



TEKNOLOGISK
INSTITUT



Teknologiske barrierer og muligheder mod en cirkulær tekstilindustri

Marts 2024

Indholdsfortegnelse

Forord.....	3
Advisory Board.....	4
Omstilling til cirkulær økonomi gennem Danmarks styrkepositioner	6
Primære barrierer	9
1. Materialer	16
2. Produktdesign	24
3. Produktion	28
4. Brugsfase	34
5. Sortering	40
6. Genanvendelse	44

Rapporten må citeres med følgende henvisning:

Teknologiske barrierer og muligheder mod en cirkulær tekstilindustri, Teknologisk Institut, Marts 2024

Forfattere fra Teknologisk Institut:

- Julie Brender Trads, Ph.d.
- Lasse Rabøl Jørgensen, Ph.d.
- Peter Rosborg, Civilingeniør
- Alexander Sandahl, Ph.d.
- Julie Stokkebro Schmøkel, cand.scient.
- Jeppe Holmehave, cand.scient.
- Manja Annette Behrens, Ph.d.

Forord

I takt med at bæredygtighed og miljøbevidsthed bliver stadig vigtigere for både samfundet og forbrugeren, stiger presset på tekstilindustrien for at overgå fra traditionelle, lineære produktionsmetoder og forretningsmodeller til at være mere cirkulære, hvor forebyggelse af affald, genbrug og genanvendelse er vigtige hjørnesten. En sådan overgang vanskeliggøres imidlertid af teknologiske barrierer, som skal overvindes.

I denne rapport vil vi udforske disse barrierer og diskutere, hvordan Danmark - med sin stærke, innovative teknologiske sektor - kan tage føring og på bedst mulig vis bidrage til den nødvendige omstilling.

Rapporten tilbyder indblik i den seneste teknologiudvikling på tværs af tekstilers livscyklus, sætter perspektiv på de teknologiske hindringer og fremlægger forslag til, hvordan vi sammen kan overkomme disse barrierer. Det er vores ønske, at rapporten vil inspirere til dialog og handling, da vejen til en mere cirkulær og bæredygtig tekstilindustri kræver samarbejde på tværs af både brancher, discipliner og landegrænser.

Rapporten vil have et overvejende teknologisk fokus, vel vidende at teknologi ikke alene kan omstille tekstilindustrien til en cirkulær økonomi. Det er vores klare holdning, at teknologiudvikling skal understøttes af andre initiativer, der adresserer f.eks. overproduktion,

dårlige arbejdsvilkår og forbrugeradfærd. Forbruget af tekstiler, forbundet med bl.a. fast-fashion, skal reduceres markant, men det vil ikke være det primære fokus i denne rapport.

I forbindelse med udarbejdelsen af '*Teknologiske barrierer og muligheder mod en cirkulær tekstilindustri*' er der blevet nedsat et advisory board, der har udarbejdet rammen, herunder valg af fokusområder, for rapporten. Advisory boardet består af Dansk Industri, BESTSELLER, Gabriel, VIA University College, Roskilde Universitet, DAKOFA, Dansk Erhverv Wear samt Dansk Mode & Tekstil. Teknologisk Institut har bidraget med miljøfaglig sekretariatsbistand og været ansvarlig for facilitering af møder og beslutningsprocesser for advisory boardet. Teknologisk Institut har desuden stået for udarbejdelsen af rapporten. Arbejdet er blevet igangsat og fulgt af Marie Louise Rementorp fra Miljøstyrelsens sekretariat for MUDP.

Rapporten er udarbejdet på baggrund af viden indhentet fra eksperter i advisory boardet, øvrige fageksperter, inputs fra den danske tekstilindustri gennem åbne arrangementer (såkaldt 'Vidensforum'), grundige litteraturstudier og Teknologisk Instituts generelle indsigt i tekstilbranchen.

God læselyst.

Advisory Board



Jette Lindgaard er miljø- & bæredygtighedschef hos branche- og arbejdsgiverforeningen Dansk Mode & Tekstil (DM&T). Jette hjælper medlemmerne gennem deres grønne omstilling og spørgsmål til kemikalier, standarder og lovgivning med udgangspunkt i sin omfattende erfaring i tekstilbranchen.



Kristian Syberg er sektionsleder for Miljødynamik hos Roskilde Universitet. Kristians forskning fokuserer primært på risikovurdering, regulering af kemikalier og plastikforurening. Han bruger en tværfaglig tilgang til fagområder, hvilket har været med til at skabe hans brede indsigt i udfordringerne på vejen mod en cirkulær økonomi.



Lasse Rafiq Hangaard er konsulent for Brancheorganisationen for Vask og Tekstiludlejning (BVT) under Dansk Industri. BVT er en faglig interesse- og serviceorganisation for industrielt drevne vaskerier i den private og offentlige sektor, samt leverandører til vaskerier. Lasse arbejder med grøn omstilling i branchen og kommunikation til medlemmerne.



Camilla Skjønning Jørgensen er Sustainable Materials and Innovation Manager hos BESTSELLER og står i spidsen for BESTSELLER's første Innovationshub. Camilla arbejder strategisk med både interne og eksterne interessenter, innovatører og brands. Camilla mener, at mange aktører sammen kan skabe positiv forandring, og at ægte forandring kommer fra handling, ikke blot overvejelse.



Marie Josephine Mustelin er politisk konsulent for tekstiler i Dansk Erhverv og tilknyttet brancheorganisationen WEAR. Marie er ansvarlig for formidling af lovgivning under EU Green Deal og varetager her de danske tekstilvirksomheders interesser.



Jeppe Emil Mogensen er designdirektør og leder af Gabriel's tværfaglige design- og udviklingsafdeling, der har fokus på at udvikle nye møbeltekstiler til det globale marked. Ved at forene funktionelle og æstetiske produktkvaliteter med cirkulære løsninger, har Gabriel indenfor de senere år opbygget konkret erfaring med innovative produkter og services.



Poul-Erik Jørgensen er ansvarlig for forskning, udvikling og innovation inden for produktdesign og materialeteknologi hos VIA University College. Poul-Erik har mere end 25 års erfaring fra både den nationale og internationale tekstilindustri, hvor han bl.a. har arbejdet med forskning, produktudvikling og produktion af fibre og garner.



Annette Braunstein er udviklingschef i DAKOFA, Dansk Competencecenter for Cirkulær Omstilling. Annette har over 20 års erfaring inden for affaldsområdet, ressourcedagsordenen og cirkulær økonomi, herunder særligt rammebetingelserne og cirkulær omstilling af tekstilkredsløbet.

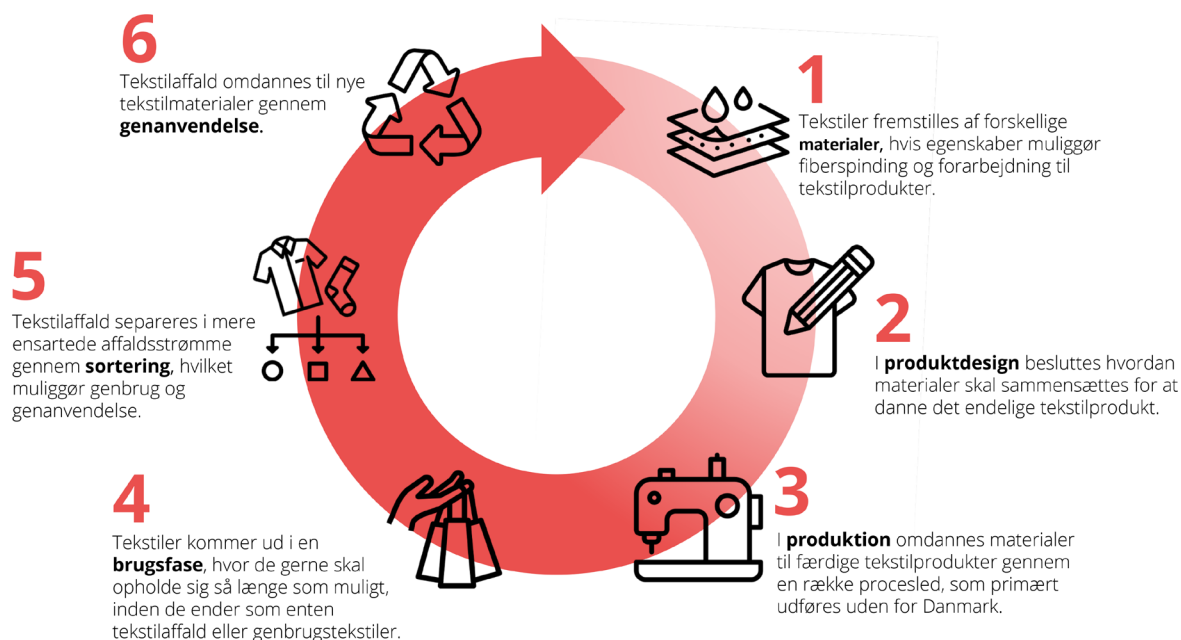
Omstilling til cirkulær økonomi gennem Danmarks styrkepositioner

Fire primære teknologiske barrierer er til hinder for omstillingen af tekstilindustrien fra lineær til cirkulær. Dog står Danmark i en unik position til at omsætte disse barrierer til muligheder ved at udvikle, demonstrere og eksportere innovative miljøteknologier, der fremmer en global, cirkulær tekstiløkonomi.

Tekstilindustrien bidrager i dag med omtrent 87 mia. DKK til det danske BNP med 96.000 danske arbejdspladser og udgør 6 % af den samlede danske vareeksport¹. Tekstilindustrien er en dansk styrkeposition med store internationale brands, der rækker langt ud over landets grænser. Dog er den globale efterspørgsel på tekstiler nu så stor, at fremskaffelse af materialer, brug af tekstiler og

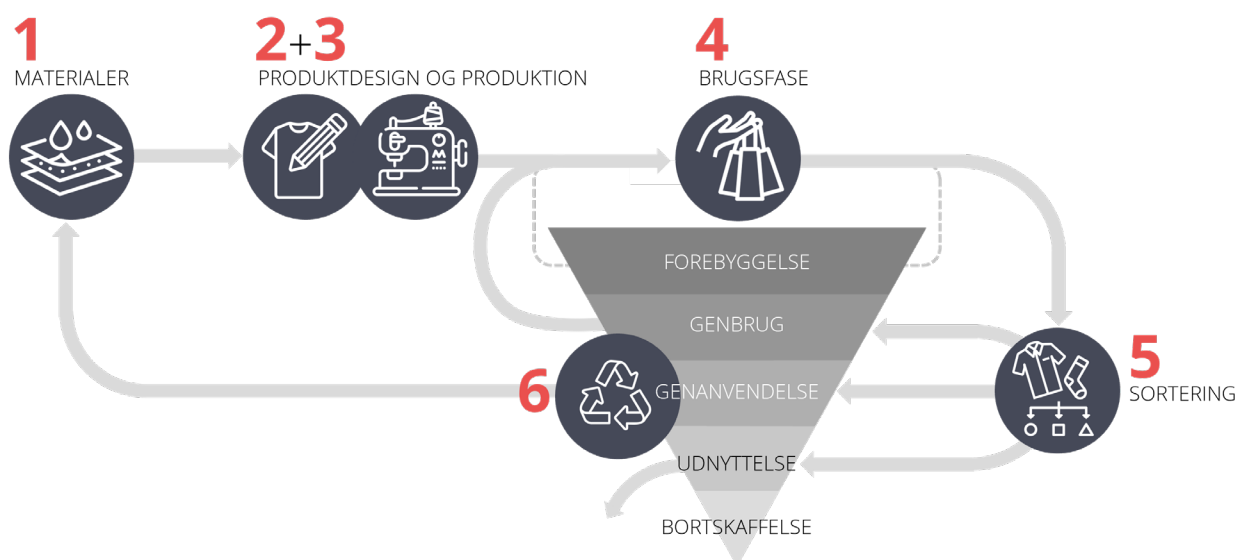
bortskaffelse af tekstilaffald udgør en væsentlig udfordring for miljøet nationalt og internationalt, og som branche står tekstilindustrien derfor overfor en omstilling, der skal sikre industriens fremtid.

Tekstilproduktionen er i dag meget ressourcekrævende i form af vand, landareal, kemikalier og fossil råolie, og branchen udleder store mængder CO₂. Det er derfor altafgørende, at tekstilindustrien omstilles til en cirkulær økonomi, hvor ressourceforbruget reduceres, og hvor materialerne udnyttes mest muligt ved fastholdelse i et lukket kredsløb. Vejen dertil kræver dog løsning af en række komplekse udfordringer, der omfatter alt fra forbrugeradfærd og måden at drive forretning på til udvikling af miljøteknologier, der kan



Figur 1: Overblik over fokusområder med angivelse af tal, som henviser til afsnittene i rapporten. Fokusområderne dækker de forskellige faser på tværs af tekstilernes livscyklus og er udvalgt for at anskue overgangen til en mere cirkulær tekstilindustri fra et holistisk perspektiv.

¹ <https://www.dmogt.dk/om-os/branchens-bidrag-til-samfundsoekonomien>



Figur 2: Affaldshierarkiet beskriver, hvordan håndtering af affald skal prioriteres, og er et begreb i dansk affaldspolitik og EU's rammedirektiv for affald. Tekstilaffaldet skal håndteres så højt oppe i affaldshierarkiet som muligt for at sikre optimal ressourceudnyttelse.

håndtere de store mængder tekstilaffald. Gennem udnyttelse af de danske styrkepositioner inden for innovation og teknologiudvikling, som tæller globale tekstilvirksomheder, stærke innovationsmiljøer og anerkendte forskere, kan Danmark omsætte disse udfordringer til unikke muligheder for at gå forrest i den cirkulære omstilling.

Danmark er allerede gået forrest i EU med husstandsnaer indsamling af tekstilaffald og har i den forbindelse erhvervet sig vigtige erfaringer i de forskellige led i affaldshåndteringen. Disse erfaringer bidrager til, at Danmark nu står i en unik position til at identificere og udvikle nye teknologier, der kan eliminere flaskehalse i affaldshåndteringen og sikre, at tekstiler bruges og genanvendes mest muligt. Det er netop gennem eksport af sådanne miljøteknologier og den dertilhørende viden, at Danmark, trods størrelse og placering, kan bidrage markant til omstillingen af den globale tekstilindustri mod en mere cirkulær økonomi.

EU har med indførelsen af affaldshierarkiet i Direktiv 2008/98/EF besluttet, hvordan håndteringen af affald generelt skal prioriteres, for at ressourcer udnyttes bedst muligt. Affaldshierarkiet indebærer, at affald skal håndteres på det højeste mulige niveau, da affaldet derved bibeholder flest mulige af dets oprindelige egenskaber. Hvis affaldet i første omgang forebygges og derefter bevæger sig langsomt gennem affaldshierarkiet, reduceres det ressourceforbrug, der er forbundet med produktion af nye tekstilmaterialer. Den langsomme vej gennem affaldshierarkiet sikres ved, at affaldet blive genbrugt eller forberedt til

genbrug gentagne gange, bl.a. gennem sortering, vask, omfarvning eller reparation, for til sidst at blive genanvendt til nye tekstilmaterialer. Det er derfor vigtigt, at alle niveauer i affaldshierarkiet inddrages, og at de teknologiske barrierer, der i øjeblikket forhindrer, at tekstiler kan genbruges og genanvendes, overkommes.

Med 'Teknologiske barrierer og muligheder mod en cirkulær tekstilindustri' ønsker vi at identificere de teknologiske barrierer, der i øjeblikket er til hinder for den fulde udnyttelse af affaldshierarkiet i tekstilindustrien. Barriererne oversættes til muligheder, som Danmark kan gribe for at fremme omstillingen til en cirkulær tekstiløkonomi. De teknologiske barrierer og de dertilhørende muligheder er identificeret ud fra et indblik i såvel eksisterende som kommende, men også manglende miljøteknologier inden for seks fokusområder på tværs af tekstilernes livscyklus: Materialer, produktdesign, produktion, brugsfase, sortering og genanvendelse (Figur 1). Teknologiske initiativer inden for de seks fokusområder vurderes i forhold til, hvordan de påvirker håndteringen af tekstilaffaldet i affaldshierarkiet, som vist på Figur 2. Med denne holistiske tilgang vil vi skabe en forståelse for den sammenhæng, der er mellem valg foretaget i f.eks. tekstilernes design, og den måde, tekstilerne affaldshåndteres på efter endt levetid. Det er netop denne afhængighed på tværs af tekstilernes levetid, der gør etableringen af en cirkulær tekstiløkonomi særligt kompleks, men som samtidig giver mulighed for at løse teknologiske udfordringer med bidrag fra flere forskellige fronter.



"Når man kører mod afgrunden, så er det ikke nok at sætte farten ned. Man bliver nødt til at skifte retning og gøre noget fundamentalt anderledes."

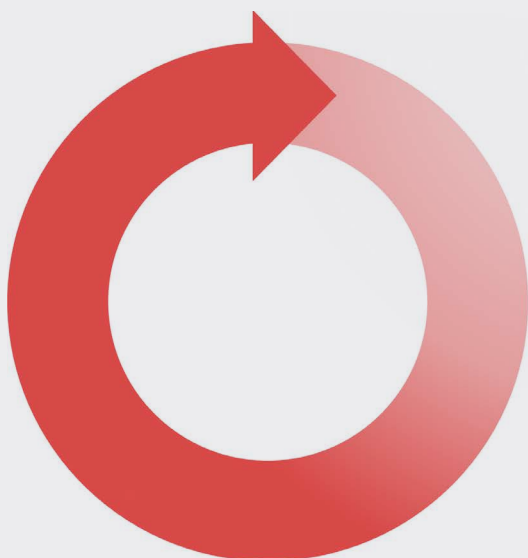
– Kristian Syberg, Roskilde Universitet

Udvikling af teknologiske løsninger er afgørende for at kunne opnå en fremtidig cirkulær økonomi for tekstiler. Sorterings- og genanvendelsesteknologier udgør kritiske trin i omdannelsen af tekstilaffald til nye tekstilmaterialer og er essentielle for at kunne lukke materialekredsløbet.

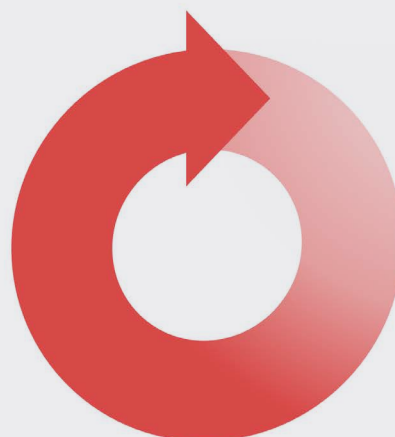
Det er ligeledes nødvendigt at mindske ressourceforbruget, men dette løses bedst gennem ikke-teknologiske løsninger, f.eks. ændring i forbrugeradfærd og nye forretningsmodeller. Her kan teknologiske løsninger være med til at understøtte ændringer, men vil ikke kunne skabe de nødvendige forandringer alene.

Det er derfor afgørende, at teknologisk udvikling understøttes af ændret forbrugeradfærd.

Teknologiske løsninger kan realisere en cirkulær økonomi



Mindsket ressourceforbrug kan ikke løses direkte gennem teknologiske løsninger



Figur 3: Teknologisk udvikling kan bidrage til at skabe løsninger, der kan lukke kredsløbet og skabe en cirkulær økonomi gennem f.eks. sorterings- og genanvendelsesteknologier. Et mindsket ressourceforbrug er også afgørende, men her kan teknologi ikke direkte løse udfordringen.

Primære barrierer

Rapporten har identificeret følgende primære barrierer, som anses for at være mulige at nedbryde gennem dansk udvikling af miljøteknologier (vist i Figur 4):

I. Tekstilmaterialer er ressourcekrævende at producere:

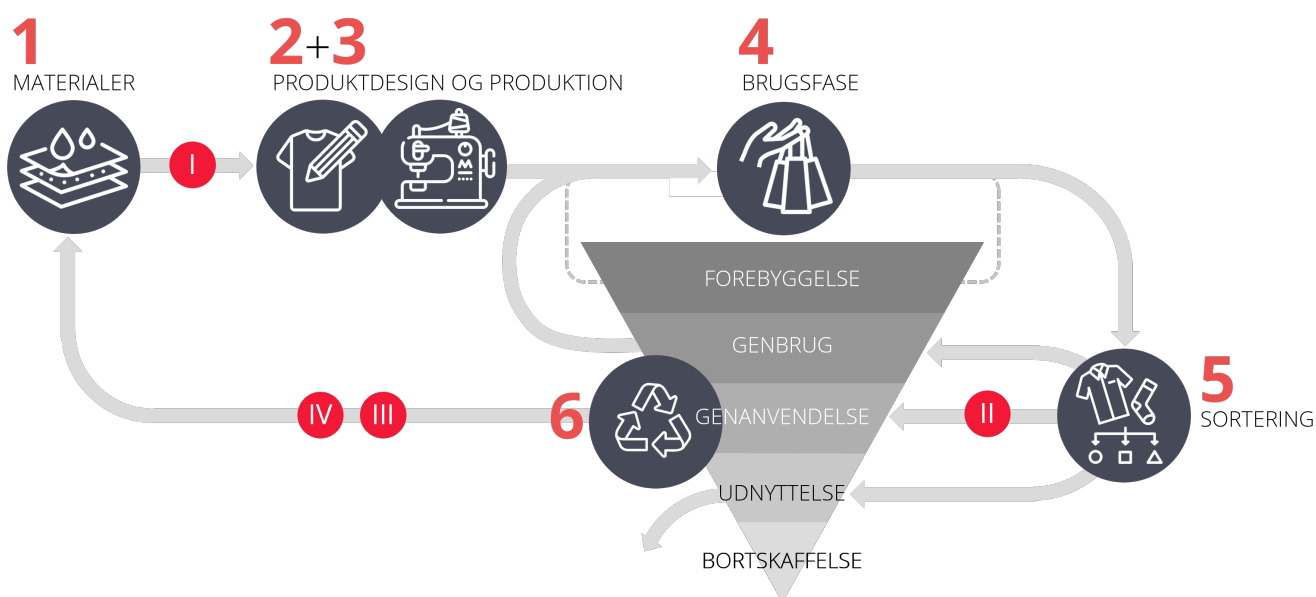
De mest udbredte tekstilmaterialer i dag kræver mange ressourcer i form af f.eks. råolie eller vand at producere, hvilket på sigt vil resultere i ressourcemangel.

