



# Forskningsöversikt om återvinning och återbruk av litiumjonbatterier

av Hans Eric Melin, Circular Energy Storage

På uppdrag av Energimyndigheten

Kontaktperson:

Greger Ledung

E-post [greger.ledung@energimyndigheten.se](mailto:greger.ledung@energimyndigheten.se)

Tel 016-544 21 21

# Innehåll

Innehåll	2
Sammanfattning	3
Bakgrund	4
Forskning om återvinning av litiumjonbatterier	4
Om författaren	5
Återvinning av litiumjonbatterier satt i sammanhang	6
Utveckling av litiumjon-marknaden	6
Förbrukade mängder av litiumjonbatterier i Sverige och världen	9
Återvinning av litiumjonbatterier	12
Återbruk av litiumjonbatterier	13
Sammanställning av forskning om återvinning och återbruk av litiumjonbatterier	14
Syfte och frågeställningar	14
Metod och tillvägagångssätt	14
Forskning om generering och insamling av EOL-batterier	16
Livslängd och uppkomst av EOL-batterier	17
Insamling av batterier	17
Studier om litiumjonbatterier	18
Studier om insamling av elbilsbatterier	19
Övriga områden inom generering och insamling	20
Forskning kring återanvändning	21
Tekniska möjligheter och begränsningar	22
Ekonomisk potential	24
Miljökonsekvenser	24
Återanvändning av andra litiumjonbatterier	25
Forskning kring återvinning av litiumjonbatterier	26
Återvinningsprocesser	27
Framställning av material från återvunna batterier	32
Förbehandlingsprocesser	33
Forskning kring batteriers miljöpåverkan	34
Forskning om design för återvinning och återbruk	36
Forskning i Sverige	37
Forskning om återvinning och återanvändning i EU-projekt	39
Pågående forskning	41
Behov av vidare forskning	43
Vad ska vi ha forskning till?	43
Forskningsläge vs industrins behov	43
Förslag på forskning inom generering och insamling av förbrukade batterier	44
Förslag på forskning inom återanvändning	45
Förslag på forskning inom återvinning	46
Till sist – reflektioner om forskning och forskningsbehov inom EOL av litiumjonbatterier	47

## Sammanfattning

Syftet med denna studie är att skapa en översikt av kunskapsläget inom end-of-life området för litiumjonbatterier. Målet har varit att klargöra vad som inom forskningen kan betraktas som state-of-the-art samt att identifiera eventuella luckor av kunskap och tillgång till tekniska processer som krävs för att ytterligare effektivisera återvinningskedjan för litiumjonbatterier.

Forskningsöversikten omfattar framförallt granskad forskning publicerad på engelska, samt kända forskningsprojekt i Sverige, EU och USA inom områdena insamling, återanvändning, återvinning, batteriers miljöpåverkan och design för återvinning.

Till skillnad från andra typer av batterier skiljer sig litiumjonbatterier på flera sätt. Dels har de i regel längre livslängd än andra batterier, dels är de i högre grad inbyggda i utrustning. Tillsammans bidrar detta till att det både tar längre tid för batterierna att nå återvinning och att de i högre grad än andra batterier exporteras för återanvändning på andra marknader vilket gör att de inte återvinns i Sverige. Detta har också färgat bilden av möjligheterna att effektivt återvinna litiumjonbatterier vilket redan idag är möjligt och görs framförallt i Kina och Sydkorea.

Att bilden inte stämmer med verkligheten skulle kunna ha att göra med att forskningen inom såväl generering som insamling av uttjänta batterier är mycket sparsmakad. Ett fåtal studier i Kina, Japan och USA har fokuserat på hur batterier når återvinning och vad som hindrar fler att göra det. Utöver det har det mest forskats kring insamling av blandade batterier. Det har heller inte skrivits speciellt mycket om hur batterier når end-of-life eller vilken livslängd de kan förväntas ha.

Återanvändning, eller second life, har det gjorts betydligt fler studier om. I regel har dessa en eller flera av de tre inriktningarna ekonomisk potential, tekniska möjligheter och begränsningar samt vilka miljökonsekvenser som återanvändning av av batterier för med sig. Gemensamt för studierna är att de i regel är små och att de har gjorts på relativt små system. Slutsatserna är överlag positiva.

Återvinningsområdet är det som är bäst täckt. Över 300 förstahandsstudier har hittats där olika typer av metoder prövats föra att både separera olika ämnen från avfallsbatterierna och att från det återtillverka katodmaterial eller försteg till katodmaterial. Över 75 procent av de genomförda studierna har gjorts av hydrometallurgiska processer. Knappt 70 procent av de publicerade studierna är gjorda i Kina eller Sydkorea. Den övervägande delen har gjorts på behandling av LCO- och NCM-batterier medan bara ett fåtal studier har gjorts på LFP-, LMO- och NCA-batterier. I princip alla aktiva material inklusive litium kan återvinnas med hög effektivitet.

Det finns ett antal områden där det helt saknas forskning. Flera av dessa områden har ur ett industriellt sammanhang stor betydelse för hur hela återvinningskedjan kan bli så effektiv som möjligt. Till exempel finns det mycket litet gjort inom sortering och klassificering av batterier, om urladdning och förbehandling och inte minst inom design för återbruk och återvinning. Vad som är anmärkningsvärt är också hur frånvarande områden som säkerhet, arbetsmiljö och transporter är i den samlade forskningen.

Forskningen framåt bör fokusera på områden som idag hindrar en effektiv återvinning. Den bör också verka för en ökad systemförståelse hos alla inblandade aktörer. Inom återanvändning finns fortfarande en möjlighet för forskningsvärlden att springa i förväg och inhämta data och erfarenheter som kan ligga till grund för strategiska, långsiktiga beslut för industrin. Slutligen kan det vara motiverat att i Sverige forska inom områden som redan är väl täckta globalt med syfte att stärka kunskapen i landet.

## Bakgrund

Litiumjonbatterier har sedan sin kommersialisering i början av 90-talet blivit en allt viktigare batteriteknologi framför allt tack vare sin höga energidensitet som möjliggjort den snabba utvecklingen av portabel elektronik som mobiltelefoner, bärbara datorer och läsplattor. Runt 2010 började litiumjon-teknologin i allt högre grad att användas i el- och hybridbilar och snart därefter även i bussar och energilagringssystem.

Den snabba utvecklingen har gjort att tillverkare av batterier har kunnat skala upp sin tillverkning och blivit mer och mer effektiva vilket lett till lägre kostnader som i sin tur ytterligare har ökat efterfrågan på batterier och de applikationer som de sitter i. Tillsammans har detta skapat en enorm tillväxt i marknaden, drivet framförallt av olika typer av fordon men även av möjligheten till ersättning av blysyre-batterier i t ex basstationer och datacenter.

Med allt högre volymer på marknaden ökar också kravet på återvinning av litiumjonbatterier. Batterierna innehåller ämnen, framförallt föreningar med kobolt och fluor, som inte bör spridas i naturen. Flera ämnen är också relativt sällsynta eller utvinns i länder med hög politisk instabilitet. Batterierna har genom sin värdekedja dessutom orsakat klimatpåverkande utsläpp vars börda kan minska om materialen i batterierna kan återanvändas.

Till skillnad från t ex bly-syrabatterier, där över 90 procent i Europa återvinns<sup>1</sup>, betraktas dock återvinningen av litiumjonbatterier ofta som otillräcklig. Både genom att de anläggningar som finns idag inte återvinner en särskilt stor andel av de batterier som satts på marknaden och som kan antas ha nått slutet av sina produktliv, och genom att effektiviteten i processerna inte är tillräckligt effektiva eller lönsamma.

## Forskning om återvinning av litiumjonbatterier

Situationen med otillräcklig återvinning anges också ofta som en bakgrund till många forskningsprojekt där inte minst en ökad effektivitet i processerna förväntas kunna vända utvecklingen vilket krävs när ökade volymer av batterier behöver återvinnas. Sålunda är fokuset relativt stort på just själva återvinningsprocessen i vilken batterier omvandlas till olika typer av material för användning i samma eller andra applikationer.

Likaså sker forskning kring själva insamlingen av batterierna och hur den kan förbättras. Också insamlingen, eller snarare bristen av, betraktas i många fall vara begränsande för återvinningen genom att både privatpersoner och företag sparar använda batterier för länge eller påstås slänga dem i vanligt hushållsavfall.

Ett ytterligare område som får mer och mer uppmärksamhet i såväl industrin som i forskningsvärlden är potentialen att återanvända litiumjonbatterier i nya applikationer, sk återanvändning eller second life. Främst handlar detta om att återanvända batterier från elfordon i energilagerlösningar. Forskningen kring återanvändning av batterier skiljer sig från den om återvinning då den är mer fokuserad på batteriets funktioner som t ex åldring och degradering, övervakning av batteriets hälsa samt vilken kommersiell nytta återanvändningen kan tänkas ha.

Forskning inom dessa områden, insamling, återanvändning och återvinning av litiumjonbatterier, ligger inom ramen för vad Batterifonden har i uppgift att finansiera. Det är komplexa områden som är tätt kopplade till varandra där ett område kan få konsekvenser för ett annat.

---

<sup>1</sup> <http://blybatteriretur.se/om-organisationen/>

Syftet med denna studie är att skapa en översikt över hur kunskapsläget ser ut inom dessa områden för att i förlängningen skapa bättre förutsättningar för att medel till ny forskning används på så effektivt sätt som möjligt. Målet har varit att ta fram ett underlag för att besvara framförallt två frågor:

- Vad inom forskningen om återvinning och återanvändning av litiumjonbatterier kan betraktas som state-of-the-art?
- Vilka luckor finns det i kunskap och tillgång till tekniska processer som krävs för att ytterligare effektivisera återvinningskedjan för litiumjonbatterier?

För att kunna besvara framförallt den första frågan måste vi också bättre förstå hur återvinningskedjan ser ut och vilka drivkrafter som ligger bakom och skapa oss ett nuläge för hur volymer, processer och lagstiftning ser ut idag. Detta sker i det första kapitalet där vi utifrån ett industriperspektiv har beskrivit området idag.

Därefter följer en genomgång av den forskning som gjorts inom området. Framförallt har vi försökt att beskriva vad det forskats om mer än att beskriva de faktiska resultaten vilket hade krävt en betydligt större ansats.

Slutligen sammanfattar vi de slutsatser vi dragit och försöker sätta detta i perspektiv för hur det bör påverka Batterifondens fortsatta arbete.

## Om författaren

Hans Eric Melin är konsult på företaget Circular Energy Storage med bas i London. Han har en lång erfarenhet av insamling och återvinning av batterier bl a genom tidigare arbeten som VD för Refind Technologies som är ett ledande företag inom sortering av avfallsbatterier och som Vice President Market Development på Battery Solutions i Michigan som är USA's största batteriåtervinnare. Hans Eric är även författare till Circular Energy Storage's årliga rapport "The Lithium-ion battery end-of-life market" från vilken data har tagits i denna rapport's inledande kapitel.

Hans Eric har en fil kand i medie- och kommunikationsvetenskap från Göteborgs Universitet vilket under 2000-talet ledde honom in på områden som insamling av avfall, sortering och avfallsminimering.

För frågor och kommentarer direkt till författaren:

[www.circularenergystorage.com](http://www.circularenergystorage.com)  
[hanseric@circularenergystorage.com](mailto:hanseric@circularenergystorage.com)  
+44 775 692 7479

## Återvinning av litiumjonbatterier satt i sammanhang

En vanlig inledning i forskningsartiklar om återvinning av litiumjonbatterier är en referens till hur batteritypen kommersialiserades av Sony 1991 efter att ha uppfunnits 1986 av John Goodenough, då på University of Oxford i Storbritannien. Vad som inte lika ofta nämns är att det första patentet för återvinning av litiumjonbatterier ansöktes om endast ett år därefter, 1992, av företaget Valence Technology<sup>2</sup> med huvudkontor i Austin, Texas, som av en tillfällighet är samma stad som John Goodenough idag kallar sitt hem.

Först år 2000 omnämns återvinning av litiumjonbatterier i en publicerad forskningsartikel när Argonne National Laboratories i USA gör en översikt av tillgängliga återvinningsprocesser<sup>3</sup> vilket vid tillfället var tre stycken.

Till skillnad från utvecklingen av själva litiumjonbatteriet som stegvis togs fram i flera olika forskningsmiljöer så har utvecklingen av återvinningen under lång tid varit industridrivna. Det samma gäller återanvändning av batterier som också nämns första gången i artikeln från Argonne.

Att litiumjonbatterier återvanns redan innan millenieskiftet, och att metoder för att separera flertalet ämnen i batterierna har funnits tillgängliga lika länge, är en viktig påminnelse om man vill förstå orsaker och drivkrafter till hur återvinning och återanvändning ser ut idag och hur det kommer att utvecklas i framtiden.

Under senare år har uppmärksamheten kring dessa frågor ökat radikalt. Likaså har forskningen om både återvinning och återanvändning ökat, liksom många närbesläktade områden såsom design för återvinning och tillverkning av batterier av återvunnet material. Den uppenbara förklaringen till detta är ökningen av själva volymen av batterier som numera sätts på marknaden och som också får allt större konsekvenser för utvinningen av de ämnen som krävs för att tillverka dem.

### Utveckling av litiumjon-marknaden

Från att först ha använts i videokameror fick litiumjonbatteriet sitt stora genomslag i främst två applikationer: mobiltelefonen och den bärbara datorn<sup>4</sup>. Med dessa två applikationer startade också tillväxten av två huvudgrupper av celler: prismatiska och cylindriska där de prismatiska främst användes i encellsapplikationer som mobiltelefoner, medan cylindriska celler användes i pack för datorer och kameror.

Volymtillväxten har sedan start varit kraftig i princip varje år, genererad av ökad popularitet för först mobiltelefoner och datorer och under andra hälften av 00-talet av smarta telefoner och läsplattor. Samtidigt har mängden andra applikationer som använder litiumjonbatterier ökat kraftigt. Från 2010 började litiumjonbatterier dominera elverktygsmarknaden och därefter har nya produkter som åkbrädor, drönare och elcyklar haft litiumjonbatteriet att tacka för sin snabba utveckling.

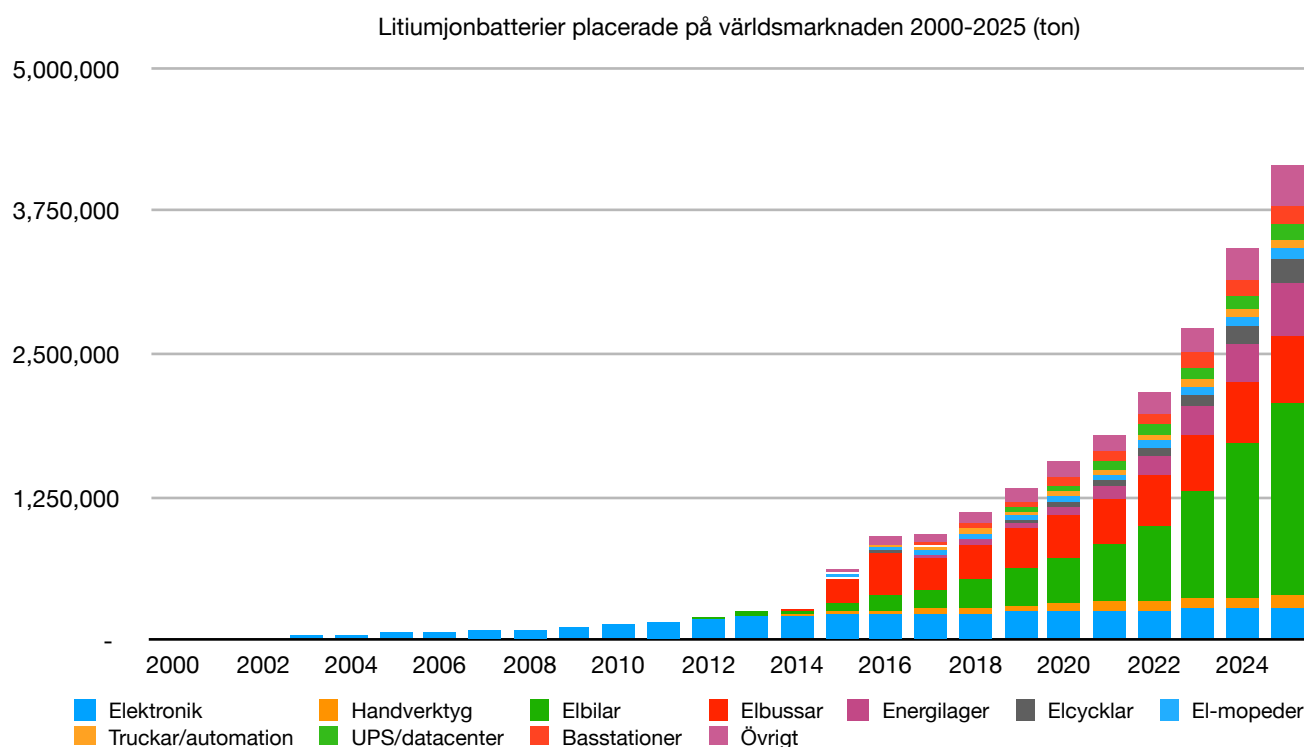
Under 2010 börjar även de första serieproducerade elbilarna att komma ut på marknaden. Det är starten på den enorma utveckling som vi nu ser. Bilar, och kort därefter bussar, har växt mycket kraftigt under 10-talet och är nu de dominerande segmenten av marknaden. Värt att notera är dock att det var först 2016 som bilar och bussar gick om

<sup>2</sup> <https://patents.google.com/patent/US5352270A/en>

<sup>3</sup> <https://www.osti.gov/biblio/761281>

<sup>4</sup> <http://jes.ecsdl.org/content/164/1/A5019.full>





elektronik som största applikation och hade det inte varit för den enormt snabba tillväxten av kinesiska elbussar så hade elektronik fortfarande varit det största användningsområdet.

På samma sätt som den snabba tillväxten för mobiltelefoner och bärbara datorer skapade skalfördelar i batteritillverkningen som därefter möjliggjorde användning av dem i de första bilarna sker nu samma utveckling för andra applikationer – tack vare de stora investeringar som gjorts på elbilsbatterier. Framförallt har applikationer som traditionellt använt blysyra-batterier och i vissa fall nickelkadmiumbatterier, som t ex reservkraft för basstationer och datacenter, idag börjat använda litiumjonbatterier. Samma sak gäller energilager som kan användas i allt från batterier kopplade till solenergianläggningar till att balansera hela kraftnät istället för exempelvis pumpad vattenkraft. Även truckar och andra industriella fordon övergår mer och mer till litiumjonbatterier. Dessa nya segment kommer tillsammans snart också att bli större än elektronik och kommer att vara en viktig marknader för batteritillverkarna.

Situationen i Sverige ser ut på samma sätt. I Naturvårdsverket statistik går det inte att urskilja vilka applikationer som satts på marknaden annat än huruvida batterier är portabla (elektronik samt elverktyg) eller industriella (inbyggda batterier inklusive elfordonsbatterier). Men tendensen ser likadan ut. Från att helt har dominerat området har de portabla batteriernas tillväxt jämnats ut och sedan 2015 har industriella batterierna varit den största kategorin som sätts på marknaden.

