

# CIRCULAIR CLEANROOMS: LESSEN UIT DE HALFGELEIDERINDUSTRIE

Herbestemming van cleanroomcomplexen blijkt een lastige uitdaging. Doordat ontwerpprincipes en richtlijnen voor demontage en materiaalpaspoorten ontbreken, verdwijnen waardevolle materialen zoals RVS en koper waarschijnlijk in laagwaardige recyclingstromen. De auteurs roepen op om circulariteit niet langer als kostenpost of verplichting te zien, maar als kans om de halfgeleiderindustrie toekomstbestendig te maken. Op basis van onderzoek en praktijkervaring delen de auteurs in dit artikel hun inzichten.





**De eerste fabrieken voor de fabricage van microchips ontstonden eind jaren vijftig. De productie bestond uit wafers met een grootte van 25 tot 50 mm, geproduceerd in cleanrooms met een ISO-klasse 8. Later, in de jaren 90 werd de 200mm-wafer gemeengoed en werden de ISO-klassen strenger. Vandaag de dag wordt geproduceerd met wafers van 300 mm in grote chipfabrieken.**

Door: **Paz Molina (Deerns), Eric Stuiver (Deerns) en Ruben Pelzers (TVVL Expertgroep Circulaire Installaties)**

De reinheidseisen van cleanrooms bij de chipproductie zijn in de loop van de jaren verschoven naar ISO 4/5-niveau (ISO 14644-1). Dankzij modernere machines wordt nu veelal gewerkt in ISO 6-ruimten, terwijl lokaal, in mini-environments, ISO 3 wordt gerealiseerd. Reinheid verschuift daarmee van de ruimte naar de machine.

De innovatie in productie en technologische ontwikkelingen zorgen ervoor dat ook in de microchipfabricage fabrieksgebouwen een beperkte levensduur hebben. Circulariteit is nog nauwelijks een thema in de semicon-sector maar het kan en zal een enorme impact krijgen. Hier ligt een grote kans.

## HERBESTEMMING FABRIEKCOMPLEXEN

De groeiende vraag naar microchips en clustering van kennisintensieve bedrijven hebben in meerdere landen geleid tot grote fabriekcomplexen. De energie-intensieve productie van microchips zorgt eveneens voor een uniek karakter van deze complexen door de aanwezige grootschalige industriële energiecentrale. Deze centrale bevat warmte- en koude-opwekkers, een noodstroom-installatie (NSA) om stroomuitval tegen te gaan en tunnels en leidingbruggen voor de distributie van de proces- en gebouwgebonden installaties. Vanwege het belang van een ononderbroken productie worden de kritische faciliteiten redundant uitgevoerd, zodat stilstand van de chipfabriek voor onderhoud beperkt is tot één dag per jaar.

De herbestemming van deze fabrieksgebouwen heeft aangetoond dat het zeer complex is om zulke gespecialiseerde infrastructuur een nieuwe bestemming te geven. Bovendien dateren deze gebouwen uit een periode waarin circulariteit nog geen ontwerpopgave was. Voor de technische gemeenschap biedt dit een belangrijk leerpunt: zelfs de best ontworpen infrastructuur kent een houdbaarheidsdatum, tenzij schaalbaarheid, technologie en businessmodel gelijktijdig mee-evolueren.

> **CIRCULARITEIT** IS NOG **NAUWELIJKS EEN THEMA** IN DE **SEMICON-SECTOR** MAAR HET KAN EEN **ENORME IMPACT KRIJGEN.**

## CIRCULAIRE INZICHTEN

De halfgeleiderindustrie is een wereld van uitersten: ultramoderne cleanrooms, razendsnelle innovatie en complexe productieprocessen. Maar achter deze high-tech schuilt een groeiende uitdaging: hoe maken we deze industrie zowel toekomstbestendig als circulair?

Waar het vroeger vooral ging over energiebeheer en $CO_2$-reductie, komt nu

ook het hergebruik van grondstoffen en materialen nadrukkelijk in beeld. Circulariteit is tot nu toe nog nauwelijks een thema in de semicon-sector maar het kan en zal een enorme impact krijgen.