II. Tekstilaffald er komplekst og forskelligartet: Komplexiteten af tekstilprodukter og forskelligartetheden i tekstilaffaldsstrømmen er en udfordring for både sorterings- og genanvendelsesteknologier, hvilket reducerer mængden af tekstilaffald, der kan genanvendes.

III. Mangel på nye og videreudvikling af eksisterende genanvendelsesteknologier:

Der er i øjeblikket ikke genanvendelsesteknologier til rådighed, der kan imødekomme behovet for genanvendelse af de mængder eller typer af tekstilaffald, der kasseres. Derudover er nuværende teknologiske løsninger begrænsede og for dyre at anvende.

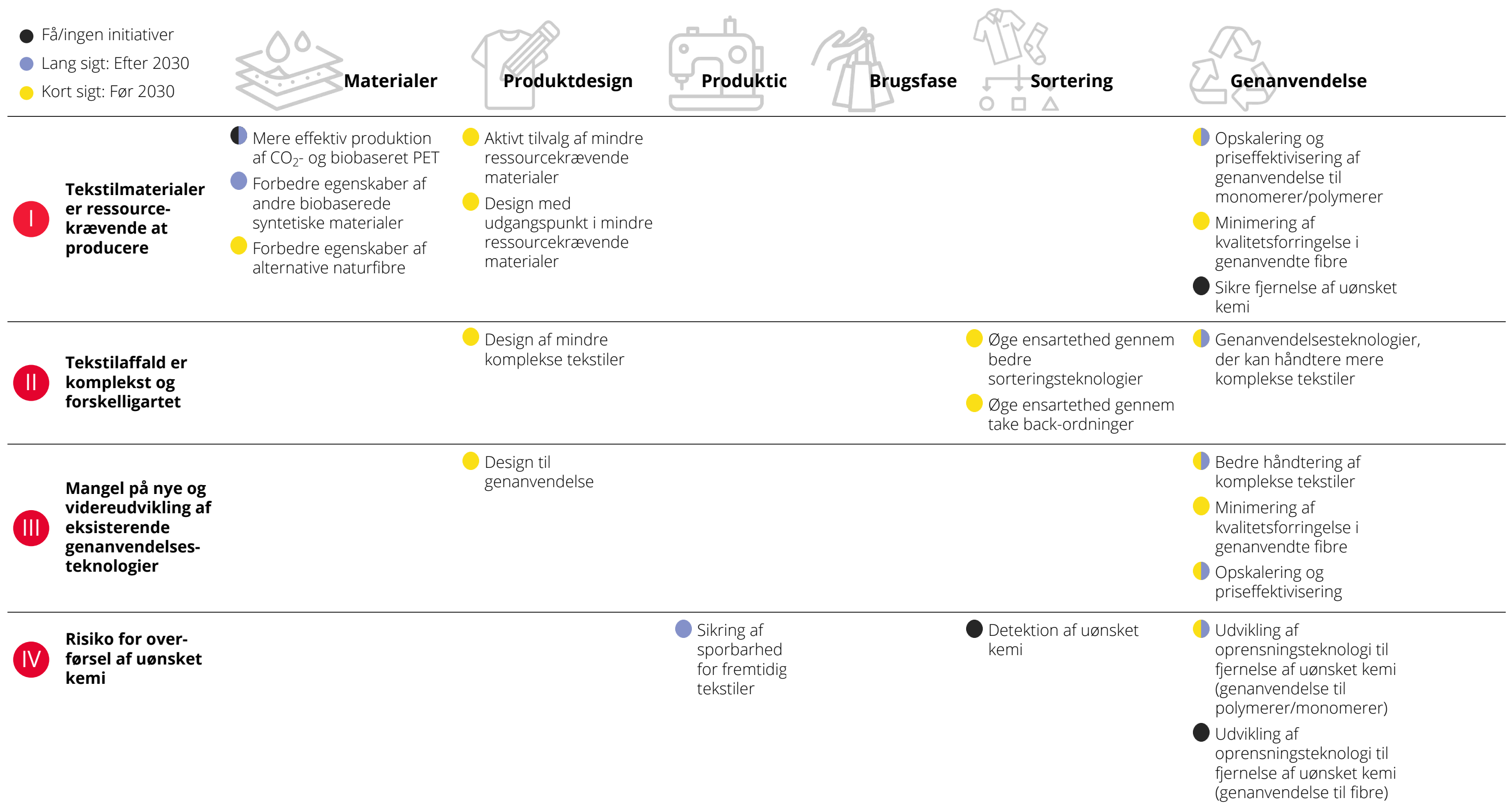
IV. Risiko for overførsel af uønsket kemi: Risikoen for overførsel af uønsket kemi fra en tidligere livscyklus til nye produkter er i dag en af de primære barrierer for udbredelsen af genanvendelse til fibre (mekanisk genanvendelse), som er den genanvendelsesteknologi, der er længst i udviklingen.



DE PRIMÆRE BARRIERER, SOM DET ER MULIGT AT NEDBRYDE Gennem TEKNOLOGISK UDVIKLING FRA DANMARK

- I Tekstilmaterialer er ressourcekrævende at producere
- II Tekstilaffald er komplekst og forskelligartet
- III Mangel på nye og videreudvikling af eksisterende genanvendelsesteknologier
- IV Risiko for overførsel af uønsket kemi

Figur 4: Rapporten har identificeret fire primære barrierer, der står i vejen for at opnå en mere cirkulær og mindre miljøbelastende tekstilindustri, og vurderes at være mulige at nedbryde gennem teknologisk udvikling fra Danmark. Hver barriere kræver en kombination af løsninger fra flere fokusområder for at blive nedbrudt.



Figur 5: De fire primære barrierer, som det er muligt at nedbryde gennem dansk teknologisk udvikling, kræver et samspil af løsninger fra de seks fokusområder. I diagrammet er opstillet et overblik over forslag til mulige løsninger, der tilsammen kan være med til at nedbryde de primære barrierer.

Barrierer og muligheder

Danmark kan gå forrest i omstillingen af tekstilindustrien til en mere cirkulær økonomi ved at kombinere sine styrkepositioner inden for tekstiler, innovation og teknologiudvikling til at overkomme disse barrierer. Barriererne er placeret mellem rapportens seks fokusområder, som er indbyrdes forbundne. Det betyder, at de skal overkommes gennem en holistisk indsats med teknologiske bidrag fra flere forskellige fokusområder. Gennem rapporten præsenteres en række muligheder for, hvordan de forskellige fokusområder kan bidrage til at overkomme disse barrierer, opsummeret i Figur 5. Mulighederne er vurderet i forhold til, hvornår de kan forventes at have en effekt på *kort sigt* (før 2030) eller på *lang sigt* (efter 2030). Derudover ses der muligheder, hvor der i dag er *få eller ingen initiativer*. De præsenterede muligheder skal ledsages af andre initiativer, for at vi i fremtiden kan opnå en mere miljørigtig og cirkulær tekstiløkonomi. Yderligere information om de foreslåede muligheder er givet i de specifikke afsnit senere i rapporten.

I. Tekstilmaterialer er ressourcekrævende at producere

Tekstilmaterialer vil i fremtiden bestå af eksisterende fibertyper samt genanvendte, alternative naturfibre og biobaserede syntetiske materialer. De mest udbredte tekstilmaterialer i dag kræver store mængder ressourcer såsom råolie eller vand at producere, hvilket vil resultere i ressourcemangel på sigt. For at overkomme denne barriere er det nødvendigt, at materialernes potentiale som tekstilmaterialer er højere end kravene til materialer, der kan bruges i tekstiler (Figur 6). Fibrenes potentiale til at blive brugt i nye tekstiler kan øges gennem materialeudvikling og ved at sænke kravene gennem tilpasset design.

Muligheder

For at øge udbredelsen af nye, mindre ressourcekrævende tekstilmaterialer er der behov for bidrag fra fokusområderne: **Materialer, produktdesign og genanvendelse**.

Materialer

PET fra biologiske kilder er demonstreret og er et lovende materiale, da det er identisk med PET baseret på råolie. Materialet forventes dog først at blive udbredt på lang sigt, da der skal fokuseres på at effektivisere processerne til fremstilling af PET fra biologiske kilder

for dermed at sænke produktpriserne. Derudover skal processerne videreudvikles til ikke at være baseret på fødevarer, men i stedet på andre eksisterende biologiske kilder. Et alternativ kan være CO₂-fangst, som er et felt i begyndende udvikling, men som først forventes at kunne blive en løsning på lang sigt. Andre biobaserede syntetiske materialer såsom PHA, PLA og PEF er afprøvet i tekstilprodukter, men her er vejen til kommerciel udbredelse også lang, da der skal investeres i udvikling af materialeegenskaber for at leve op til eksisterende produktkrav.

Naturfibre fra alternative kilder som hør og hamp er på forskellige udviklingsstadier. Nogle naturfibermaterialer forventes at være tilgængelige på kort sigt; det gælder f.eks. hør, der efterhånden er udbredt i markedet. For at hør kan erstatte f.eks. bomuld, skal der fremadrettet fokuseres på at forbedre hørs materialeegenskaber, såsom holdbarhed, krympning og tilbøjelighed til at krølle. Hamp og andre alternative materialer er længere fra markedet og kræver udvikling af dedikerede produktionsprocesser til f.eks. spinning.

Generelt skal introduktionen af nye materialer baseres på en robust vurdering af materialernes levetid, genanvendelsesmuligheder og effekt på ressourceforbruget og CO₂-udledningen.

Produktdesign

Nye designmetoder skal udvikles til at kunne håndtere nye materials egenskaber. Her er der behov for at udforske, hvordan de reducerede fiberegenskaber, såsom styrke kan kompenseres i produktdesignet gennem bl.a. vævnings- og strikketeknik, stoftykkelse, mv. Der skal i produktdesign aktivt tilvælges mindre ressourcekrævende materialer. Selv med de nuværende materialer er det muligt at træffe valg om brugen af mindre ressourcekrævende materialer og produktionsprocesser, og denne løsning vil derfor kunne have effekt allerede på kort sigt. Efterhånden som nye materialer og produktionsprocesser udvikles, vil valg i designfasen kunne skabe en endnu større effekt.

Genanvendelse

Genanvendelse til fibre (mekanisk genanvendelse) er tæt på markedet. Der skal imidlertid fokuseres på at minimere kvalitetsforringelsen af materialerne og på at fjerne risikoen for at overføre uønskede kemiske indholdsstoffer, såsom PFAS, ind i produktets nye liv. Desuden skal fiberkvaliteten forbedres. Der er løsninger på vej til minimering af kvalitetsforringelsen, hvilket har givet ophav til underkategorien blød mekanisk

genanvendelse, som forventes at kunne have en effekt allerede på kort sigt. Dog er der på nuværende tidspunkt ingen løsninger til fjernelse af uønsket kemi for denne form for genanvendelse.

Teknologier, der genanvender tekstilaffald til monomerer og polymerer er på forskellige udviklingsniveauer, hvor enkelte store anlæg forventes at være operationelle i 2025, mens nye løsninger forventes løbende at komme til på lang sigt.

II. Tekstilaffald er komplekst og forskelligartet

Tekstilprodukter er komplekse, fordi de bl.a. kan bestå af en kombination af flere forskellige tekstilfibre, farver, indholdsstoffer og trims. Dertil kommer, at den samlede strøm af tekstilaffald er forskelligartet, da den indeholder mange forskellige tekstilprodukter. Forskellighartigheden gør det svært for sorteringsteknologier at udsortere korrekt, og kompleksiteten af de enkelte produkter gør, at selv en perfekt udsortering kan resultere i komplekse tekstilaffaldsfraktioner. Dette sænker genanvendelsespotentialet for tekstilaffaldet, som vist i Figur 7.

Muligheder

For at øge mængden af tekstil-til-tekstil-genanvendelse er der behov for bidrag fra fokusområderne: **Produktdesign, sortering og genanvendelse.**

Produktdesign

Tekstilvirksomheder er klar over udfordringen, og produktdesign fokuserer i stigende grad på at forsimple produkterne, når der designes til genanvendelse. For at sikre lang levetid og langsom vej gennem affaldshierarkiet vil der dog fortsat være behov for at sikre optimale produkttegenskaber, hvilket i nogle tilfælde kan stride imod forsimpelingen af produktkompleksiteten. For simpelt produktdesign kan derfor kun delvist nedbryde denne barriere. Effekten af at forsimple produkterne vil have en effekt, når de nye tekstiler når til enden af deres livscyklus.

Sortering

For at øge ensartetheden af tekstiler er der behov for yderligere forbedring af NIR-sensorer. NIR-sensorer skal kunne måle den eksakte fibersammensætning i et blandingsskud, hvor der f.eks. er tilføjet små mængder elastan til polyester- eller bomuldsfibre. Udviklingsprojekter i videnstunge virksomheder og i innovationsmiljøet, herunder på universiteter og GTS-institutter, arbejder aktivt på både at udvikle datakvaliteten af

NIR-sensorer og på at forbedre algoritmer til den efterfølgende databehandling. Forbedringer forventes at være inkrementelle, men til gengæld med effekt på kort sigt.

Nye supplerende sorteringsteknologier skal udvikles til at udtrække andre produktinformationer, som f.eks. typen af tekstiler (arbejdsbukser, strømper, undertøj mv.) og produktslitage. De supplerende informationer vil bevirke, at de efterfølgende genanvendelsesteknologier kan indstilles til at producere genanvendte fibre i højere kvalitet. Her kan f.eks. billedgenkendelsesteknologier overføres fra andre brancher.

Take back-ordninger for tekstiler efter endt brug er endnu en mulighed for at øge ensartetheden af tekstilaffald og har især potentiale, hvis ordningerne kan skabe et genbrugs- eller genanvendelsespotentiale, der ikke kan realiseres gennem fælles indsamling. Denne mulighed vil have effekt på kort sigt.

Genanvendelse

Genanvendelsespotentialet hænger direkte sammen med ensartetheden af tekstilaffaldet som illustreret i Figur 7. Genanvendelse af tekstilaffald på kommerciel skala sker på nuværende tidspunkt for ensartede strømme fra industriaffald, tekstilaffald fra vaskerier og gennem udsortering. Når det i fremtiden skal være muligt at genanvende de store mængder husstandsindsamlet tekstilaffald, vil det være en stor udfordring at udsortere i fuldstændig ensartede fraktioner grundet tekstilernes kompleksitet. For at øge affaldsfraktionernes potentiale for at blive genanvendt er det nødvendigt at sænke grænsen for, hvornår det er muligt at genanvende (Figur 7). I den forbindelse skal der udvikles genanvendelsesteknologier til håndtering af de komplekse tekstiler og eventuelt mindre mængder fejlsorterede tekstiler. Sådanne genanvendelsesteknologier er på forskellige udviklingsstadier og vil give effekt på både kort og langt sigt, i takt med at de kommer commercialiseres.



III. Mangel på nye og videreudvikling af eksisterende genanvendelsesteknologier

Der er i dag ikke genanvendelsesteknologier til rådighed, der kan genanvende de store mængder tekstilaffald tilbage til nye tekstilprodukter. Genanvendelsesteknologier, der omdanner tekstilaffald til fibre, forkorter fibre markant, hvilket medfører tab af fysisk kvalitet. Derudover er der risiko for overførsel af uønsket kemi fra tekstilernes tidligere liv til deres nye liv.

Genanvendelsesteknologier, der danner polymerer og monomerer, er begrænset på kapaciteten og af de høje omkostninger forbundet med brug af kemikalier, opløsningsmidler og energi. Derudover er de ikke i stand til på kommerciel skala at håndtere komplekse tekstiler bestående af f.eks. blandingsfibre (Figur 7).

Muligheder

For at øge mængden af tekstil-til-tekstil-genanvendelse er der behov for bidrag fra fokusområderne: **Produktdesign og genanvendelse**.

Produktdesign

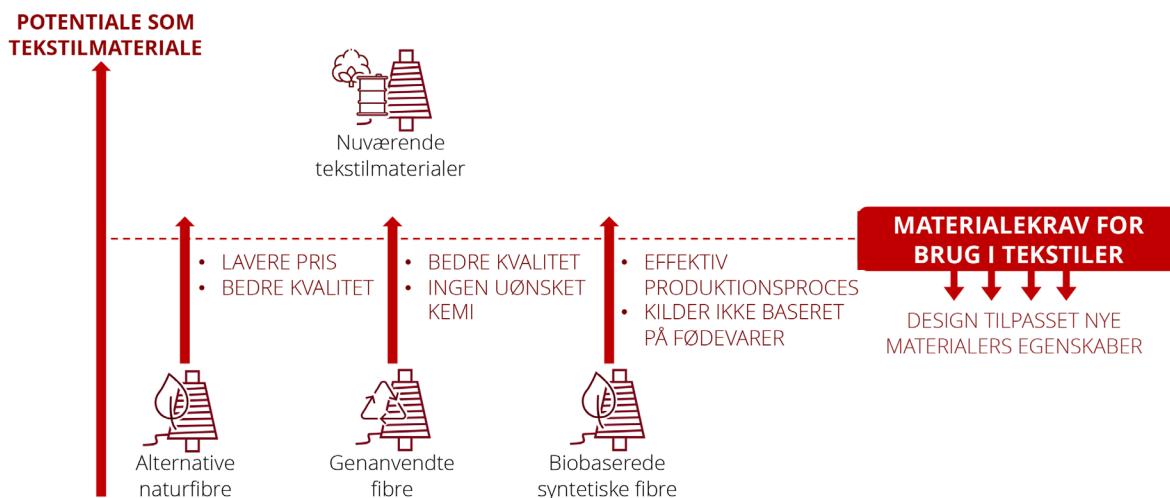
Som beskrevet ovenfor under barriere II er det muligt gennem design for genanvendelse at øge tekstilernes genanvendelsespotentiale ved endt levetid. Dette skal dog altid ske med en afvejning i forhold til produkt-egenskaber for at sikre lang levetid og langsom vej ned gennem affaldshierarkiet.

Genanvendelse

Genanvendelse af tekstilaffald til fibre (mekanisk genanvendelse) er tættest på markedet, men der er behov for videreudvikling med fokus på at minimere den fiberforkortelse, der sker i processen. Denne type genanvendelse forventes at kunne have en effekt på kort sigt og vil yderligere kunne optimeres ved at udsortere tekstilaffaldet på baggrund af produkttype i affaldssorteringen, og derefter tilpasse genanvendelsesbetingelserne til de specifikke produkter. F.eks. er de optimale betingelser for mekanisk genanvendelse af cowboybukser og T-shirts ikke de samme, selv i det tilfælde hvor begge produkter er lavet af bomuld.

Genanvendelsesteknologier, der omdanner tekstilaffald til polymerer eller monomerer, er længere fra markedet, og her skal udvikling fortsat fokusere på at effektivisere processerne, bl.a. gennem optimering af reaktionsbetingelser (temperatur og tryk), brug af kemikalier, opløsningsmidler og energi.

Størstedelen af udsorterede produkter kan endnu ikke håndteres i genanvendelsesprocesser, der omdanner tekstilaffald til polymerer eller monomerer, primært på grund af kompleksiteten af tekstilerne. Teknologiske løsninger er under udvikling, men mangler opskalering til kommerciel skala og priseffektivisering. Der skal derfor fortsat investeres i udvikling af nye genanvendelsesteknologier, herunder opløsningsteknologier til adskillelse af forskellige fibertyper, oprensningsteknologier til fjernelse af uønskede komponenter samt polymeriserings- og depolymeringsteknologier til de



Figur 6: For at nye materialer bliver udbredt i tekstiler skal de leve op til de krav, der i dag stilles til tekstilmaterialer. Materialernes potentiale for at blive i tekstiler kan for alternative biobaserede fibre øges gennem lavere pris, forbedrede egenskaber, mere effektive produktionsprocesser og højere kvalitet. For genanvendte fibre kræves der højere kvalitet, ingen uønsket kemi, lettere tilgængelighed og lavere pris.

relevante fibre. Derudover er der behov for at udvikle kvalitetssikringsmetoder, der sikrer, at uønskede kemikalier ikke overføres i genanvendelsesprocessen. Her forventes der løbende at ske fremskridt, og effekten vil derfor ses på både kort og langt sigt.