Skiftet från en marknad som dominerats av elektronik till en betydligt mer mångfacetterad marknad får stora konsekvenser för återvinningsföretagen. Framförallt innebär det tre stora förändringar:

### 1. Olika batterikemier

Batterier i mobiltelefoner och datorer var från början nästan uteslutande av typen LCO (LiCoO<sub>2</sub>). Celler av denna typ innehåller mellan 17 och 20 procent kobolt vilket är det mest värdefulla ämnet i batterierna. Med elverktyg, energilager, elcyklar, bussar och majoriteten av alla bilar, framförallt i Kina, så kom LFP-batteriet (LiFePo<sub>4</sub>). Denna typ innehåller inte kobolt över huvudtaget vilket gör att utbytet från återvinningen blir mycket lågt. Samma sak gäller LMO (LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) som används i elmoped, elverktyg samt i många av de första stora volymbilarna på

## Fördelning av återvinningsbara ämnen i olika litiumjonbatterier

Material	USD/kg	Procentuellt innehåll i cylindrisk cell (18650)							
		NCM111	NCM523	NCM622	NCM811	NCA	LFP	LMO	LCO
<b>Hylsa</b>									
Stål	0,29	10.0%	10.0%	10.0%	10.0%	10.0%	10.0%	10.0%	10.0%
Aluminium	1,8	10.0%	10.0%	10.0%	10.0%	10.0%	10.0%	10.0%	10.0%
<b>Strömtillledare</b>									
Aluminium	1,8	5.0%	5.0%	5.0%	5.0%	5.0%	5.0%	5.0%	5.0%
Koppar	6,0	7.0%	7.0%	7.0%	7.0%	7.0%	7.0%	7.0%	7.0%
<b>Anodmaterial</b>									
Grafit	1,2	18.1%	18.1%	18.1%	18.1%	18.1%	18.1%	18.1%	18.1%
<b>Katodmaterial</b>									
Mangan	2,4	6.1%	5.5%	3.6%	1.8%			19.4%	
Litium	70,0	2.3%	2.3%	2.3%	1.9%	2.3%	1.4%	1.2%	2.3%
Kobolt	30,0	6.5%	3.9%	3.9%	1.9%	2.9%			19.3%
Nickel	12,0	6.5%	9.7%	11.6%	15.4%	15.6%			
Aluminium	1,8					0.4%			
Järn	0,4						11.3%		
<b>Totalt värde per kg</b>		<b>5,42</b>	<b>5,02</b>	<b>5,19</b>	<b>4,77</b>	<b>5,32</b>	<b>1,97</b>	<b>2,26</b>	<b>8,30</b>

elbilsmarknaden som t ex Nissan Leaf och Chevrolet Volt, dock i en kombination med NMC ( $\text{Li}(\text{NiMnCo})\text{O}_2$ ). Just NMC har tillsammans med NCA ( $\text{Li}(\text{NiCoAl})\text{O}_2$ ) därefter blivit den dominerande batterikemin för elbilar i västvärlden. Båda kemierna innehåller kobolt men bara mellan 6,5 och 2 procent i NMC och mindre än 3 procent i NCA.

Förutom att de nya batterikemierna har gjort att batteriernas genomsnittliga värde har minskat har komplexiteten ökat för återvinnarna för att hålla isär dessa. Detta är viktigt både ur ett tekniskt och ett ekonomiskt perspektiv. Problemet ska dock inte överdrivas då celltyper ofta kan knytas till sina respektive applikationer eller produkter de suttit i, vilket gör att de oftast relativt enkelt kan identifieras.

## 2. Batterierna blir stora och sammansatta

Medan utmaningen för portabla batterier ligger i att sortera batterierna så är utmaningen för elbilbatterier och andra industriella batterier att de är sammansatta i större moduler som i sin tur är sammansatta i batteripack. Detta gör att mängden arbete för att förbereda batterierna för återvinning är betydligt större än för portabla batterier och kräver samtidigt högre kompetens.

## 3. Batterierna följer med sina applikationer

Till skillnad från gamla portabla batterier så är litiumjonbatterier idag nästan alltid inbyggda i sina applikationer och är inte designade för att separeras. I applikationer som elbilar och energilagring är detta självklart men sedan två till tre år tillbaka så gäller samma sak för smarta telefoner och bärbara datorer. Detta gör dels att batterier mer sällan kommer direkt till företag specialiserade på batteriåtervinning utan snarare till återvinnare av elektronik och bilar.



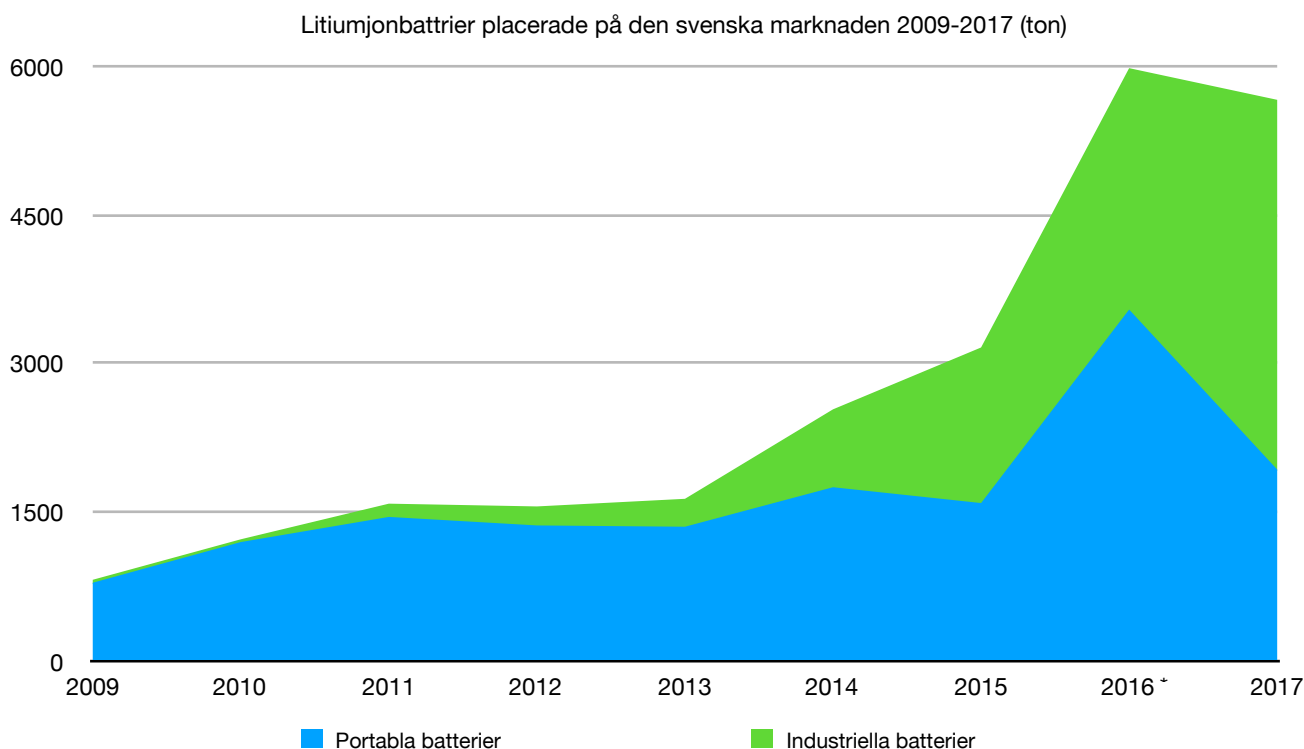
Dels gör det att batterierna i många fall följer med sina applikationer när de säljs och exporteras vilket gör att de aldrig når återvinningen över huvudtaget, åtminstone inte på den marknad där de först såldes.

## Förbrukade mängder av litiumjonbatterier i Sverige och världen

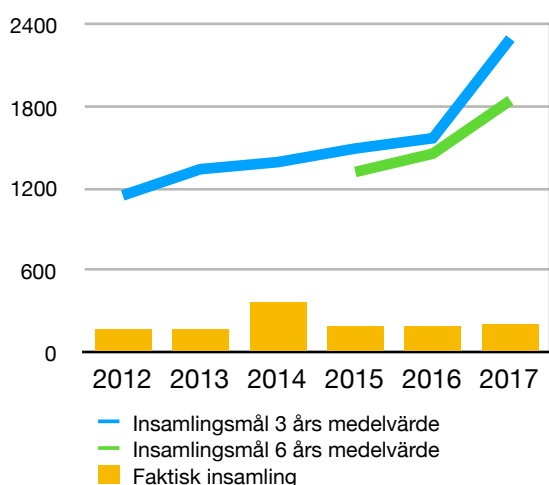
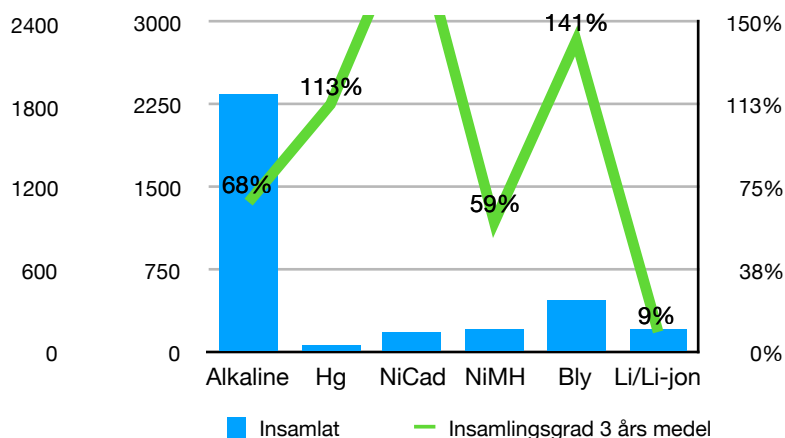
Ett litiumjonbatteris kapacitet minskar både i takt med att det används och pga att det blir äldre. Hur snabbt detta går beror på en rad faktorer som hur batterier har använts, om det använts som en enskild cell eller i ett större pack, samt vilken typ av batteri det är. LCO-batterier som används i elektronik beräknas i regel ha mellan 500 och 1000 cykler medan ett LFP- eller NCA-batteri i ett energilager har visat sig kunna användas i över 2000 cykler innan de tappat mer än 20 procent av sin kapacitet. Slutligen kommer dock alla batterier att sluta fungera.

Det är dock inte alltid det är batteriets livslängd som gör att det anses vara förbrukat eller "end-of-life" – EOL. I många fall kan det vara den utrustning som batteriet sitter i som betraktas som förbrukat medan batteriet i sig fortfarande fungerar utmärkt. Det finns idag ingen tillgänglig statistik över hur stor mängd batterier i Sverige som varje år når EOL. Den enda informationen som finns är hur mycket som sätts på marknaden samt hur mycket som samlas in för att återvinnas och vad som slutligen återvinns. Vad som samlas in av samlingsorganisationer och återvinnare är dock inte samma sak som hur många batterier som nått EOL.

Ett sätt att beräkna mängden portabla batterier som nått EOL är att använda utgångsvärdet i beräkningen av det årliga insamlingsmålet i EU's batteridirektiv. Direktivet säger att 45 procent av ett genomsnitt av de tre föregående årens volym som satts på marknaden ska samlas in. Ett antagande skulle därmed kunna vara att detta genomsnitt skulle motsvara mängden förbrukade batterier och 45 procent motsvarar vad man finner vara rimligt att medlemsländerna ska kunna samla in av denna mängd.



\* Den kraftiga ökningen av portabla batterier 2016 är troligtvis ett rapporteringsfel till Naturvårdsverket. Volymen ska sannolikt fördelas ut över både 2015 och 2017.

Litiumjonbatterier i Sverige –  
insamlade ton och insamlingsmål  
2012-2017Portabla batterier i Sverige – insamlade  
ton och insamlingsgrad 3 års medel  
2017

Översatt till Naturvårdsverkets statistik skulle det innebära att mängden portabla litiumjonbatterier i Sverige som 2017 nådde EOL skulle vara 2297 ton. Detta ska ställas mot mängden insamlade portabla litiumjonbatterier samma år som var 206 ton vilket motsvarar en insamlingsgrad på 9 procent. En studie genomförd av den europeiska samarbetsorganisationen för batteri-insamlare, EUCOBAT, har dock visat att tre år är en för kort tid och att människor behåller sina batterier snarare i sex år istället för tre<sup>5</sup>. Skillnaden i insamlingsgrad för svensk del skulle dock inte bli radikalt annorlunda utan då uppgå till 11 procent.

Den låga insamlingsgraden för litiumjonbatterier blir ännu mer synlig när den jämförs med insamlingsgraden för övriga batterityper. I vissa fall är dessa påverkade av utfasning, framförallt när det gäller kvicksilver och nickel kadmium, vilket gör att fler batterier samlas in än vad som sätts på marknaden. Även andra batterityper som alkaline och bly-syra-batterier har också kortare livslängd än litiumjon. Men skillnaden är ändå uppseendeväckande, inte minst i jämförelse med nickel-metallhydrid som har en liknande livslängd och användningsområde som litiumjonbatterier.

För industriella batterier är det rimligt att tiden mellan att batteriet satts på marknaden till att det är förbrukat är ännu längre då dessa batterier i många fall är designade för att hålla i många år, i vissa fall över 10 år. Men även om man använder ett genomsnitt av vad som sattes på marknaden för 6-8 år sedan så är inte insamlingsgraden mer än 16 procent. Detta är långt från Sveriges insamlingsmål som är 95 procent.

Siffrorna stämmer väl överens med hur det ser ut i många andra länder i Europa<sup>6</sup> liksom i USA<sup>7</sup> och Australien<sup>8</sup> som rapporterar från 2 till 11 procents insamlings- och återvinningsgrad.

Det finns idag väldigt lite akademisk forskning som har försökt förklara den låga insamlingen. En förekommande förklaring är att batterierna istället slängs i hushållsavfallet och att även elbilsbatterier skulle läggas på deponi<sup>9</sup> <sup>10</sup>. Vi har

<sup>5</sup> Colin, Jeroen; How battery life cycle influences the collection rate of battery collection schemes; Eucobat, conference presentation ICBR; 2017

<sup>6</sup> GRS Batterien Annual Review 2017

<sup>7</sup> Call2Recycle Annual Report 2017

<sup>8</sup> <https://www.csiro.au/en/News/News-releases/2018/Australia-to-lead-lithium-ion-battery-recycling-charge>

<sup>9</sup> <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378775307026195>

<sup>10</sup> <sup>10</sup> <https://www.csiro.au/en/News/News-releases/2018/Australia-to-lead-lithium-ion-battery-recycling-charge>

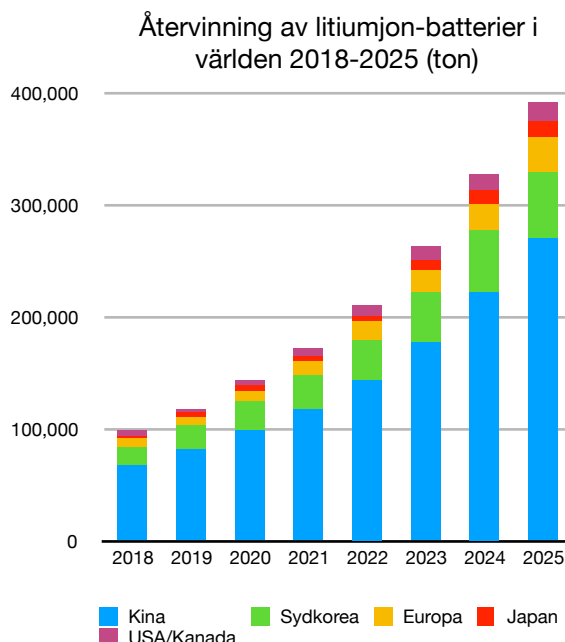
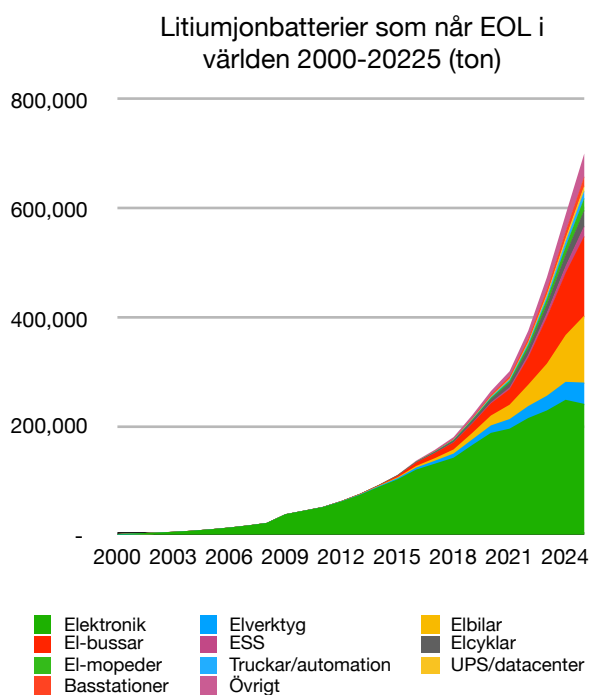
dock inte funnit några studier som stödjer detta genom att undersöka hur mycket batterier som faktiskt läggs på deponi utan påståendena är endast antaganden att de batterier som inte samlas in slängs på annat sätt.

Ett annan förklaring som ofta refereras är att batterierna hamstras i hem och företag, främst i den utrustning som de från början varit installerad i som t ex mobiltelefoner. Flera studier<sup>11</sup> har gjorts på detta område som bekräftar att folk i många fall behåller sin gamla telefon när de köper en ny. Det finns dock inte någon studie på området som ens kommer i närheten att förklara hela den stora diskrepansen mellan insamling och förbrukning.

Circular Energy Storage's förklaring är att stora mängder av batterierna istället exporteras<sup>12</sup>. Dels genom att framförallt smarta telefoner och läsplattor, men även bärbara datorer, exporteras till Kina för rekonditionering och återanvändning. I dessa fall går batterierna med som en del i utrusningen som exportras. Dels sker det genom att batterier som samlats in av t ex elektronikåtervinningsföretag säljs till återvinnare i framförallt Sydkorea eller Kina för återvinning eller till rekonditioneringsföretag som använder batterierna i t ex portabla mobilladdare. Denna allt mer omfattande handel gör att stora mängder batterier som annars skulle ha återvunnits i Europa istället blir tillgängliga för återvinnare i Asien.

Detta innebär att bara för att återvinningsgraden av litiumjonbatterier är låg i Europa så betyder det inte att återvinningsgraden är låg globalt. Istället har Circular Energy Storage gjort beräkningen att så mycket som 97 000 ton återvanns under 2018 varav 67 000 ton i Kina och 18 000 ton i Sydkorea.

Skälet till att så få industriella batterier återvinns är en kombination av att batterierna helt enkelt har hållit längre än vad som förväntades, samt att en stor andel batterier återanvänds i nya applikationer. Framförallt är det elbilsbatterier som används i energilagrar. Det finns även en stor andel batterier som bara lagerhålls i väntan på att företag ska fatta beslut om hur de ska användas. Än så länge kommer dock 80 procent av batterierna som når EOL från elektronik.



<sup>11</sup> <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X16307607>

<sup>12</sup> The lithium-ion battery end-of-life market 2018-2025, Circular Energy Storage, 2018

## Återvinning av litiumjonbatterier

Den bild av att litiumjonbatterier inte kan återvinnas som ofta förmedlas i såväl media som i många forskningsrapporter stämmer inte. Det finns idag över 50 företag runt om i världen som återvinner litiumjonbatterier i någon skala, från små laboratorieanläggningar till fullskaliga fabriker<sup>13</sup>. Flest företag finns i Kina följt av EU, Sydkorea, Japan, Kanada och USA. I princip så har varje marknad större kapacitet än utbud av batterier att återvinna.

Strukturen och metoderna ser olika ut på de olika marknaderna. Den största marknaden för återvinning av litiumjonbatterier, Kina, består av över 30 företag som i olika grad återvinner både avfallsbatterier och produktionsavfall. Metoderna är nästan uteslutande hydrometallurgiska och slutprodukterna är i regel olika kemiska produkter som t ex koboltsulfat, nickelsulfat eller litiumkarbonat. Många företag producerar också kompletta blandningar för att t ex producera försteg till NCM- eller NCA-katoder (precursors). Mer än en tredjedel av företagen är knutna till producenter av katod- eller anodmaterial. De stora volymerna kommer både från stora mängder spill och bortsorterade nya produkter, samt från avfallsbatterier som inte minst samlats in från återanvändningsmarknaden där batterier byts ut och säljs till handlare som i sin tur säljer till återvinnarna.

Även flera av de stora litiumproducenterna har, eller planerar att investera i återvinningsanläggningar och använder återvunnet material i sina produkter. Konkurrensen om batterier att återvinna är mycket hög vilket också gör att priserna är högre än någon annanstans. I princip alla typer av celler, även LFP, har positiva värden i Kina, dvs återvinnarna betalar för att komma över materialet.

I Sydkorea arbetar också återvinnare tätt ihop med materialföretag. Flera företag har länge importerat material från framförallt Nordamerika för att producera batterikemikalier till sydkoreanska batteritillverkare. På senare år har Sydkorea också blivit en väg in i Kina dit batterier inte kan skeppas som avfall. Kopplingarna till Kina har också ökat genom kinesiska förvärv av sydkoreanska återvinnare samt genom joint ventures. Metoderna är liksom i Kina främst hydrometallurgiska och de huvudsakliga produkterna är olika föreningar av kobolt, nickel och litium.

Europa har ett tiotal företag som på olika sätt behandlar litiumjonbatterier. Utbytet är inte lite stort som i Kina och Sydkorea vilket främst beror på lägre volymer vilket inte gör det lönsamt att utvinna alla ämnen. Både pyrometallurgiska och hydrometallurgiska metoder används samt kombinationer därav. Trots att flera befintliga anläggningar har mycket små volymer i förhållande till sin kapacitet planeras ytterligare anläggningar i olika delar av unionen. Volymerna i Europa kommer främst ifrån insamlingsorganisationer av portabla batterier men också genom kontrakt med producenter som sätter industriella batterier på marknaden. Till skillnad från Sydkorea och Kina producerar ingen återvinnare i Europa färdiga produkter till batterimaterial-marknaden utan säljer istället s k svart massa eller kemiska föreningar som kräver vidare behandling för att kunna användas i produktion av nya batterier. Detta gör också att värdena på batterierna i Europa är betydligt lägre eller till och med negativa vilket ytterligare bidrar till de låga volymerna.