De aanleiding is concreet: er zijn de nodige fabrieksgebouwen voor microchips die end-of-life zijn. Ze zijn verlaten, maar nog altijd verbonden aan draaiende installaties en nutsvoorzieningen. Ontvlechten zonder de productie te verstoren is een complexe logistieke en technische puzzel. Daarna volgt het demonteren, scheiden en veilig afvoeren van materialen. Pas dan kan zorgvuldig en veilig worden gesloopt, met oog voor hergebruik.

## MATERIAALPASPOORTEN EN DEMONTABEL ONTWERPEN

Een kernprobleem is dat materialen vaak gemengd zijn toegepast en daardoor lastig te scheiden zijn. Denk aan elektrische bedrading met koper én oude PVC-mantels, of verhoogde vloeren met aluminium en PVC-vloerbedekking. Een veelbelovende oplossing is het materiaalpaspoort: een digitaal register waarin precies staat welke materialen zijn gebruikt, waar ze zich bevinden en hoe ze zijn bewerkt. Op die manier kunnen waardevolle grondstoffen als roestvrij staal (RVS 316 en 304), koper en aluminium bij demontage weer zuiver worden teruggewonnen door een gespecialiseerde aannemer.

> WIE BIJ **HET ONTWERP AL REKENING HOUDT** MET **DEMONTAGE, VERLENGT** DE **LEVENSDUUR EN WAARDE** VAN ZIJN MATERIALEN.

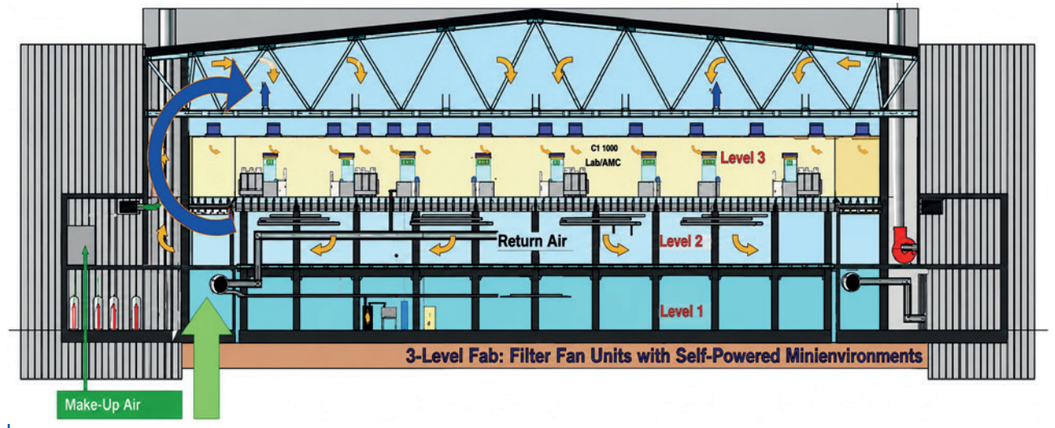
Ook het ontwerp van cleanrooms verdient aandacht. Demontabele wandsystemen maken hergebruik mogelijk, terwijl gekitte of verlijmde systemen bij sloop als gemengd afval eindigen. Daarnaast moeten te gebruiken materialen voldoen aan AMC-eisen (Airborne Molecular Contamination) en mogen ze niet uitgassen, wat de keuzevrijheid verder beperkt. Toch biedt dit ook kansen: wie bij het ontwerp al rekening houdt met demontage, verlengt de levensduur en waarde van zijn materialen.




**Foto 1:** Voor de fabricage van chips zijn technisch complexe en energie-intensieve fabrieken nodig.








**Figuur 2:** Bij de circulaire aanpak moet veel aandacht worden besteed aan de technische installaties ten behoeve van de cleanrooms.