IV. Risiko for overførsel af uønsket kemi

Genanvendelse til fibre (mekanisk genanvendelse) af tekstilaffald er i dag i stand til at producere genanvendte fibre med en kvalitet, der gør det muligt at anvende dem i nye tekstilprodukter, men risikoen for at overføre uønsket kemi til nye produkter er en barriere for udbredelsen af mekanisk genanvendte fibre fra tekstilaffald uden sporbarhed. Risikoen for at overføre uønskede indholdsstoffer gennem genanvendelse til polymerer og monomerer er minimal, men kræver sikring. Det manglende kendskab til disse stoffer gør det udfordrende at udvikle teknologier til at fjerne dem (Figur 7).

Der er ingen teknologier under udvikling, der på kort sigt kan løse denne udfordring.

Muligheder

For at reducere risikoen for overførsel af uønsket kemi til nye tekstilprodukter er der behov for bidrag fra fokusområderne: **Produktion, sortering og genanvendelse.**

Produktion

Tekstilvirksomheder kan bidrage ved at fremskaffe information om eller regulere indholdet af kemiske ind-

holdsstoffer i produktionen, men denne indsats vil først få effekt på længere sigt. Der er kommet fokus på at øge sporbarhed i værdikæden med EU's strategi for bæredygtige og cirkulære tekstiler og produktpas; et fokus der forventes at stige markant med konkretisering af strategien. Indførelsen af produktpasset vil formentlig skabe øget sporbarhed, men anvendelsen af den indsamlede information i form af produktmærkninger skal strømlines, og procedurer skal udvikles for at håndtere mærkningerne i genanvendelsesprocesser.

Sortering

Sorteringsteknologier, der kan detektere uønskede kemiske stoffer i tekstiler, vil potentielt have en stor positiv effekt, men dette vurderes at være en stor teknologisk udfordring, som ikke forventes at kunne løses med nuværende sorteringsteknologier. Der er derfor behov for flere nye initiativer og helt nye teknologier for at overkomme barrieren i sorteringstrinnet. Udfordringen skyldes primært, at detektionen skal kunne udføres på kort tid.

Genanvendelse

Genanvendelsesteknologier kan indeholde oprensnings-trin, der kan fjerne uønskede kemikalier inden (eller som en del af) genanvendelsen, men dette kræver et kendskab til, hvilke kemikalier der skal fjernes. Genanvendelse tilbage til polymerer og monomerer indbefatter allerede sådanne trin, men der er behov for sikring af, at den uønskede kemi rent faktisk bliver fjernet. For genanvendelse tilbage til fibre (mekanisk genanvendelse) findes der ikke løsninger til at oprense produkterne.



Figur 7: Genanvendelsespotentialitet angiver tekstilernes mulighed for at blive genanvendt. Genanvendelsespotentialitet for blandet tekstilaffald skal øges gennem sortering, sporbarhed og produktdesign, der bidrager til at ensarte affaldsstrømmene. Samtidig kan grænsen for, hvornår det er muligt at genanvende tekstilaffald, sænkes gennem udvikling af bedre genanvendelsesteknologier.



1. Materialer

Den største udfordring med tekstilmaterialer er, at de er ressourcekrævende at producere, og mange af de primære tekstilmaterialer er baseret på fossil råolie. Dog repræsenterer nye biobaserede og genanvendte materialer mulige fremtidige løsninger til problematikken.

Den første fase i tekstilernes livscyklus starter ved fremstilling af de rå tekstilmaterialer. Disse materialer er nøje udvalgt og udviklet på baggrund af deres evne til at blive spundet til garn og anvendt i tekstiler. I en cirkulær tekstilindustri vil materialer blive holdt i et kredsløb, men med en stigning i verdens efterspørgsel på tekstiler kombineret med tab af materialer under brug og i genanvendelsesprocesser vil der også fremadrettet være behov for at introducere nye tekstilmaterialer i kredsløbet.

Tekstilproduktion og -forbrug er i dag baseret på materialer såsom PET, bomuld, regenereret cellulose, nylon, akryl og uld. Materialerne har dog individuelle udfordringer. Bomuld og uld kræver store mængder vand og ressourcer og bidrager til drivhusgasudledningen. Syntetiske fibre som PET og nylon er fremstillet af råolie og har derfor et stort CO₂-aftryk. Selvom regenereret cellulose har en lavere miljøpåvirkning, kræver den kemikalier i produktionsprocessen.

I lyset af disse udfordringer ses alternative materialer som en mulig vej frem. Potentialerne ligger i genanvendte materialer, alternative naturfibre fra forskellige

kilder og biobaserede syntetiske tekstilmaterialer.

Selvom disse typer alternativer har potentiale, er der samtidig udfordringer, når det gælder styrke, termisk stabilitet, omkostninger og kompleksitet i genanvendelse. Særligt for genanvendte fibre gælder det, at der til nye produkter kan overføres uønskede kemikalier, såsom PFAS eller skadelige farvestoffer, som tidligere har været tilladte. Der er et presserende behov for at udvikle og implementere tekstilmaterialer, der i langt højere grad kan genanvendes, er fri for uønskede kemikalier, og som har et lavere ressourcebehov og en lavere CO₂-udledning fra tekstilproduktionen. For at fremme udviklingen og implementeringen af den nye type tekstilmaterialer er en kritisk vurdering af materialernes levetid, genanvendelsesmuligheder, effekt på ressourceforbruget og CO₂-udledning nødvendig. Samtidig er det afgørende fortsat at stræbe efter innovation og forbedring inden for disse områder.

Endelig er det - mens vi bevæger os mod mere bæredygtige løsninger - afgørende at sikre, at vi med velovervejede design- og produktionsmetoder ikke skaber yderligere problemer, særligt i forbindelse med genanvendelse og affaldshåndtering. Fremtidens tekstilmaterialer skal nemlig kunne sorteres og genanvendes, og de må samtidig ikke begrænse muligheden for at sortere og genanvende eksisterende tekstilmaterialer. Disse faktorer skal med i overvejelserne for at sikre, at introduktion af nye tekstilmaterialer på markedet bidrager til en bæredygtig og ansvarlig fremtid for tekstilindustrien.

Nuværende tekstilmaterialer

Langt de fleste tekstilmaterialer i dag er PET, bomuld, regenereret cellulose, nylon, akryl og uld, der samlet udgør over 90 % af alle eksisterende tekstilmaterialer. Materialerne har forskelligt ophav (Figur 8) – grundlæggende inddeles materialer i naturfibre (f.eks. bomuld og uld), regenererede fibre (f.eks. viskose) og syntetiske fibre (f.eks. PET og nylon). Historisk har de biobaserede tekstilmaterialer generelt været brugt længe til tekstil, mens de regenererede og syntetiske materialer og deres egenskaber er blevet udviklet og forbedret i løbet af de seneste hundrede år.

Naturfibre

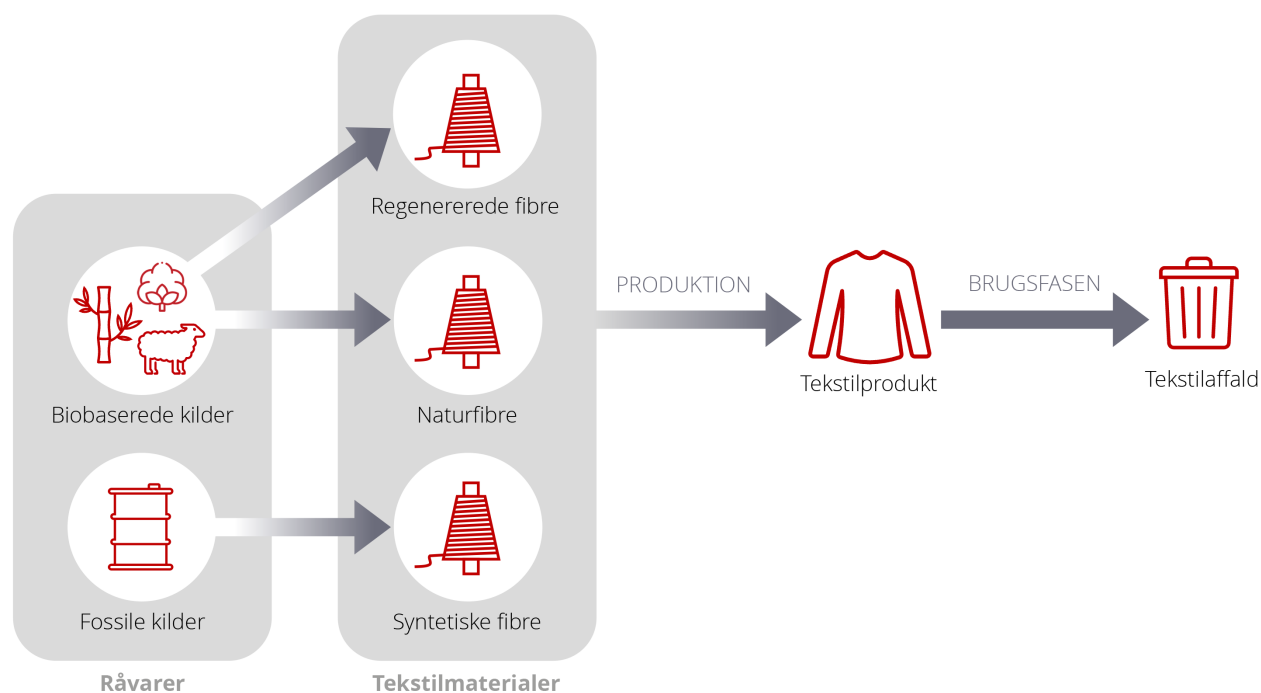
Naturfibre oprindelse og struktur er naturlig. Bomuld er i dag den mest anvendte naturfiber i tekstilmaterialer. Dog er materialet miljømæssigt udfordret på grund af det høje vand- og pesticidforbrug, der er forbundet med dyrkningen. Uld er også et populært naturmateriale, der ligeledes er udfordret miljø- og klimamæssigt, da opdræt af får og geder kræver meget landareal og udleder store mængder kvælstof og drivhusgas (metan). Dog har uld en række unikke og positive egenskaber såsom varmeisolering og åndbarhed og kræver desuden mindre vask, hvilket er svært at eftergøre med andre tekstiltyper. Generelt stiller de nuværende naturfibre høje ressourcekrav på grund af dyrkning af råvaren og den efterfølgende processing.

Regenererede fibre

Regenereret cellulose anvendes i høj grad grundet de færdige tekstilers naturlige fald, lave vægt og bløde tekstur. Materialet er syntetisk, hvilket betyder, at det ikke findes i naturen. Regenereret cellulose produceres hovedsageligt fra træ og bambus, hvorfra cellulose oparbejdes kemisk og raffineres til en fiber, der efterfølgende spindes til garn. Her har råvaren et lavere ressourceaftryk, hvorimod materialet er miljømæssigt udfordret grundet de anvendte kemikalier i processerne og det deraf følgende spildevand.

Syntetiske fibre

Syntetiske fibre fremstilles ud fra råolie (fossilt), hvilket betyder, at fibrene ikke findes i naturen. Det mest udbredte tekstilmateriale i denne kategori er PET, som udgør ca. halvdelen af det årlige globale tekstilvolumen. Andre udbredte fossilbaserede syntetiske tekstilmaterialer inkluderer nylon og akryl. Produktionen kræver anvendelse af kemikalier og høje temperaturer, hvilket giver generelle udfordringer ift. CO₂-aftryk og dannelse af giftige kemikalier og gasser, som skal håndteres. Fossilbaserede materialer kræver udvinding af råolie, der hidtil har ligget i jorden, og bidrager dermed til at øge mængden af kulstof i atmosfæren.



Figur 8: Nuværende tekstilmaterialer består af regenererede fibre, der stammer fra biologiske kilder, naturfibre, der stammer fra biologiske kilder, samt syntetiske fibre, der stammer fra fossile kilder.

De nuværende materials udbredelse afspejles af materialernes anvendelse. F.eks. har blandingen af PET og bomuld vundet stor udbredelse på grund af PET's lave pris og bestandighed over for krympning samt bomulds bidrag til åndbarheden. Ligeledes er der for tekstil med høje slidkrav, f.eks. erhvervstekstil/arbejdstøj, anvendt mere slidstærke materialer såsom bomuld med længere fiberlængder eller forstærkning med nylon. I dag er PET og bomuld de to mest udbredte tekstilmaterialer grundet det høje forbrug inden for modetekstiler. Blandede

tekstiler kan dog i sidste ende skabe udfordringer for genanvendelsesløsningerne, da disse kan være sværere at håndtere, afhængigt af teknologi (se mere i afsnit 6 om Genanvendelse). Der ligger derfor en klar udfordring i at balancere tekstilmaterialets sammensætning ift. dets anvendelse (f.eks. foer i jakker, elasticitet og holdbarhed) og dets genanvendelighed (f.eks. forsimpning af design og materialesammensætning), da disse parametre ofte kan være modstridende.

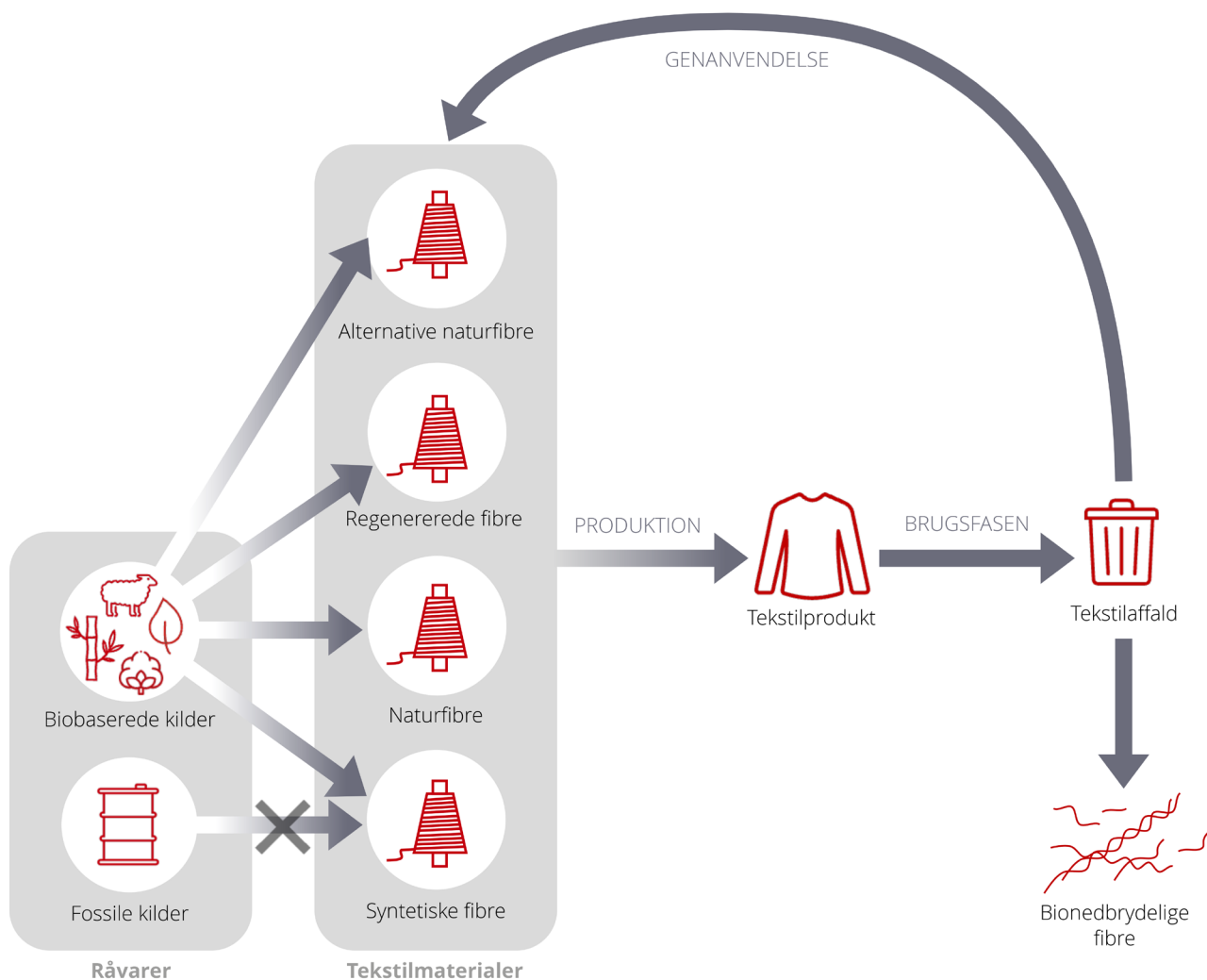


Fremtidens tekstilmaterialer

Hvis nutidens mest udbredte materialer fortsat benyttes, og behovet fortsætter med at stige, vil der i fremtiden ikke være ressourcer nok til at kunne imødekomme efterspørgslen, samtidig med at materialerne bidrager til den globale CO₂-udledning.

Det er derfor afgørende, at produktionsprocessen for fremtidens tekstilmaterialer kræver færre ressourcer og har en lavere CO₂-udledning. Der skal således produceres tekstilmaterialer, der f.eks. er baseret på reststrømme eller afgrøder, der kræver mindre vand og plads til at gro. For mange af fremtidens materialer kan det dog være en udfordring at finde tilstrækkeligt store volu-

mener af råvarerne, hvis de baserer sig på spildstrømme eller er begrænset til at kunne dyrkes i et særligt klima. Fremtidens materialer (Figur 9) vil formentlig kunne inddeles i: Alternative naturfibre fra andre biologiske kilder, biobaserede syntetiske tekstilmaterialer, genanvendte og regenererede fibre samt bionedbrydelige fibre. Dette vil således involvere ny produktion af de normalvis syntetiske materialer fra biologiske eller CO₂-baserede kilder samt identifikation af alternative biobaserede materialer fra f.eks. lokalt producerede materialer eller fra ressourceudnyttelse af overskuds- og restprodukter. Ressourcebehovet vil yderligere blive reduceret, når man kan benytte større grader af genanvendt materiale i tekstil. Der vil i fremtiden formentlig stadig blive anvendt konventionelle biobaserede og syntetiske tekstilmaterialer, omend i reduceret grad.



Figur 9: Fremtidige tekstilmaterialer vil formentlig bestå af en kombination af nuværende tekstilmaterialer samt af naturfibre fra andre biologiske kilder, biobaserede syntetiske tekstilmaterialer, genanvendte og regenererede fibre samt bionedbrydelige fibre.

Alternative naturfibre

Alternative naturfibre defineres her som materialer fra biologiske kilder, som ikke i dag anvendes i nogen særlig grad. Disse materialer har potentiale til i fremtiden at kunne erstatte nogle af de konventionelle materialer, der i øjeblikket bruges, på grund af et lavere ressourceforbrug ifm. produktion af materialerne. Eksempler på disse materialer er Spinnova², hør og hamp, som kan produceres lokalt, alle med et lavere vand- og pesticidforbrug end bomuld. Dog er hør- og hampefibre på nuværende tidspunkt væsentligt dyrere end bomuld, ligesom fibrenes egenskaber er anderledes; bl.a. er de stivere, hvilket skaber behov for en ressourcekrævende blødgøringsproces. Hørprodukter er i dag kommercielt tilgængelige, men materialet er udfordret af dens tilbøjelighed til at krølle og krympe, særligt under første vask. For hamp er innovationen og udviklingen inden for fiberfremstilling begrænset sammenlignet med f.eks. bomuld, og der er derfor potentiale for at forbedre både egenskaber og produktpriser².

En række alternative materialer baseret på fødevarer-af-fald fra kilder som appelsiner, kaffe og ananas har været under udvikling over en årrække³. Størstedelen af materialerne er dog stadig på demonstrationsstadiet, og generelt er det svært at indhente konkret information om udfordringerne forbundet med at udbrede anvendelsen af materialerne. Der er dog stadig potentiale for udvikling af alternativer til de konventionelle materialer på grund af et lavere ressourceforbrug og mindre CO₂-udledning. Dog er det afgørende ikke at gå på kompromis med materialernes levetid og genanvendelsesmuligheder. I den forbindelse udgør biobaserede materialer en udfordring, da de primært fremstilles af planter, og ikke ved hjælp af menneskeskabte teknologier. Det er derfor ikke muligt med kemiske genanvendelsesmetoder at omdanne de biologiske monomerer (glukose og aminosyrer) tilbage til nye tekstilmaterialer (se afsnit 6. Genanvendelse for mere information).

Biobaserede syntetiske tekstilmaterialer

Biobaserede syntetiske tekstilmaterialer er syntetiske materialer, der ikke findes i naturen, men som er baseret på biologisk materiale. Tekstilmaterialerne kan f.eks. være identiske med de fossilbaserede syntetiske tekstilmaterialer, såsom PET, eller alternativer hertil. Teknologierne til at konvertere det biologiske materiale er dog stadigvæk forholdsvis ineffektive og omkostningsfulde og er derudover baseret på kilder, der er i konkurrence med fødevarerindustrien, såkaldte '1.-generationskilder'. Dette har skabt interesse for at afsøge muligheden for at anvende andre biologiske kilder og udvikle alternativer til PET.

