	4				
Vervoer en logistiek	1		1		1
Halfgeleiders				2	
Watersector					1

De machinebouw is breed qua aanvragen en sectoren, aandrijfsystemen zijn al specifieker en vind je ook in alle sectoren. De enige sector waar alle zoekwoorden voorkomen is de elektronica-industrie, ICT.[43]

43 Bron: Projecten.rvo.nl. Zoekwoorden: machinebouw, aandrijfsystemen, lagers, semicon, permanente magneten

Tabel 9: Subsidieprojecten in de machinebouwsector

Subsidie	Machine-bouw	Lagers	Permanente magneten	Semicon	Aandrijf systemen
Eureka				6	
Eurostars				1	
GlobalStars				1	
Joint Technology Initiatives				3	
Kennis en Innovatie Agenda-Circulaire Economie (KIA CE)					
Mkb-innovatiestimulering Topsectoren	29	3	2	8	7
PPS-toeslag Onderzoek en Innovatie		1		12	
Subsidie Circulaire Ketenprojecten	1				
Tegemoetkoming vaste lasten		5			
Important Project of Common European Interest (IPCEI)				2	

De MIT (MKB-innovatiestimulering Regio en Topsectoren) is de belangrijkste subsidie voor mkb in de machinebouw. De MIT stimuleert innovatie bij het midden- en kleinbedrijf (MKB) over regiogrenzen heen en kent verschillende instrumenten zoals subsidie voor een haalbaarheidsproject of een R&D-samenwerkingsproject met een specifiek thema voor AI. De semicon sector ontvangt de meeste subsidie, het gaat daarbij om grote tickets en Europese onderzoeksprojecten (IPCEI, Eureka).

Quick response team voor kritieke grondstoffen

De ministeries van EZK en Buitenlandse Zaken onderhouden nauw contact met het bedrijfsleven om signalen van mogelijke leveringsdisrupties van kritieke grondstoffen, componenten en halffabricaten tijdig te identificeren. Dit gebeurt in nauwe samenwerking met het NMO en het signaleringsnetwerk. Het hiervoor ingerichte quick response team analyseert de potentiële impact van dergelijke verstoringen en treedt hierover in dialoog met de betrokken bedrijven. Dit team richt zich op alternatieve materialen als mitigatiestrategie, terwijl de routekaart de nadruk legt op circulaire mitigatiestrategieën, zoals hergebruik en recycling.

Kennisoverdracht en samenwerking in sector

End of life blauwdruk

Het doel van het project van Maaklos is om op basis van de case van Lely een overdraagbare methode te ontwikkelen: een ‘best practice’ voor hoogwaardige end-of-life strategieën in de machinebouw.
De resultaten zullen bestaan uit:

1. Een besluitvormingskader voor componentniveau-keuzes op de R-ladder.
2. Een generieke werkwijze en format dat overdraagbaar is naar andere machinefabrikanten binnen Zuid-Holland.

Routekaart Remanufacturing van het Remanufacturing Collectief

Om de route naar remanufacturing wat eenvoudiger en meer voorspelbaar te maken hebben het adviesbureau MaakLos, de Provincie Noord-Brabant en de BOM deze routekaart ontwikkeld. In 2024 zijn geactualiseerde versies verschenen met nieuwe inzichten en cases uit Overijssel en Gelderland, en meer recent uit Zuid-Holland. In de meest actuele versie uit 2025 zijn alle recente cases te vinden. Deze routekaart schetst het belang en de kansen, maar ook waar bedrijven tegenaan gaan lopen met daarbij mogelijke oplossingen. De reis naar remanufacturing start als een project, bestaat uit zeven stappen en volgt een lineair productieproces, maar dan andersom. Deze stappen zijn: 1. terugvinden, 2. terughalen, 3. diagnose stellen, 4. up-to-date maken, 5. opnieuw verkopen, 6. zorgen voor langdurig en onbezorgd gebruik en 7. het project omvormen naar doorlopende business.[44]