## RECYCLING: DE STILLE UITDAGING

Waar metalen vaak redelijk goed te recyclen zijn, vormen kunststoffen een grotere uitdaging. Polyetheen en polypropyleen zijn in principe relatief goed herbruikbaar, maar veel andere kunststoffen niet. Glasvezelversterkte kunststoffen, PVDF, PFA en PVC zijn moeilijker te recyclen, wereldwijd loopt hiernaar onderzoek. Vanwege brandgevaar pleiten verzekeraars zoals Factory Mutual voor het vermijden van kunststoffen. Ook ogenschijnlijk eenvoudige onderdelen zoals FFU's blijken complex. Ze bestaan uit aluminium, verschillende kunststoffen, steenwol, koper en papier. In grote fabrieken gaat het om duizenden stuks. Dit is voldoende volume om het economisch interessant te maken om ze te ontmantelen en te recyclen. Toch gebeurt dit nu nog nauwelijks.

> **CIRCULARITEIT IN CLEANROOMS GAAT VERDER** DAN GEBOUWEN EN CONSTRUCTIEVE MATERIALEN.

## INSTALLATIES EN MATERIALEN

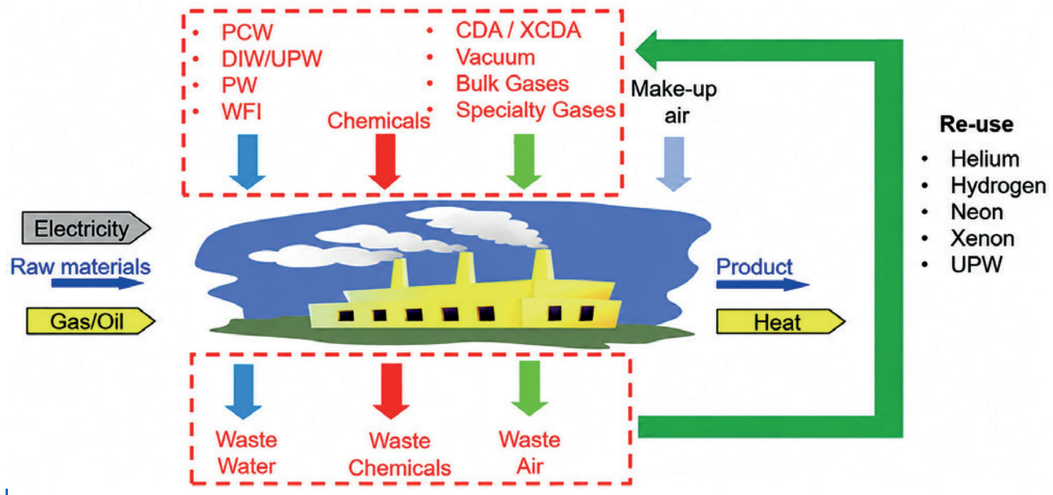
Circulariteit in cleanrooms gaat verder dan gebouwen en constructieve materialen. Technische installaties, zoals chillers, demiwaterinstallaties en verwarmingsketels, bieden een belangrijke kansen voor hergebruik en levensduurverlenging. Deze systemen zijn doorgaans opgebouwd uit hoogwaardige materialen, waaronder metalen, en zijn ontworpen om betrouwbaar te functioneren over een lange levensduur. Door besturing en koelmiddelen te vernieuwen kunnen ze opnieuw worden ingezet, wat zowel grondstoffen als kosten bespaart.

Een vergelijkbare circulaire benadering geldt voor bepaalde procesgerelateerde assets. Afgekeurde productiewafers kunnen worden hergebruikt als monitor- of dummywafers en uiteindelijk zelfs een tweede leven krijgen, bijvoorbeeld in de productie van zonnepanelen. Ook verpakkingen dragen bij aan de circulariteitsuitdaging. Materialen die cleanrooms binnenkomen zijn doorgaans dubbel verpakt, wat leidt tot aanzienlijke afvalstromen. Het gebruik van recyclebare of herbruikbare verpakkingsmaterialen kan deze impact aanzienlijk verminderen.

## CIRCULAIRE BENADERING VAN BEDRIJFSSTOFFEN

Naast installaties en apparatuur maken cleanroomprocessen gebruik van grote hoeveelheden water, gassen en chemicaliën. Al deze stromen bieden kansen voor circulair gebruik.