Fra fossilbaseret til biobaseret

PET produceres i dag ud fra fossil råolie, der trækkes op af jorden, hvorfra de ønskede monomerer isoleres. De præcis samme monomerer kan fremstilles fra biologiske kilder. På den måde er det muligt at producere biobaserede syntetiske fibre, der er identiske med de produkter, vi bruger i dag.

Biobaseret syntetisk PET er demonstreret af amerikanske Virent, amerikanske Anellotech og canadiske Ensyn, som har produceret råvarer (paraxylene) til produktion af PET fra biologiske kilder⁴. Produkt eksempler med 100 % biobaseret PET er kommet på markedet, f.eks. i et samarbejde mellem Virent og Patagonia⁵. Dog er produktionen af disse materialer udfordret af lave råvareudbytter, hvilket medfører, at der skal bruges store mængder biomasse til at producere råvarerne. Dette giver i sidste ende høje priser på materialet.

² Schumacher, Ana Gabriela Duque, Sérgio Pequito, and Jennifer Pazour. "Industrial hemp fiber: A sustainable and economical alternative to cotton." *Journal of Cleaner Production* 268 (2020): 122180.

³ Mistra Future Fashion report number: 2019:02 part 1

⁴ Sousa, A. F., Patrício, R., Terzopoulou, Z., Bikiaris, D. N., Stern, T., Wenger, J., ... & Guigo, N. (2021). Recommendations for replacing PET on packaging, fiber, and film materials with biobased counterparts. *Green Chemistry*, 23(22), 8795-8820.

⁵ <https://www.virent.com/news/virents-100-plant-based-technology-finds-sweet-success-with-patagonia/>, <https://www.patagonia.com/our-footprint/biobased-polyester.html>



Der er generelt et stort fokus på at producere de nuværende fossilbaserede råvarer fra biologiske kilder eller fra indfanget CO₂ (såkaldte 'drop-in kemikalier'), hvor hovedparten af udviklingen stadig foregår på universiteterne. Alternativt kan man også producere helt andre materialer fra CO₂ eller biologiske kilder, som kemisk set ligner de nuværende fossilbaserede materialer. Eksempler på dette er PEF produceret fra biomasse, som potentielt kan erstatte PET på mange punkter, og bl.a. hollandske Avantium udvikler produktionsteknologi til PEF og har allerede samarbejder med flere store virksomheder, herunder Carlsberg. PEF har gennemgået en hurtig udvikling, hvor materialet oprindeligt var udfordret af sin manglende termiske stabilitet, som førte til farvedannelse og tab af polymerlængde under produktionstrinene, men dette har nyere produktionsprocesser rettet op på⁶. PEF har gode egenskaber, som i nogle tilfælde er bedre end PET's. Indtil nu har PEF primært været anvendt til emballage, men det finder i stadig højere grad anvendelse inden for tekstil, hvilket bl.a. afsøges af danske Kvadrat⁷. En grundlæggende risiko ved brugen af PEF og andre lignende materialer er, at materialerne med høj sandsynlighed vil blive blandet med PET under genanvendelse, da materialerne er svære at kende forskel på for visse sorteringsteknologier. PEF-PET-blandingen har ringere egenskaber end de rene materialer, hvilket er en af de største udfordringer ved at introducere PEF på markedet.

Et andet materiale, som det er værd at nævne i denne sammenhæng, er PLA⁸, som ofte forbindes med dets anvendelse til 3D-print. PLA er et syntetisk biobaseret

materiale, som produceres fra mælkesyre og ligeledes nedbrydes til mælkesyre under kompostering. PLA anvendes allerede som et tekstilmateriale, og PLA-pellets til fiberspinning er lanceret af bl.a. danske Pond Biomaterials. Materialet er imidlertid udfordret af sin lavere styrke og meget lave termiske stabilitet sammenlignet med PET, hvilket især er en udfordring, når PLA-baserede tekstiler vaskes ved 60 °C eller stryges. Desuden brænder PLA lettere, hvilket kan være et problem for f.eks. møbelstoffer og gardiner. Der er derfor nogle mere grundlæggende udfordringer til hinder for PLA's udbredelse som tekstilmateriale, hvilket potentielt kan løses gennem en mere skånsom håndtering, f.eks. lavtemperaturvask. PLA kan sorteres ved hjælp af hyperspektral nærinfrarød (NIR)-teknologi og efterfølgende genanvendes. Denne teknologi skal dog implementeres på sorteringsanlæg, for at affaldsstrømmen i praksis kan udnyttes. Det sker ikke på nuværende tidspunkt, da der ikke er et marked for genanvendelse af disse materialer i Danmark⁹. Dette skyldes formentlig, at mængderne af PLA er små, og at der ikke er en reel efterspørgsel på genanvendt PLA.

Der arbejdes også med udvikling af andre nye materialer, hvis egenskaber dog endnu ikke er optimeret. Bl.a. PHA der er en polyester som alternativ til PET. Amerikanske Mango Materials producerer PHA-pellets til fiberspinning ud fra metangas, der kan komme fra bl.a. vandretningsanlæg og i fremtiden potentielt fra indfanget CO₂. Generelt er det kendt, at PHA er sprødere og har lavere mekanisk styrke end PET, samtidig med at prisen for PHA ofte er højere. Da materialet er mindre kendt i tekstilsammenhænge, mangler der validering af dets egenskaber.

⁶ Rosenboom, J. G., Hohl, D. K., Fleckenstein, P., Storti, G., & Morbidelli, M. (2018). Bottle-grade polyethylene furanoate from ring-opening polymerisation of cyclic oligomers. *Nature Communications*, 9(1), 2701.

⁷ <https://www.avantium.com/press-releases/avantium-and-kvadrat-sign-offtake-agreement-for-the-development-of-pef-for-interior-textiles/>

⁸ Yang, Y., Zhang, M., Ju, Z., Tam, P. Y., Hua, T., Younas, M. W., ... & Hu, H. (2021). Poly (lactic acid) fibers, yarns and fabrics: Manufacturing, properties and applications. *Textile Research Journal*, 91(13-14), 1641-1669.

⁹ Werther, I., Eriksen, M. H., Thellersen, D. B., Jørgensen, H., Opfølgning på biobaseret og bionedbrydelig plastik i Danmark, Miljøprojekt nr. 2223, januar 2023

Genanvendte og regenererede materialer

Genanvendelse af materialer anses som en nødvendighed for at maksimere udnyttelsen af tekstilråmaterialer, syntetiske såvel som naturfibre, og dermed sænke behovet for jomfruelige ressourcer. Der findes mange genanvendelsesteknologier, ligesom der konstant udvikles nye. Dette er beskrevet yderligere i afsnit 6. Genanvendelse. En klar udfordring for alle genanvendte materialer i dag er 1) risikoen for overførsel af uønskede kemiske indholdsstoffer fra produkternes tidligere liv og 2) deres forringede egenskaber sammenlignet med de tilsvarende jomfruelige materialer, ofte pga. reducerede fiber- og polymerlængder samt variation grundet forskelligartethed i materialestrømmen. Disse barrierer er især udfordrende, når materialet skal cirkulere og genanvendes flere gange. Der anvendes derfor sjældent mekanisk genanvendte materialer fra post-consumer tekstilaffald uden sporbarhed i nye tekstiler, og sjældent i ren form, men i stedet i kombination med jomfruelige materialer, så produktet stadig kan opfylde sine tekniske krav ift. anvendelsen. Udviklere af genanvendelsesteknologier og designere fokuserer dog på at løse udfordringerne med tab af mekaniske egenskaber.

"Samarbejde inden for cirkulær økonomi er afgørende. Vi skal fokusere på løsninger, der skaber stor positiv forandring fremfor at fortabe os i enkeltstående nicheprojekter. Sammen kan vi skabe en bæredygtig fremtid for modebranchen."

- Camilla Skjønning Jørgensen, BESTSELLER

Genanvendt PET, eller rPET, er i dag udbredt, men disse tekstiler kommer fra omsmeltede flasker, som i dag er den eneste mulighed for at genanvende PET til tekstiler på kommerciel skala, primært fordi materialerne

herfra er af højere kvalitet og renlighed end tekstil-PET. At genanvende fødevaregodkendt plast til tekstiler er dog ikke optimalt, da det fjerner høj kvalitetsplast fra sit eget kredsløb og derfor anses som en 'downcycling' af materialet, også kaldet lavkvalitetsgenanvendelse¹⁰. Plasten fra brugte flasker skal ifølge EU's tekstilstrategi forblive i sit eget lukkede kredsløb, og ikke bruges i tekstiler¹¹.

Regenereret cellulose kan fremstilles ud fra bomuld, og materialet klassificeres derfor som et genanvendt materiale (se mere i afsnit 6. Genanvendelse). Der findes mange virksomheder, som beskæftiger sig med dette, bl.a. Södra og Lenzing, som oprindeligt har brugt cellulose fra træ, men som nu har udviklet teknologi til at oparbejde cellulosen fra bomuldstekstil (Södras OnceMore og Lenzings REFIBRA).

En helt central barriere for udbredelsen af mekanisk genanvendte fibre er risikoen for overførsel af uønskede kemikalier til nye produkter. Dette skyldes den manglende viden om ophavet til det genanvendte materiale. Hvis det tidligere har været teknisk tekstil med brandhæmmere, f.eks. gardiner, eller hvis det grundet alder indeholder kemiske stoffer, der på nuværende tidspunkt ikke overholder gældende lovgivning, vil disse uønskede kemiske indholdsstoffer potentielt ende i nye produkter. Forskellige teknologier er under udvikling for at skabe gennemsigtighed på produktniveau, f.eks. blockchain til registrering af materialets historik samt kemiske sporstoffer (f.eks. DNA eller fluorescerende metaller), der kan følge materialet på dets rejse og aflæses, når det er nødvendigt¹². Disse teknologier er endnu ikke implementeret, men er under kraftig udvikling grundet det store behov for dem. For de tekstilprodukter, der på nuværende tidspunkt er i omløb, vil disse mærkningsteknologier ikke nå at få en effekt. Her vil det i stedet være gavnligt at kunne detektere tilstedeværelsen af kemikalier i tekstilerne under sorteringen af tekstilaffaldet. Dette er en stor teknologisk udfordring grundet forskelligheden af kemikalierne og den påkrævede detektionshastighed og forventes derfor ikke at være en teknologisk mulighed på kort sigt.

¹⁰ Guldberg, A., Adrian, A. H., Poll, C., Petersen, H. G., Hvam, M., Bigum, M., Hirsbak, S., Sønderhousen, U., Fauerby, S. B., Cirkulær genanvendelse, Ingeniørforeningen IDA, November 2021

¹¹ EU-strategien for bæredygtige og cirkulære tekstiler, juni 2023

¹² <https://www.fibretrace.io/>

Bionedbrydelige tekstiler

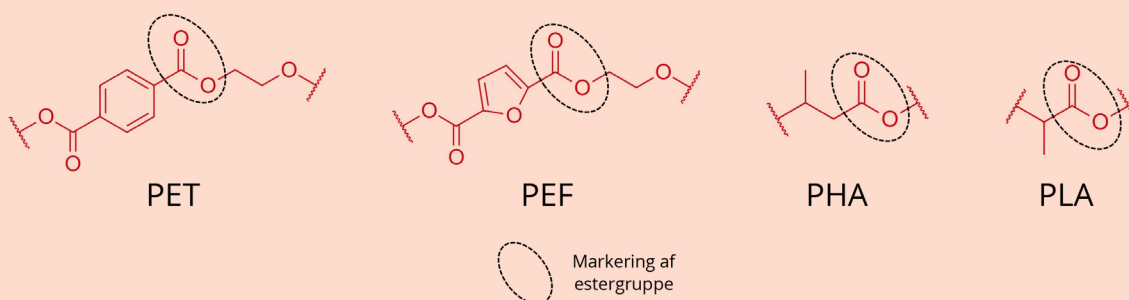
Materialer kan være bionedbrydelige, hvilket betyder, at minimum 90 % af materialets masse kan omsættes af organismer (bakterier og svampe) inden for en given tidsramme. Materialer kan være biobaserede uden at være bionedbrydelige, da biobaseret refererer til, at materialet kommer fra en biologisk kilde, mens bionedbrydelig refererer til, at materialet kan nedbrydes biologisk under kontrollerede forhold. Desuden kan både syntetiske og biobaserede materialer være bionedbrydelige. Bionedbrydeligheden er afhængig af specifikke miljøer, som fremmer nedbrydningen, f.eks. tilstedeværelsen af vand, ilt og temperatur samt tilstedeværelsen af svampe og bakterier. Langt størstedelen af de bio-

nedbrydelige materialer skal komposteres i industrielle anlæg. Dette betyder, at bionedbrydelige tekstiler ikke nødvendigvis kan nedbrydes i naturen og ikke inden for tidsrammen, især ikke i Norden, hvor temperaturen ofte hæmmer bionedbrydningen. Selvom disse materialer kan nedbrydes efter endt brug, er de dog stadigvæk ressource- og energikrævende at producere, og det er derfor nødvendigt, at materialerne først udnyttes gennem genbrug og genanvendelse. I nogle lande faciliterer affaldshåndteringen i dag ikke, at materialer kan genanvendes, og her kan bionedbrydelige materialer bidrage til at minimere affaldsophobning.

Polyester vs. PET

Polyester er en fællesbetegnelse for alle stoffer, der indeholder flere (poly) af den kemiske grupper 'ester' (Figur 10). Polyester dækker både over PET, PEF, PHA og PLA.

PET er en forkortelse for det kemiske navn '*polyethylenterephthalat*', der er den bestemte type polyester, som primært anvendes til fremstilling af tekstiler.

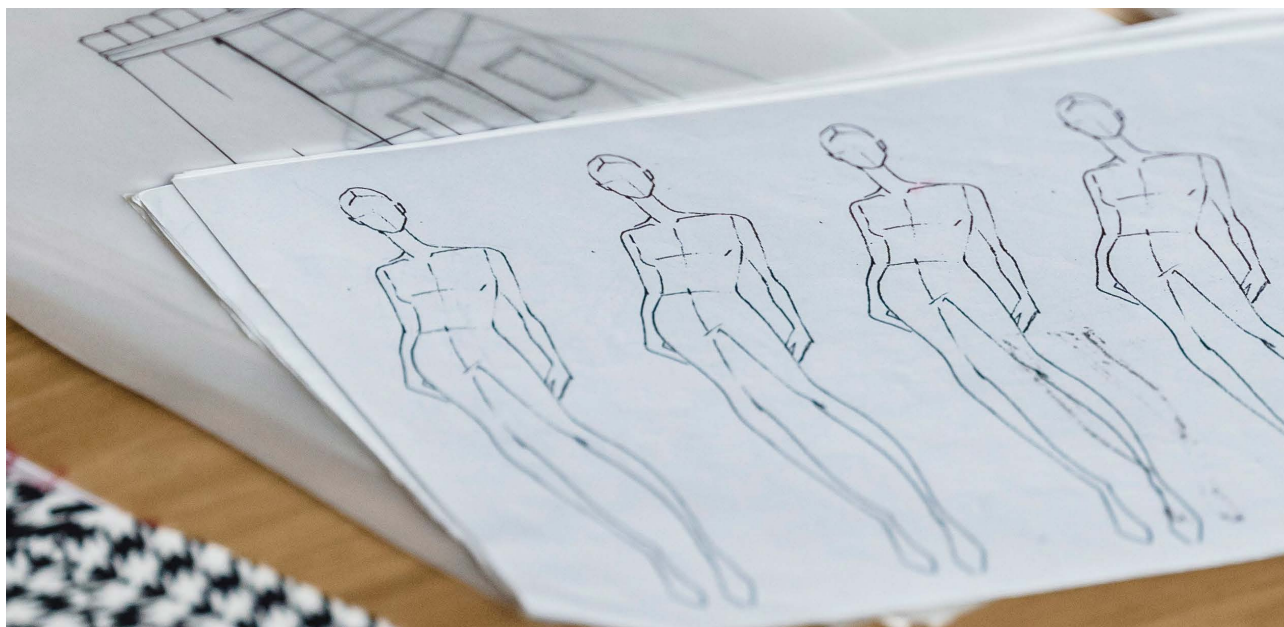


Figur 10: Udsnit af den kemisk struktur for PET og PLA, hvor den kemiske estergruppe er markeret med stiple ring.









2. Produktdesign

At designe mere miljøvenlige tekstiler kræver en bred, tværfaglig viden om, hvordan tekstiler produceres, sorteres og genanvendes i den pågældende virksomheds værdikæde. Denne viden er typisk udenfor tekstilvirksomhedernes kernekompetencer. Dog kan nye designmetoder bidrage til implementeringen af nye og genanvendte materialer.

I produktets designfase bliver der taget en række beslutninger, som har afgørende betydning for produktets ressourceforbrug, og på hvordan produktet i slutningen af dets livscyklus kommer til at bevæge sig ned igennem affaldshierarkiet (Figur 11). Som eksempel kan tilføjelse af små mængder elastan til en bomuld eller PET-T-shirt gøre, at den hverken kan sorteres eller genanvendes med nuværende teknologier¹³. Overgang til mere bæredygtige og cirkulære produkter i tekstilindustrien kræver derfor en ny tilgang til designprocessen, hvilket er et fokuspunkt i EU med den kommende Ecodesign-forordning¹⁴.

Enkelte tekstilvirksomheder har udviklet designguides, men udfordringen består i at omsætte disse retningslinjer til konkrete handlinger i den enkelte virksomhed. Balancegangen består i at designe et produkt, der kan sorteres og genanvendes, men samtidig lever op til

kravene ifm. produktets anvendelse. Her er forståelse af et produkts fulde livscyklus, fra produktion til genanvendelse, afgørende for på et oplyst grundlag at kunne træffe beslutninger i designprocessen. Desværre er mangel på vidensudveksling og konstant teknologisk udvikling, især i affaldshåndteringsfasen, ofte en barriere for, at tekstilvirksomheder opnår og vedligeholder denne forståelse. Digitale værktøjer til simulering af miljøpåvirkning kan anvendes i designfasen, men de tager ikke højde for hvordan tekstilprodukter produceres og affaldshåndteres i virksomhedens egen værdikæde, og risikerer derfor at lede til beslutninger, der ikke nødvendigvis leder til mere miljøvenlige tekstilprodukter.

Med det forventede skift fra jomfruelige materialer baseret på råolie til genanvendte og nye biobaserede fibre i fremtiden vil der være behov for at udvikle nye designmetoder. Disse metoder skal kunne håndtere materialernes ændrede kvalitet og egenskaber. Dette afgørende skift vil kræve en bevægelse mod 'materialeledet design', hvor produktdesign er baseret på de specifikke egenskaber og begrænsninger af de tilgængelige materialer. Selvom denne tilgang til design i øjeblikket er en niche, forventes den at blive meget mere udbredt i den nærmeste fremtid.

¹³ Cura, Kirsti, et al. "Textile recognition and sorting for recycling at an automated line using near infrared spectroscopy." *Recycling* 6.1 (2021): 11.

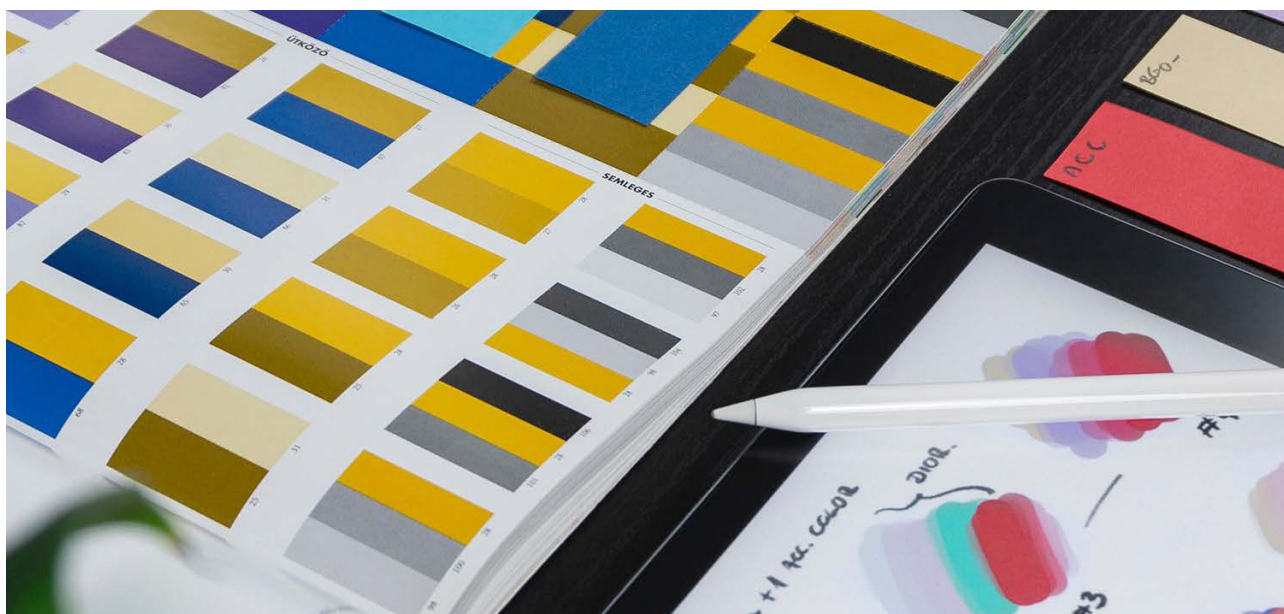
¹⁴ EU-strategien for bæredygtige og cirkulære tekstiler, juni 2023

Designguides

Enkelte tekstilvirksomheder har investeret i den nødvendige viden for at kunne udvikle designguides, der beskriver, hvordan designfasen kan bidrage til at minimere miljøpåvirkningen af tekstiler. Nogle designguides er offentligt tilgængelige, men den kompleksitet, der er forbundet med at designe produkterne til både at kunne leve op til anvendelsesafhængige kundekrav og til at kunne bevæge sig langsomt igennem affaldshierarkiet bevirker, at konkrete og handlingsorienterede guidelines er svære at generalisere til en bredere kategori af tekstiler. I stedet er mange designguides formuleret som en proces, hvor forståelse af produktets målgruppe og forventet anvendelse skal danne grundlag for beslutning om den videre designproces, der bl.a. indeholder materialevalg og udseende. Til denne fase er der typisk defineret en række fokusområder, der skal tænkes ind i produktdesignet såsom at designe til lang levetid, adskillelse og minimering af affald. Erfaringer fra blandt andet sektorsamarbejdet viser dog, at disse offentligt tilgængelige designguides ofte bliver for simple og for generiske til at kunne implementeres direkte i de fleste tekstilvirksomheder. Udfordringen består således i at omsætte designguides til konkrete handlinger i design-

processen hos den enkelte tekstilvirksomhed.