USA och Kanada tillhör pionjärerna inom återvinning men idag är volymerna begränsade då de största mängderna exporteras till Sydkorea, Kina och till viss del till Europa. Flera uppstartsföretag är på gång att starta processer, framförallt i Kanada. Från att både ha använt hydrometallurgiska och pyrometallurgiska metoder är de kvarvarande, samt de nya processerna, enbart hydrometallurgiska i kombination med mekaniska processer.

Även Japan tillhör pionjärerna men lider liksom Europa och Nordamerika av att volymer exporteras till Kina och Sydkorea. Trots en stor marknad för katodmaterial har den låga volymen gjort att metoderna utvecklats lite under flera decennier. Andra växande marknader för litiumjonåtervinning är Malaysia, Indonesien, Filippinerna och Singapore som även importerar batterier från Europa och varifrån material kan exporteras till Kina.

<sup>13</sup> The lithium-ion battery end-of-life market 2018-2025, Circular Energy Storage, 2018

## Återbruk av litiumjonbatterier

Det största skälet till de låga volymerna av industriella batterier är att dessa fortfarande används i sina ursprungliga applikationer. Men i takt med att de batterier av olika skäl klassificeras som förbrukade så återanvänds också fler och fler i nya applikationer.

Pionjärerna inom detta segment är naturligt nog de företag som var tidiga med elbilar: Nissan, Renault, BMW, och Daimler<sup>14</sup>. En lång rad av projekt och initiativ har tagits av dessa företag vilket omfattat energilager i hem samt industrier och kommersiella lokaler, större energilager i regionala eller nationella elnät eller stöd för laddning av elbilar i både hem och för laddstationer.

I flera fall så har nämnda fordonstillverkare skapat lösningar som kombinerar nya och använda batterier. Ett skäl till detta är att mängden batterier som kommer tillbaka fortfarande är väldigt liten. Det finns idag större kapacitet i energilagerinstallationer att fylla än vad det finns tillgängliga batterier.

Samma situation råder i Kina där batterier från framförallt bussar och tidiga elbilar har börjat att komma tillbaka. I ett statligt drivet initiativ finns det ett avtal tecknat av 16 av de största batteri- och fordonsföretagen och landets operatör av basstationer att använda batterierna som reservkraft. Med 1,9 miljoner basstationer med ett snittbehov av runt 100 kWh finns det därmed även i Kina ett större behov än vad det än så länge finns tillgängliga batterier. Hittills har 10 000 ton EOL-batterier återanvänts i backup-lösningar, motsvarande en kapacitet på 800 MWh eller 2 procent av behovet.

Förutom återanvändning så används förbrukade batterier till återtillverkning av elbilsbatterier för att kunna serva eftermarknaden. Detta är sin tur ett skäl till varför flera tillverkare inte är mer aktiva inom energilagerlösningar då de batterier de kommer över helt enkelt går åt till egen återproduktion.

Ett annat hinder för bil- och batteritillverkare att satsa på energilager, eller att på annat sätt dra nytta av återbruksmarknaden, är att de inte har kontroll över batterierna. För industriella batterier säger lagen i Europa att den som sätter industriella batterier på marknaden också ansvarar för att batteriet tas tillbaka och återvinns, såvida inget annat avtalats. Det finns däremot ingenting som säger att en ägare måste sända batteriet tillbaka till tillverkaren. Det innebär att batterier som till exempel förvärvas av bildemonteringsföretag snarare går till den som är beredd att betala mest för batteriet. Bara när batteriet är skadat och kan antas ha ett negativt värde är det sannolikt att den lagliga rätten att skicka tillbaka batteriet kommer att utnyttjas så länge inget annat avtalats mellan säljare och köpare.

Marknaden för energilagerlösningar baserade på återanvända batterier förväntas av flera bedömare att öka kraftigt<sup>15</sup>. Men det är inte den enda återbruksmarknaden. Som tidigare nämnts återanvänds en stor mängd portabla batterier<sup>16</sup>. Framst sker detta i Kina, vilket också är hur förbrukade batterier kommer in i landet utan att klassificeras som avfall, men det finns även företag i både USA och Europa som testar och säljer batterier. Batterierna kan sedan användas i sina ursprungliga produkter såsom mobiltelefoner eller bärbara datorer eller mobilladdare och mindre pack.

<sup>14</sup> The lithium-ion battery end-of-life market 2018-2025, Circular Energy Storage, 2018

<sup>15</sup> <https://www.idtechex.com/research/reports/second-life-electric-vehicle-batteries-2019-2029-000626.asp>

<sup>16</sup> The lithium-ion battery end-of-life market 2018-2025, Circular Energy Storage, 2018

# Sammanställning av forskning om återvinning och återbruk av litiumjonbatterier

Som nämnts i tidigare kapitel så var återvinning och återbruk av litiumjonbatterier från början drivet av industrin och enskilda entreprenörer. Det dröjde ända till år 2000 då de första forskningsartiklarna publicerades. Det var då dels i form av en översikt av den redan då existerande marknaden<sup>17</sup>, en beskrivning av en industriellt framtagen process<sup>18</sup> samt ett första vetenskapligt experiment med mål att återvinna ämnen från ett LCO-batteri<sup>19</sup>.

Sedan dess har forskning om hela EOL-området för litiumjonbatterier ökat för nästan varje år. Forskningen som gjorts på området kan delas in i fyra kategorier:

- Industriell forskning och utveckling
- Akademiska översikter och systemanalyser
- Akademiska experiment, modelleringar och framtagning av ny teknik
- Akademiska livscykelanalyser

I denna sammanställning har vi framförallt koncentrerat oss på den akademiska forskningen men även sneplat på vad som gjorts inom företagen genom att studera olika patent eller gå igenom olika offentligt finansierade forskningsprojekt.

## Syfte och frågeställningar

Syftet med sammanställningen har som tidigare nämnts varit att svara på vilken forskning som finns tillgänglig inom EOL-området för litiumjonbatterier och att identifiera potentiella vita fläckar. Rent konkret har tre frågor stått i centrum:

1. Vilken forskning finns tillgänglig inom de olika delområdena?
2. Vad är de huvudsakliga resultaten i denna forskning?
3. Var har forskningen genomförts?

Målet har varit att ge en bild av hur mycket vi vet, eller snar har möjlighet att veta, baserat på vad som finns tillgängligt i offentligt publicerad forskning.

## Metod och tillvägagångssätt

Fokus i arbetet har varit att söka identifiera så många forskningskällor som möjligt och dela in dessa i en grov struktur. Artiklar har därefter sökts genom att använda Google Scholar med ett antal fasta sökord inom fyra olika områden:

1. Generering och insamling av litiumjonbatterier: bl a *“collection lithium-ion batteries”*, *“collection EV batteries”*
2. Återanvändning av litiumjonbatterier: bl a *“second life lithium-ion batteries”*, *“reuse of lithium-ion batteries”*
3. Återvinning av litiumjonbatterier: bl a *“recycling lithium-ion batteries”*, *“recycling EV batteries”*
4. Livscykelanalys för litiumjonbatterier: bl a *“life cycle assessment lithium-ion batteries”*, *“life cycle analysis lithium-ion batteries”*, *“life cycle assessment EV batteries”*, *“life cycle analysis EV batteries”*

<sup>17</sup> <https://www.osti.gov/biblio/761281>

<sup>18</sup> <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378775301006000>

<sup>19</sup> <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378775300005231>



Sökningarna sorterades efter relevans och avslutades efter att tre efterföljande sidor utan relevanta artiklar kommit i en följd.

Efter sökningarna gick källorna igenom i de 10 mest citerade artiklarna i varje kategori för att fylla på med artiklar som inte fångats upp av sökbegreppen.

Artiklarna i Google Scholar är till största delen granskad forskning som publicerats i olika vetenskapliga tidskrifter. Här finns dock även utdrag ur vetenskapliga textböcker representerade liksom i ett fåtal fall rapporter utgivna av institut och forskningsföretag. Endast forskning publicerad på engelska har tagits med i sammanställningen även om artiklar publicerade på andra språk kommit upp i sökningarna.

Efter att artiklarna identifierats har abstract studerats för att klassificera texterna i olika delområden inom sina respektive områden. Cirka en fjärdedel av texterna har helt eller delvis gått igenom för ytterligare fördjupning.

Utöver sökningarna i Google Scholar har även Google's öppna sökmotor använts för att identifiera svensk forskning inom området. Detta har kompletterats av genomgång av projekt finansierade av t ex Energimyndigheten, Mistra och Vinnova. Sökningar har också gjorts på samtliga svenska universitet och forskningsinstitut.

Slutligen har även Google använts för att identifiera genomförda och pågående EU-projekt och i förekommande fall nationella projekt i andra länder än Sverige, bl a USA och Storbritannien. Vidare sök har också gjorts på de berörda myndigheters projektsammanställningar som t ex EU eller Innovate UK.

## Forskning om generering och insamling av EOL-batterier

Generering och insamling omfattar alla företeelser och aktiviteter som påverkar eller som krävs för att batterier ska nå både återbruk och återvinning. De processer som finns inom området har sällan någon högre teknisk höjd även om det finns moment, främst avseende säkerhet, där tekniska lösningar och analyser spelar en stor roll.

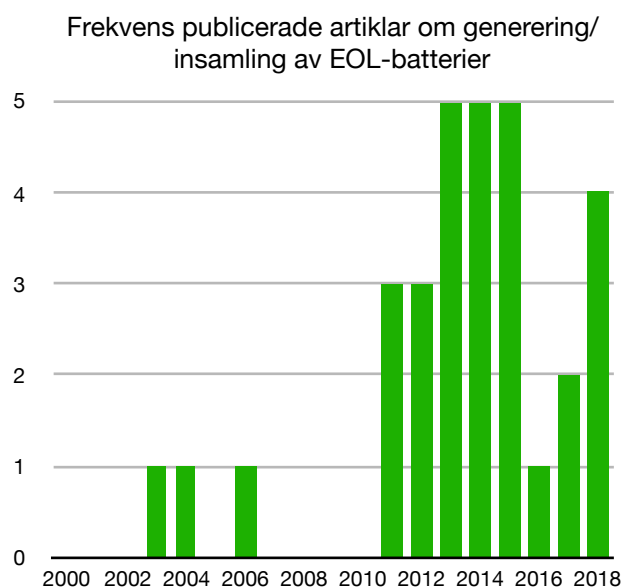
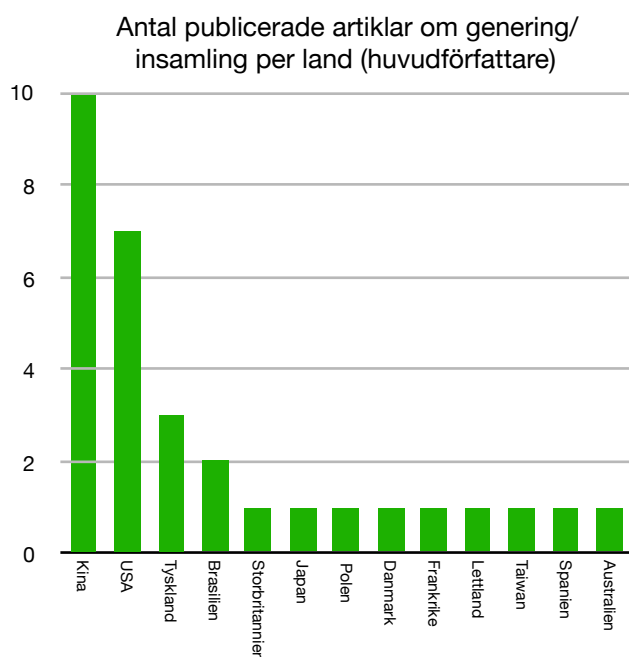
Området är dock oerhört viktigt eftersom resultatet av både generering och insamling påverkar nästa steg i processen. Om inga batterier samlas in finns inga stora behov av att återvinna och de batterier som samlas in riskerar en ineffektiv återvinning eftersom det saknas tillräckliga volymer.

Ett närliggande område är forskning om företags eller länders övergripande EOL-strategi där alternativ som återvinning och återanvändning diskuteras utifrån hur de kan användas för att optimera hela EOL-kedjan. Resultaten i denna typ av studier tydliggör framförallt vilka ekonomiska men även miljömässiga incitament som finns för insamling av batterier.

Delområden som är relevanta att studera är:

- Livslängd och karaktär på batterier som satts på marknaden
- Uppkomst av och marknadskanaler för förbrukade batterier
- Insamlings- och affärsmodeller samt end-of-life-strategier
- Insamlings och transportmodeller
- Faror och säkerhetsaspekter vid insamling och transporter
- Sortering, klassificering och beslut om nästa användning

Trots områdets vikt för hela återvinningskedjan finns det tämligen få studier som täcker in områdena ovan. I våra sökningar har vi bara hittat 31 granskade forskningsartiklar som berör insamling av litiumjonbatterier inklusive artiklar om elektronik och blandade avfallsbatterier. Artiklarna är spridda över världen med 10 från Kina, 9 artiklar från EU, 7 från USA och 5 från övriga världen.



## Livslängd och uppkomst av EOL-batterier

Medan det finns ett stort antal studier om litiumjonbatteriers livslängd ur ett tekniskt perspektiv (berörs mer i avsnitt om återanvändning och LCA) så är det förvånansvärt sparsamt med forskning runt livslängd för batterier ur ett EOL-perspektiv. Det finns en lång rad studier om t ex medellivslängd för mobiltelefoner<sup>20</sup> och i vilken takt de når återvinning<sup>21</sup> <sup>22</sup> <sup>23</sup> <sup>24</sup> <sup>25</sup> <sup>26</sup>. Ingen av dessa studier tar däremot upp hur insamlingen av mobiltelefoner påverkar insamlingen av de ingående batterierna. När det gäller studier av annan elektronisk utrustning med batterier har vi inte kunnat hitta någon studie som kan användas som utgångspunkt för hur lång tid det tar för t ex bärbara datorer eller läsplatton att nå EOL.

Den enda akademiskt forskning om uppkomst av litiumjonbatterier återfinns dels i en studie<sup>27</sup> kring hur mycket sällsynta metaller från batterier som genereras genom elektronikavfall. Dels som resultat från EU-projektet ProSum<sup>28</sup>. Målet i detta projekt har varit att skapa en databas för all tillgänglig data om volymer, flöden och behandling av elektronikavfall, EOL-fordon, avfallsbatterier och gruvavfall. Databasen som kallas Urban Mine Platform<sup>29</sup> är tillgänglig för vem som helst och innehåller mycket värdefull information för prognosbyggande eller ren förståelse för hur materialflödena ser ut. Av något skäl saknas dock batterier från lätta och tunga fordon i databasen.

Därutöver har återvinningsföretaget Accurec genomfört en liknande studie<sup>30</sup> där man gjort uppskattningar och prognoser för hur mycket batterier som satts på den Europeiska marknaden och hur mycket som beräknas nå EOL och slutligen återvinnas. I en rapport från CEPS som gjorts inom ramen för EU-projektet Circular Impacts har prognoser gjorts för hur mycket råvaror som kommer att bli tillgängliga från återvinning av elbilsbatterier i Europa 2040. Som en del i detta man gjort prognoser för EOL-flöden av fordon.

I förarbetet till The Urban Mine Platform har flödesanalyser gjorts där man tagit hänsyn till såväl export som import av både batterier och utrustning med batterier i. Man har också tagit hänsyn till återanvändning. I själva databasen är det dock inte tydligt hur mycket som blir till avfall i Europa och hur mycket som exporteras. Studierna från Accurec och CEPS tar inte hänsyn till export över huvudtaget. CEPS har dock tagit hänsyn till återanvändning i sin prognos.

## Insamling av batterier

Av de artiklar som specifikt studerar insamling är flertalet översikter som beskriver nuvarande situation i respektive land samt i flera fall hur det ser ut i övriga världen. Samtliga av dessa studier handlar om insamling av bärbara avfallsbatterier av alla olika kategorier såsom alkaline, nickel kadmium etc. I de flesta fall är studierna gjorda av forskningsinstitutioner i länder där insamlingen inte har någon längre tradition eller relativt låg acceptans som t ex Lettland, Spanien, Polen och Brasilien. Bland studierna finns flera där forskarna genomfört simuleringar och modelleringar av olika insamlingsmodeller där t ex pant varit en komponent. Bland resultaten belyser forskare vikten av såväl ekonomiska incitament som en väl utbyggd insamlingsinfrastruktur.

<sup>20</sup> <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X12001390>

<sup>21</sup> <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X11000663>

<sup>22</sup> <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652616305893>.

<sup>23</sup>[PDF] [Electronics waste: recycling of mobile phones](#)

<sup>24</sup> <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X16307607>

<sup>25</sup> <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X16307607>

<sup>26</sup> [https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/41061015/Leopold\\_Nichawa\\_Yangke.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAWOWYGGZYS3UL3A&Expires=1547860128&Signature=Xot%2BabmG0KcAdcE5a8T4BOO%3D&response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DWhat\\_do\\_I\\_do\\_with\\_my\\_old\\_mobile\\_phones.pdf](https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/41061015/Leopold_Nichawa_Yangke.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAWOWYGGZYS3UL3A&Expires=1547860128&Signature=Xot%2BabmG0KcAdcE5a8T4BOO%3D&response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DWhat_do_I_do_with_my_old_mobile_phones.pdf)

<sup>27</sup> <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X15003608>

<sup>28</sup> <http://www.prosumproject.eu/objectives>

<sup>29</sup> <http://www.urbanmineplatform.eu/homepage>

<sup>30</sup> [PDF] [Investigation about Lithium-Ion Battery Market Evolution and future Potential of Secondary Raw Material from Recycling](#)

Dessa studier har lika hög relevans för litiumjonbatterier som för övriga batterityper i de fall batterierna samlas in på liknande sätt. Däremot belyser ingen av studierna varför just litiumjonbatterier har lägre insamlingsgrad än övriga batterityper eller hur dessa batterier skiljer sig från övriga på det sätt som redovisades i denna rapports inledningskapitel.

Endast en studie har hittats som specifikt undersöker mängden batterier som slängs i hushållsavfall<sup>31</sup>. Studien som är gjord i Danmark 2013 visar att mängden batterier som slängs i hushållsavfallet är relativt hög (4g per hushåll och vecka) men att mängden litiumjonbatterier är mycket liten och endast förekommande inbyggd i elektronik. Istället är det engångsbatterier som står för den stora mängden.

Utanför den internationellt tillgängliga forskning har ett projekt genomförts i Sverige om blandade avfallsbatterier på Chalmers Tekniska Högskola: "Effektivare insamling av batterier med konsumenterna i fokus"<sup>32</sup>. Bland resultaten fanns en modell för att beräkna insamlingsgraden för batterier och data som visar på tre års medianålder hos insamlade AA- och AAA-batterier, vilket innebär att 50% av batterierna som samlas in är äldre än så. Projektet har fått en fortsättning i en fas två där syftet är att ta fram bättre insamlingsmetoder för både lösa och apparatbundna batterier<sup>33</sup>.

## Studier om litiumjonbatterier

Artiklar som fokuserar på litiumjonbatterier gör det i regel utifrån ett mer holistiskt perspektiv där man diskuterar hela EOL-kedjan. Denna kedja ser olika ut beroende på om det handlar om bärbara eller industriella batterier. Här kan studierna delas in i tre olika kategorier; bärbara batterier, elbilsbatterier och litiumjonbatterier generellt.

Den mest kompletta studien om bärbara litiumjonbatterier är gjord av Gu et al<sup>34</sup> och täcker hela återvinningskedjan av batterier i elektronik i Kina. Studien beskriver ingående de olika leden från konsument till återvinnare. Författarnas slutsats är att mindre än 10 procent av batterierna återvinns och att det krävs omfattande policyförändringar för att öka insamlingen. En annan analys av den kinesiska marknaden har gjorts av Zeng et al.<sup>35</sup>. Studien som studerar både portabla och industriella batterier är även den en översikt över hela kinesiska återvinningsmarknaden för litiumjonbatterier och liksom i den tidigare föreslås policyåtgärder, framförallt för insamling och hantering av elbilsbatterier.