44 Bron: Routekaart remanufacturing 2025 (www.circulairemaakindustrie.nl)

CIRCO tracks

Industriële producten zoals machines, apparaten en werktuigbouwkundige installaties vragen een specifieke verduurzamingsaanpak. Doordat producten nu al worden ontworpen voor een lange levensduur is er vaak (nog) weinig aandacht voor circulariteit. Echter is het energie- en materiaalgebruik tijdens de gebruiksfase juist zeer hoog en worden producten ondanks hun technische levensduur steeds vaker voortijdig afgedankt door bijvoorbeeld verandering van wetgevingen, technologische ontwikkelingen, klanteisen, gebruikersgedrag of businessmodellen. Het kostenefficiënt produceren machines steeds lastiger door (in te toekomst) groeiende grondstoffen schaarste en prijzen. Het vanuit een keten- en systeemgedachte nadenken over circulariteit kan onnodige en/of vroegtijdige materiaalvernietiging, waardeverlies én milieu-impact voorkomen en biedt nieuwe businesskansen. Een CIRCO Track bestaat uit drie (fysieke of online) bijeenkomsten van een halve dag met de trainers en alle deelnemers.[45]

Boost smart industry

BOOST Smart Industry is het samenwerkingsverband in Oost-Nederland dat zich richt op innoveren, digitaliseren, automatiseren, robotiseren en verduurzamen voor producerende mkb-bedrijven in de maakindustrie in Oost-Nederland. Hier bundelen bedrijven, intermediairs, overheid en onderwijsinstellingen hun krachten voor de realisatie van een toekomstbestendige industrie. Zij geven bedrijven advies en onder de vlag van het publiek-private samenwerkingsverband BOOST verbinden zij bedrijven die de verkennende fase voorbij zijn en klaarstaan om circulaire ambities om te zetten in concrete resultaten.[46] BOOST is ook de naam van de EDIH in Oost-Nederland die gericht is op de maakindustrie.

Europese digitale innovatie hubs

Een EDIH is binnen het Digital Europe-programma hét regionale aanspreekpunt voor vragen en uitdagingen rondom digitalisering. Een EDIH ondersteunt bedrijven in hun digitale transformatie en doet dit zonder winstoogmerk. De EDIH's bieden uiteenlopende vormen van ondersteuning, waaronder:

- toegang faciliteren tot testfaciliteiten;
- organiseren van netwerkactiviteiten;
- trainen en opleiden van (potentiële) medewerkers bij bedrijven; en
- het mogelijk maken van toegang tot financiering.

Ze richten zich met name op mkb'ers en publieke instanties en ondersteunen hen om maximaal gebruik te kunnen maken van de voordelen van digitalisering.[47]

Initiatieven specifiek voor de semicon sector

Omdat de semicon sector een belangrijke motor is van de maakindustrie wordt hieronder een aantal initiatieven beschreven.

Nationaal programma Versterking Microchip-sector ('Beethoven')

Het project Beethoven is talentgericht industriebeleid. Onder deze noemer hebben Rijk en regio (onder andere Zuid-Holland en Brabant) gewerkt aan een omvangrijk pakket maatregelen. Voor deze maatregelen voor onderwijs, kennis en de ruimtelijke infrastructuur trekken zij € 2,51 miljard uit. Met het maatregelenpakket willen zij de Nederlandse microchipsector versterken en verdere groei van de activiteiten in Brainport Eindhoven ondersteunen. Zo investeren zij in praktisch en theoretisch geschoold talent en voldoende ruimte, bereikbaarheid en betaalbare woonruimte in Brainport Eindhoven. Daarnaast maakt het kabinet zich hard voor een internationaal gelijk speelveld en meer Europese coördinatie op het gebied van chipmachines.[48]

45 Bron: www.CIRCO.nl
46 Bron: www.boostsmartindustry.nl
47 Bron: Europese Digitale Innovatie Hubs (EDIH) – Digital Europe (RVO.nl)
48 Bron: Nieuwsbericht 'Nederland investeert €2,5 miljard in sterk ondernemingsklimaat voor microchipsector Brainport Eindhoven (Rijksoverheid.nl)

Circular Business Program Semicon (CBPS)

Het CBPS is het innovatieprogramma waarmee de Nederlandse semicon equipmentketen versneld circulaire productie opschaalt. De ambitie is om circulariteit naar industriële schaal te brengen. Het programma geeft vorm aan pre-competitieve innovatie en helpt bedrijven in de chipsector om slimmer, duurzamer en toekomstbestendiger te produceren.