At træffe de optimale designvalg kræver viden om, hvordan et produkt håndteres igennem hele dets livscyklus, herunder i det marked, produktet lanceres på. Dette er en viden, som kan være vanskelig at opnå for den enkelte virksomhed, da gennemsigtheden tilbage i værdikæder kan være begrænset, og fordi sorterings- og genanvendelsesteknologier placeret senere i produktets livscyklus er under konstant udvikling. Forskellige digitale værktøjer til at simulere miljøpåvirkningen af forskellige produktdesigns er i dag tilgængelige¹⁵. I øjeblikket fokuserer disse platforme dog primært på CO₂-udledning som måleparameter, og de anvendte databaser er baseret på globale gennemsnit, som derfor ikke er repræsentative for individuelle virksomheders værdikæder. På trods af platformenes nuværende begrænsninger kan de stadigvæk anvendes som generisk ledesnor i designfasen i deres nuværende form, men simpliciteten risikerer at danne grundlag for designvalg, der ikke nødvendigvis fordrer øget cirkularitet. Det er forventeligt, at disse former for services vil udvikle sig markant inden for de næste par år ved bl.a. at inkludere mere nøjagtige og virksomhedsspecifikke data.



¹⁵ <https://www.maalbar.dk/>, <https://apparelcoalition.org/the-higg-index/>, <https://www.2030calculator.com/>, <https://bawear-score.com/>

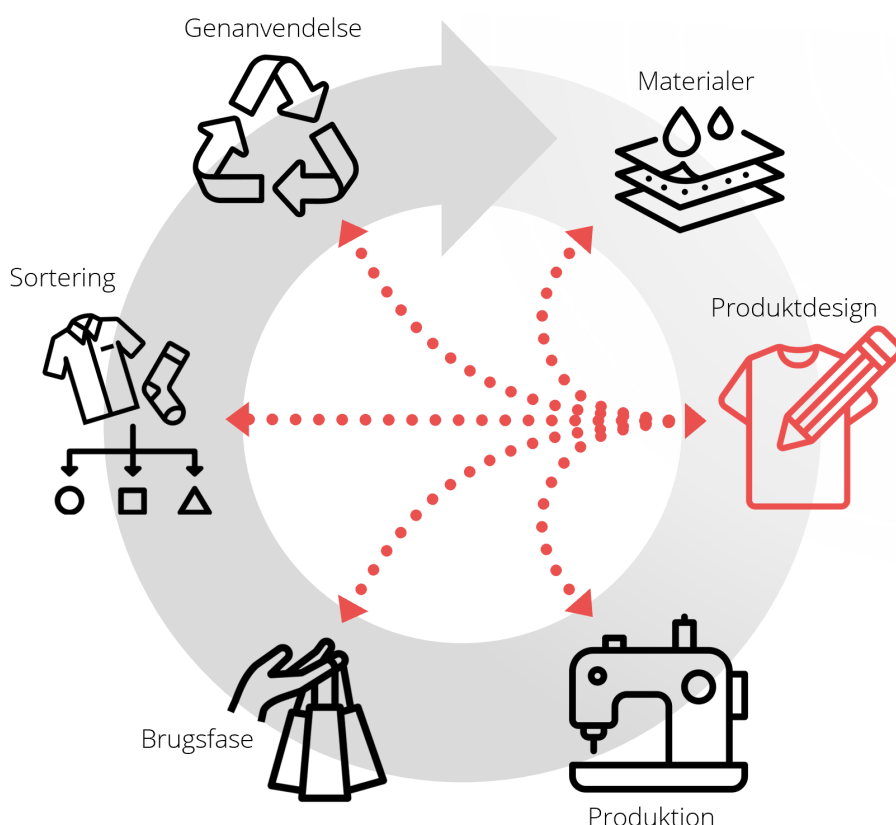
Fremtidens produktdesign

Som beskrevet i afsnit 1 vil der i fremtiden ske et skift i brugen af tekstilmaterialer fra jomfruelige materialer baseret på råolie til genanvendte og nye biobaserede fibre. Mange virksomheder har allerede forsøgt at inkorporere genanvendte fibre i nye produkter¹⁶, og udover det manglende kendskab til kemikalieindholdet (se afsnit 1 og 6) består den største udfordring i at skabe produkter med en kvalitet tilsvarende jomfruelige produkter. Dette skyldes, at fiberegenskaberne og ensartetheden for genanvendte fibre er anderledes end deres tilsvarende jomfruelige materialer. Dette er især en udfordring ved post-consumer genanvendelse (efter endt brugsfase) i forhold til ved pre-consumer genanvendelse (genanvendelse inden brug f.eks. produktionsspild). For at kunne producere produkter af tilfredsstillende kvalitet af både genanvendte fibre og nye biobaserede fibre er det nødvendigt at udvikle nye designmetoder,

der tager udgangspunkt i de nye materials egenskaber. Dette felt kaldes 'materialeledet design', som er modsætning til den klassiske 'designtænkning', hvor anvendelsen i stedet dikterer de ønskede fibertyper. Materialeledet design vil kunne hjælpe med implementeringen af nye tekstilmaterialer.

"EU's strategi for bæredygtige og cirkulære tekstiler er en katalysator for forandring, men vi kan ikke sidde afventende, til lovgivningen ligger fast. Vi bliver nødt til at skabe innovative løsninger nu."

- Marie Josephine Mustelin, Dansk Erhverv



Figur 11: Beslutninger taget i forbindelse med produktdesign har betydning for alle andre dele af et tekstilprodukts livscyklus. Samtidig påvirker ændringer og udvikling i alle andre dele af værdikæden, hvilke valg der er de rigtige at tage i designfasen.

¹⁶ <http://www.ecap.eu.com/take-action/fibre-to-fibre/>





3. Produktion

Den globale tekstilproduktion skal udlede mindre CO₂, reducere miljøforurening, forbruge færre ressourcer, og være mere gennemsigtig, men størstedelen af tekstilproduktionen ligger i dag uden for landets grænser. Dog har Danmark en unik mulighed for, gennem øget samarbejde i værdikæden samt udvikling og overførsel af danske miljøteknologier, at bidrage til en mere miljøvenlig tekstilproduktion.

Produktionen af tekstilprodukter involverer alle de procesled, der er nødvendige for at omdanne råmaterialer til anvendelige produkter. I 1990'erne blev omtrent 20.000 produktionsjobs i tekstilbranchen nedlagt i Danmark, da størstedelen af tekstilproduktionen blev flyttet til udlandet for at reducere prisen på tekstilprodukterne¹⁷. I dag er det meste af tekstilproduktionen stadig placeret i udlandet og er primært drevet af omkostningsreduktioner, og i mellemtiden er vigtig viden om produktionsprocesser og metoder i den forbindelse gået tabt i Danmark. Størstedelen af danske tekstilvirksomheder fokuserer i stedet på design og lancering af tekstiler, mens fremstillingen primært foretages i eksterne leverandørkæder, hvor bl.a. viden om, hvilke kemikalier der tilsættes tekstilerne, kan være svær at fremskaffe.

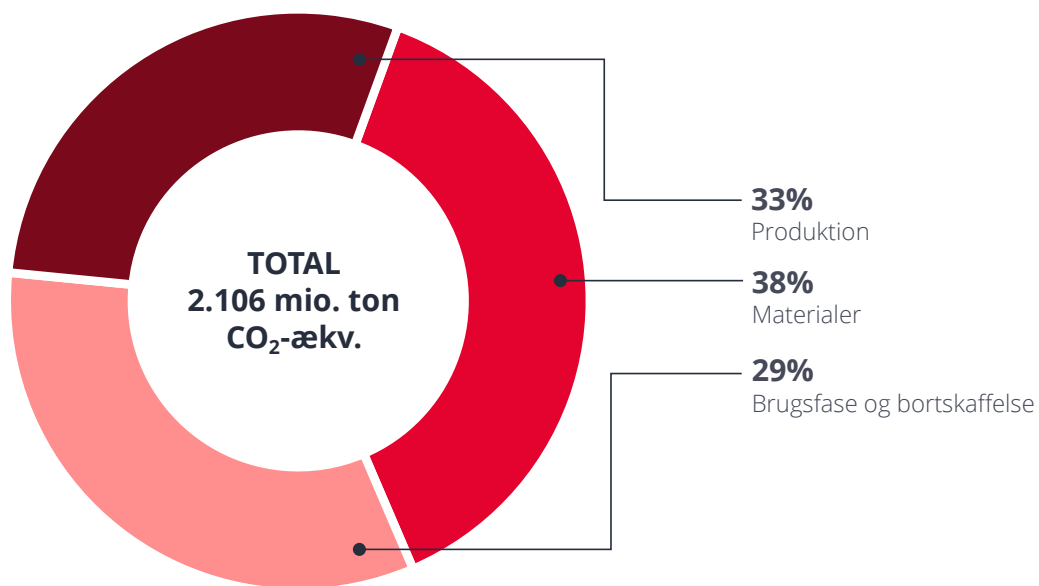
Tekstilproduktion omfatter en række ressourceintensive processer såsom spinning, vævning, farvning, efterbehandling mv., som bruger store mængder vand, energi og kemikalier. Udregnet i CO₂-ækv. tegner produktionen sig for 1/3 af miljøbelastningen fra tekstiler (Figur 12).

I fremtiden skal produktionen i højere grad være ressourceeffektiv, og der er derudover behov for, at information fra de forskellige processtrin, herunder anvendelse af kemikalier, dokumenteres for at skabe gennemsigtighed. Dette kan opnås ad flere veje. Øget samarbejde i værdikæden, såsom strategiske partnerskaber eller finansielle investeringer kan hjælpe danske virksomheder med at udøve betydelig indflydelse på produktionsleddet og samtidig højne det tekniske videniveau indenfor tekstilproduktion i Danmark.

Flytning af tekstilproduktion tilbage til Danmark eller til nærtliggende områder (reshoring eller nearshoring) kan bidrage til bæredygtighed, men er forbundet med udfordringer som prisstigninger og mangel på produktionskompetencer i det danske arbejdsmarked. Implementering af automatiseret produktion kan dog bidrage til at gøre disse tiltag rentable.

Sidst, men ikke mindst, kan overførsel af innovative og teknologiske tiltag bidrage til at gøre tekstilproduktionen mindre miljøbelastende. Investering i udvikling og overførsel af miljøvenlige teknologier, herunder automatiseret produktionsudstyr, digital printteknologi eller vandrensningsteknologi, vil styrke både den danske tekstilindustri konkurrencekraft og bidrage til at reducere dens globale miljøpåvirkning. Derfor opfordres der til strategisk støtte til teknologisk innovation, udvikling af kompetencer og bæredygtige samarbejder for at styrke dansk bidrag til omstilling af den globale tekstilindustri.

¹⁷ <https://ldcluster.com/portfolio-item/sylab-mode-og-tekstilproduktion-i-danmark/>



Figur 12: Udledning af CO₂-eq fra værdikæden for tøj og sko fordelt på fremstilling af materialer, produktion og brugsfase samt bortskaffelse. Figuren er baseret på data fra kilde 18.

¹⁸ Berg et al. McKinsey & Company and Global Fashion Agenda, 2020

Øget samarbejde i værdikæden

En måde, hvorpå danske virksomheder kan få indflydelse på produktionsleddet, er ved at skabe de rette rammer for at fremme teknologiudvikling i produktionsleddet, herunder konkret at efterspørge mere bæredygtige produktionsteknologier med bedre arbejdsforhold og lavere ressourceforbrug i form af kemikalier, vand og energiforbrug. Dette er i overensstemmelse med CSDDD-direktivet fra EU, som gør due diligence for bæredygtighed lovpligtig¹⁹. Produktionsleddet besidder stor viden og er i stand til at udvikle og tilbyde nye teknologiske løsninger, og for at holde sig konkurrencedygtige vil disse virksomheder være nødsaget til at udbyde de produktionsløsninger, der efterspørges af markedet²⁰. Et eksempel på dette ses i Bangladesh, der er verdens andenstørste producent af færdigsyede tekstiler. Eksporten af tekstiler udgør 80 % af landets eksport, hvoraf størstedelen eksporteres til EU. Som reaktion på den stigende efterspørgsel på mere bæredygtige tekstiler har den bangladeshiske centralbank (Bangladesh Bank) i samarbejde med landets regering oprettet en 'teknisk opgraderingsfond' til tekstilproducenter på 100 millioner dollars, der skal understøtte den grønne omstilling i den bangladeshiske tekstilindustri²¹. Mange danske tekstilvirksomheder oplever dog, at deres manglende tekniske viden om tekstilproduktion kan skabe kommunikationsudfordringer i forbindelse med at konkretisere, hvad de efterspørger. Der er derfor behov for i den danske tekstilindustri at løfte den tekniske indsigt og viden inden for tekstilproduktion. Dette vil hjælpe virksomhederne med dels at træffe de rigtige beslutninger og stille de rigtige krav til produktionsleddet, dels at navigere i beslutningsprocesser i forbindelse med produktionen af de produkter, danske virksomheder bringer på markedet.

En anden måde, hvorpå danske tekstilvirksomheder kan skabe kontrol og indsigt i produktionsleddet, er ved at indgå i partnerskaber på tværs af værdikæden eller gennem ejerskab over produktionen. For møbeltekstiler og tekniske tekstiler ses det i højere grad, at produktionsleddet enten ejes af danske virksomheder, eller at produktionen er placeret i Danmark. Dette giver tekstilvirksomhederne den nødvendige kontrol over produktionen til at sikre, at strenge kvalitetskrav imødekommes. For størstedelen af danske tekstilvirksomheder vil det i stedet være tilstrækkeligt blot at styrke

kommunikationen på tværs af værdikæden for at opnå den nødvendige indflydelse. Dette kan være igennem industrielle værdikædesamarbejder, partnerskaber eller gennem danske virksomheders finansielle investering i teknologiudvikling i produktionsleddet. Generelt vil sådanne partnerskaber på tværs af værdikæden give danske virksomheder en større indflydelse på tekstilproduktionen, samtidig med at det bidrager til at højne vidensniveauet i Danmark inden for tekstilproduktion. Dette kræver dog, at danske tekstilvirksomheder er villige til at afsætte tiden og de nødvendige ressourcer til at indgå i partnerskaber for at få den ønskede viden og indflydelse. Institutioner som Udenrigsministeriet kan være en hjælp til at identificere muligheder og etablere samarbejde på tværs af landegrænser.

Re- eller nearshoring af produktion

I takt med at mere bæredygtige produkter efterspørges af forbrugerne, har en række danske tekstilvirksomheder spekuleret i at flytte produktion tilbage til Danmark (reshoring) eller til et nærtliggende land (nearshoring). Dette vil give mulighed for at få en større kontrol over og gennemsigtighed i produktionsprocessen, og dermed mulighed for at tage ansvar for at mindske de negative miljøpåvirkninger fra f.eks. forbrug af vand, kemikalier og energi. Dette er dog ikke uden udfordringer. Hvis nuværende produktionsteknologier overføres direkte fra udlandet til Danmark, vil den dyrere danske arbejdskraft medføre en betydelig stigning i de resulterende produktpriser, hvilket vil sænke produkternes konkurrencekraft på det internationale marked. Som tidligere nævnt vil der ligeledes være mangel på produktionskompetencer på det danske arbejdsmarked til at kunne varetage denne opgave, hvilket vil tage flere år at genopbygge.

En anden tilgang vil være at udnytte Danmarks styrkeposition inden for innovation til at skabe automatiserede produktionsfabrikker, der kræver mindre manuelt arbejde, og som på den måde kan opnå en konkurrencedygtig produktpris. Syrobotter, som f.eks. Sewbots, har været kommercielt tilgængelige i en årrække og er opsat i forbindelse med bl.a. Sylab²². Derudover har startupvirksomheden Rodinia Generation etableret en produktionsfabrik, hvor både print, udskæring og syning er automatiseret. Syrobotter er dog typisk begrænsede i

¹⁹ https://commission.europa.eu/business-economy-euro/doing-business-eu/corporate-sustainability-due-diligence_en

²⁰ <https://thetradecouncil.dk/indsigter/verden-rundt/fokus-paa-baeredygtige-vaerdikaeder-i-tyrkiet>

²¹ <https://thetradecouncil.dk/publikationer/oekonomiske-himmelflugt-inden-for-groenne-tekstiler-og-faerdigsyet-toej-i-bangladesh>

²² <https://www.hustandclaire.com/dk/sylab>

²³ <https://softwearautomation.com/>



"Teknisk viden om materialer, produktdesign og produktion af tekstiler er afgørende for at få tekstilindustrien igennem den grønne omstilling."

- Poul-Erik Jørgensen, VIA University

deres anvendelsesmuligheder, og i dag bruges de derfor primært til at sy simple tekstiler såsom T-shirts²³. På sigt er potentialet i automatiseret tekstilproduktion betydeligt, men den lave produktionskapacitet kan på nuværende tidspunkt ikke matche den efterspørgsel på tekstiler, der p.t. imødekommes af udenlandske produktionsled.

Nye teknologiske tilgange til tekstilproduktion

Selvom tekstilproduktionen primært ligger uden for Danmark, vil der være en mulighed for Danmark i at bidrage med teknologisk udvikling, der kan overføres til den nuværende værdikæde og således rykke tekstilproduktion i en mindre miljøbelastende retning. Igen er dette en unik mulighed for at udnytte Danmarks styrkeposition inden for innovation og teknologiudvikling, hvor erfaring fra andre brancher kan overføres til at løse komplekse udfordringer i tekstilproduktionen. Danmarks manglende tekniske forståelse af tekstilproduktion giver her en mulighed for at være nyskabende og for at gentænke og supplere traditionelle produktionsteknologier.

Tidligere teknologiudviklinger, der har skabt helt nye løsninger og suppleret den nuværende værdikæde, er digitale printteknologier til tekstiler som erstatning for

traditionelle stykfarvninger eller skærmpoint, der er storbidrager til industriel forurening af vand via kemikaliespild, og som desuden kræver et stort vandforbrug²³. Som eksempel bruger skærmpoint omtrent 50-60 liter vand pr. kvadratmeter stof, hvorimod digitale printteknologier kræver omtrent 2 liter pr. kvadratmeter stof²⁴. Problemet med netop vandforurening er endnu et område, hvor dansk teknologi kan gøre en forskel for tekstilindustrien. Den danske regering har en strategisk vision om at fordoble eksport af dansk vandteknologi til at løse verdens vandproblemer, fra 20 mia. DKK i 2019 til 40 mia. DKK i 2030²⁵. Her er Danmark langt foran, hvad angår vandrensningsteknologier, og bl.a. Indien er et oplagt eksportmarked grundet det store vandforbrug og -forurening forbundet med tekstilproduktion²⁶.

Som nævnt i afsnit 1 vil fremtidens råmaterialer til tekstiler have andre egenskaber end de mest anvendte materialer i dag, og det vil kræve et tæt samspil mellem design og produktion at udvikle nye metoder til at producere høj kvalitetstekstiler ud fra disse råmaterialer. Den globale spredning af design og produktion komplicerer et sådant samspil, og for at løse denne udfordring har en række aktører i den danske tekstilindustri investeret i en national R&D-fabrik, hvor nye fibertyper udvikles og afprøves, og produktionsmetoder optimeres²⁷. Igen er det tanken, at viden genereret i Danmark på lille skala kan overføres og skabe effekt i den globale tekstilindustri.