Edelgassen zoals helium, krypton en neon worden steeds vaker teruggewonnen en hergebruikt, waarbij de hoge kostprijs de economische aantrekkelijkheid van dergelijke oplossingen vergroot. Waterstof wordt bijvoorbeeld vaak geventileerd na epitaxieprocessen, maar heeft potentieel om als energiebron te worden hergebruikt. Waar hergebruik niet haalbaar is, kunnen emissies van schadelijke stoffen worden beperkt door behandeling.




**Figuur 3:** Ontwerpschema van de primaire en secundaire processen in een chipfabriek (bron Deerns).

Zo worden perfluorkoolstoffen (PFC's) doorgaans afgevangen met lokale abatement-systemen.

Waterhergebruik biedt een belangrijke kans voor circulariteit. Ultra-puurwatersystemen kunnen hergebruikspercentages tot wel 80% bereiken, mits voldoende ruimte en ondersteunende infrastructuur beschikbaar zijn. In veel faciliteiten worden afvalwaterstromen al gedeeltelijk teruggewonnen. Zo kan licht vervuild spoelwater worden opgevangen en behandeld via specifieke zuiveringsstappen, waarna het veilig opnieuw in het proces kan worden ingezet zonder de procesintegriteit in gevaar te brengen. Hierdoor wordt de afhankelijkheid van primaire waterbronnen aanzienlijk verminderd. In de toekomst kunnen aanvullende stromen, zoals CMP-slurries, mogelijk ook geschikt worden voor hergebruik naarmate zuiveringstechnologieën zich verder ontwikkelen.

Daarnaast worden diverse vloeibare afvalstromen, zoals zwavelzuur, fosforzuur, oplosmiddelen en fluoridehoudend afvalwater, in veel gevallen gescheiden ingezameld en behandeld. Afhankelijk van de samenstelling en beschikbare technologieën kunnen deze stromen ook kansen bieden voor terugwinning of recycling.

## ENERGIE: DE ONGRIJPBARE FACTOR

Opvallend is dat de energiebehoefte in tegenstelling tot andere bedrijfsmiddelen juist blijft stijgen. Door de toenemende complexiteit van machines neemt het elektriciteitsverbruik explosief toe. Dit geldt niet alleen voor de productie, maar ook voor de chips zelf, met name AI-processors, die enorme hoeveelheden energie vragen in datacenters. Grote techbedrijven overwegen zelfs eigen kerncentrales om de stroomvoorziening van hun datacenters te garanderen.

Hier ligt een paradox: terwijl circulariteit draait om het sluiten van kringlopen, vergroot de groeiende energiehonger juist de ecologische voetafdruk. Energie moet een integraal onderdeel worden van fabrieksontwerpen, bijvoorbeeld door lokale opwekking met zon en wind, adiabatisch bevochtigen en koelen of door restwarmte te hergebruiken.

## CONCLUSIE: VAN PROBLEEM NAAR PERSPECTIEF

De belangrijkste les uit de diverse gesprekken is dat circulariteit in de halfgeleiderindustrie niet begint bij het oplossen van afvalproblemen, maar bij het anders denken over ontwerpen, bouwen en gebruiken. Ook technisch hoogwaardige cleanroomfaciliteiten hebben een beperkte economische levensduur. Door gebouwen, gebouwgebonden installaties en processen modulair en demontabel te maken, materialen te registreren en stromen te scheiden, kan de industrie waarde behouden in plaats van verspillen.

Het vergt samenwerking tussen ontwerpers, fabrikanten, gebruikers en sloopbedrijven, maar ook nieuwe wet- en regelgeving en economische prikkels. Circulariteit is daarmee niet alleen een technische uitdaging, maar ook een organisatorische en culturele omslag. De ambitie is helder: circulariteit niet langer zien als kostenpost of verplichting, maar als kans om de halfgeleiderindustrie toekomstbestendig te maken met demontabel ontwerp en materiaalpaspoorten, zodat hoogwaardige recycling eenvoudiger wordt. ●