Door circulair te ontwerpen en produceren, reduceren we de Total Cost of Goods en versterken daarmee het toekomstig verdienvermogen, vergroten we de materiaalbeschikbaarheid en verlagen we effectief de CO_2-voetafdruk en afval. Met een lab naar markt-aanpak realiseren we concrete, innovatieve oplossingen. De ambitie is om een hoog percentage van de retourstroom hoogwaardig te kunnen hergebruiken. We synchroniseren onder andere vraag en aanbod van retourstromen, we creëren nieuwe technieken voor hergebruik van onderdelen en delen productdata voor transparantie in de levenscyclus.

Zo kan CBPS gezamenlijk nieuwe blauwdrukken creëren die keten breed geïmplementeerd kunnen worden. Denk aan nieuwe repair- en reuse-processen, circulaire design rules, datastructuur / PLM-koppelingen, gezamenlijke fab-faciliteiten, en een supply chain dashboard voor retourstromen. Levensduurverlening en leveringszekerheid van semicon producten staan daarbij centraal.

Met deze aanpak zorgt CBPS voor versterking van de semicon equipment keten. CBPS laat zien dat in de internationale semiconmarkt een duurzaam concurrentievoordeel op lange termijn kan worden gerealiseerd. In totaal wordt er iets meer dan 9 miljoen geïnvesteerd. De provincie Noord Brabant stelt daarvan €2 miljoen beschikbaar om deze circulaire transitie te versnellen. Naast initiatiefnemers Brainport Industries, ImpactX, de Provincie Noord-Brabant en de BOM zetten de bedrijven ASML, VDL ETG, Prodrive Technologies, Neways, KMWE, ERIKS, HQ Pack, Faes en Aalberts Advanced Mechatronics hun kennis, ervaring én financiële middelen in. Kennispartners zoals TNO, TU/e, Eindhoven Engine en Fontys dragen structureel bij met onderzoek en expertise.[49]

Semicon Coalition

Op initiatief van Nederland hebben de verantwoordelijke ministers van België, Duitsland, Finland, Frankrijk, Italië, Oostenrijk, Polen en Spanje in maart 2025 de Semicon Coalition opgericht. Vervolgens hebben alle andere EU-ministers zich hierbij aangesloten en de verklaring ondertekend. Inmiddels hebben al meer dan 50 leidende partijen uit de Europese en wereldwijde halfgeleidersector de verklaring onderschreven. Zo kan de urgentie voor een snelle herziening van de EU Chips Act worden vergroot. Met als strategisch einddoel het succesvol toepassen van Europese halfgeleiders in diverse (eind)markten zoals energie, defensie, automotive en AI. Iets wat ook in lijn is met het rapport van Mario Draghi over de toekomst van het Europese concurrentievermogen.

De verklaring kent 5 prioriteiten:

1. Het versterken van het halfgeleiderecosysteem door betere samenwerking tussen de sector, onderzoekers, mkb'ers en startups.
2. Investeringen: EU- en nationale financiering afstemmen, het goedkeuren van strategische projecten versnellen en meer privaat kapitaal mobiliseren.
3. Meer mensen opleiden voor deze sector via een Europese talentenpool voor halfgeleidertechnologieën.
4. Duurzaamheid bevorderen met een meer energiezuinige en circulaire halfgeleiderproductie.
5. Internationale partnerschappen uitbreiden en samenwerken met gelijkgestemde partners van buiten de EU, terwijl tegelijkertijd ongewenste (technologische) afhankelijkheden worden voorkomen.[50]