²⁴ A new textiles economy: Redesigning fashion's future, Ellen MacArthur Foundation, 2017

²⁵ <https://www.texintel.com/blog/2018/8/6/digital-textile-printing-will-save-40-billion-litres-of-water-in-2018>

²⁶ <https://mim.dk/nyheder/2021/nov/eksportstrategi-for-vand/>

²⁷ <https://thetradecouncil.dk/publikationer/tekstilindustrien-i-indien>

²⁸ <https://via.ritzau.dk/pressemeddelelse/13698065/nyt-forskningsprojekt-skal-gore-danmark-forende-indenfor-baeredygtig-tekstilproduktion?publisherId=9534582&lang=da>

Pre-consumer vs. post-consumer

Tekstilaffald, der produceres, før tekstilerne har været ude i brugsfasen, f.eks. i form af afskær fra garn eller stof under produktionen, betegnes som pre-consumer tekstilaffald. Denne type affald kendetegnes ved at have en høj grad af ensartethed og sporbarhed.

Tekstilaffald, der genereres efter at have været i brug, betegnes som post-consumer tekstilaffald. Typisk blandes dette affald sammen med andet tekstilaffald, hvilket reducerer ensartetheden.

Der er langt flere og større barrierer forbundet med genanvendelse af post-consumer frem for pre-consumer tekstilaffald. Udover den reducerede ensartethed tilsættes der også en række kemikalier i forarbejdningen af tekstilerne, som typisk undgås i pre-consumer affald. Derudover mistes sporbarheden, når produktet har været ude i brugsfasen.





4. Brugsfase

En af de største udfordringer i overgangen til en bæredygtig og cirkulær tekstilindustri er det høje forbrug af tekstiler, især i lande med høj velstand. Forbruget skal sænkes gennem primært ikke-teknologiske løsninger, men eksisterende og kommende teknologier kan bidrage indirekte ved at nedbryde adfærdsbarrierer og således facilitere en ændring i forbrugeradfærd.

En forlængelse af brugsfasen for de enkelte tekstilprodukter har længe været foreslået som en måde til at reducere det høje forbrug af nye tekstilprodukter og dermed også forbruget af jordens ressourcer. Dertil kommer, at en forlængelse af brugsfasen vil bidrage til affaldsforebyggelse ved at udskyde, hvornår tekstilerne skal bevæge sig ned igennem genanvendelseshierarkiet. Forlængelse af brugsfasen for tekstiler er bestemt af flere faktorer, herunder produktkvalitet, forbrugers tilknytning til produktet og muligheden for vedligeholdelse og reparation. I dagens tekstilindustri er der en tendens til, at lave priser og kortvarige trends ofte munder ud i udskiftning af tøj fremfor reparation og genbrug, hvilket nu udfordres af EU's tekstilstrategi, der forsøger at gøre op med 'fast-fashion' og det høje forbrug af nye tekstiler²⁹.

Teknologiske løsninger kan bidrage til f.eks. at ændre forbrugeradfærden ved at informere forbrugeren om, hvor lang tid produktet forventes at kunne holde, og

hvor stor en del af produktet, der derefter kan genanvendes (Figur 13). Implementering af teknologier som blockchain, kunstig intelligens og digitale tvillinger kan være med til at fremskaffe denne information om tekstilproduktets livscyklus og formidle det til forbrugeren i købsituationen. Derudover er nye teknologier tilgængelige, der tager højde for individuelle kropsmål, og som i højere grad kan sikre god pasform og en mere personlig tilknytning til tekstilprodukterne.

Reparation og vedligeholdelse af tekstiler er centrale for at forlænge tøjets levetid, men den nuværende lave pris på nyt tøj kombineret med manglen på nemme reparationsmuligheder betyder, at det er for nemt blot at købe nyt tøj. Mere miljøvenlige vaskeprocesser, der både forbruger mindre vand og energi og samtidig slider mindre på tekstilerne, kan bidrage til at forlænge levetiden for tekstilprodukter og samtidig minimere miljøpåvirkningen.

Omstrukturering af forretningsmodeller, som f.eks. overgangen fra traditionelle produktionsvirksomheder til servicevirksomheder, der tilbyder tekstilleje, har potentiale til at reducere ressourceforbruget og øge produktets levetid. Udvikling af sådanne modeller bør fremmes for at sikre en mere bæredygtig tekstilindustri. Disse tiltag kræver teknologiske og adfærdsmæssige ændringer samt en omfattende gentænkning af forretningsmodellen for tekstilindustrien.

²⁹ Pressemeddelelse, 27/4-2023: Ending fast fashion: tougher rules to fight excessive production and consumption. European Parliament, 2023.

Kvalitet og personlig tilknytning

En forlængelse af brugsfasen er tæt forbundet med tekstilets kvalitet og forbrugernes tilknytning til produktet. Både funktionel (fit og pasform), æstetisk (udseende og design) og fysisk (holdbarhed) kvalitet er afgørende for, hvor meget og hvor længe tekstiler bliver brugt. Størstedelen af tekstilprodukter er i dag lavpris-produkter, hvilket er foranlediget af årtiers pris-konkurrence i tekstilindustrien med værdikæder, der nu er optimeret til at kunne producere store mængder tekstilmaterialer. Denne udvikling har medført, at det sjældent virker økonomisk meningsfuldt at reparere tøjet, og dermed levetidsforlænge, eller at købe brugte tekstiler frem for at købe nye. Skiftende trends betyder samtidig, at der er et større incitament til at købe nyt frem for at reparere og levetidsforlænge. Dette er et fokuspunkt for EU i forbindelse med EU's tekstilstrategi, der forsøger at gøre op med billige og hurtigt udskiftelige tekstiler under sloganet 'Putting fast fashion out of fashion'³⁰.

"Der er meget viden og mange teknologier i den industrielle vaskeribranche, som forlænger levetiden samt øger muligheden for genbrug og genanvendelse. U hensigtsmæssig og forkert vask kan forkorte levetiden for tekstiler drastisk."

- Lasse Rafiq Hangaard, Dansk Industri

Der findes teknologier til at producere produkter af høj kvalitet, men efterspørgslen fra forbrugerne på lavprisprodukter regulerer udbuddet. I stedet bør den teknologiske indsats fokuseres mod at guide og ændre efterspørgslen fra forbrugeren. Ved at udnytte teknologiske muligheder for digital formidling, tagging og videregivelse af informationer kan viden om tekstilernes genanvendelsesmuligheder eller forventede levetider, f.eks. i form af antal gange, tekstilerne kan vaskes, formidles, og brugeren vil i højere grad kunne træffe et oplyst valg i købsituationen og dermed omsætte ambitioner til handling i den grønne omstilling. En ændring i adfærden vil formentligt ikke ske alene på baggrund af information, f.eks. i en QR-kode, men kræve udvikling af digitale formidlingsværktøjer. Data

for tekstilprodukters forventede levetider vil gøre det muligt at udregne miljøbesparelser ved f.eks. at købe genbrugstekstiler eller reparere sine produkter; en information, som forbrugeren kan reklamere med i sit netværk. Behovet for gennemsigtighed i værdikæden og mulighederne med det kommende produkt-pas har givet afsæt til udviklingen af teknologiplatforme, der baserer sig på teknologier som blockchain, kunstig intelligens og digitale tvillinger, og som gennem produktdata dokumenterer tekstilprodukternes rejse fra fiber til butik³¹. Flere virksomheder tilbyder denne ydelse, og udrulning af disse teknologier sker allerede i form af partnerskaber med store tekstilvirksomheder³².

Det er dog ikke kun produkternes fysiske kvalitet, der begrænser produkters levetid. Studier viser, at to tredjedele af tekstilprodukter kasseres af andre grunde³³. I stedet er det produkternes pasform og forbrugernes personlige tilknytning til produktet, der begrunder størstedelen af bortskaffelsen. Den dårlige pasform skyldes formentlig, at den klassiske størrelsesklassificering, hvor kropstyper inddeles i et begrænset antal klasser, ikke i tilstrækkelig grad afspejler forskelligheden i menneskelige kropsformer. Teknologisk set har det affødt muligheden for at specialdesigne produkter gennem online platforme, hvor forbrugeren indtaster egne kropsmål. Derudover er teknologier som Augmented Reality (AR) og Virtual Reality (VR) blevet brugt til at visualisere forskellige tekstilmaterialers pasform og materialernes naturlige fald på animerede kroppe³⁴, og 3D-kropsscanninger er blevet brugt til at tage kropsmål automatisk og dermed sikre en god pasform for specialproduceret tøj³⁵. I øjeblikket er disse teknologier begrænset til produktion i småskala, hvilket delvis skyldes det højere prisniveau forbundet med teknologien og den efterfølgende produktion af tekstilerne. Hvis disse teknologier skal opskaleres, skal der investeres i udvikling af større og mere effektive, automatiserede og digitale produktionsmaskiner til fremstilling af tekstilerne baseret på de individuelle kropsmål, som kan styrke forretningsgrundlaget og øge produktionskapaciteten. Hvis disse opmålingsteknologier udbredes til den bredere tekstilbranche, og god pasform sikres, vil mængden af produktreturnering, fejlkøb og tidlig kassering formentlig kunne reduceres markant.

³⁰ EU-strategien for bæredygtige og cirkulære tekstiler, juni 2023

³¹ <https://www.atma.io/>, <https://www.retraced.com/>, <https://www.tex-tracer.com/>, <https://textilegenesis.com/>

³² Pressemeldelse 19/4-2022: Med banebrydende blockchain-samarbejde vil BESTSELLER spore 25 millioner stykker tøj

³³ <https://clothingresearch.oslomet.no/2022/10/19/review-of-clothing-disposal-reasons/>

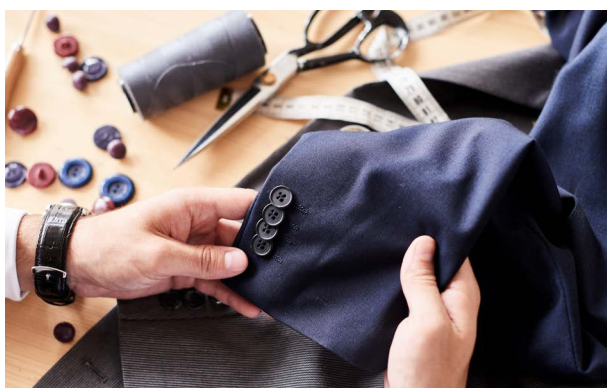
³⁴ Pressemeldelse 5/2-2021: Dansk modebrand lancerer sine kollektioner i virtual reality

³⁵ <https://mond.com/da/3d-kropsscanning/>

Vedligehold og reparation

For de tekstilprodukter, hvor slitage er den primære kasseringsårsag, er vedligeholdelse og reparation nødvendig for at forlænge brugsfasen. I dag bruger danskere under 0,1 % af deres tøjbudget på at reparere slidt tøj, hvilket primært skyldes den lave pris for nyt tøj kombineret med den manglende tilgængelighed af reparationsmuligheder og besværet forbundet med at reparere tekstilerne selv³⁶. Dette er et fokuspunkt i EU, der bl.a. ønsker at gøre reparation nemmere for forbrugeren gennem krav til produktdesigns, der gør det nemmere at reparere, samt formidling af viden til forbrugerne for at fremme reparation³⁷. For netop at fremme selvreparation har en række virksomheder udviklet selvklæbende reparationsplastre, nemt påførbare lapper og udskiftelige lynlåsglidere. Derudover er platforme blevet udviklet til at skabe nem adgang til skræddere, der tilbyder afhentning og levering af tekstilprodukterne som en del af servicen³⁸. Igen består udfordringen i, at udgiften til reparation er af samme størrelsesorden som prisen for et nyt stykke tøj. Det er muligt, at reparationsudgifter på sigt kan reduceres ved udvikling af automatiserede reparationsteknologier, men automatisering af reparation er udfordrende på grund af opgavens forskellighed og automatiseringsteknologiers manglende fleksibilitet. En sådan løsning forventes derfor ikke at være tilgængelig på kort sigt.

En anden mulighed for at forlænge tekstilers fysiske levetid ligger i vedligeholdelse gennem optimering af vaskeprocesser. Vaskeprocesser har stor påvirkning på tekstilers miljøaftryk i brugsfasen i form af vandforbrug, sæbedosering og vasketemperatur. På dette felt er der sket store teknologiske fremskridt, og især inden



for industriel vask er vaskeprocesser blevet optimeret ift. mindsket ressourceforbrug og slid på tekstilerne, bl.a. ved brug af blødt vand, lavere temperaturer og nye vaskemidler. Denne udvikling har potentiale til at blive overført til privatvask, hvor der i dag er blevet udviklet bedre sæbepræparater, automatisk dosering og mere energieffektive vaskeprogrammer. Meget af denne viden er allerede implementeret i mere miljømæssigt skånsomme vaskeprogrammer, som tilbydes i nyere vaskemaskiner til privat brug. Studier viser dog, at en stor del af miljøgevinsten fra den positive teknologiudvikling i vaske- og tørreprocesser modvirkes af private forbrugeres øgede vaskefrekvens³⁹. Dette viser tydeligt, at teknologiudvikling sjældent kan stå alene, men skal kombineres med en ændring af adfærd.

Forretningsmodeller

Grundlæggende gentænkning af de forretningsmodeller, der i dag anvendes af de fleste tekstilvirksomheder, har stort potentiale for at reducere forbruget af tekstilprodukter. Der afprøves i øjeblikket forskellige forretningsmodeller på testskala, herunder leasing/leje og take back-systemer, og på nuværende tidspunkt er det ikke afklaret, hvilke modeller der har de største økonomiske og miljømæssige potentialer og den største tilslutning fra forbrugerne.

En forretningsmodel, der har et særligt potentiale for at bidrage til den cirkulære økonomi, og som kan overføres til forbrugertekstiler, er for en salgsvirksomhed at overgå til at blive en servicevirksomhed, hvor der tilbydes adgang til at bruge tekstiler frem for at eje dem. I denne model er økonomisk vækst principielt afkoblet fra ressourceforbrug.

Virksomheder, der tilbyder vask af tekstiler for andre virksomheder såsom Textilia (tidl. De Forenede Dampvaskerier) og Elis, praktiserer denne model for arbejdstøj til offentlige og private virksomheder. I denne model er den udlejende virksomhed ansvarlig for logistik og vask af produkterne, hvilket skaber et incitament til at indkøbe tekstilprodukter i højere kvalitet og til at optimere vaskeprocedurer og andre vedligeholdelsesindsatser.

³⁶ <https://www.dr.dk/nyheder/viden/klima/knaekket-lynlaas-og-hul-i-buxsen-er-blevet-et-kaempe-klima-problem-vi-bruger-kun>

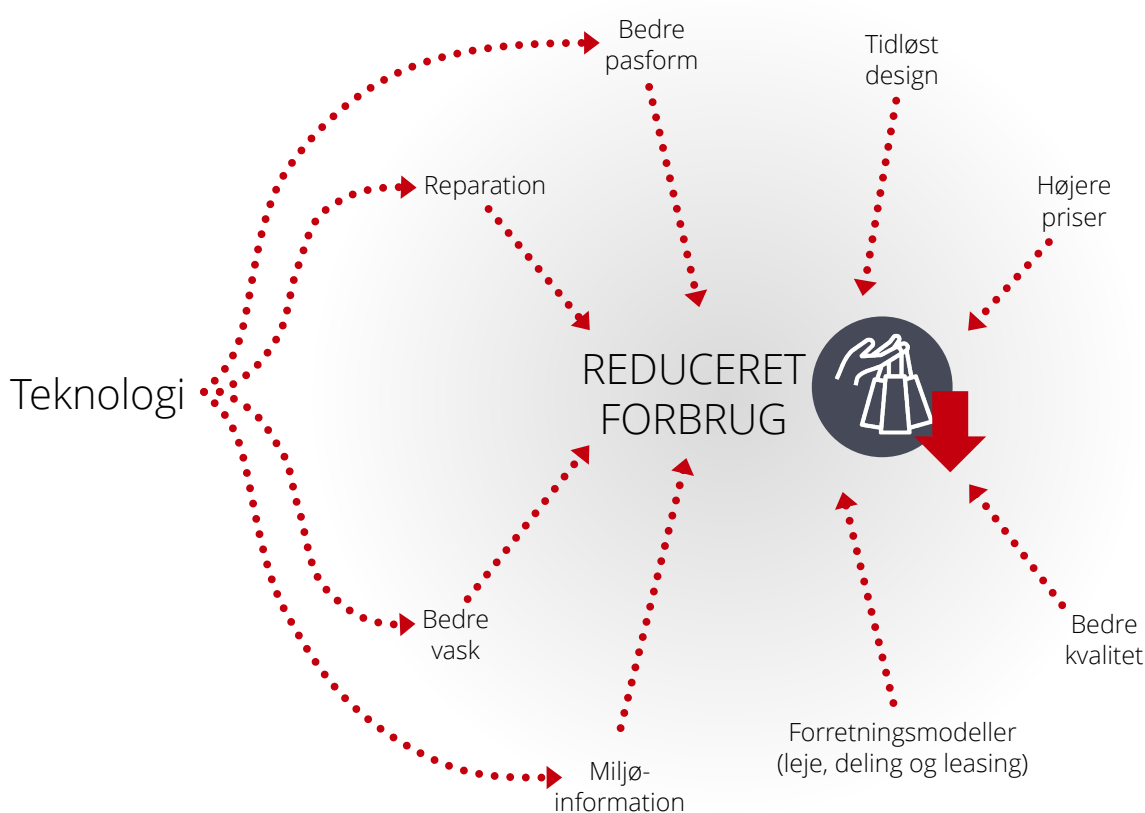
³⁷ EU-strategien for bæredygtige og cirkulære tekstiler, juni 2023

³⁸ <https://www.nordictailors.com/>

³⁹ Laitala, K., Boks, C., & Klepp, I. G. (2011). Potential for environmental improvements in laundering. Tidsskrift for Teknologi og Kultur, 20(1), 17-30

Ligeledes er der strømme af homogene tekstilprodukter efter endt brug, hvilket øger genanvendelsespotential. Denne forretningsmodel er i princippet overførbart til privat regi, hvor forbrugere kan abonnere på en ordning, der leverer adgang til en delt mængde tøj, som kan lejes. Dette formodes at resultere i, at det enkelte stykke tøj bliver brugt mere, og at forbrugerne således køber mindre tøj⁴⁰. Inden for B2B-branchen er udnyttelsen af de enkelte tekstilprodukter dog ofte forhindret

af bl.a. virksomhedsspecifikke logoer og farver, hvilket resulterer i, at der i dag ofte købes helt nyt tøj ved opstart af nye udbud eller samarbejdsaftaler. Der findes enkelte eksempler på fjernbare print og transfertryk, f.eks. udviklet af den svenske virksomhed Vividye, hvor forbehandlingen af tekstilet gør det muligt at fjerne efterfølgende tekstilprint. Teknologien er ved at blive udbredt, bl.a. i samarbejde med mærket Gina Tricot.



Figur 13: Der er mange faktorer, der kan bidrage til at reducere forbruget af tekstiler. Teknologiske løsninger har potentiale til indirekte at påvirke forbruget, men det vurderes ikke, at teknologiske løsninger alene kan skabe ændringer i forbrugeradfærden.

⁴⁰ <https://detkollektiveklaedskab.dk/>, <https://www.anothercloset.dk/>

Udledning af mikroplast fra tekstiler

En særlig udfordring forbundet med vask af tekstilprodukter består i udledningen af mikroplast gennem vaskevandet. Under vaske- og tørreprocesser vil tekstilprodukter langsomt degradere gennem mekanisk slid og kemisk nedbrydning i reaktion med afblegning, skyllemidler og vaskepulver. Denne degradering resulterer i mikroplast fra især syntetiske tekstiler såsom PET, nylon og elastan. Der er allerede adskillige initiativer og både høj- og lavteknologiske løsninger under udvikling for at adressere dette problem, herunder filtre, der kan monteres på vaskemaskiner⁴¹. Desuden har vandforbruget under vask vist sig at være særligt afgørende for udledningen, hvor et højere forhold mellem vand og mængden af syntetiske tekstiler medfører en større udledning af mikroplastik. En måde til at reducere dette problem kan være præventivt at udvaske mikropla-

stik før brugsfasen, da studier viser, at den største udledning sker de første gange, tekstilerne vaskes⁴². Udledningen af mikroplast kan også reduceres gennem indsatser i produktions- og designfaserne, hvor f.eks. fnugdannelse har vist sig at være mindre ved garn med høj torsion.

Nyt tøj bruges oftere

Der er en klar tendens til, at tøj bruges mere, når det er nyt. Tøj, der er mindre end to år bruges omkring 30 gange om året, mens tøj der er over 15 år bruges omkring 3 gange om året.⁴³

⁴¹ <https://www.microfibreconsortium.com/>

⁴² Durable, repairable and mainstream: How ecodesign can make our textiles circular - a report by ECOS, April 2021

⁴³ Laitala, K. and Klepp, I.G. (2021) 'Clothing longevity: the relationship between the number of users, how long and how many times garments are used.'





5. Sortering

Sortering af tekstiler skal i højere grad skabe ensartede affaldsstrømme, så mængden af genanvendeligt tekstilaffald øges. Der er stort fokus på at udvikle bedre NIR-scannere og andre sensorteknologier, der kan trække mere information ud af tekstilaffaldet.