Wang et al<sup>36</sup> har gjort en omfattande analys av hur förändrade materialvärden i litiumjonbatterierna kommer att påverka insamling och hantering av batterier i USA. Genom att koboltinnehållet minskar försämrar incitamenten för återvinnare att samla in batterier vilket enligt författarna ger skäl till att förändra lagstiftning kring krav på insamling och återvinning. Frågeställningarna finns även med i två av författarnas doktorsavhandlingar där de gör fördjupande studier av de ekonomiska och miljömässiga konsekvenserna av hanteringen av batterierna<sup>37</sup>.

I en studie av Winslow et al.<sup>38</sup> görs en liknande analys där de föreslår att litiumjonbatterier borde klassas som farligt avfall för att därigenom kunna styra även mindre värdefulla cellkemier till återvinning. Ingen av studierna tittar på hur återbruksmarknaden är med och styr flödena.

<sup>31</sup> <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X13002493>

<sup>32</sup> <http://www.energimyndigheten.se/forskning-och-innovation/projektdataas/sokresultat/?projectid=18810>

<sup>33</sup> <http://www.energimyndigheten.se/forskning-och-innovation/projektdataas/sokresultat/?projectid=24127>

<sup>34</sup> <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652617311332>

<sup>35</sup> <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211500859X>

<sup>36</sup> <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030147971400036X>

<sup>37</sup> <https://scholarworks.rit.edu/theses/9308/>, <https://scholarworks.rit.edu/theses/8306/>

<sup>38</sup> <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344917303774>

En ytterligare analys, som tar sin utgångspunkt i materialvärden på den japanska marknaden, har gjorts av Asari and Sakai<sup>39</sup>. Forskarna har studerat hur batterier med högt koboltinnehåll kommer från användarna till återvinning i Japan och undersöker bl a vilken kunskap och attityd människor har till återvinning och vad de faktiskt gör med sina batterier.

I en rapport skriven av Boxall et al<sup>40</sup> studeras insamling och återvinning av litiumjonbatterier i Australien. I studien dras slutsatsen att merparten av batterierna läggs på deponi och att det finns en stor ekonomisk potential om batterierna istället återvanns. I rapporten görs dock ingen undersökning av huruvida batterierna läggs på deponi utan uppgiften komma från en tidigare konsultrapport där man utgår från att allt som inte samlats in istället deponeras. Författarna drar slutsatsen att insamlingsgraden kan öka genom policyåtgärder och förbättrad kommunikation.

Studier om industriella batterier som inte är elbilbatterier lyser med endast ett undantag helt med sin frånvaro. Undantaget är en studie<sup>41</sup> av insamling av el-cykelbatterier på den kinesiska marknaden och är intressant inte minst för att den tar upp skillnaden i insamlingsgrad mellan blysyra-batterier och litiumjonbatterier med utgångspunkt i deras respektive materialvärden.

Det finns inga studier gjorda av den europeiska marknaden vad gäller insamling av bärbara litiumjonbatterier. Vi har heller inte hittat någon studie som tar upp återbruk av bärbara batterier och hur det påverkar flödena.

## Studier om insamling av elbilbatterier

När det gäller elbilbatterier så har flera studier gjorts i Kina, USA och Tyskland, vilket också var de tidiga länderna med större volymer av elbilar. Gemensamt för ett antal av studierna är de belyser hela kedjan, från att batteriet anses ha nått EOL till att de når återanvändning eller återvinning.

Med start 2012 gjordes flera studier som baserat på potentiella värden, både positiva och negativa, i EOL-kedjan föreslår olika typer standarder, mål och organisationsstrukturer. Hoyer et al<sup>42</sup> föreslår ett högre återvinningskrav som styrmedel för att säkerställa en hög insamlingsgrad av elbilbatterier medan Xu et al<sup>43</sup> föreslår standarder för att skapa struktur på den kinesiska marknaden för EOL-batterier.

Betydelsen av återanvändning finns med i flera studier i USA och Kina där det pekas på att värdena för återanvändning-batterier är betydligt högre än om de direkt återvinns.

I en studien av Quiao<sup>44</sup> et al täcks de ekonomiska konsekvenserna av återvinningen och hur det kan tänkas påverka insamlingen. I studien konstateras att återvinning av elbilar med NMC-batterier genererar en bruttovinst på 474 USD efter inköp av fordonet för 569 USD. Författarna kom fram till att katodmaterialet i batteriet svarade för över 60 procent av de totala intäkterna. Trots att studien inte tar hänsyn till återanvändning som generellt sett genererar ännu högre värden, så är den viktig då den pekar på hur stor vikt batteriets värde har för återvinning av bilen vilket ger en tydlig indikation om hur flödet kommer att se ut när bilarna når EOL.

Det finns två studier som specifikt tittar på livslängden på elbilbatterier utifrån ett återvinningsperspektiv. En studie gjord av Natkunarajah et al<sup>45</sup> som omfattar den tyska marknaden kommer fram till ett antal scenarier hur snabbt

<sup>39</sup> <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344913001924>

<sup>40</sup> <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S089268751830390X>

<sup>41</sup> <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X1630530X>

<sup>42</sup> [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-4451-48-2\\_88](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-4451-48-2_88)

<sup>43</sup> <https://www.scientific.net/AMR.610-613.2170>

<sup>44</sup> <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344918303288>

<sup>45</sup> <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827115004849>

batterierna kommer tillbaka och tar också hänsyn till att batterier kommer att återanvändas i energilagerlösningar. En studie gjord av Richa et al<sup>46</sup> analyserar samma sak för den amerikanska marknaden. Båda studierna är mycket användbara för att förstå i vilken takt batterier kan tänkas nå återvinningen.

Utöver de granskade artiklarna så har insamlingsområdet studerats och resultat har publicerats inom ramen för ett mindre antal projekt. I det europeiska forskningsprojektet ELIBAMA<sup>47</sup> med målet att förstärka och påskynda skapandet av en europeisk elbilsbatteriindustri inriktad på storskalig produktion av elbilsbatterier, studerades den omfattade logistikkedjan kring EOL-batterier i ett arbetspaket. Projektet föreslog olika standardiseringsåtgärder inom tre olika områden: EOL-logistik, rekommendationer för enkel demontering av batterier samt standardiserad ekodesign för förbättrad återvinning.

Det finns behov av ytterligare forskning inte minst pga att området förändras så fort. Det måste dock sägas att det inom just detta område börjar byggas upp en kunskapsbas med flera studier som kan byggas vidare på när jämförelser görs i andra länder och när mer primärdata från t ex återanvändningsinstallationer eller mer fullskalig återvinning kan utvärderas.

## Övriga områden inom generering och insamling

Det som är mest anmärkningsvärt inom detta områden är den totala avsaknaden av studier kring transport eller fysisk hantering (innan demontering) av litiumjonbatterier. Det enda material som finns tillgängligt är presentationer av företags erfarenheter och innovationer från olika konferenser. Området har en mycket stor betydelse för både kostnader och flöden i återvinningskedjan och upptar ofta mycket tid på t ex industrikonferenser.

Vad som heller inte hittats är någon form av experiment eller pilotprojekt som testar hypoteser inom insamling utan all forskning är beskrivande.

Tillsammans med de relativt få studier som ändå finns, samt avsaknaden av studier kring export och återanvändning av bärbara och andra industriella batterier, så blir slutsatsen att generering och insamling som forskningsområde är starkt underutvecklat. Även om flera studier bidrar med mycket nyttig information för både industrin och forskningen så går det inte med ett så litet underlag går att avgöra vad som är state-of-the-art inom området. Här finns ett jättebehov. Inte minst då det inte går att utesluta att det just är den ringa samlande kunskapen om insamling och handel en starkt bidragande orsak till varför forskare inom andra delar av EOL-området drar helt felaktiga slutsatser kring insamlingsnivåer och orsaker till varför återvinningsvolymerna är så låga i t ex Europa och Nordamerika.

<sup>46</sup> <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092134491300253X>

<sup>47</sup> [https://cordis.europa.eu/project/rcn/101578\\_en.html](https://cordis.europa.eu/project/rcn/101578_en.html)



## Forskning kring återanvändning

I takt med att elbilar har blivit mer och mer etablerade har också forskning kring batteriernas livslängd och alternativa användningsområden ökat kraftigt. Sökfrasen "Lithium-ion second life" i Google Scholar gav 2010 21 träffar och har sedan dess ökat årligen och gav 2018 252 träffar. Många av dessa studier handlar dock inte specifikt om återanvändning utan t ex om åldring av batterier eller om allmänna förutsättningar för elbilar.

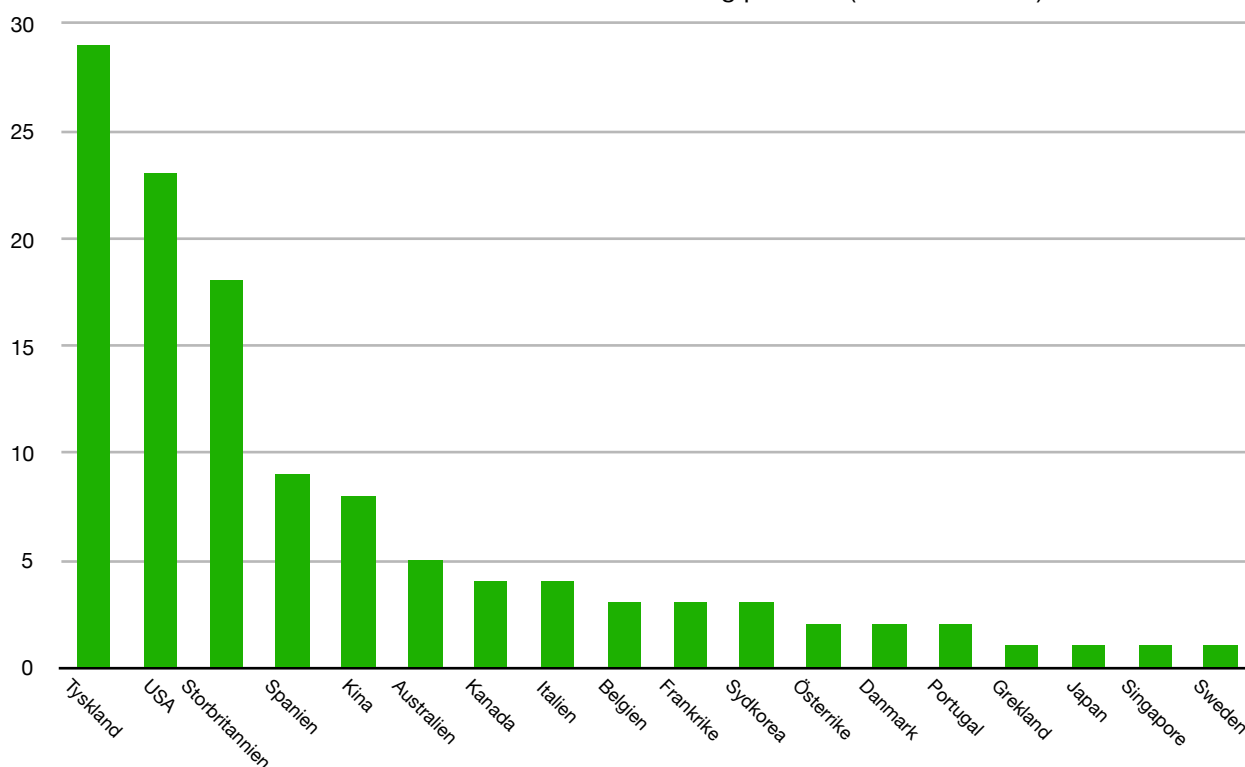
I vår sammanställning har vi hittat 166 publicerade studier som handlar om återanvändning av litiumjonbatterier eller som är särskilt relevanta för området. Exempel på det senare är studier som handlar om åldring, övervakning och styrning och där författarna specifikt har pekat på möjligheterna kring återanvändning.

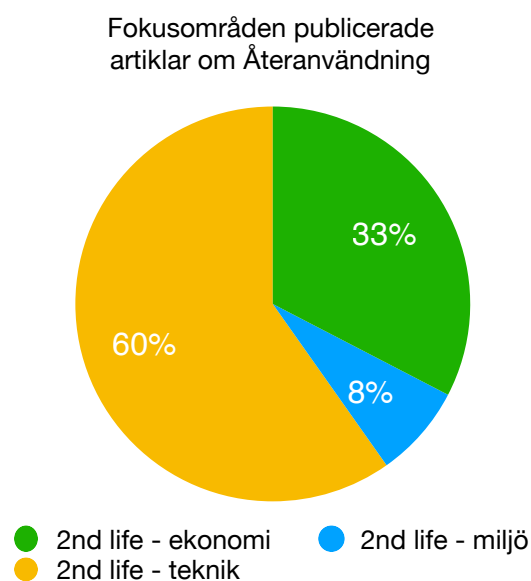
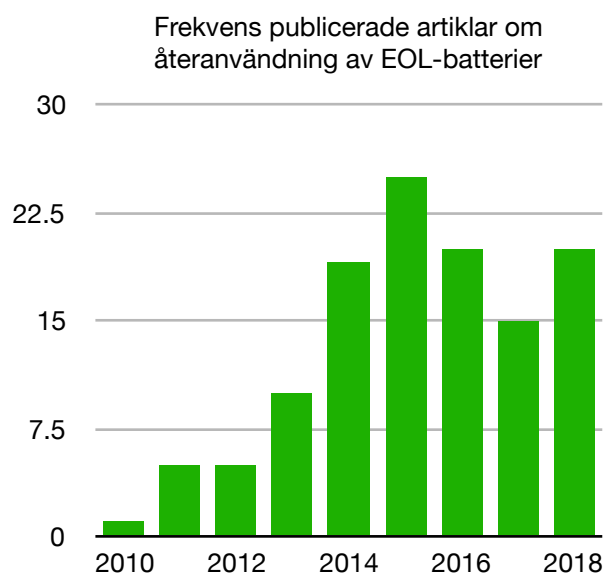
Till skillnad från insamlings- och återvinningsområdet så har utvecklingen av återbruk varit betydligt mer driven av akademiska forskningsinstitutioner. Flera av dessa studier har dock utgjort delar av större industriellt drivna projekt inte minst inom EU's sjunde ramprogram och i nationella forskningsprojekt. Totalt har sex EU- och nationella projekt publicerat sina resultat medan två ytterligare pågår vilka redovisas i separat kapitel längre fram. Flera av EU-projekten har producerat forskning som granskats och publicerats.

Det finns därmed idag en stor mängd studier med resultat som en aktör med ambition inom återanvändningsområdet direkt kan använda sig av för att både fatta beslut och direkt utnyttja i tekniska innovationer.

Att döma av var forskningen har gjorts kan man konstatera att det främst handlar om ett europeiskt intresseområde med Tyskland, Storbritannien och Spanien i topp fyra, dock med USA på andra plats. Därefter kommer Kina och Australien. Dessa länder är även de ledande länderna inom energilagring vilket har en mycket tydlig koppling till återanvändningsområdet.

Publicerade artiklar om återanvändning per land (huvudförfattare)





Intresset för området har ökat kraftigt men jämfört med t ex återvinningsområdet så är återanvändning fortfarande en ny företeelse. Det blir också tydligt i själva forskningsinnehållet som följer ett ganska tydligt mönster och ur ett (kort) historiskt perspektiv kan man urskönja dels ett antal hypoteser som både bekräftats och falsifierats, dels ett antal genomgående forskningsteman.

Framförallt har återanvändningsområdet studerats utifrån tre olika perspektiv:

- Tekniska möjligheter och begränsningar
- Ekonomisk potential
- Miljökonsekvenser

Som redan nämnts finns återanvändning även med som en viktig aspekt i forskning om batterierna, främst i sammanhang som batteriets åldring och i studier och utveckling av system för övervakning och styrning av batterier.

## Tekniska möjligheter och begränsningar

Ur ett tekniskt sammanhang så har man främst fokuserat på:

- Kvalitet och kvarvarande kapacitet i förbrukade elbilsbatterier
- Test- och verifieringsmetoder för att bestämma återbrukspotential för batterier
- Styrning av batterier i återbruksapplikationer
- Applikationer för återbruksbatterier
- Potentiell livslängd för batterier i återbruksapplikationer

Studier om batteriernas kvalitet och kvarvarande kapacitet handlar både om hur batteriernas livstid i bilen kan optimeras och vilken potential de sedan har att användas i återbruksapplikationer. Överlag är resultaten positiva med en generell uppfattning att batterierna både förutses ha ett långt liv i bilarna och att den även därefter kommer att ha

tillräcklig kapacitet för att användas i nya applikationer. Neubauer et al<sup>48</sup> konstaterar att batterier förvisso degraderas under sitt liv i fordon i flera fall mer än de ofta antagna 80 procent men trots det så finns det stora förutsättningar att använda dem i nya applikationer. Samtidigt pekar Martinez-Laserna et al<sup>49</sup>, som gjort en omfattande litteraturstudie om återbruk av elbilsbatterier, på en brist på forskning som tar hänsyn till hur snabbt batterier degraderas när de sedan används i den faktiska återbruksapplikationen.

För en köpare av batterier är detta naturligtvis helt avgörande för att kunna verifiera potentialen för t ex en energilagringsapplikation. In sin litteraturstudie påpekar också författarna på att det fortfarande saknas kunskap om hur ålder påverkar batteriernas prestanda då detta i princip inte går att testa i forcerade experiment. Författarna visade också att batterier som når det så kallade "åldringknäet", där degraderingen accelererar, inte kan användas varken i fordons- eller energilagringsapplikationer.

I linje med dessa kommentarer kan man också konstatera att det stora flertalet studier på återbruk är modelleringar där man simulerat fram data. Det saknas fortfarande publicerade studier av batterier som följts över en längre tid och speciellt under faktiska förhållanden.

Ett område som kan ha stor betydelse för batteriets degradering är styrning och övervakning av det, både när det finns kvar i bilen och när det därefter används i återbruksapplikationer. Vi har identifierat flera studier som visar positiva resultat på både det faktiska slitaget av batterierna genom t ex aktiv balansering<sup>50 51 52</sup>. Likaså finns det ett antal artiklar som beskriver nya teknik för att övervaka cellerna och på det sättet erhålla bättre kunskap om hur batteriet har varit använt<sup>53 54 55</sup>.

Vad gäller applikationer så har många tidigare studier inte bara ställt sig frågan om det går att tjäna pengar på återbruksbatterier i olika applikationer utan till och med sett dessa batterier som en möjliggörare för applikationer som energilagring. Tidiga studier hade därför i flera fall fokus på applikationer som tidigare inte varit lönsamma med fabriksnya batterier som t ex "off-grid"-lösningar<sup>56</sup> och reservkraft på landsbygden eller i utvecklingsländer<sup>57 58</sup>. De vanligaste applikationerna här är integration med solceller.

Efterhand har fokuset breddats och idag så finns forskningsresultat om integration av återbruksbatterier i större system som stödjer nationella kraftnät<sup>59 60</sup>, samt mindre applikationer som laddning av elfordon eller reservkraft. Vad som är tydligt och vad som även påtalas i litteraturstudien från Martinez-Laserna et al är att det saknas studier på större system och inte minst system som används av de stora energilagringsaktörerna.

Ett område som följs med stort intresse av aktörerna inom återanvändningsområdet är olika möjligheter att testa batterierna. Här finns studier som tittar på olika metoder<sup>61 62</sup>. Detta är dock ett område där man hade kunde förvänta sig mer forskning då det i många fall anses vara en avgörande faktor för att effektivt kunna använda batterier i nya applikationer.

<sup>48</sup> [https://www.jstor.org/stable/26268745?seq=1#page\\_scan\\_tab\\_contents](https://www.jstor.org/stable/26268745?seq=1#page_scan_tab_contents)

<sup>49</sup> <https://www.deepdyve.com/lp/elsevier/battery-second-life-hype-hope-or-reality-a-critical-review-of-the-sYB1OqhKv2?>

<sup>50</sup> <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6024482>

<sup>51</sup> <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6502728>

<sup>52</sup> <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7007107>

<sup>53</sup> <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6914969>

<sup>54</sup> [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-18714-3\\_37](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-18714-3_37)

<sup>55</sup> <https://www.nature.com/articles/nmat4777>

<sup>56</sup> [PDF] [The economics of using electric vehicles for vehicle to building applications considering the effect of battery degradation](#)

<sup>57</sup> <https://arxiv.org/abs/1410.4370>

<sup>58</sup> <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/9/9/094004/meta>

<sup>59</sup> <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7516664>

<sup>60</sup> <http://digital-library.theiet.org/content/conferences/10.1049/cp.2016.0257>

<sup>61</sup> <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319917323108>

<sup>62</sup> [Life test design for retired xEV batteries aiming at smart home applications](#)

## Ekonomisk potential

Över 30 studier har identifierats om den ekonomiska potentialen i återbruksapplikationer. Dessa studier bygger liksom i flera fall av de tekniska studierna på modelleringar, främst vad gäller batteriers degradering och livslängd.