IPCEI Advanced Semiconductor Technologies

Het Europese Important Project of Common European Interest (IPCEI), is een belangrijk project van gemeenschappelijk Europees belang. De IPCEI voor Advanced Semiconductor Technologies (AST) bouwt voort op de eerdere IPCEI's voor Micro-elektronica, Micro-elektronica en Communicatietechnologie, en de Europese Chips Act. Toekenningen aan projecten worden einde 2026 verwacht. Het doel van een IPCEI is te komen tot een combinatie van projecten met onderlinge samenhang die een versterkend effect op elkaar hebben. Deze projecten moeten deelnemers de kans bieden verdere technische oplossingen en schaalvoordelen te ontwikkelen.[51]

49 Bron: Nieuwbericht 'Brabant investeert samen met het bedrijfsleven ruim 4 miljoen in duurzame chipproductie' (www.Brainportindustries.nl)
50 Bron: Nieuwsbericht 'Alle EU-landen nu in 'Semicon Coalition' voor technologich leiderschap Europa (Rijksoverheid.nl)
51 Bron: www.RVO.nl

Bijlage 11:

NEN Factsheet – machinebouw

Normen en richtlijnen

Op basis van de scope van de routekaart machinebouw, is een eerste overzicht van het bestaande normenlandschap in kaart gebracht. Normalisatie brengt partijen, zoals het bedrijfsleven, overheden en branche- organisaties, bij elkaar om afspraken te maken en deze vast te leggen in normen of richtlijnen. Normalisatie vindt plaats op nationaal, Europees en mondiaal niveau. In Nederland verloopt normalisatie via het Nederlands Normalisatie Instituut (NEN).

Figuur 16: Uiteenlopende functies van normen.



Voorbeelden van relevante normen voor de machinebouw zijn:

- ISO 22095: Chain of Custody welke inzicht geeft in herkomst en doorstroming van en helpen risico's in de keten te beheersen,
- ISO 24544 – Rare earth – Recyclable neodymium–iron–boron (NdFeB) resources – Classification, general requirements and acceptance conditions welke hoogwaardig hergebruik bevordert van magneetbronnen en
- EN 45560 – Circular design of products – Method for the assessment of the circularity of products welke binnen de machinebouw handvaten geeft voor hergebruik van materialen.

Tabel 10: Voorbeelden van commissies en normen die relevant zijn binnen specifieke actielijnen van deze routekaart

Onderwerp / thema	Relevante commissies, normen en initiatieven
Actielijn 1 – Inkoop en leveranciersmanagement	
Hergebruik van kritieke componenten:	Initiatieven als CEN-CLC/JTC 10 houden zich bezig met zaken relaterende aan ecodesign, labelling en traceerbaarheid, aansluitend bij het doel om hergebruik te stimuleren.
Crisismechanismen	ISO/TC 292 (Security and Resilience) produceert normen als ISO 22301 (business continuity). ISO/TC 262 produceert normen als ISO 31000 (ricisomanagement). Deze werkzaamheden raken aan deze componenten.
Actielijn 2: Ontwerp en productie	
Modulariteit	Normalisatie kan een grote rol spelen in het standaardiseren van componenten. Binnen betreffende commissies, zoals IEC/TC 22 (Power electronic systems and equipment) of IEC/TC 44 (Safety of machinery - Electritechnical aspects) kan dit via Nederlandse deelname internatinoaal worden ingebracht. Via Nederlandse normcommissies, zoals Elektrische Machines en Machines & Procesinstallaties, kunnen ook nationale afspraken worden gemaakt
Life Cycle Asset Management	ISO/TC 251 (asset management) produceert normen als ISO 55000, ISO 55001 en ISO 55002, die allemaal zijn toegespitst op Life Cycle Assesment.
Actielijn 3: Gebruik	
Levensduurverlenging via sensoren en onderhoud	(Internationale) Commissies, zoals ISO/TC 108 (Mechanical vibration, shock and condition monitoring), houden zich bezig met slim en datagedreven onderhoud, via normen als ISO 17359 (Condition monitoring and diagnostics of machines - General guidelines) en de ISO 13374 serie (Condition monitoring and diagnostics of machines - Data processing, communication and presentation)
Beoordelen van restwaarde en herproduceerbaarheid	Hoewel er verschillende normen bestaan die een indicatie geven van het potentieel voor hergebruik of remanufacturing (EN 4555x-serie), lijken ze momenteel te ontbreken voor de expliciete bepaling van de technische/economisch restwaarde van machines binnen de scope. Mogelijk een kans om (nationaal) deze specifieke normen op te stellen voor uniforme en breed gedragen methoden.
Actielijn 4: Hergebruik	
Ecosysteemvorming en ketensamenwerking	Commissies als ISO/TC 184 (Automation systems and integration) houden zich bezig met zaken als data-uitwisseling en industriële data verwerking, aspecten die kennisdeling vergemakkelijken
Actielijn 6: Data en digitalisering	
Digitale productidentiteit	Initiatieven als het Digital Product Passport (CEN-CLC/JTC 24) geven inzicht in de volledige levensduur van producten, waardoor ketensamenwerking met die informatie effectiever kan verlopen.