Sorteringen er første skridt i valoriseringen af tekstilaffaldet og er afgørende for, hvordan affaldet håndteres i affaldshierarkiet. Sortering skal sikre, at flest mulige tekstiler genbruges, og at genanvendelige tekstiler finsorteres ud i fraktioner, der kan genanvendes. Med lanceringen af husstandsindsamling af tekstilaffald er mængden af tekstiler, der skal sorteres, steget markant, hvilket stiller krav til sorteringskapaciteten. I dag foregår den første del af tekstilsorteringen (forsortering) udelukkende manuelt, hvilket er både omkostningsfuldt og tidskrævende. Dele af processen såsom frasorteringen af ikke-tekstiler eller våde tekstiler kan potentielt automatiseres med videreudvikling af eksisterende teknologi, men en fuldt automatiseret løsning for selve genbrugsvurderingen eksisterer ikke. På lang sigt kan teknologier som billedgenkendelse og kunstig intelligens potentielt gøre det muligt at forsortere fuldt automatisk.

Den efterfølgende finsortering kan i dag foretages automatiseret og er primært baseret på NIR-teknologi, men teknologiens evne til at udtrække informationer om f.eks. fibertyper (særligt fiberblandinger) er ikke tilstrækkelig. Disse teknologier er under konstant udvikling, men der er behov for yderligere forskning i supplerende teknologier, som kan identificere produktslitage eller produkttype for i højere grad at kunne sikre, at tekstilaffald udsorteres til at kunne genanvendes bedst muligt i fremtiden (Figur 14).

I det store billede er løbende forbedring og implementering af teknologiske fremskridt indenfor sortering og effektive take back-systemer nødvendige for at facilitere genanvendelse og genbrug af tekstiler og dermed bidrage til en mere bæredygtig tekstilindustri.

"Vi skal sikre en holistisk systemisk udvikling, hvor alle led i kæden hænger sammen. Der ligger masser af viden i vores tekstilaffald, som er vigtig at bringe i spil."

-Annette Braunstein, DAKOFA



Forsortering

Formålet med forsortering er at udsortere tekstiler til genbrug og bortsortere ikke-tekstiler, så den resterende fraktion udelukkende består af genanvendelige tekstiler, der sendes videre til finsortering. Bortsorteringen omfatter ikke-tekstiler såsom legetøj, tasker og lignende, der ved en fejl er kommet i affaldsfraktionen, kontamineret tekstiler, der er uegnede til genbrug eller genanvendelse pga. fugt, malerpletter, oliepletter eller tilsvarende, samt genbrugelige tekstiler, der sendes til genbrug i eller udenfor Danmark.

I sorteringen er valoriseringen af selve tekstilaffaldet begrænset, og derfor skal omkostningerne forbundet med dette trin holdes nede. I dag er det muligt at forsørte semiautomatisk ved brug af transportbånd, men selve vurderingen af genbrugelighed sker manuelt, da vurderingen er subjektiv, hvilket gør forsorteringen til et økonomisk krævende trin. Grundet det subjektive aspekt af vurderingen forventes det ikke, at vurdering af genbrugspotentialet vil kunne fuldautomatiseres i den nærmeste fremtid. Når parametrene for genbrugelighed er kendte, vil der på lang sigt være mulighed for automatisering ved brug af teknologier såsom billedgenkendelse og kunstig intelligens. For bortsortering af ikke-tekstiler forventes det derimod, at teknologier på

kort sigt kan videreudvikles til at genkende og bortsortere fremmede objekter. Virksomheder såsom ARIS Robotics arbejder med billedgenkendelse og kunstig intelligens til sortering af affald, og en sådan teknologi vurderes at kunne overføres direkte til at bortsortere ikke-tekstiler, som i øjeblikket udgør omtrent 5 % af affaldet⁴⁴. Våde og kontamineret tekstiler skal også bortsorteres, men de udgør en større teknologisk udfordring. Dette skyldes, at fugtighedssensorer og kemiske detektionssensorer er udviklet til at kunne måle og udlæse et signal med hastigheder fra få minutter og op til flere timer. For at kunne håndtere de store mængder tekstilaffald er det nødvendigt at kunne måle og udlæse et signal på få sekunder eller derunder. Teknologier til at detektere vand, kemiske komponenter eller biologisk vækst i tekstiler i realtid forventes derfor ikke at være tilgængelig i nærmeste fremtid, men kan være et teknologisk fokuspunkt på lang sigt.

Som alternativ til at kassere våde tekstiler har en række virksomheder, inkl. Københavns Kommune, igangsat et projekt for at affugte tekstilerne i store tørrecontainere. Dette tilføjer et fordyrende og ressourcekrævende trin i tekstilernes opgradering, men vil omvendt øge mængden af tekstiler, der sendes til både genbrug og genanvendelse og dermed minimere mængden, der sendes til forbrænding⁴⁵.

⁴⁴ UFF Humana, Miljørapport 2022-2023

⁴⁵ <https://circularcph.cphsolutionslab.dk/cc/news/new-partnership-tackles-the-challenge-of-wet-textile-waste>

Finsortering

Formålet med finsortering er at udsortere de genanvendelige tekstiler i fraktioner, der bedst muligt matcher inputkravene til de forskellige genanvendelsesprocesser. Det er her bl.a. nødvendigt at sortere i forhold til farve, fibersammensætning, tekstiltype og applikationer. Det er i dag muligt at foretage automatiseret finsortering af tekstiler, og anlæg er kommercielt tilgængelige. Disse anlæg bygger på NIR- og farvespektroskopi, som kombineres med en klassificeringsalgoritme, der kan omsætte den målte data til en bestemt materialetype eller farve. Disse teknologier kan kombineres med røntgen, som kan supplere identificeringen. Selvom kommercielle anlæg er tilgængelige baseret på disse teknologier, har teknologierne en række begrænsninger, som i dag reducerer sorteringsgraden og dermed også effektiviteten af den efterfølgende genanvendelsesproces.

En af de primære udfordringer består i at identificere sammensætningen af fibre i et tekstilprodukt, hvilket især gør sig gældende, hvis fibrene er til stede i små mængder, hvis produktet består af mange typer fibre, eller hvis produktets overflade ikke er repræsentativt for produktet. Dette skyldes, at sorteringsteknologierne har en begrænset følsomhed, som forhindrer detektion af små fiberkoncentrationer, og at teknologierne kun måler produktets overflade på et meget begrænset område. Desuden vil mørke tekstiler svække signalet fra disse teknologier betydeligt, hvilket komplicerer udfordringen yderligere. Virksomheder, der udbyder disse teknologier, kender begrænsningerne, og der arbejdes derfor løbende på at optimere teknologierne ved at forbedre datakvaliteten og udvikle bedre klassificeringsalgoritmer.

For at gøre sorteringsteknologier i stand til i højere grad at kunne udsortere i fraktioner, der matcher kriterierne for genanvendelsesteknologier, vil der være behov for udvikling af supplerende teknologier, som kan udtrække andre produktinformationer. Finsortering er i dag begrænset til de identifikationsmuligheder, som NIR, farvespektroskopi og røntgen har, hvor sortering ud fra andre parametre som limrester og fibernedbrydning kræver brug af nye metoder, f.eks. hyperspektrale ka-

2-strømsløsning for tekstilaffald

Det er blevet besluttet at bruge en 2-strømsløsning for tekstilaffald i Danmark. Det betyder, at borgerne fortsat skal indlevere genbrugeligt tøj til genbrug, mens tekstilaffald er blevet en del af den husstandsne nære affaldsindsamling. Det ses dog, at både genbrugeligt tekstil og tekstilaffald ender begge steder, og der er derfor fortsat behov for forsoring af det husstandsnært indsamlede tekstilaffald⁴⁹.

meraer kombineret med nye billedgenkendelsesalgoritmer. Derudover er der, på trods af eksisterende teknologier under udvikling⁴⁶, stadigvæk behov for at forbedre identificering og fjernelse af trims, såsom lynlås og knapper fra tekstilfraktionerne. Den primære udvikling af sorteringsteknologier i Danmark foregår på universiteter, i vidensinstitutioner og i specialiserede virksomheder. Sideløbende med dette foregår der industrielle udviklingsaktiviteter hos brugere af teknologierne, f.eks. NewReTex.

Der er potentiale for at udnytte produktmærkninger til at løse finsorteringsudfordringen, og der eksisterer effektive og billige mærkningsteknologier, der kan indeholde produktinformationer, og som kan aflæses digitalt af en scanner. Det er en udbredt teknologi i forbindelse med industriel vask, hvor radiofrekvensidentificeringsmærker (RFID) er monteret på produkter og bl.a. indeholder information om fibersammensætningen⁴⁷. Teknologien kan således bruges til at udsortere produktet, uden at det er nødvendigt at måle på selve produktet. Der er dog flere væsentlige barrierer forbundet med implementeringen af denne løsning i den bredere tekstilindustri, herunder at alle tekstilproducenter i fællesskab skal beslutte sig for den samme mærkningsteknologi, at informationen i mærkningen skal være korrekt, og at forbrugeren ikke må fjerne mærkningen i brugsfasen. Derudover skal mærkningen kunne fjernes igen, inden produktet sendes til genanvendelse, da disse processer formentlig ikke vil kunne håndtere mærkerne.

⁴⁶ <https://www.wieland.nl/en/innovation-fiber-farming/>

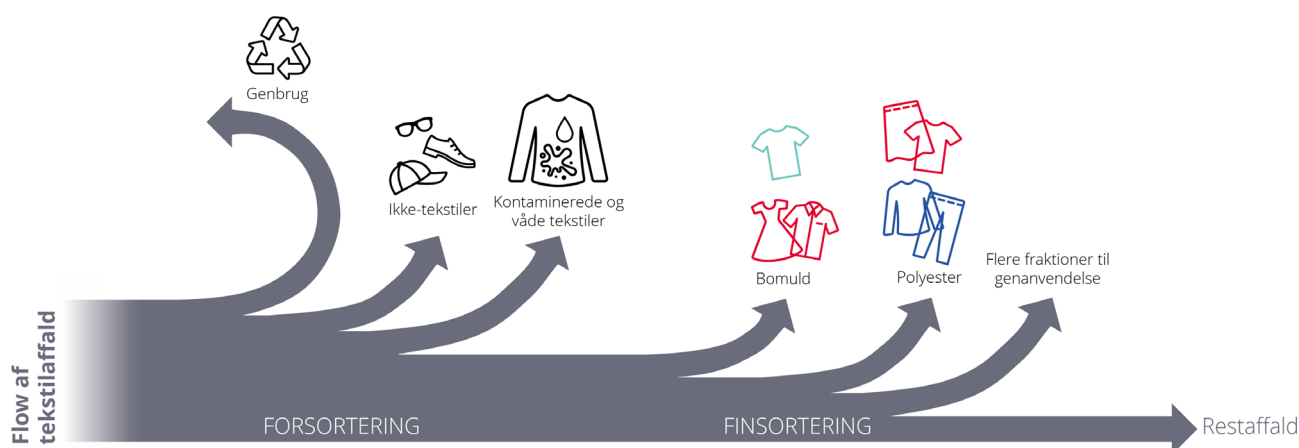
⁴⁷ <https://www.jensen-group.com/products/product-detail/futurail-and-inwatec-collaboration.html>

Take-back

Mange tekstilvirksomheder arbejder hen imod at tage deres produkter tilbage i et lukket take back-system. Fordelen er her, at virksomhederne har en dybdegående viden om tekstilernes indhold, som de kan bruge til at vurdere, hvorvidt produkterne skal genbruges, genfremstilles eller genanvendes. Denne mulighed skal vurderes ift. alternativet, som vil være, at forbrugerne indleverer de funktionelle tekstiler direkte til genbrugsbutikker og defekte tekstiler direkte til genanvendelse via den husstandsnaere tekstilindsamling eller genbrugsstationer. Hvis tekstilerne består af gængse materialer som polyester og bomuld vil det formentlig være tilstrækkeligt at lade produkterne gå gennem den kollektive indsamlingsordning, da genanvendelsesplanlægning i storskala i øjeblikket optimeres til netop disse fraktioner. Når det gælder produkter bestående af mindre konventi-

onelle tekstiler, som f.eks. arbejdstøj, monomaterialer og nylonstrømper, kan det være mere hensigtsmæssigt for virksomheder at indsamle produkterne separat med henblik på at afsætte dem til en fokuseret genanvendelsesteknologi.

Vurderingen af de produkter, der tages tilbage i en take back-ordning, medfører en arbejdsbyrde, som er omkostningsfuld for tekstilvirksomhederne, da håndteringen og kvalitetsvurderingen, i forhold til om produkterne kan genbruges, typisk vil være manuel og dermed tidskrævende. Dette har affødt platforme, der fysisk håndterer alt i forbindelse med take back-ordninger, kvalitetssikring og gensalg af tekstilprodukter på vegne af tekstilvirksomheder, så gensalget indgår som en del af virksomhedernes eksisterende webshops⁴⁸.



Figur 14: Blandede affaldstekstiler, f.eks. fra husstandsindsamling, vil først blive forsorteret, hvorved genbrugeligt tøj, ikke-tekstiler og våde tekstiler bortsorteres. Derefter vil resten blive finsorteret, hvor der bliver udsorteret efter fibersammensætning og farve, så fraktionerne bedst muligt matcher kriterierne fra relevante genanvendelsesteknologier. Det tekstilaffald, der ikke er egnet til genanvendelse, vil gå videre til restaffald. Pilene repræsenterer ikke mængder.



⁴⁸ <http://www.create2stay.com/>

⁴⁹ Tekstilaffaldspartnerskabet, Guideline til værdikæden



6. Genanvendelse

Der er behov for nye og videreudvikling af eksisterende teknologier, så det bliver muligt at genanvende en større andel af tekstilaffaldet på kommercielt niveau. Udbredelse af genanvendelsesteknologier til at producere genanvendte fibre forhindres dels af risikoen for at overføre uønskede kemikalier til nye produkter, dels af den lave kvalitet af de genanvendte fibre. Genanvendelsesteknologier, der producerer polymerer og monomerer, kræver mere udvikling for at kunne håndtere flere typer af tekstilmaterialer samtidig med at være mere økonomisk rentable. Genanvendelsesteknologier er under udvikling for at adressere disse udfordringer.

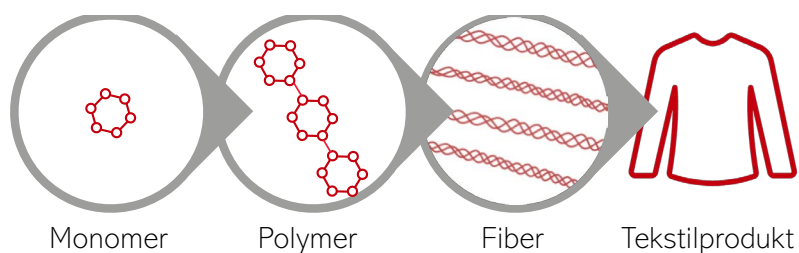
Genanvendelse skal sikre, at tekstilmaterialer holdes i kredsløbet, når produkterne ikke længere kan anvendes eller genbruges. I dag findes der genanvendelsesteknologier, der kan omdanne tekstilaffaldet tilbage til enten omsyede tekstiler, fibre, polymerer eller monomerer, som derefter kan bruges i produktionen af nye tekstiler. Danmark er ikke nødvendigvis oplagt til etablering af store genanvendelsesanlæg, men der er i stedet en mulighed for igen at bidrage gennem innovation og teknologiudvikling til at bidrage med nye løsninger. Genanvendelse tilbage til fibre er længst i udviklingen og anvendes i dag på kommerciel skala, ligesom omsyning til nye tekstiler er demonstreret. Den største teknologiske barriere for at introducere de genanvendte fibre i nye produkter er risikoen for at overføre uønskede kemikalier fra produktets tidligere livscyklus over i den næste livscyklus. For kemikaliesporbarhed på produktniveau er der i øjeblikket ingen oplagte løsninger,

hvilket udgør et betydeligt gab i overgangen til en cirkulær økonomi. Derudover medfører genanvendelse til fibre også en reduktion i fiberkvalitet, hvilket kan føre til produkter af lavere kvalitet. Her har igangværende teknologiudvikling fokus på at minimere kvalitetsforringelsen under neddelingen, og tekstildesignere forsøger at tage højde for de ændrede fiberegenskaber til brug i nye produkter.

For genanvendelse tilbage til polymerer og monomerer er udviklingsniveauet lavere, og de primære barrierer består i at håndtere forskelligartede og komplekse tekstilmaterialer samt at øge rentabiliteten. Der er en lang række teknologier under udvikling i dag, og der kommer løbende nye til. Udviklingsniveauerne strækker sig fra laboratorieskala til planlagt fuldskala, men der er stadigvæk rig mulighed for, at nye teknologier kan overtage store markedsandele, hvis de er mere effektive end de nuværende. Der skal fortsat sættes på videreudvikling af eksisterende løsninger for at øge effektiviteten og rentabiliteten og på udvikling af nye teknologier, der kan genanvende flere sammensatte fibertyper, som er mere robuste over for forskelligartetheder, f.eks. elasthan, nylon, overfladebehandling, variation i kvaliteten af input materialet m.m.

Udviklingen af robuste, skalerbare genanvendelsesløsninger, der kan håndtere varierende affaldsstrømme, er essentiel, for at tekstilindustrien kan omstilles til en cirkulær økonomi.

Genanvendelseshierarkiet

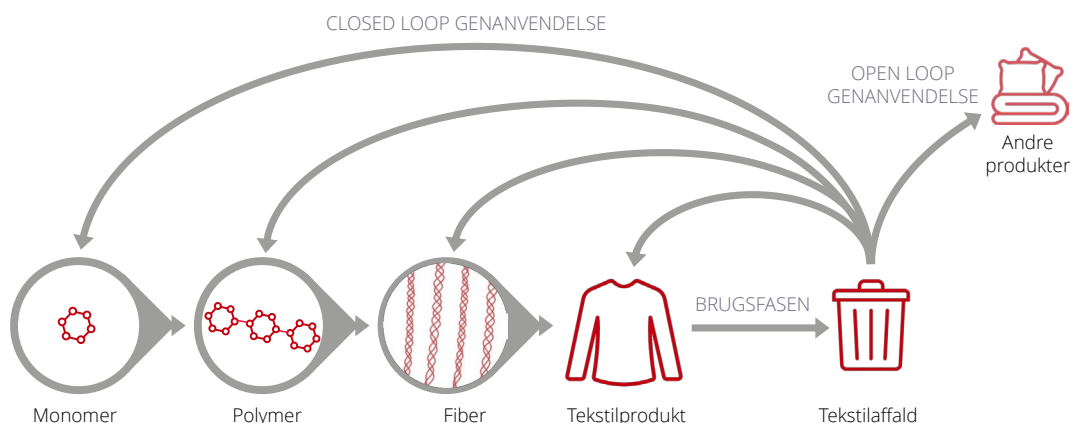


Figur 15: Skematisk illustration af niveauerne i opbygningen af et tekstilprodukt.

For at forstå forskellen mellem de forskellige genanvendelsesprocesser er det nødvendigt at kende til tekstilmaterialernes kemiske opbygning. Tekstilmaterialernes opbygning (Figur 15) kan inddeles i produkt, fiber, polymer og monomer. Tekstilprodukter består af fibre, der er spundet til garn og er vævet eller strikket. Tekstilfibre består af lange kæder kaldet polymerer, og polymererne er opbygget af en række af byggesten, monomerer. Tekstiler såsom bomuld, PET og elastan er opbygget af forskellige byggesten, men den generelle opbygning er den samme.

Det er ikke muligt at skabe én løsning til udfordringen med genanvendelse af tekstilaffald. I stedet findes der forskellige genanvendelsesteknologier, der omdanner tekstilaffaldet til de forskellige stadier i produktets opbygning. Valget af genanvendelsesteknologi skal træffes ud fra reglen om, at produktet skal nedbrydes så lidt som muligt, hvilket også kan beskrives som at anvende så lille et loop som muligt (Figur 16). Dermed bibeholdes materialets egenskaber mest muligt i gen-

anvendelsesprocessen. Det er derfor nødvendigt, at der bliver udviklet en række genanvendelsesteknologier, så tekstilaffaldet kan genanvendes på forskellige måder, og så løsningerne i kombination kan sikre optimal materialeudnyttelse. F.eks. vil det være mest hensigtsmæssigt at genanvende et par hullede cowboybukser tilbage til fibre. Under genanvendelsesprocessen vil fibre blive forkortet, men de vil være anvendelige i nye tekstiler, f.eks. i en ny T-shirt. Når T-shirten med genanvendt materiale eller et andet tekstilprodukt, der som udgangspunkt er produceret med korte fibre, er nået til end-of-life, kan yderligere fiberforkortelse potentielt give for korte fibre til, at de kan anvendes i nye produkter. Her vil genanvendelse til polymerer eller monomerer udgøre de bedste genanvendelsesmuligheder, hvilket skaber muligheden for at 'starte forfra', hvorefter nye produkter igen kan produceres. En teknologi er dermed ikke bedre end andre, og der er behov for udvikling af flere løsninger, for på bedste måde at bibeholde materiale og produktens egenskaber. Specifikke teknologier er tidligere beskrevet i andre kortlægninger⁵⁰.