En tidig aspekt som studerades var om intäkterna från återbruksapplikationer har potential att minska kostnaderna för elbilen<sup>63</sup>. Detta ska ses i perspektiv av att ett elbilsbatteri står för mellan 30 och 50 procent av bilens kostnad. Om en del av denna kostnad skulle kunna tas ut i efterföljande applikationer skulle priset för bilen kunna sänkas. I litteraturstudien från Martinez-Laserna et al<sup>64</sup> konstateras att det förvisso finns möjligheter att tjäna mer pengar på batteriet i nya applikationer men att det ständigt minskade batteripriset kommer att göra skillnaden mindre.

Stor vikt har lagts vid att bedöma om det finns tillräckligt med intäktsgenererande tjänster och produktområden för batterierna. Här är det viktigt att ta hänsyn till att många av studierna har gjorts under en tid där man försöker hitta och tydliggöra affärsmodellerna även för nya batterier i t ex energilagersystem för hemmabruk<sup>65</sup>. Resultaten i de flesta studier är överväldigande där man menar på att det finns stora möjligheter att tjäna pengar på återbruksbatterier, framförallt i energilager-applikationer<sup>66 67</sup>. Ännu fler studier har inriktats mot kostnadsstrukturen för återbruk och ställt detta mot kostnader för återvinning. Här konstaterar flera att det är viktigt att arbeta med en effektiv produktionskedja för att få ner kostnaden vilket krävs då batterierna måste säljas med ordentlig rabatt i förhållande till nya batterier pga sin kortare livslängd. Studier och modelleringar som undersöker kostnader för demontering och testing av batterierna<sup>68</sup> har direkt intresse för industrin.

En ytterligare ekonomisk aspekt är olika affärsmodeller för att både att sälja använda batterier och tjäna pengar på att återanvända dem men också hur detta integreras med ägandet av elbilen<sup>69</sup>.

Det samlade resultatet är att forskare anser att det finns stor potential i återanvändning av batterier från elbilar och att det idag finns etablerade intäktsmodeller för detta. Dock rör området på sig mycket snabbt vilket gör att såväl kostnads- som intäktsberäkningar snart kan bara inaktuella vilket även kan påverka själva dynamiken i marknaden.

## Miljökonsekvenser

Vi har identifierat sju studier som gör livscykelanalyser med fokus på återanvändning av batterier. Svaret i studierna är relativt entydigt<sup>70 71</sup> Det finns stora fördelar med att återanvända batterier i energilagerlösningar och andra applikationer eftersom det ökar livslängden på batterierna vilket gör att en mindre del av batteriernas klimatavtryck behöver knytas till bilen.

Det är också positivt att ersätta nya batterier med begagnade vilket gör klimatavtrycket för förnyelsebar energi ännu mindre. Liksom i fallet med den ekonomiska nyttan så bidrar återanvända batterier till mindre utsläpp genom att vara

<sup>63</sup> <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378775311012377>

<sup>64</sup> <sup>64</sup> [https://www.jstor.org/stable/26268745?seq=1#page\\_scan\\_tab\\_contents](https://www.jstor.org/stable/26268745?seq=1#page_scan_tab_contents)

<sup>65</sup> <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7131849>

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061514003603>

<sup>67</sup> <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6625141>

<sup>68</sup> [PDF] [A Cost Analysis of Electric Vehicle Batteries Second Life Businesses](#)

<sup>69</sup> <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/21681015.2016.1172125>

<sup>70</sup> <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2213138814000071>

<sup>71</sup> <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378775313017448>

en del av t ex energilagerlösningar som gör att förnyelsebar energi kan utnyttjas på ett mer effektivt sätt och ännu mer när detta ersätter gas- eller dieseldrivna kraftverk som används för skapa temporärt ökad kapacitet i kraftnäten eller för att reglera frekvensen på nätet.

## Återanvändning av andra litiumjonbatterier

Som visats i det inledande kapitlet så är elbils- och elbussbatterier endast en av många applikationer för litiumjonbatteriet. Än så länge så är batterier från elektronik den största strömmen av förbrukade batterier och återbruksmarknaden för dessa är både stor och drivande av de globala volymerna. Ändå så förekommer ytterst lite forskning kring återbruk av andra batterier än de från bilar. Den enda studie som vi hittat är en koreansk artikel där mobiltelefonbatterier används för att förse lampor med el<sup>72</sup>.

---

<sup>72</sup> <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096014811500052X>

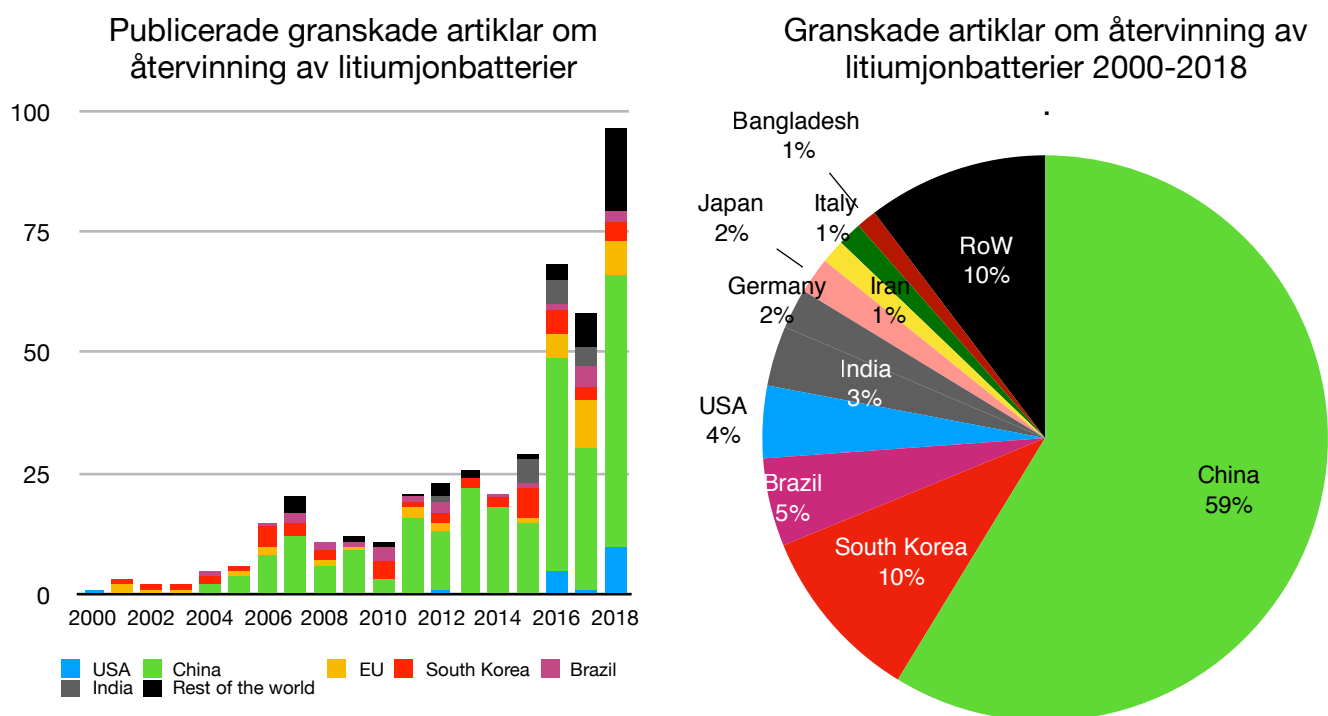
## Forskning kring återvinning av litiumjonbatterier

Om forskning om insamling och återanvändning av litiumjonbatterier är mager så är forskningen om återvinningsprocesser betydligt mer omfattande. Sedan de första artiklarna om återvinningsmetoder publicerades i början av 00-talet så har det byggts upp en omfattande kunskap om olika processer för att behandla batterier, utvinna material och återanvända materialet i nya batterier. Totalt har 432 artiklar identifierats i denna sammanställning som spänner över enskilda återvinningsprocesser till studier om karaktärisering av batterier för återvinning. Här finns också ett stort antal översikter i form litteraturstudier som effektivt sammanfattar området.

På ett övergripande plan blir två saker väldigt tydliga. Dels hur tidigt det började etableras forskning och samlad kunskap om återvinning. Dels hur mycket av denna forskning som domineras av i första hand Kina och i andra hand Sydkorea. Av den forskning som publicerats mellan 2000 och 2018 har 59% av artiklarna en försteförfattare från ett universitet eller institut i Kina. I många fall är det helkinesiska forskningsgrupper som står bakom studierna. I diagrammet nedan syns tydligt att detta inte är ett nytt fenomen utan Kina och Sydkorea dominerade redan efter några år in på 2000-talet. Vad som också är intressant är att länder man inte förväntar sig vara stora inom området har producerat ganska omfattande forskning såsom t ex Brasilien, Bangladesh och Iran men även Egypten, Indonesien och Malaysia. Sverige finns representerat med en artikel.

Förhållandet där Kina dominerar så starkt gäller även om man tittar på sökta patent. I en tidigare studie har Circular Energy Storage gått igenom sökta patent inom återvinning av litiumjonbatterier och funnit dels att antalet är ännu större än de publicerade studierna, dels att området helt domineras av Kina, Sydkorea och Japan.

Skälet till detta har en stark koppling till forskningens innehåll. Just Kina, Sydkorea och Japan står för över 90 procent av all produktion av litiumjonbatterier<sup>73</sup> och är ännu mer dominerande när det gäller produktion av de material som ingår



<sup>73</sup> Lithium ion Mega Factory Assessment, Benchmark Minerals, december 2018



i batterierna som katod-, anod- och elektrolytmaterial. Det är detta perspektiv som helt dominerar forskningen om återvinning – hur man kan använda avfallsbatterier för att producera nytt material för batterier?

Forskningen inom återvinning kan delas in i tre huvudsakliga kategorier:

- Återvinningsprocesser (från batteri/produktionsavfall till separerade ämnen eller återvunna komponenter)
- Framställning av material från återvunna batterier
- Förbehandlingsprocesser (sortering, demontering och urladdning)

I flera fall glider kategorierna samman då olika återvinningsprocesser till exempel ställer olika krav på förbehandling och samtidigt ger olika förutsättningar för att kunna framställa nya material från de återvunna batterierna.

Utöver dessa huvudkategorier finns det också forskning om hur man kan använda andra ämnen istället för t ex naturlig grafit för att framställa anodmaterial och det finns även flera studier kring hur material från litiumjonbatterier kan användas i andra produkter som t ex andra batterityper, superkondensatorer eller material i kemiska processer <sup>74 75 76</sup>.

## Återvinningsprocesser

Återvinning av litiumjonbatterier delas ofta upp i tre olika processer: mekaniska, pyrometallurgiska och hydrometallurgiska processer. I själva verket är dock detta inte alternativa metoder utan snarare metoder som används i kombination med varandra. I litteratur och studier som beskriver återvinning av litiumjonbatterier betraktas framförallt pyrometallurgiska och hydrometallurgiska processer som i princip lika förekommande. När det gäller primär forskning om de faktiska processerna är dock hydrometallurgiska processer i stark majoritet. Till exempel, i en sammanställning från 2004 om generell batteriåtervinning<sup>77</sup> listas processer från olika industriella aktörer där pyrometallurgiska processer är i majoritet. Man beskriver också tre olika pyrometallurgiska steg: pyrolys, reduktion och förbränning. Men ingen referens finns till faktisk forskning som beskriver eller ligger till grund för liknande processer. I översikter som följer därefter så har pyrometallurgi inte alls samma framträdande roll. I en sammanställning av Xu et al<sup>78</sup> från 2008 listas "termiska metoder" under kategorin fysiska metoder. Den enda metod som beskrivs är en pyrolysmetod som används i kombination med en mekanisk och en hydrometallurgisk metod.

I en sammanställning från 2013 skiljer Zhang et al<sup>79</sup> på behandling och förbehandling. I detta sammanhang omskrivs pyrolys som ett sätt att förhandla litiumjonbatterier innan de sedan återvinns i antingen en mekanisk eller hydrometallurgisk process. I samma studie gör man också en översikt av tillgängliga processer där författarna konstaterar att flera av de företag som återvinner litiumjonbatterier använder pyrometallurgiska reduktionsprocesser som egentligen är avsedd för andra material och även i de fall dedikerade metoder används så menar författarna att möjligheterna försämras att ta till vara på alla ämnen i batterierna. En nyligen publicerad sammanställning av litiumjon-återvinningsprocesser av Li et al<sup>80</sup> görs samma uppdelning där pyrometallurgi endast beskrivs som exempel på industriella processer.

Istället ligger allt fokus på mekaniska och hydrometallurgiska processer. I sammanställningar av både Xu et al och Li et al delas processerna in i fysiska och kemiska:

<sup>74</sup> <https://link.springer.com/article/10.1007/s10800-012-0419-z>

<sup>75</sup> <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2012/cp/c1cp21936g>

<sup>76</sup> <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319912019684#!>

<sup>77</sup> <https://www.deepdyve.com/lp/elsevier/recycling-of-batteries-a-review-of-current-processes-and-technologies-gNtVhYUht0?key=elsevier>

<sup>78</sup> <https://www.deepdyve.com/lp/elsevier/a-review-of-processes-and-technologies-for-the-recycling-of-lithium-uY4Lg2x0YM?key=elsevier>

<sup>79</sup> [https://www.deepdyve.com/lp/springer-journals/an-overview-on-the-processes-and-technologies-for-recycling-cathodic-a31qHNYUJ3?key=dd\\_plugin\\_gs&utm\\_campaign=pluginGoogleScholar&utm\\_source=pluginGoogleScholar&utm\\_medium=plugin](https://www.deepdyve.com/lp/springer-journals/an-overview-on-the-processes-and-technologies-for-recycling-cathodic-a31qHNYUJ3?key=dd_plugin_gs&utm_campaign=pluginGoogleScholar&utm_source=pluginGoogleScholar&utm_medium=plugin)

<sup>80</sup> The Recycling of Spent Lithium-Ion Batteries: a Review of Current Processes and Technologies

### Fysiska metoder

- Mekanisk separering – Feed-materialet går igenom ett antal mekaniska steg omfattande bl a rivning eller krossning, siktning, luft, vattenbad och magnetisk avskiljning. Steget ses framförallt som ett försteg till lakning eller annan kemisk separering och är främst till för att avskilja batteriernas yttre höljen samt om möjligt skilja de belagda folierna av aluminium och koppar.
- Upplösning (dissolution) – Genom att lösa upp det krossade materialet, eller hela folier med anod- och katodmaterial, i NMP-lösning kan det aktiva materialet separeras från aluminium och kopparfolien. Problemet enligt författarna är att processen är dyr och skapar mycket avfall.
- Mekanokemisk separering – En mekanisk behandling som frambringar en kemisk reaktion i materialet. Används framförallt för LCO-batterier
- Termisk behandling – Ett alternativ framförallt till upplösning då uppvärmning till 350 grader löser upp bindmedlet mellan strömtilledarna och de aktiva materialen vilket gör att katod- och anodmaterial kan separeras i nästa steg, antingen genom mekanisk eller hydrometallurgisk bearbetning. Metoden räknas i andra studier som pyrometallurgisk och kan även, i högre temperaturer (pyrolys/kalcinerings) användas för att separera, eller underlätta separation av de olika aktiva materialen. Pyrolys som omnämndes tidigare beskrivs ofta som ett steg med stor potential som en del i en kedja av processer.

### Kemiska metoder

- Separering med syra (lakning) – Ett förbehandlat material behandlas i utspädd för att på så sätt åstadkomma kemiska reaktioner där ämnen formar nya föreningar. De vanligast förekommande syror är H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HCl, HNO<sub>3</sub>.
- Bio-lakning – Biologiska substanser som t ex bakterier används istället för syror, eller för att generera syror, för att separera de olika ämnena.
- Fällning (precipitation) – Kobolt och andra ämnen avskiljs i en process där man aktivt förändrar temperatur och PH-värde för att få materialet till att fast och icke upplösningsbar form.

Båda översiktsstudierna visar att samtliga processer har prövats i flera forskningsprojekt, något som bekräftas av denna sammanställning. Vanligast är att flera steg prövas i olika experiment vilket skapar en överlappning metoderna emellan. Men genom att klassificera studierna baserat på deras huvudresultat kan vi konstatera att av 312 studier vi identifierat som bygger på förstahandsdata avser strax över 70 procent olika typer av hydrometallurgiska metoder medan knappt 15 procent respektive 10 procent avser fysiska och pyrometallurgiska metoder. Knappt 4 procent av studierna handlar om biologisk extraktion vilket i regel även det är en hydrometallurgisk metod där bakterier eller andra biologiska material används för att reagera med batterimaterialet.

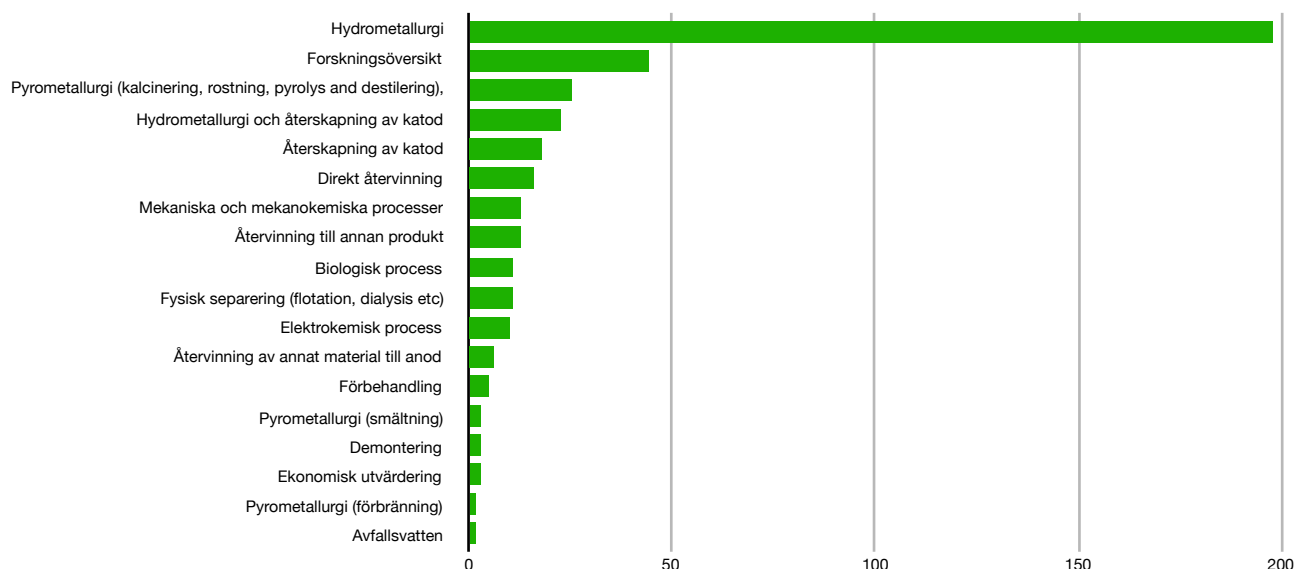
Många studier kring hydrometallurgi bygger på liknande principer och har som främsta syfte att pröva olika hypoteser inom t ex lakningsmetoder kring reagenter och reduktanter, temperatur, tid och olika typer av mekanisk eller annan fysisk aktivering såsom t ex användning av ultraljud eller omrörning. De absolut vanligaste reagenterna är svavelsyra och saltsyra. Det finns dock en lång rad av studier där framförallt olika typer organiska syror används såsom askorbinsyra och citronsyra <sup>81 82 83</sup>.

<sup>81</sup> <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1005030213000157#!>

<sup>82</sup> <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S037877531201943X>

<sup>83</sup> <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958053X16306055>

## Inriktning på forskning om återvinningsmetoder för litiumjonbatterier



Mekaniska och mekanokemiska metoder är ofta med som försteg till hydrometallurgiska processer men ett mindre antal studier har gjorts på huruvida de kan fungera självständigt. Vanligtvis är slutprodukten ett svart pulver som innehåller en blandning av både anod- och katodmaterial men flera forskningsprojekt har utvecklat metoder där man med hjälp av skiktning och magnetisk separering lyckats separera återanvändbart katodmaterial, framförallt för LCO- och LFP-batterier. Vanligare är dock att detta sker i kombination med olika typer av termiska behandlingar.