De opgestelde Factsheet NEN – machinebouw met de relevante nationale normcommissies en normen (NEN), relevante Europese commissies en normen (CEN-CENELEC) en relevante internationale commissies en normen (ISO/IEC) is opvraagbaar.

Bijlage 12:

Praktijkvoorbeelden circulaire machinebouw

Steeds meer bedrijven ontdekken dat circulair ondernemen niet alleen bijdraagt aan een duurzamer milieu, maar ook aan hun eigen concurrentiekracht. Door producten en processen zo in te richten dat waarde behouden blijft en verspilling wordt geminimaliseerd, kunnen bedrijven zowel economische als ecologische voordelen behalen. In deze bijlage belichten we enkele inspirerende voorbeelden.[52]

Case 1: Lely

Lely biedt via hun platform used.lely.com gecertificeerde tweedehands melkrobots aan (Reuse). Daarbij kunnen boeren kiezen voor een standaard revisie (Repair) of het premium Taurus Certified-programma (Remanufacture en Refurbish). Gereviseerde robots krijgen de nieuwste software-update, leveren vergelijkbare functionaliteit als nieuwe machines, inclusief onderhoudscontract en garantie, maar kosten slechts een fractie van de nieuwprijs. Boeren kunnen ook hun huidige robot inruilen.

Case 2: Schelde Exotech

Exotech, een fabrikant van industriële druk en vacuümapparatuur, heeft refurbishment en remanufacturing structureel ingebed in het bedrijfsmodel. Via een CIRCO-track ontwikkelden zij een commerciële propositie waarbij ze gebruikte apparaten grondig renoveren of verbeteren, waardoor klanten een 'zo goed als nieuw' product ontvangen tegen slechts een derde tot de helft van de prijs van nieuwbouw. In 2020 genereerde deze dienstverlening al 5-10 % van de omzet—met hogere marges en minder concurrentie dan bij verkoop van nieuwe apparatuur.

Case 3: Aebi Schmidt

Aebi Schmidt biedt gemeenten geen strooi- of veegmachines meer als product, maar levert prestatie-gerichte diensten (Rethink) en rekent af op resultaat: 100% beschikbaarheid en betrouwbaarheid. Door modulair ontwerp , data-gedreven onderhoud, refurbishing en remanufacturing verlengen zij de levensduur van machines aanzienlijk en besparen gemeenten tot 80% CO_2 ten opzichte van een nieuwe strooier, terwijl grondstoffen en materiaalwaarde behouden blijven.

Case 4: Meulenbroek Machinebouw

Meulenbroek Machinebouw maakt afvalperscontainers die modulair, robuust en onderhoudsvriendelijk zijn ontworpen, met als doel maximale levensduur (Reuse) en eenvoudige reparatie (Repair). Klanten kunnen kiezen tussen huur (Rethink) waarbij Meulenbroek eigenaar blijft, of verkoop met een terug-koopgarantie. Hierdoor blijven de containers in de keten en behoudt Meulenbroek controle over de inzameling en hoe containers worden hergebruikt of technisch opgeknapt.