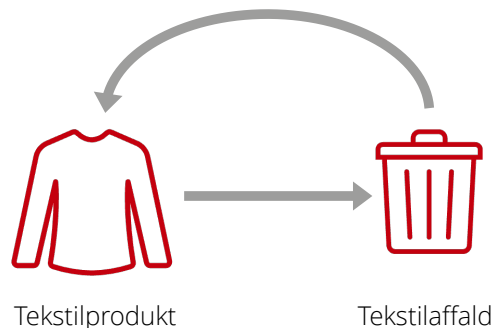


Figur 16: Oversigt over genanvendelsesmuligheder for tekstilaffald inddelt efter outputtype fra genanvendelsesteknologien.

⁵⁰ Jørgensen, P.-E., Werner, A., Constantinou, G., Research and identification of textile plants globally - focusing on fibre-to-fibre recycling for the fashion & textile industry, LDC, DTI, VIA, 2022. Damayanti, D., Wulandari, L. A., Bagaskoro A., Rianjanu, A., Su, A.-S., Possibility Routes for Textile Recycling Technology, Polymers 2021, 13, 3834

Genanvendelse af tekstilaffald til et nyt tekstilprodukt

Denne type genanvendelse involverer omdannelse af tekstilaffald direkte til et nyt produkt, f.eks. klipning til klude eller omsyning til et andet tekstilprodukt end det oprindelige, f.eks. omsyning fra lagen til skjorte, som er kendt fra Textilia Upcy. Denne type genanvendelse er attraktiv, da den kræver få ressourcer, samtidig med at man får et tekstilprodukt, der er direkte anvendeligt. Tilgangen er mest udbredt for genanvendelse af erhvervstekstiler, da der inden for denne branche findes store affaldsfraktioner med ensartethed og sporbarhed. Processen er manuel og kræver visuel inspektion samt vurdering af materialets kvalitet. Rentabiliteten og opskalermulighederne udfordres især af det manuelle arbejde, som genanvendelsesløsningen kræver, og samtidig er tilgangen ikke velegnet til at håndtere større mængder af uensartede fraktioner fra f.eks. husstandssindsamlet tekstilaffald.



Figur 17: Genanvendelse af tekstilaffald tilbage til nye tekstilprodukter.

Open loop-genanvendelse vs closed loop-genanvendelse

Når tekstilaffald genanvendes, kan det blive omdannet til et af udgangspunkterne i tekstilets egen opbygning eller et helt andet materiale. Dette kaldes for hhv. closed loop-genanvendelse og open loop-genanvendelse.

Ved open loop-genanvendelse bliver materialet ikke til et tekstilprodukt igen. Ved closed loop-genanvendelse er det muligt at bearbejde materialet, så det igen kan blive til et tekstilprodukt vha. kendte produktionstrin, f.eks. spinning af genanvendte fibre til garn, som efterfølgende kan væves eller strikkes.

Det er generelt sværere at opnå closed loop-genanvendelse end open loop-genanvendelse, da der for open loop-genanvendelse er flere anvendelsesmuligheder, ofte med lavere tekniske krav til materialet, end for closed loop-genanvendelse. Et eksempel på open loop-genanvendelse er tekstilaffald, der kan anvendes til isoleringsmateriale eller puddefyld. Open loop-genanvendelse til at håndtere de store mængder tekstilaffald er et skridt i den rigtige retning, mens der udvikles closed loop-muligheder. Det er her vigtigt at pointere, at en fuld cirkulær økonomi kun kan opnås gennem closed loop-genanvendelse.



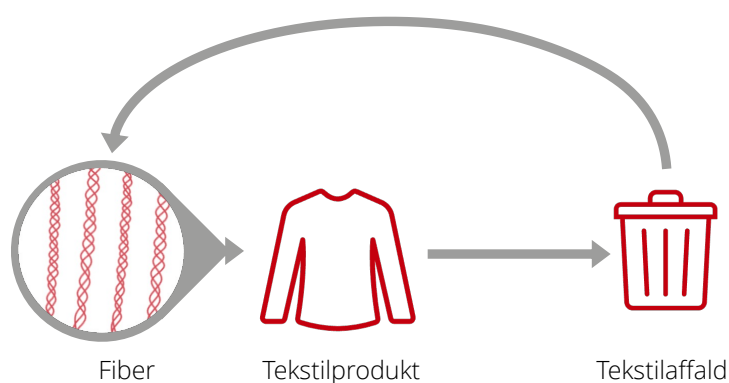
Genanvendelse af tekstilaffald til fiber

Denne type genanvendelse neddelar tekstilaffald til fibre, som kan benyttes direkte til at producere nye tekstilprodukter. I dag foregår metoden enten via omsmeltning eller opkradsning af tekstilaffaldet.

Ved omsmeltning opvarmes tekstilaffaldet til dets smeltepunkt, hvorefter det spindes til nye tekstilfibre. Omsmeltning er kun mulig for syntetiske tekstiler som nylon og PET, mens omsmeltning af biologiske tekstilfibre ikke er mulig, da fibrene nedbrydes ved opvarmning, inden de smelter. Genanvendt PET fra plastflasker er udbredt og kan tilføjes op til 100 % i nye produkter, og ligeledes har omsmeltning af overskudsgarn af PET fra tekstilproduktion været brugt i en årrække og kan bruges op til ca. 20 % i nye produkter⁵¹. Længt mere komplekst er det at omsmelte fra tekstilstof til nye produkter, og der findes kun få eksempler på dette. Det er her muligt at bruge op til ca. 10 % genanvendt tekstilaffald og samtidig sikre kvaliteten af de nye produkter, hvilke er vist af Gabriel⁵².

Ved opkradsning rives tekstilet mekanisk fra hinanden, hvilket resulterer i adskilte tekstilfibre, som efterfølgende spindes til nyt garn. Der findes allerede virksomheder, der foretager dette, herunder spanske RECOVER, som opkradser brugte cowboybukser og producerer ny fiber/garn, som er kommercielt tilgængelig. Knowledge Cotton Apparel, der har lanceret

cowboybukser af 100% genanvendt pre-consumer bomuld, NewRetex, der har lanceret T-shirts med post-consumer tekstilaffald og Textile Pioneers, der får produceret tøj af mekanisk genanvendte fibre. Mekanisk genanvendelse ved opkradsning er dermed den mest modne tekstil-til-tekstil genanvendelsesteknologi, men udbredelsen forhindres bl.a. af risikoen for at bringe nye produkter på markedet, der indeholder uønskede kemiske stoffer. Dette skyldes, at der ikke sker en oprensning i denne genanvendelsesproces, hvorfor fibersammensætningen og indholdet af kemikalier i inputmaterialerne bliver direkte overført til outputmaterialerne. Det er også en udfordring, at fiberlængden forkortes under opkradsning, hvilket sænker kvaliteten af outputmaterialet, men det er dog stadigvæk muligt at producere nye tekstiler helt eller delvist af mekanisk genanvendte fibre. Der bliver løbende udviklet mildere opkradsningsteknologier, hvilket har givet ophav til underkategorien 'blød mekanisk genanvendelse'⁵³, hvor udfordringen med fiberforkortelse (PurFi) er minimeret. Yderligere optimering kan potentielt ske ved at indstille opkradseren specifikt til de produkttyper, der opkradses. Dette kræver et samspil mellem sorteringsteknologier og mekaniske genanvendelsesteknologier, hvilket ikke kan opnås på nuværende tidspunkt på grund af sorteringsteknologiernes manglende evne til at sortere efter produkttyper (se afsnit 5).



Figur 18: Genanvendelse af tekstilaffald tilbage til fibre.

⁵¹ Duhoux, T., Maes, E., Hirschnitx-Garbers, M., Peeters, K., Asscherickx, L., Christis, M., Stubbe, B.,... et. Al. Study on the technical, regulatory, economic and environmental effectiveness of textile fibres recycling, T. Duhoux et al., November 2021

⁵² <https://www.gabriel.dk/en/about-gabriel/news/67904/67904>

⁵³ Scaling textile recycling in Europe—turning waste into value, McKinsey & Company

Genanvendelse af tekstilaffald til polymer

I denne genanvendelsesproces omdannes tekstilaffald til polymerer, som derefter kan spinnes til fibre. Tilgangen involverer kemiske procestrin, hvor der anvendes kemiske opløsningsmidler til at opløse og oparbejde polymeren fra tekstilaffaldet. Opløsningsmidlet har til formål at opløse den ønskede polymer uden at opløse andre kemiske stoffer, f.eks. farvestoffer, eller andre polymerer i tekstilaffaldet. Alternativt kan tekstilaffaldet renses for farvestoffer, inden polymeren opløses. Det er derfor en oplagt løsning til genanvendelse af tekstilaffald med blandede fibre, da de resulterende polymerer kan bruges til produktion af nye tekstilprodukter med nær jomfruelig kvalitet. Løsningen stiller færre krav til tekstilets fysiske kvalitet (fiberlængder) og kan derfor komplementere de øvrige mekaniske og termiske løsninger.

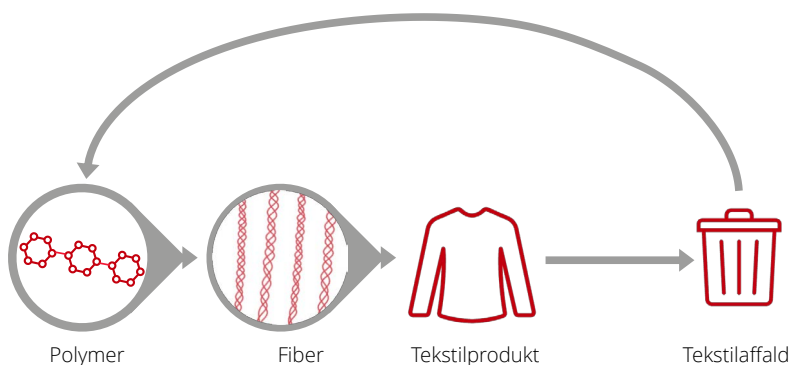
Der findes i dag teknologier baseret på forskellige opløsningsmidler, så polymerer kan opløses selektivt, afhængigt af opløsningsmidlet. Der er dog generelt behov for opskalering og implementering. Oprensket PET kan spinnes til nye fibre af næsten jomfruelig kvalitet og renhed omend med polymerforkortelse. Forkortelsen af polymeren har en effekt på fiberkvaliteten, der dog er mindre end fiberforkortelsen oplevet under opkradsning. Dette begrænser antallet af gange, materialet kan cirkuleres, da polymeren på et tidspunkt vil være for kort til at kunne spinnes til nye fibre. Derudover vil det også påvirke kvaliteten af de nye produkter.

Oparbejdning af bomuld ændrer krystalliniteten, og materialet bruges til produktionen af regenererede fibre, f.eks. viskose (se afsnit 1. Materialer). Dermed resulterer denne tilgang ikke i direkte genanvendelse af bomuld til ny bomuld, men i stedet til viskose. Eksisterende løsninger er begrænset til genanvendelse

af bomuldstekstil fra ensartede affaldsfraktioner af f.eks. erhvervstekstil (f.eks. hvide duge og lagener), produktionsspild (fraskær) eller overproducerede metervarer. Ensartetheden i disse affaldsstrømme gør genanvendelsen lettere. Flere teknologiske løsninger til at genanvende fiberblandinger såsom polycotton (blanding af PET og bomuld) er under udvikling (britiske Worn Again eller danske Textile Change), men disse løsninger er stadigvæk på pilotskala. Der skal udvikles flere og bedre teknologiske løsninger til at håndtere forskelligartethed i tekstilaffaldet. Dette kan være i form af f.eks. flere typer fiberblandinger, herunder tilføjelse af nylon og elasthan, overfladebehandling, slitage, m.m. Denne forskelligartethed bliver ikke homogeniseret under sorteringen, og det er derfor nødvendigt, at genanvendelsesteknologierne gøres robuste nok til at kunne håndtere det. Jo bedre genanvendelsesteknologierne er til at håndtere forskelligartethed, jo bedre vil de være i stand til at tage store mængder post-consumer tekstilaffald, f.eks. fra husstandsindsamlingen.

Selvom uønskede kemiske indholdsstoffer typisk fjernes i denne genanvendelsesproces, kan det i enkelte tilfælde blive opløst sammen med polymeren, hvorved der vil være en risiko for, at stofferne overføres til det nye produkt. Den manglende viden om de konkrete kemiske indholdsstoffer, der er anvendt i produktionen, gør det udfordrende at udvikle oprensingsprocesser. Dog er problemet minimalt ift. genanvendelse til fibre.

Generelt er der behov for yderligere investering i teknologiudvikling for at videreudvikle eksisterende og udvikle nye genanvendelsesteknologier tilbage til polymerer. Nye teknologiske løsninger kommer løbende til og vil muligvis overhale mere etablerede teknologier, hvis de viser sig at være mere selektive, effektive eller økonomisk mere rentable.



Figur 19: Genanvendelse af tekstilaffald tilbage til polymerer.

Genanvendelse af tekstilaffald til monomer

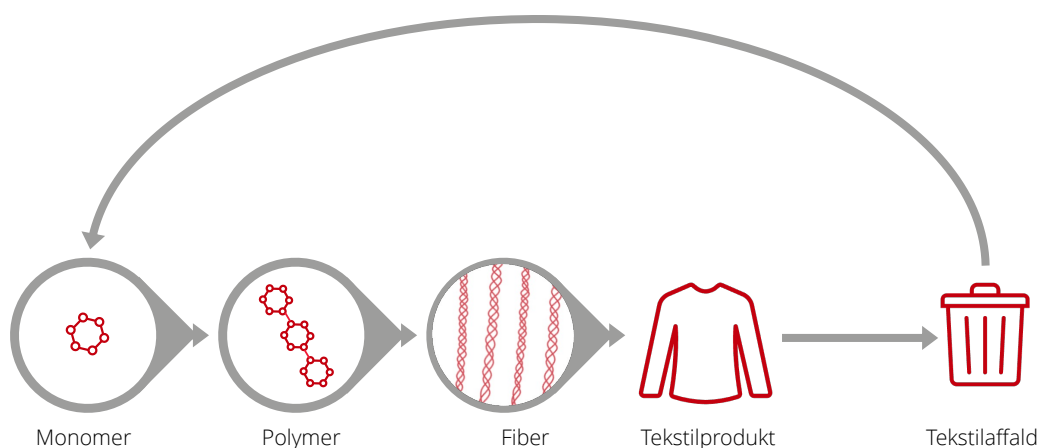
Denne type genanvendelse omdanner tekstilaffald hele vejen tilbage til monomerer, som så skal polymeriseres og derefter anvendes til produktion af nye tekstilprodukter med jomfruelig kvalitet og uden uønskede kemiske indholdsstoffer fra tidligere liv. Dog er der en lang vej for monomererne, før de igen kan blive et tekstilprodukt, og de nødvendige processer er energi- og ressourcekrævende. Genanvendelsesprocessen involverer kemiske processer med barske betingelser, hvor tekstilaffaldet ofte opvarmes under tryk med kemiske reagenser, som nedbryder polymererne til monomerer, der opsamles og rengøres for urenheder. Denne genanvendelsesproces skal tilvælges frem for de øvrige genanvendelsesprocesser i det scenarie, hvor fiberlængden af tekstilmaterialerne er blevet så forkortet, at de øvrige genanvendelsesteknologier ikke længere vil kunne frembringe produkter af tilfredsstillende kvalitet. Denne type genanvendelse er derfor afgørende for at kunne føre materialerne fra bunden af affaldshierarkiet tilbage til toppen i et cirkulært kredsløb.

Der findes mange forskellige genanvendelsesteknologier til at omdanne tekstilaffald til monomerer, og de afhænger bl.a. af, hvilket tekstilmateriale der skal genanvendes. Generelt er teknologierne udviklet til at kunne håndtere ét bestemt tekstilmateriale (PET, nylon osv.), og derfor udgør blandinger af tekstilmaterialer en udfordring for rentabiliteten, da kun en del af materialet genanvendes til nye materialer.

"Genanvendelse af tekstilaffald repræsenterer spændende løsninger indenfor vores industri, hvilket reducerer vores afhængighed af fossile ressourcer."

- Jeppe Emil Mogensen, Gabriel A/S

Udviklingsniveauet af genanvendelsesteknologierne spænder hele vejen fra laboratorieskala til kommerciel skala. For PET er de fleste af løsningerne i stand til at genanvende både flasker og tekstiler. Flaske-PET udgør dog en renere og mere ensartet fraktion, hvilket gør genanvendelsen lettere, og de fleste teknologier fokuserer derfor på denne affaldsfraktion. Flere nævner også tekstil-PET på deres hjemmesider. Det er dog uvist, om materialet genanvendes på nuværende tidspunkt, eller om det forventes at kunne håndteres i fremtiden på baggrund af videreudvikling. Eksempler på dette er den enzymatiske proces udviklet af franske Carbios (anlæg på 40.000 tons/år planlagt i 2025 i Frankrig) eller kemiske processer udviklet af bl.a. amerikanske Eastman (100.000 tons/år under konstruktion i USA, 160.000 tons/år planlagt i 2025 i Frankrig) eller japanske Jeplan (22.000 tons/år operationelt anlæg i Japan). Det har ikke været muligt at identificere ophavet til PET-affaldet, som de nævnte teknologier genanvender, og de angivne kapaciteter



Figur 20: Genanvendelse af tekstilaffald tilbage til monomerer.

vurderes derfor at være for både plast- og tekstil-PET. Nylon 6 fra bl.a. fiskenet genanvendes ved italienske Aquafil til genanvendt nylon, Econyl, gennem en termisk depolymeriseringsproces.

Biobaserede tekstiler er en særlig udfordring for denne type genanvendelsesproces, da nye tekstilprodukter ikke kan fremstilles direkte af de

Kategorisering af genanvendelsesteknologier

Der er mange typer af genanvendelsesteknologier og måder at kategorisere dem på. Typiske kategoriseringer kunne være opdelingen i enten mekanisk eller kemisk, andre gange medtages termomekanisk som kategori. I denne rapport kategoriseres genanvendelsesteknologierne ud fra det produkt, der produceres ved genanvendelsen: tekstiler, fibre, polymerer eller monomerer.

monomerer, tekstilaffaldet nedbrydes til i denne type genanvendelse. Dette skyldes, at et biologisk tekstil, f.eks. cellulose eller uld, nedbrydes til de biologiske monomerer glukose og aminosyrer. Vi får f.eks. bomuld fra planter og ikke fra dets monomerer, og vi har derfor ikke teknologier til at anvende disse monomerer til at producere nyt bomuld igen. Dog kan de biologiske monomerer anvendes som byggesten til andre materialer og produkter, hvilket gør det til open loop-genanvendelse.

Generelt har teknologiske løsninger, der er tæt på opskalering, høje krav til tekstilets ensartethed, så kun rene og syntetiske fraktioner kan genanvendes. Videreudvikling og nye teknologier forventes at gøre løsningerne mere robuste og åbne mulighed for genanvendelse af mindre ensartede fraktioner. Desuden kommer der løbende nye løsninger som bl.a. nye katalysatorer, der vil kunne muliggøre genanvendelse under mildere betingelser⁵⁴. Det vurderes ikke, at markedet er domineret af bestemte teknologier, og det er derfor muligt, at nye teknologier kan overhale eksisterende løsninger, især hvis de kan håndtere mere forskelligartethed i inputmaterialer og er skalerbare.

⁵⁴ Yang, Y., Sharma, S., Di Bernardo, C., Rossi, E., Lima, R., Kamounah, F. S., ... & Lee, J. W. (2023). Catalytic Fabric Recycling: Glycolysis of Blended PET with Carbon Dioxide and Ammonia. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 11(30), 11294-11304.



Fiber- og polymerforkortelse

Ved genanvendelse til fibre gennem opkradsning (mekanisk genanvendelse) klippes tekstilet i stykker og bliver efterfølgende mekanisk opkradset. Dette slider på materialet, og der sker en fiberforkortelse på op til 30-40 %⁵⁵. Dette har betydning for, i hvor høj kvalitet det er muligt at producere nye tekstiler.

Ved genanvendelse til fibre gennem omsmeltningsforkortes i stedet polymererne. For PET-fibre forkortes polymeren allerede ved processering, f.eks. spinning til fibre, ved farvning på grund af opvarmning og gennem reaktioner med f.eks. vand⁵⁶. Der vil derfor ske en gradvis forkortelse af polymererne i hvert procestrin, og dermed også i hver genanvendelsescyklus, den enkelte polymer har været igennem. Den forkortede polymer medfører et fald i den kvalitet, det er muligt at spinne nye fibre i, hvilket i sidste ende afspejler sig i produktkvaliteten. Derudover sætter det

også en begrænsning på, hvor mange gange det er muligt at genanvende materialet.

Det er muligt at 'nulstille' kvaliteten ved at genanvende til monomerer, hvorefter polymeren vil være af jomfruelig kvalitet og længde.



⁵⁵ Scaling textile recycling in Europe—turning waste into value, McKinsey & Company

⁵⁶ Abbasi, M., Mohaddes Mojtahedi, M. R., & Kotek, R. (2018). Effect of Melt Spinning Variables on the Structural Changes of Recycled and Bottle Grade Filament Yarn PET. *Journal of Textiles and Polymers*, 6(2), 67. Venkatachalam, Subbiah Bharathi et al. "Degradation and Recyclability of Poly (Ethylene Terephthalate)." (2012).





TEKNOLOGISK
INSTITUT