Kombinationer av metoder för att åstadkomma detta samlas under begreppet direktåtervinning som just avser att behålla egenskaperna hos katoden för att i ett senare steg öka mängden litium i den. Principerna för dessa är dock i regel tämligen olika. För LCO- och LFP- batterier förekommer flera metoder där materialen hålls intakta för att efter ytterligare termisk behandling (som en del av återskapande av katod eller anod) kan användas igen<sup>84 85 86 87</sup>. För NCM/NMC-batterier är det dock vanligare att ämnena först separeras för att därefter förenas på nytt. Ett skäl till detta är att ingångsmaterialet sällan är det samma som det önskade nya katodmaterialet.

De flesta studier kring pyrometallurgiska steg avser pyrolys och kalcinering och där processen är en del som även omfattar mekanisk och/eller hydrometallurgisk processer<sup>88 89 90</sup>. Endast tre studier har identifierats som handlar om smältning samt en om förbränning<sup>91 92 93 94</sup>.

Effektiviteten i återvinningen är i regel hög. Li et al listar 20 studier med en effektivitet för litium ofta på 100 procent medan nickel, kobolt och mangan i regel har en effektivitet mellan 80 och 99 procent. Även detta stämmer väl med

<sup>84</sup> [https://www.researchgate.net/publication/319009673\\_High-Yield\\_One-Pot\\_Recovery\\_and\\_Characterization\\_of\\_Nanostructured\\_Cobalt\\_Oxalate\\_from\\_Spent\\_Lithium-Ion\\_Batteries\\_and\\_Successive\\_Re-Synthesis\\_of\\_LiCoO2](https://www.researchgate.net/publication/319009673_High-Yield_One-Pot_Recovery_and_Characterization_of_Nanostructured_Cobalt_Oxalate_from_Spent_Lithium-Ion_Batteries_and_Successive_Re-Synthesis_of_LiCoO2)

<sup>85</sup> <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2018/gc/c7gc02831h/unauth#divAbstract>

<sup>86</sup> <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2016/gc/c5gc02650d/unauth#divAbstract>

<sup>87</sup> <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2015/ta/c5ta02540k>

<sup>88</sup> <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389411009952#!>

<sup>89</sup> <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389415301047>

<sup>90</sup> <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.est.7b02561>

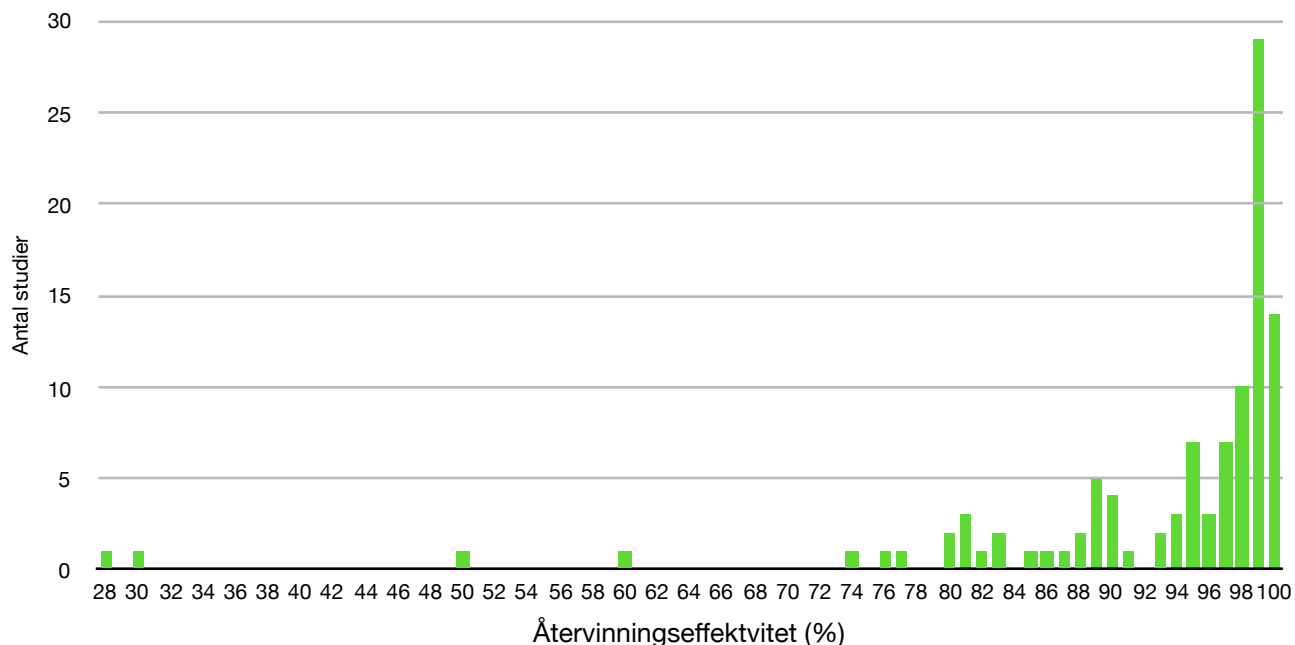
<sup>91</sup> [http://en.cnki.com.cn/Article\\_en/CJFDTOTAL-METE200704001.htm](http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTOTAL-METE200704001.htm)

<sup>92</sup> [https://www.researchgate.net/publication/313492473\\_Lithium-Ion\\_Battery\\_Recycling\\_Through\\_Secondary\\_Aluminum\\_Production](https://www.researchgate.net/publication/313492473_Lithium-Ion_Battery_Recycling_Through_Secondary_Aluminum_Production)

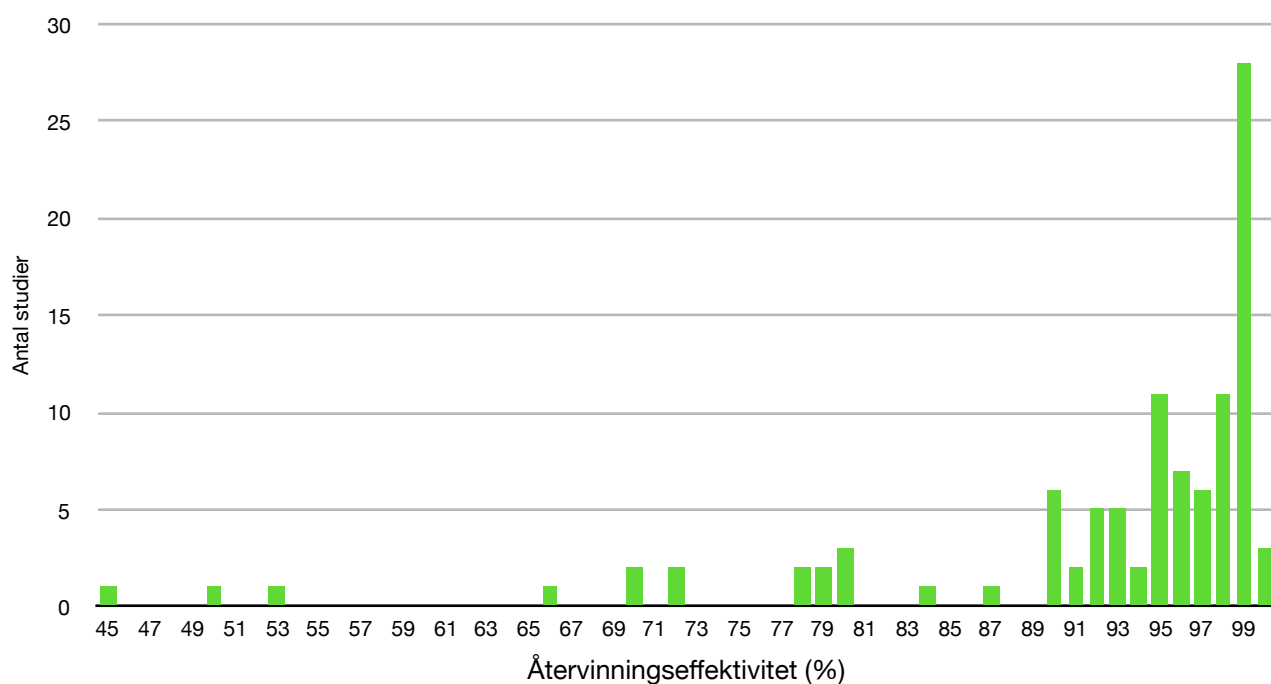
<sup>93</sup> <https://www.pyrometallurgy.co.za/MoltenSlags2016/Manuscripts/Recovery%20of%20Valuable%20Metals%20from%20Spent%20Lithium-Ion.pdf>

<sup>94</sup> <https://www.scientific.net/AMR.878.51>

## Återvinningseffektivitet litium (antal studier)



## Återvinningseffektivitet kobolt (antal studier)



denna sammanställning. Medan ett fåtal studier har visat på en återvinningseffektivitet på 30-70 procent av olika ämnen som koppar, aluminium och litium så ligger vanligtvis resultaten mellan 90 och 100 procent. Vi har identifierat 80 studier där mer än 90 procent av litium har kunnat återvinnas och 86 studier där över 90 procent av kobolt har återvunnits. Därutöver finns 18 respektive 20 studier där LCO- och NCM-katod har kunnat återvinnas till över 90 procent. I de flesta fall är renhetsgraderna när dessa angivits också höga och vissa fall har de ställts som krav för att materialet ska få ingå i återvinningseffektiviteten.

Värt att nämna är att de stora flertalet studier som gjorts är genomförda i labbskala vilket innebär att man har haft en god kontroll över materialet och kunnat förbereda det så att det är optimalt för processerna. Separering av celler har ofta gjorts för hand vilket sällan kan användas i en uppskattad process. Samtidigt finns det dock patent som omfattar liknande metoder där metoderna bygger på industriella principer.

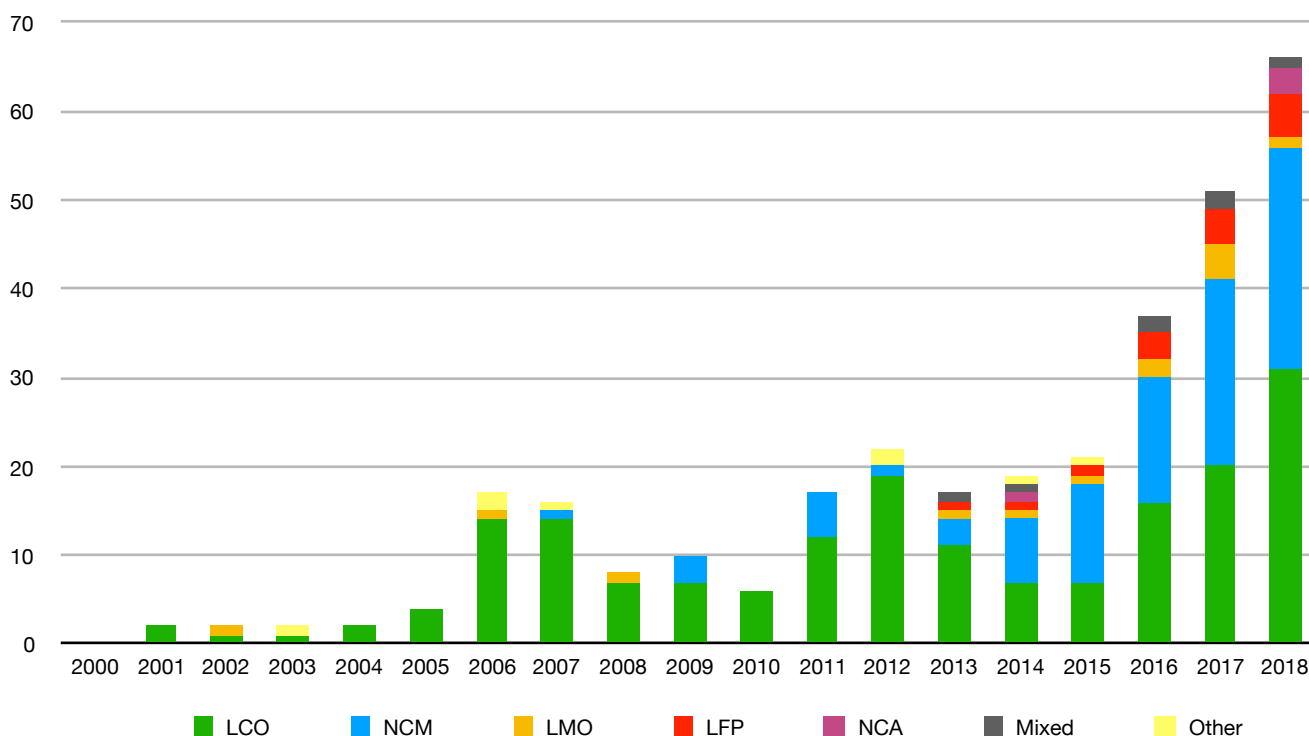
I de forskningsöversikter som nämns ovan görs ingen egentlig utvärdering av vilken process som är mest state-of-the-art. Det beskrivs heller inte som ett behov av vidare forskning utan istället pekar författarna på att ytterligare fördjupning krävs i t ex biologiska metoder som anses ha stora möjligheter genom begränsad miljöpåverkan.

### Återvunna batterikemier

På samma sätt som hydrometallurgiska metoder är i stark majoritet i forskningen gäller samma sak vad gäller vilka batterikemier (vilken katod avfallsbatterierna har) som metoderna är avsedda för. Av naturliga skäl har LCO-batterier länge varit den vanligaste typen. Dessa batterier utgör fortfarande den största mängden avfallsbatterier då de varit längst på marknaden. Över tid blir det dock tydligt att NMC (eller NCM som katodkemin kallas), den numera vanligaste katodkemin för elbilar har varit främsta fokus i forskningen.

Vad det däremot fortfarande har gjorts relativt lite forskning på är kring återvinning av LFP-, LMO- och NCA-batterier. Detta är anmärkningsvärt främst för LFP och LMO då dessa kemier är vanliga framförallt i Kina, och de medför speciella utmaningar då de inte innehåller kobolt och nickel vilket innebär att materialvärdena är relativt låga. Det går dock att se en viss ökning av forskning kring LFP vilket går hand i hand med den industriella utvecklingen i Kina. LFP är dock en relativt vanlig kemi även i Europa, framförallt i bussar och i energilagring.

Återvinningsprocesser i publicerad forskning baserad på batterikemi



## Framställning av material från återvunna batterier

Många av studierna som prövat och utvecklat återvinningsmetoderna omfattar även metoder för att skapa olika typer av produkter från det återvunna materialet. I speciellt kinesisk forskning är det tydligt att detta är slutmålet för all återvinning. Det är också ett naturligt steg efter de olika kemiska och mekaniska återvinningsmetoderna och är troligtvis ytterligare ett skäl till varför just dessa metoder är så dominerande.

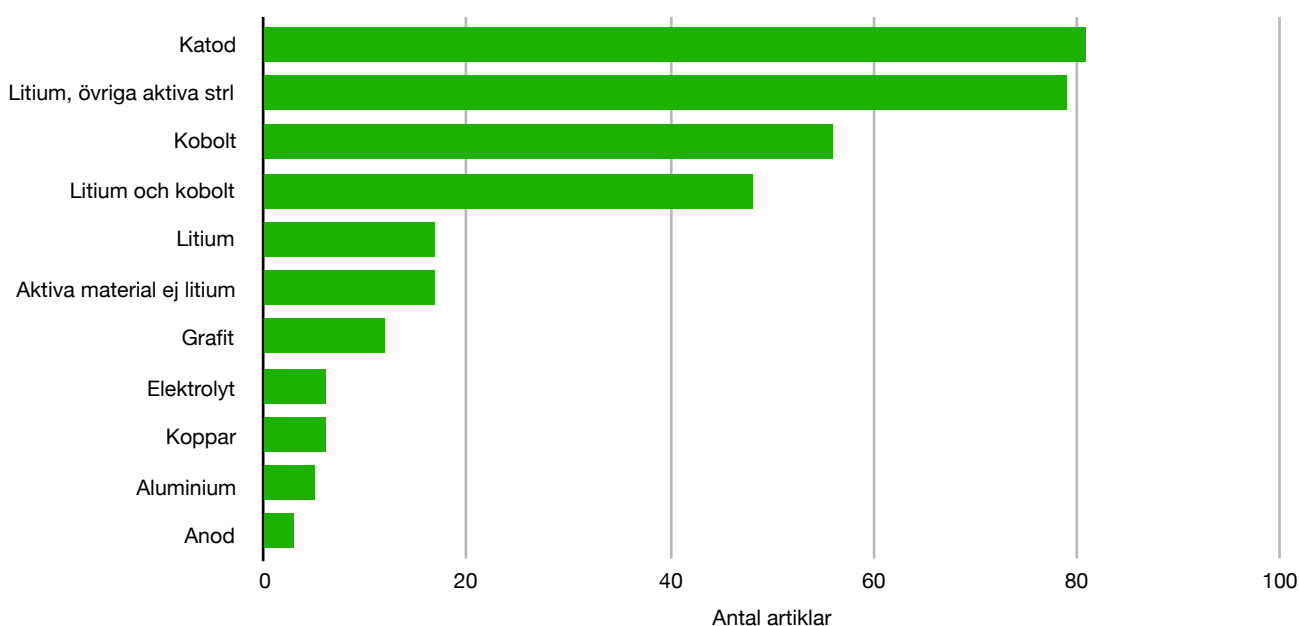
I princip kan sex olika vägar för materialåtervinningen urskiljas:

1. Batterikemikalier
2. Försteg till katodmaterial (precursor)
3. Katodmaterial
4. Anodmaterial
5. Elektrolyt
6. Material till andra applikationer

Fördelningen de genomgångna studierna emellan är relativt jämn över de tre första kategorierna. Återvinning av anodmaterial (grafit) och elektrolyt, vilka båda har betydligt lägre värden än katodmaterialet har studerats betydligt mindre liksom att använda materialet till andra applikationer.

Li et al listar 21 referenser som fördelas över tre typer av metoder (sol-gel, termisk och co-precipitation) för att skapa försteg för katodmaterial, sk precursors (katodmaterial utan litium). Metoderna skiljer sig åt beroende på vilket katodmaterial det är fråga om. I vår sammanställning har vi identifierat 81 studier med genomförda experiment för att framställa katodmaterial och 78 studier där man fokuserat på litium och övriga aktiva material för att i flera fall i efterhand använda dem i försteg till katodmaterial samtidigt som man i regel återvinner litium separat i form av antingen litiumkarbonat eller litiumfosfat. I de fall man producerat nytt katodmaterial avslutas studierna i många fall med att det nygamla katodmaterialet testas under riktiga förhållanden och i många fall i jämförelse med nya, oanvända, batterier. Resultatet är i många fall påfallande positivt och författarna drar i de flesta fall slutsatserna att man kan använda det

Återvunna ämnen i publicerade studier



återanvända katodmaterialet för i uppskalad produktion av nya batterier. Dominansen för Kina och Sydkorea är stor inom detta område som tillsammans står för 84 procent av studierna. Därutöver finns 138 studier där man fokuserat på att återvinna litium och kobolt separat (inte som LiCoO<sub>2</sub>), litium separat eller kobolt separat. I dessa kategorier finns en större andel icke-kinesiska studier. Här finns också projekt där man velat använda LCO-batterier för att få fram litium och kobolt för användning i NCM- och NCA-batterier.

## Förbehandlingsprocesser

Något som ofta lyfts fram som ett problem inom litiumjonåtervinning är dels att det finns så många olika typer av kemier vilka är svåra för återvinnare att hålla reda på, dels att framförallt i hydrometallurgiska processer så krävs desintegrering av materialet som är mycket tidskrävande. Ett tredje problem som är tätt kopplat till det andra är att litiumjonbatterier är mycket brandfarliga och i princip kan explodera när de utsätts för mekanisk påverkan. Av detta skäl är det anmärkningsvärt att forskning om just sortering, demontering och urladdning av batterier är tämligen ovanlig.

### Sortering

Behovet av sortering och klassificering omnämns som en viktig förutsättning för en effektiv återvinning<sup>95</sup> men vi har inte hittat en enda studie som beskriver en metod för sortering av litiumjonbatterier. Snarare så betraktas det bara som ett hinder och närmast oöverstigligt problem vilket stämmer dåligt med verkligheten. Tre studier har hittats om klassificering av batterier<sup>96 97 98</sup>. Detta är ett första steg i en sorteringsprocess och bidrar därmed positivt till området.

### Demontering och disintegrering

Demontering av celler och pack har studerats i ett flera sammanhang<sup>99 100 101 102 103</sup>. Framförallt handlar forskningen om hur man kan automatisera processen vilket inte minst i ett europeiskt perspektiv är nödvändigt för att göra återvinningen lönsam. De flests studier handlar om hur man kan separera batteripack från elbilar och hur detta kan automatiseras med hjälp av t ex robotar. Endast två studier berör metoder för att kunna desintegrera cellers komponenter på något annat sätt än genom rivning och krossning.