Case 5: Lenze stuurt machineprestaties over de hele levenscyclus

Het bedrijf positioneert zich niet als leverancier van losse componenten van zijn motoren en besturing, maar als **systeempartner** voor machinebouwers. De waarde verschuift van losse hardware naar het samenspel met software en data. Door standaardisatie, modulaire platformen en softwaregedreven configuratie wordt het aantal varianten sterk teruggebracht. Dat leidt tot kortere engineeringtrajecten, lagere voorraden en eenvoudiger onderhoud en meer leveringszekerheid. Met monitoring en data-analyse wordt tijdens de gebruiksfase **voorspellend onderhoud** gepleegd. Door middel van **retrofit** worden bestaande machines gericht geüpdatet met nieuwe aandrijvingen, besturingen en software. Zo wordt materiaalgebruik beperkt en de levensduur verlengd. Tegelijk groeit de rol van service, software en de installed base als bron van waarde.

52 Bron 1e vier cases: Leidraad data voor een grondstof & productpaspoort. Regio op ketenrisico's en kansen. Versie 3.0 Machinebouw (Circonnect). De overige cases zijn d.m.v. interviews tot stand gekomen.

Case 6: Remade in Holland

Dit remanufacturing bedrijf specialiseert zich in het **reviseren** van elektromotoren en andere industriële aandrijfsystemen, hierbij ondersteund door ACE Transformers and Coils voor de elektromagnetische kennis en **Ronduit Circulair** helpt bedrijven bij het ontwikkelen en implementeren van circulaire businessmodellen. Bij het reviseren functioneert vaak de magneet nog, maar valt de motor uit door andere slijtage aan lagers, tandwielen, mechanisch of elektronisch. Verlijming van permanente magneten maakt hergebruik echter lastig, andere **ontwerpkeuzes** zouden deze demontabel moeten maken en een standaard ontwerp voor magneten zou helpen om ze te hergebruiken. Dit ligt vaak bij internationale leveranciers of OEM's en daarvoor moet er **ketensamenwerking** ontstaan om tot een circulaire oplossing te komen.

Case 7: MagnetIQ Technologies BV (MIQ)

MagnetIQ Technologies richt zich op de levering van permanente magneten, magnetische materialen en klantspecifieke magnetische assemblages voor industriële en hightech toepassingen. Naast materiaal- en magneetlevering ondersteunt het bedrijf klanten met engineering, simulatie, materiaalselectie, prototyping en de ontwikkeling van complete magnetische systemen. MagnetIQ combineert wereldwijde sourcing, waaronder directe sourcing uit China, met Europese voorraad en call-off leveringen om leveringszekerheid en kortere levertijden te realiseren. Daarnaast zet het bedrijf in op een meer veerkrachtige en duurzame Europese magneetketen door recycling van permanente magneten en productieschroot. Via een short-loop recyclingproces wordt magnetisch materiaal teruggewonnen en opnieuw ingezet voor de productie van NdFeB-magneten in Europa. Hiermee wil MagnetIQ de afhankelijkheid van primaire grondstoffen en internationale toeleveringsketens verminderen en bijdragen aan sterkere lokale Europese supply chains.

Case 8: SEW-EURODRIVE

SEW-EURODRIVE levert aandrijf- en besturingstechnologie en past permanente magneten toe in servomotoren en in steeds efficiëntere motoren (richting IE5,[53] vooral bij kleinere vermogens); het magneettype varieert per toepassing. Grondstofafhankelijkheid (REEs) is een uitdaging en door levensduren van circa 15 jaar is er nog geen substantiële retourstroom van deze motoren. Sourcing loopt centraal via het hoofdkantoor: **meerdere inkoopkanalen**, **strategische voorraadvorming** voor kritische componenten en **ontwerpflexibiliteit** maken snel schakelen mogelijk. Remanufacturing van motoren is geïntegreerd in de service- en circulariteitsstrategie: **rotoren zijn daarbij vaak herbruikbaar**, de slijtage zit in lagers en afdichtingen. Na herassemblage en testen is het prestatie-niveau vergelijkbaar met nieuw. SEW positioneert remanufacturing als alternatief voor vervanging door nieuw — levensduurverlenging en minder materiaalgebruik, afval en energieverbruik.