Vi har heller inte hittat någon forskning som specifikt studerar rivning, krossning eller någon annan automatiserad desintegreringsmetod. Flera studier beskriver de olika metoder som finns tillgängliga där framförallt battericeller krossas i en inert miljö eller efter att antingen blivit termiskt behandlade eller nedfrysta. Detta stämmer ganska dåligt med många studier som gjorts av de faktiska återvinningsprocesserna då dessa ofta förberetts genom manuell separering av anod och katod, något som allt mindre görs i industriell skala även i länder med låga arbetskraftskostnader.

### Urladdning

Urladdning beskrivs i många studier om behandlingsmetoder<sup>104 105 106</sup> men sällan i detalj. Återigen är det industripraxis som beskrivs eller metodsteg i labbmiljö. Den enda studie som faktiskt prövar olika metoder är gjord av Ojanen et al<sup>107</sup> där olika vattenlösningar testas för att uppnå optimal urladdning.

<sup>95</sup> <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344913002541>

<sup>96</sup> <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X14000105>

<sup>97</sup> <https://link.springer.com/article/10.1007/s11783-014-0705-6>

<sup>98</sup> <https://link.springer.com/article/10.1007/s10163-017-0600-x>

<sup>99</sup> <https://www.scientific.net/AMR.907.391>

<sup>100</sup> [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-29069-5\\_26](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-29069-5_26)

<sup>101</sup> <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6088599>

<sup>102</sup> Robot assisted disassembly for the recycling of electric vehicle batteries

<sup>103</sup> [PDF] Conception of an automated plant for the disassembly of lithium ion batteries

<sup>104</sup> <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378775305005677>

<sup>105</sup> <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10643389.2013.763578>

<sup>106</sup> <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378775306010421>

<sup>107</sup> <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X18301879>

## Forskning kring batteriers miljöpåverkan

En i media ofta uppmärksammad fråga är vilken påverkan litiumjonbatterier har på miljön. Framförallt gäller detta elbilsbatterier som då ofta jämförs med bilar som körs med traditionella bränslen eller med andra alternativa teknologier som bränsleceller. Vad som händer med batterierna i deras slutskede spelar en potentiellt viktig roll i det här sammanhanget då en effektiv återvinning och ett längre utnyttjande av batterierna i återbruksapplikationer borde kunna stärka batteriernas, och därmed elbilens, ställning. På samma sätt skulle en ineffektiv, eller till och med undermålig återvinning innebära motsatsen.

I genomgången har knappt 80 publicerade artiklar eller rapporter hittats som beskriver batteriers, eller batteriernas värdekedjas miljökonsekvenser, oftast som en livscykelanalys. Av dessa tar 40 artiklar sin utgångspunkt i batteriet medan 25 artiklar utgår från fordonet med jämförelser t ex mellan elfordon och traditionella fordon. Därutöver finns ett mindre antal artiklar som tar sin utgångspunkt i andra applikationer som energilagringssystem, elektronik och flyg.

Livscykelanalyser av batterier har i sin tur gjorts på flera olika nivåer och med olika jämförelser. De tidigaste studierna som publicerades runt 2010 har jämfört litiumjonbatterier med andra kemier som nickel kadmium, nickel metallhydrid och blysyrbatterier<sup>108,109,110</sup>. Datan som använts i studierna var mycket begränsad, inte minst vad gäller produktionsfasen. En av de mest refererade studierna är en artikel av Zachrisson et al där det dels görs en beräkning av energibehovet i produktionen underifrån och upp genom att utgå från den faktiska processen, och uppfifrån och ner, genom att använda en batteritillverkarens elförbrukning utslaget på producerad volym. I flera följande studier kompletteras och ersätts denna data med nya beräkningar oftast från egna labbstudier<sup>111 112 113</sup>. Endast en studie har hittats som använder primärdata från faktisk produktion<sup>114</sup> där ett batteri från en Ford Focus, producerat i USA, studeras.

Det görs flera översikter som samlar datan från tidigare studier, bl a i IVL's uppmärksammade studie från 2017<sup>115</sup> men också därefter av t ex The International Council of Clean Transportation<sup>116</sup>. I princip alla dessa studier är eniga om att störst påverkan kommer av produktion av katoden i batteriet, både vad gäller klimatpåverkan och flera andra parametrar. Det är dock mycket stora skillnader på värden studierna emellan. Orsakerna till detta är flera, som t ex olika energimixvärden men även helt olika typer av data. Detta i sin tur har med att göra att många studier har olika utgångspunkter som t ex jämförelser mellan olika batterikemier.

De flesta studier görs s k "cradle-to-gate", dvs från extraktion av metaller till att batteriet, eller fordonet lämnar fabriken. Detta gör att återvinning oftast inte är med i beräkningarna och ännu mer sällan återanvändning. Zachrisson et al, som tar med transport till återvinning men inte själva processen, motiverar detta med att återvinning snarare i så fall borde tas med som ett ingående värde och att det materialet ska betraktas som en egen process. Undantaget är en forskargrupp på Argonne National Laboratories i USA som i flera studier har belyst återvinningens roll i livcykelanalyser av litiumjonbatterier<sup>117</sup>. Bl a menar forskarna att energiåtgången för extraktion av t ex aluminium, nickel och koppar i batterierna kan minskas med 63 till 75 procent vilket bör räknas in i livscykelanalysen.

<sup>108</sup> <https://www.osti.gov/biblio/1000659>

<sup>109</sup> <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es103607c>

<sup>110</sup> <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378775305008761>

<sup>111</sup> <https://www.osti.gov/biblio/1177517>

<sup>112</sup> <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es4037786>

<sup>113</sup> <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-016-7849-9>

<sup>114</sup> <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.est.6b00830>

<sup>115</sup> <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-016-7849-9>

<sup>116</sup> [https://www.theicct.org/sites/default/files/publications/EV-life-cycle-GHG\\_ICCT-Briefing\\_09022018\\_vF.pdf](https://www.theicct.org/sites/default/files/publications/EV-life-cycle-GHG_ICCT-Briefing_09022018_vF.pdf)

<sup>117</sup> <https://trjournalonline.trb.org/doi/abs/10.3141/2252-08>

<sup>118</sup> [https://www.researchgate.net/profile/Linda\\_Gaines/publication/265158823\\_Paper\\_No\\_11-3891\\_Life-Cycle\\_Analysis\\_for\\_Lithium-Ion\\_Battery\\_Production\\_and\\_Recycling/links/547336180c2168c8faeb58a/Paper-No-11-3891-Life-Cycle-Analysis-for-Lithium-Ion-Battery-Production-and-Recycling.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Linda_Gaines/publication/265158823_Paper_No_11-3891_Life-Cycle_Analysis_for_Lithium-Ion_Battery_Production_and_Recycling/links/547336180c2168c8faeb58a/Paper-No-11-3891-Life-Cycle-Analysis-for-Lithium-Ion-Battery-Production-and-Recycling.pdf)



Det har också gjorts livscykelanalyser som enbart tittar på återvinningsprocessen av litiumjonbatterier<sup>119120121122</sup>.

Ingen av de genomförda livscykelanalyserna av återvinningen går speciellt långt ner på djupet avseende processers olika påverkan. Hendrickson et al and Boyden et al skiljer båda på hydro- och pyrometallurgiska processer, vilket även Dunn et al gör i sin livscykelanalys som inbegriper återvinning. Värdena är dock i samtliga fall inte tagna från riktiga verksamheter. Ingen av författarna har heller gjort någon egentlig värdering av vilka de verkliga riskerna är med återvinningsverksamheten.

I och med att de flesta studier har gjorts cradle-to-gate eller som längst cradle-to-wheels har betydelsen av återanvändning i de flesta fall inte diskuterats. Undantagen är två rapporter varav en är ett av resultaten in EU-projektet SASLAB<sup>123</sup> där en livscykelanalys görs av själva återanvändningsfasen. Den andra är en studie<sup>124</sup> där en analys gjordes av återanvända batterier i en energilagringssapplikation vilket jämfördes att istället använda blysyrebatterier.

Närliggande området för återanvändning är studier kring den totala användningen av batteriet. Endast en studie har hittats som tar hänsyn till detta<sup>125</sup>. Studien som analyserat hur miljöpåverkan av ett batteri från en Nissan Leaf påverkas av degradering visar att klimatpåverkan av batteriet kan försämrats så mycket som 29 procent om degradering tas hänsyn till. Samtidigt är det en av få studier som inte är cradle-to-gate och skulle troligtvis påverkas positivt om den hade kompletterats av en studie om potentialen från återanvändning.

---

<sup>119</sup> <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jiec.12607>

<sup>120</sup> <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827116300701>

<sup>121</sup> <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/10/1/014011/meta>

<sup>122</sup> <http://www.lcm2007.ethz.ch/paper/424.pdf>

<sup>123</sup> <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X18300677>

<sup>124</sup> <https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-015-0942-3>

<sup>125</sup> <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827117309411#>

## Forskning om design för återvinning och återbruk

För att både återvinning och återanvändning ska kunna bli så effektiv som möjligt bör så mycket som möjligt göras för att underlätta dessa processer redan när batteriet tillverkas. Detta omfattar t ex att skapa modulära pack-konstruktioner som gör att celler eller moduler lätt kan demonteras för reparation, återbruk eller återvinning. I detta skulle även metoder för infästning och koppling av celler ingå liksom åtgärder som märkning eller standardisering av material och demonteringsmetoder.

Vad som därför är förvånande är att inte en enda publicerad artikel har hittats inom detta område.

Det enda som kunnat hittas är det brittiska projektet Amplifii<sup>126</sup> som har haft till syfte att tillverka modulära batteripack som ska kunna användas i olika typer i fordon och applikationer. Projektet som skett i samarbete med biltillverkare, återanvändningsföretag och återvinnare har nyligen fått en fortsättning där samma aktörer ska fördjupa samarbetet.

---

<sup>126</sup> <https://warwick.ac.uk/fac/sci/wmg/business/successstories/amplifii/>

## Forskning i Sverige

Forskning om EOL-frågor för litiumjonbatterier har liksom i andra länder i Europa ökat kraftigt de senaste åren. Vi har hittat 13 genomförda studier som är relevanta för något av de olika områdena. Därutöver pågår minst lika många projekt. Forskningsfältet är dominerat av Chalmers Tekniska Högskola som deltar i 12 av de 27 avslutade eller pågående studierna i Sverige. Chalmers har därutöver deltagit i fem större EU-projekt. Luleå Tekniska Universitet har varit aktiva med tre projekt medan flera universitet och institut deltagit i enstaka projekt. Bland företagen har Stena Recycling deltagit i tre svenska projekt och i tre europeiska medan Volvo och Volvo Cars deltagit i två projekt vardera med relevans för EOL.

De svenska studierna och projekten följer relativt väl den internationella fördelningen av vilka områden som studerats. Tio projekt/studier om återvinning har genomförts eller pågår, sju om återanvändning, fyra om miljöpåverkan och tre om insamling.

Den första studien med relevans för området var den tidigare refererade livscykelanalysen av Zachrisson et al<sup>127</sup> som kortfattat i en artikel 2010 diskuterar återvinning som område. Studien har fått stort genomslag internationellt och refereras av många studier runt om i världen.

En licentiatavhandling studerade 2012 livscykeln för kommersiella LFP-batterier i tillstånd som efterliknar dem i tunga hybridfordon<sup>128</sup>. Studien adresserar inte EOL-frågor i direkt mening men har hög relevans för framförallt återanvändning. Samma år publicerades en licentiatavhandling om litiumjonåtervinning där experiment gjordes med Cyanex 272 och Cyanex 923 för att kunna återvinna litium ur hybridbilsbatterier genom vätskeextraktion<sup>129</sup>.

2016 slutfördes de första större projekten, i samtliga fall finansierade av Energimyndigheten,

Två projekt omfattade ny forskning om återvinningsmetoder. I projektet *Återvinning av metaller ur uttjänta Li-jon batterier samarbetade*<sup>130</sup> Luleå Tekniska Universitet, Chalmers Tekniska Högskola, Kungliga Tekniska Högskolan, Stena Recycling för att möjliggöra återvinning av fler ämnen än idag ur uttjänta litiumjonbatterier genom att ta fram underlag för resurseffektiva termiska återvinningsmetoder. Speciellt studerades aluminium, koppar och litium, men återvinning av metaller som nickel och kobolt ingick också i utvärderingen av resultaten. Framförallt drogs slutsatsen att aluminium från batterierna kan återvinnas genom smältning tillsammans med aluminiumskrot. För en effektiv återvinning av flertal metaller, inklusive litium från uttjänta Li-jon batterier bedöms en kombination av olika metoder krävas.

Projektet *Hydro och pyrokemisk metallåtervinning från batterier*<sup>131</sup> hade till syfte att ta fram en energi- och resurseffektiv återvinningsprocess för NiMH-batterier. Då dessa har flera ämnen gemensamt med litiumjonbatterierna har projektet även relevans för litiumjonbatterier. Målet var att utveckla en tidigare verifierad process från labbskala till pilotskala. Resultaten visade bl a att återvinning NiMH-batterier kan göras mer effektiv med hjälp av mekanisk behandling med hjälp av krossning och efterföljande skiktning av de olika materialen. Resultatet publicerades i en artikel i *Journal of Material Cycles and Waste Management*.

<sup>127</sup> Life cycle assessment of lithium-ion batteries for plug-in ... - Swerea

<sup>128</sup> <http://www.dissertations.se/dissertation/4bedfe5463/>

<sup>129</sup> <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/163605.pdf>

<sup>130</sup> <https://research.chalmers.se/publication/247277>

<sup>131</sup> <http://www.energimyndigheten.se/forskning-och-innovation/projektdata/sokresultat/?projectId=18833>

Tidigare nämnda projekt *Effektivare insamling av batterier med konsumenterna i fokus*<sup>132</sup> har också hög relevans inom området. Dock var fokuset främst på alkalinebatterier.

Ett projekt med hög relevans för återanvändning var *Batterisensor för tillståndsestimering*<sup>133</sup>. Syftet med projektet var att bidra till mer effektiv användning av litiumjonbatterier, i framförallt fordonstillämpningar, genom ett nytt sätt att mäta batteritillstånd. I projektet undersöktes sensorsystemets tillförlitlighet och funktion samt informationsbidrag genom fordonstypiska batteritester. Trots att resultaten främst handlade om batteriernas effektivitet i sina primära applikationer så är resultaten mycket viktiga när system för återanvändning designas.

2016 skrevs också en magisteruppsats på Luleå Tekniska Universitet, *Recovery of Lithium from Spent Lithium ion Batteries*<sup>134</sup>, som studerat förutsättningarna att med hjälp av hydrometallurgi återvinna litium från en syntetisk slagg från tidigare pyrometallurgiskt behandling.

Under 2017 slutfördes ytterligare projekt med relevans för området om än inte med direkta frågeställningar kring EOL av litiumjonbatterier. En avhandling inom behandling av nickelmetallhydridbatterier, ett projekt med titeln *Integrerad hållbarhetsanalys av morgondagens batterikoncept*<sup>135</sup> samt en litteraturöversikt av forskning inom livscykelanalys för litiumjonbatterier, *The Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Lithium-Ion Batteries*<sup>136</sup>. Den sistnämnda som gjordes av IVL, fick stor nationell och internationell uppmärksamhet när den lyfte fram den stora miljöpåverkan själva celltillverkningen har, vilket gör att en elbil har lämnat ett stort klimatavtryck redan innan den använts.

2018 blir det tydligt att EOL av litiumjonbatterier blir ett allt mer viktigt forskningsområde när fyra projekt med mycket hög relevans slutförs.

Inom återvinning slutförs Chalmers-projektet *Flexibel och effektiv hydrometallurgisk återvinning av Li-jon batterier med olika batterikemier*<sup>137</sup> som studerar möjligheten att genom pyrolys avskilja organiska komponenter hos förbrukade litiumjonbatterier.

Ett värdefullt tillskott för forskning inom insamling av batterier är *Hållbar insamling, eftermarknad och återvinning av litiumbaserade bilbatterier*<sup>138</sup>. Projektet syftar till att utveckla ett hållbart system för insamling, eftermarknad och återvinning av litiumbaserade bilbatterier och har deltagare i många delar av värdekedjan inklusive demontering och försäkring.

Inom återanvändning har två projekt slutförts under året. Forskningsinstitutet Rise Viktoria genomförde en aktörsstudie i *Cirkulära affärsmodeller för elfordonsbatterier*<sup>139</sup> där man utvärderar olika cirkulära affärsmodeller inbegripande både återvinning och återanvändning. Volvo, i samarbete med bl a Riksbyggen och Göteborg Energi genomförde en installation av bussbatterier som ska tjäna som energilager i en ny bostadsrättsförening, Brf Viva<sup>140</sup>.

<sup>132</sup> <http://www.energimyndigheten.se/forskning-och-innovation/projektdatabas/sokresultat/?projectid=18810>

<sup>133</sup> <http://www.energimyndigheten.se/forskning-och-innovation/projektdatabas/sokresultat/?projectid=21784>

<sup>134</sup> <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1039125/FULLTEXT01.pdf>

<sup>135</sup> <http://www.energimyndigheten.se/forskning-och-innovation/projektdatabas/sokresultat/?projectid=24114>

<sup>136</sup> <https://www.ivl.se/toppmeny/pressrum/pressmeddelanden/pressmeddelande---arkiv/2017-05-29-ny-rapport-belyser-klimatpaverkan-fran-produktionen-av-elbilsbatterier.html>

<sup>137</sup> <http://www.energimyndigheten.se/forskning-och-innovation/projektdatabas/sokresultat/?projectid=21789>

<sup>138</sup> <http://www.energimyndigheten.se/forskning-och-innovation/projektdatabas/sokresultat/?projectid=21790>

<sup>139</sup> <https://www.viktoria.se/projects/extended-ev-battery-life-improving-the-value-chain>

<sup>140</sup> <http://www.vok.nu/wp-content/uploads/2018/11/F1.-Energioptimering-Brf-Viva-Tina-M%C3%A5rind-2018-11-06.pdf>

## Forskning om återvinning och återanvändning i EU-projekt

En stor del av forskningen i Europa görs inom ramen för projekt finansierade av forskningsprogrammen Horizon 2020 och tidigare det Sjunde Ramprogrammet. Projekt och enskilda studier har också gjorts inom ramen för nationella forskningsfinansiärer med liknande resursramar främst i Tyskland och Storbritannien.

Sedan 2011 har hela 33 projekt startats där minst ett arbetspaket har omfattat återvinning eller återanvändning av litiumjonbatterier. Av dessa har nittion avslutats eller är precis på väg att avslutas. De olika projekten har en relativt stor bredd med fokus på allt ifrån återvinningsprocesser till beskrivning av värdekedjan. Fyra projekt producerar resultat som i olika utsträckning antingen utvecklats eller testats hydrometallurgiska återvinningsmetoder. Lika många har utvärderat olika typer av återanvändningsapplikationer. Två projekt utvärderar pyrometallurgiska metoder och lika många kommer fram till att en kombination av t ex hydrometallurgi, pyrolys och mekanisk separering har störst potential.

Många av projekten är väldigt lika varandra. Detta kan bero på att de ofta är en del i större projekt med uppgift att verifiera helheten i projektet vilket gör att själva återvinningsdelen blir den samma oavsett vilken helhet som ska verifieras. T ex utvärderas återvinningsmetoder för litiumsvavelbatterier på ett liknande sätt som för nya optimerade litiumjonbatterier. Många projekt är också relativt bundna av projektkonstellationen där t ex projekt med en återvinnare i gruppen ofta kommer fram till att den önskade metoden är just den som återvinnaren använder i sin verksamhet. Det är i regel också samma återvinningsföretag som förekommer i projekten. Av de 33 identifierade projekten som antingen avslutats eller som fortfarande pågår så är Umicore med i åtta och Accurec i sju. Därefter följer Stena Recycling, SNAM och Recupyl. Koncentrationen är tydlig även på akademiska sidan där Fraunhofer medverkar i hela tio projekt medan RWTH Aachen är med i sju och Chalmers i fem.

Av de genomförda EU-projekten så är det framförallt ett som står ut: Lithorec<sup>141</sup> (och Lithorec2). Lithorec är det enda EU-projektet som i sin helhet haft till syfte att utveckla och skala upp en komplett återvinningsprocess för elbilsbatterier. Metoden bygger på en kombination av termiska, mekaniska och hydrometallurgiska processer där resultatet har blivit en process med mycket hög återvinningsgrad av de flesta materialen i flera olika kemier. Det hela har lett till att en anläggning har satts upp som tagits över av företaget Dusenfeld. Vad som också gör att Lithorec står ut är den omfattande akademiska publiceringen vilket har gjort projektet betydligt mer tillgängligt än många andra. Dels har flera artiklar publicerats i olika vetenskapliga tidskrifter, dels har en hel bok givits ut baserat på projektet<sup>142</sup>.