Case 9: Aandrijven zonder aanraking: hoe Zytec met een luchtspleet tussen motor en machine alles efficiënter maakt

ZYTEC **"Non-contact drive"** ontwikkelt en levert aandrijfsystemen zonder fysiek contact, een slimme vervanger van de klassieke koppeling tussen motor en machine. De koppeling die de overbrenging regelt tussen motor en machine moet perfect uitgelijnd, kan warm worden en door trilling of spanning slijten. Daarom heeft Zytec een systeem ontworpen met een metalen schijf en sterke magneten die de motor laat draaien zonder elkaar te raken. De winst zit niet alleen in langer functioneren van de installatie maar in energie, oude systemen moeten gereguleerd met kleppen en hier kun je precies regelen hoeveel kracht er overgedragen wordt.

Benieuwd naar meer inspirerende voorbeelden van circulair ondernemen? Op de website van Stichting Circulaire Maakindustrie staan tientallen praktijkvoorbeelden van bedrijven uit de maakindustrie die circulaire principes succesvol hebben geïntegreerd in hun bedrijfsvoering.

53 IE5 is de hoogste internationale energie-efficiëntieklasse voor elektromotoren (volgens de IEC 60034-30-norm)

Bijlage 13:

Afkortingenlijst

Veelvoorkomende afkortingen (op alfabetische volgorde)

AI	Artificiële intelligentie
BBP	Bruto Binnenlands Product
BNP	Bruto Nationaal Product
BOM	Brabantse Ontwikkelings Maatschappij
CBPS	Circulair Business Program Semicon
CE	Circulaire Economie
CEA	Circular Economy Act
CO_2	Koolstofdioxide
CPM	Circulaire Potentie Methodiek
CRMA	Critical Raw Materials Act
CRoF	Control Room of the Future
DACE	Digitalisering en Automatisering voor een Circulaire Economie
DPP	Digitaal product paspoort
EDIH	Europese digitale innovatie hub
ESPR	Ecodesign for Sustainable Products Regulation
EU	Europese Unie
EZK	Ministerie van Economische Zaken en Klimaat
(H)REE	(Heavy) Rare Earth Elements
HTSM	High Tech Systemen en Materialen
ICER	Integrale Circulaire Economie Rapportage
IP	Intellectueel Eigendom
IPCEI	Important Project of Common European interest
KPI	Key Performance Indicator
KGG	Klimaat en Groene Groei
LCA	levenscyclusanalyse
MKB	Midden- en kleinbedrijf
MKI	Milieukostenindicator
MVO	Maatschappelijk Verantwoord Ondernemen
NDS	Nederlandse Digitaliseringsstrategie
NEN	Nederlands Normalisatie Instituut
NGS	Nationale grondstoffenstrategie
NLCS	Nederlandse cybersecuritystrategie
NMO	Nederlands Materialen Observatorium (onderdeel TNO)
NO_x	Stikstofoxiden
NPCE	Nationaal Programma Circulaire Economie
NTS	Nationale technologiestrategie
NZIA	Net-zero Industry Act
OEM	Original Equipment Manufacturer
PBL	Planbureau voor de Leefomgeving
PFAS	Poly- en perfluoralkylstoffen
PLM	Product Lifecycle Management
PM	Permanente magneten
R&D	Research & Development
ROM	Regionale ontwikkelingsmaatschappij
RVO	Rijksdienst voor Ondernemend Nederland
SCSN	Smart Connected Supplier Network
TKI	Topconsortium Kennis en Innovatie
UPCM	Uitvoeringsprogramma Circulaire Maakindustrie
ZZS	Zeer Zorgwekkende Stoffen

Colofon
Deze routekaart is opgesteld door het productteam **Circulaire en Weerbare Machinebouw** in opdracht van het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat (EZK), onder begeleiding van Circonnect en de Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO).

Redactie: RVO

Bij de totstandkoming van deze publicatie is gebruikgemaakt van AI voor het verzamelen van achtergrondinformatie en het genereren van teksten.

De uiteindelijke inhoud is door de auteur(s) gecontroleerd, geverifieerd en geredigeerd.

Vormgeving: Osage
Fotografie: Rijksbeeldbank, Stichting Circulaire Maakindustrie
Website: www.circulairemaakindustrie.nl
Publicatiedatum: november 2026