Ett annat projekt som står ut är Batteries 2020<sup>143</sup> med ett genomgående mål om att öka effektiviteten i hela användningsfasen, från högre energidensitet i cellen till effektiva återanvändningsapplikationer. Även detta projekt är mycket välpublicerat med flera artiklar och med hög aktivitet bland projektets forskare<sup>144</sup>.

Tidigare nämnda Amplifil<sup>145</sup> är också ett projekt där det cirkulära står i centrum med utveckling av modulära pack som kan användas i olika typer av fordon och i stationär energilagring samt utveckling av återvinningsmetoder. Liksom i fallet Lithorec så har Amplifil lett till kommersialisering av flera delar i projektet bl a vad gäller återvinning där företaget Axion försökte erbjuda (begränsad) återvinning av litiumjonbatterier.

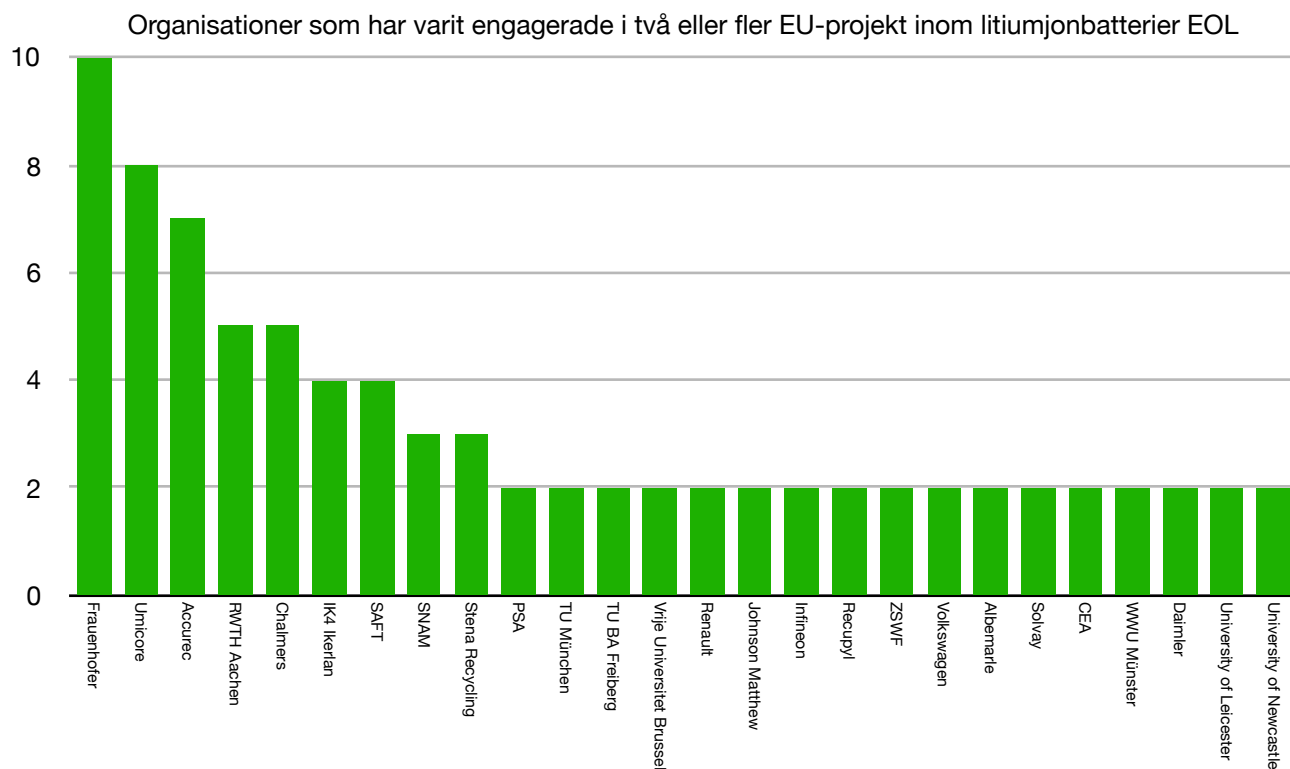
<sup>141</sup> <http://www.lithorec2.de/index.php/en/>

<sup>142</sup> <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-70572-9>

<sup>143</sup> [https://cordis.europa.eu/result/rcn/195734\\_en.html](https://cordis.europa.eu/result/rcn/195734_en.html)

<sup>144</sup> <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7695698>

<sup>145</sup> <https://warwick.ac.uk/fac/sci/wmg/business/successstories/amplifil/>



Ett annorlunda projekt är ProSum<sup>146</sup>. Målet i detta projekt har varit att skapa en databas för all tillgänglig data om polymerer, flöden och behandling av elektronikavfall, EOL-fordon, avfallsbatterier och gruvavfall. Databasen är tillgänglig för vem som helst och innehåller mycket värdefull information för prognosbyggande eller ren förståelse för hur materialflödena ser ut.

<sup>146</sup> <http://www.prosumproject.eu/objectives>

## Pågående forskning

Att följa den pågående forskningen inom EOL-området är utmanande. Främst för att det tar lång tid mellan forskningens genomförande och publiceringen av den. Vi har därför avgränsat detta område till att göra en översikt över kända projekt främst i EU och i Storbritannien i det sk Faraday-programmet.

Utav de nio pågående EU-projekten som omfattar EOL-aktiviteter för litiumjonbatterier är hälften av liknande karaktär som beskrevs ovan, dvs projekt som omfattar hela eller stora delar av den totala värdekedjan och där återvinning endast är en del som ska bidra till att sluta cirkeln. I t ex projektet Alion<sup>147</sup> utvecklas litiumaluminiumbatterier där ett arbetspaket innefattar återvinning av dessa. Med största sannolikhet kommer inte återvinningsmetoderna skilja sig nämnvärt från dagens processer.

Det finns dock ett par projekt som skiljer ut sig.

Det första är AutoBatRec 2020<sup>148</sup>. Projektet har till syfte att identifiera effektiva återvinningsmetoder för elbilsbatterier som är ekologiskt sunda, ekonomiska och överförbara till industriell skala. Varje del av värdekedjan ska undersökas som ny typ av insamling, nya transportkoncept till automatisk demontering och sortering och slutligen separering av metaller. Detta är ett av de första projekten av sitt slag och kan få stor betydelse för den europeiska end-of-life-marknaden om resultaten blir lyckosamma.

Det andra är CROCODILE<sup>149</sup>. Syftet med projektet är att demonstrera olika metallurgiska processer i syfte att etablera en fungerande värdekedja för koboltinnehållande material och produkter som t ex batterier. I projektet ingår ett stort antal återvinnare som Akkuser, Accurec, SNAM, Relight, Stena Recycling och Ecorecycling liksom koboltföretag som Freeport och Glencore. Med så brett deltagande förefaller fokuset vara inriktat på just demonstration av befintliga processer i de olika återvinningsföretaget och innebär troligtvis inte mycket nytt. Dock tyder aktörerna nedströms på att det skulle kunna bli en utvärdering om vilka processer som är ekonomiskt mest fördelaktiga.

Ett ytterligare projekt som är speciellt är Close WEEE<sup>150</sup>. Syftet med projektet är att öka utbytet från elektronikavfall där litiumjonbatterier utför en viktig del. En ny mikrovågsteknik ska användas för att utvinna ämnen som litium, kobolt och koppar ur batterier från mobiltelefoner, läsplattor och datorer. Om man även kan adressera frågor som hur man ska komma över utrustningen kan detta projekt bli mycket viktigt då det fortfarande är elektronik som står för den största mängden avfallsbatterier.

Ett ytterligare projekt som samlar hela återvinningsvärdekedjan är norska LIBRES där en lång rad aktörer från insamlare (Batteriretur) till nedströms mottagare som Glencore Nikkelverk och Keliber medverkar. I projektet ingår även Norsk Hydro som har till uppgift att utveckla en återvinningsprocess.

I Storbritannien har flera projekt startats inom ramen för den sk Faraday Battery Challenge vilket är ett nationellt program uppgående till 246 miljoner pund. Ett av de första flaggskeppsprojekten som startades var ReLiB som leds av University of Birmingham i samarbete med sju andra universitet och 14 industriella aktörer. Projektet, som avslutas 2021, ska bli ta fram ett "triage"-system för använda batterier, autonom testing av batterier och robotbaserad

<sup>147</sup> <http://alionproject.eu/project/>

<sup>148</sup> <https://eitrawmaterials.eu/autobatrec2020-innovation-project-for-smart-recycling-of-waste-traction-batteries-from-electric-vehicles/>

<sup>149</sup> [https://cordis.europa.eu/project/rcn/214467\\_en.html](https://cordis.europa.eu/project/rcn/214467_en.html)

<sup>150</sup> [www.closeweee.eu](http://www.closeweee.eu)

sortering, nya återvinningsmetoder samt utveckling av nya affärsmodeller och en göra översikt av brittisk lagstiftning inom området.

Inom ramen för The Faraday institute görs också en lång rad mindre projekt som t ex livstidsförlängning av batterier (Advanced battery life extension), modulära batteripack (Amplifill-2), nya smarta BMS (BABE), ny återvinningsmetod för EV-batterier (CALIBRE), återtillverkning av batterier (R2Lib), samt effektiv värdekedja för återtillverkning och återvinning av EV-batterier (VALUABLE).

I USA har Department of Energy avsatt 15 miljoner dollar för ett centrum för litiumjonåtervinning. Centrumet som främst kommer att fokusera på direktåtervinning av litiumjonbatterier leds av Argonne National Laboratories tillsammans med Oak Ridge Laboratories och National Renewable Energy Laboratories. Till centret har även vissa forskargrupper knutits från bl a Michigan Technical University, University of California San Diego och Worcester Polytechnic Institute. Centrumet startades upp i februari 2019 och har finansiering för tre år.

I Sverige pågår också ett antal större forskningsprojekt. Två projekt inom återvinning görs i Luleå. Det ena, *Resurseffektiva återvinningsvägar för uttjänta litiumjonbatterier*, är lett av Luleå Tekniska Universitet och har till syfte att utveckla ett koncept som möjliggör effektiv återvinning av metaller såsom Co, Ni, Cu och Li från uttjänta li-jon batterier. Fokus i studien är att undersöka en kombination av mineraltekniska och metallurgiska processteg för uppberedning av elektrolyten från uttjänta li-jon batterier genom så kallad mekanisk aktivering. Detta för lättare kunna separera metaller i smältprocesser och efterföljande raffineringsteg.

Det andra, *ReLion*, är lett av Swerim och ska fastställa förutsättningarna för ett sammanhållet återvinningsystem för storskalig återvinning av litiumjonbatterier, som ska kunna hantera koppar, aluminium, litium, mangan och nickel. Detta ska göras genom bl.a. analys av materialflöden, undersökningar av möjliga mellanprodukter som kan gå vidare till effektiva processer inom t ex metallurgisk industri, och praktiska tester av återvinningsmetodik. I projektet har man sagt att ska utgå från traditioner i svensk metallurgisk industri vilket sannolikt innebär att pyrometallurgiska metoder står i centrum.

Inom återanvändning pågår projektet "Second-use av Li-jonbatterier från hybrid- och elfordon"<sup>151</sup> Syftet med projektet är att undersöka förutsättningarna för återanvändning av fordonsbatterier i energilagringssapplikationer och inbegriper företag i hela värdekedjan, från fordonstillverkare till energilagerutvecklare.

Ett projekt som angriper ett mer avgränsat problem men som kan få stor betydelse är "*BLACK - Batteriets Liv och Användning efter Krock*". Projektet syftar till att verifiera battericellers elektriska begränsningar i relation till mekanisk chock vilket kan användas som underlag för framtida konstruktioner av batterisystem. Men resultaten bör vara minst lika intressanta för EOL-industrin och för man kan hantera batterier i återanvändningsapplikationer när de varit med i skadade fordon.

Ett annat nischat projekt men som adresserar en fråga som kan bidra till ökad insamling är REWEEEL - Automatiserad lokalisering och demontering av batterier från WEEE-produkter. Projektets mål är att utveckla en automatiserad process för identifiering och demontering av batterier från smarta mobiltelefoner och surfplattor vilket kan leda till ett ökat utbyte.

---

<sup>151</sup> <http://www.energimyndigheten.se/forskning-och-innovation/projektdataas/sokresultat/?projectId=26799>



## Behov av vidare forskning

### Vad ska vi ha forskning till?

Det finns naturligtvis flera till skäl att forska om återvinning och återbruk av batterier. Ett skäl är att ta fram ny kunskap som kan skapa nytta för hela batteriindustrin och ta området framåt. Ett annat skäl, för t ex ett enskilt företag eller för Sverige som land, kan vara att utveckla den egna förmåga att skapa effektiva och lönsamma lösningar och på så sätt stärka sin egen position.

I det första fallet bör forskningen inriktas mot nya områden, ny teknik eller nya metoder, alternativt verifiering av redan gjord forskning. I det andra fallet kan forskningen snarare ses som kompetensuppbyggnad eller tekniköverföring och kan göras på områden som behöver stärkas utan att det innebär att forskningsområdet som helhet flyttas framåt.

I programbeskrivningen för Batterifondsprogrammet som är Sveriges största finansiär av batteriforskning så står det att syftet med programmet är att:

- skapa fortsatt kunskaps-, kompetens- och teknikutveckling som utgör bas för framtida innovationer inom området,
- åstadkomma ökad synlighet för, och överföring av, forskning, utveckling och nya tekniker inom området mellan näringsliv och akademi
- utöka områdets bredd och volym för att möjliggöra att starkt svenskt näringsliv kan bibehållas och även expandera,
- indirekt bidra till höjd systemkunskap inom näringslivet kring batterier och batteriåtervinning.

Vidare står det att målet är att stärka Sveriges position inom forskning och utveckling av batteriteknik samt att nya tekniska lösningar och nya produkter ska tas fram.

Syftet är alltså dubbelt. Det finns därför egentligen inget hinder att utveckla metoder i Sverige som redan finns i andra länder. I alla fall inte om kunskapen saknas i Sverige. De områden som bedöms ha stor framtida potential inom EOL-området, samt inom batteriområdet i stort, och där Sverige saknar expertis och kompetens bör därmed prioriteras.

Vad som också bör vara av vikt är att inrikta forskningen på områden där brist på kunskap eller lösningar skapar begränsningar i industrin idag såväl globalt som i Sverige.

Likaså kan det tyckas vara onödigt att på djupet forska inom ett specifikt område om de förbättringar som åstadkoms, hur bra de än må vara, ändå inte kommer att leda till t ex ökad återvinning pga problemen ligger någon annanstans. Det är också tveksamt om det finns skäl att utveckla metoder som redan på pappret har lägre lönsamhet eller utbyte än vad metoder och processer i utlandet har då detta troligtvis skapar dåliga förutsättningar för en hållbar försörjningskedja.

### Forskningsläge vs industrins behov

I denna forskningsammansättning har fokus legat på framför allt tre områden:

- Generering och insamling av förbrukade litiumjonbatterier
- Återanvändning av litiumjonbatterier
- Återvinning av litiumjonbatterier

Vidare har studien också täckt forskning runt batteriers miljöpåverkan och design för återvinning och återbruk.

På övergripande nivå kan konstateras att forskningen är mycket framtung med omfattande forskning gjord inom återvinning, relativt mycket men ändå bara begynnande forskning inom återanvändning samt ytterst lite inom insamling och generering.

Ställt mot hur marknaden faktiskt ser ut idag, eller vad som inom industrin betraktas som utmaningar, så råder en relativt stor obalans. Som kunde konstateras i det inledande kapitlet så är det största hindret för ökad återvinning inte brist på tekniska lösningar. Det finns idag flera återvinnare med effektiva processer genom vilka batterier återvinns till nytt batterimaterial helt i enlighet med vad som är önskvärt i en cirkulär ekonomi. Vad som däremot saknas, speciellt i Europa, är batterier att återvinna.

Detta hänger samtidigt ihop. Om återvinnare i andra delar av världen har mer effektiva processer och även en mer lönsam avsättningsmarknad så kommer de alltid att kunna betala högre priser än återvinnare i Sverige. Detta riskerar att göra det omöjligt för återvinnare i Sverige att attrahera tillräckligt stora volymer för att få en effektiv verksamhet.

Om däremot material försvinner till återbruksmarknaden så spelar effektiva återvinningsprocesser inte så stor roll hur effektiva de än må vara eftersom värdet på återvunnet material i regel inte kan mäta sig med värdet på återanvända produkter. Detta bidrar till att föra ut portabla batterier ur landet men, med system för återanvändning på plats, skulle det kunna bidra till att industriella batterier stannar kvar.

En generell slutsats bör därför vara att forskning som på olika sätt kan bidra till ökade volymer samt ökat utbyte, oavsett om det handlar om ökade intäkter eller minskade kostnader, är av vikt då det kan bidra till ökad konkurrenskraft för svenska och europeiska företag.

## Förslag på forskning inom generering och insamling av förbrukade batterier

Sammanställningen visade att det gjorts mycket lite forskning inom detta område. Även om flera forskningsprojekt har bidragit till värdefull kunskap om t ex avfallsbatteriers värdekedja och vad som driver den, så går det inte att säga att det finns en kunskapsbas att bygga vidare på. Vad som också är anmärkningsvärt är den totala avsaknaden av tekniska lösningar t ex för ökad säkerhet eller ökad automatisering, något som skulle kunna både effektivisera och minska kostnaderna inom området.

Områden där ökad forskning skulle kunna spela en betydande roll är:

**Ökad systemförståelse** – Skapa förståelse för hur hela EOL-marknaden hänger ihop och hur den förhåller sig till hela batterimarknaden. Om det inte finns tillgänglig kunskap om när batterier når EOL, vart de tar vägen och vad som händer med dem så blir det oerhört svårt att prioritera åtgärder och rikta fortsatta medel till forskning och utveckling. Förståelse för intäkts- och kostnadsstruktur i hela värdekedjan liksom om konkurrerande länders utveckling är av allra största vikt.

Det finns också ett stort behov av att veta var trösklarna finns för att batterier ska flöda mellan användare och insamlare så smidigt som möjligt. Vad skulle få folk att snabbare lämna in elektronikavfall inklusive batterier? Vad skulle få elektronikåtervinnare och återbruksföretag att sälja batterier till svenska aktörer istället för utomlands?

**Incitament och kreativa insamlingsmetoder** – Best practice inom insamling av batterier. Modelleringar och test i mindre skala kan vara intressant för att bättre förstå hur batterier kan nå återvinning snabbare.

**Hinder för internationell och intraeuropeisk handel och transport av batterier** – Trots att de flesta regler kring batteriåtervinning är skapade på EU-nivå så finns det fortfarande skillnader framförallt för hur batterier får transporteras. Detta skapar mycket merarbete för återvinnare och det kan göra att bästa lösningar i vissa fall inte kan väljas. Forskningen har en roll att tydliggöra och identifiera hinder och peka på hur detta kan förändras.

**Säkra transporter** – Förutom brist på batterier så är återvinnarens största problem idag de utmaningar som kommer med lagring och transport av litium- och litiumjonbatterier. Trots detta finns oerhört lite forskning gjord vilket gör att såväl lagstiftning som kommersiella lösningar riskerar att vila på svag grund. Mer kunskap krävs om vad som orsakar bränder, hur batterier bäst bör förvaras och förpackas och hur skador kan minimeras. Experimentell forskning kan också bidra till nya lösningar och kommersiella produkter.

**Säkerhet och arbetsmiljö i hanteringen av litiumjonbatterier** – På samma tema finns det ett stort behov av kartlägga risker i hanteringen av litiumjonbatterier i anläggningarna. Både för att undvika olyckor men också för att minimera onödiga regleringar om det inte behövs. I en verksamhet där marginalintäkterna är låga finns inte plats för dyra processer utan det kommer snarare göra att material i stället exporteras.

## Förslag på forskning inom återanvändning

Som framkom i kapitlet om återanvändning så börjar en grundläggande kunskap att etableras. Den är dock endast i sin linda och behöver byggas på. Utifrån ett nationellt perspektiv finns det flera skäl att både bredda och fördjupa kunskapen inom detta område. För det första så är återanvändning ett högre trappsteg i avfallstrappan och är därmed en viktig del för att nå flera miljömål. För det andra så är en återanvändningsmarknad en potentiell jobbskapare där hantering krävs av produkter som en gång inte tillverkades i Sverige men som nu kan sysselsätta människor lokalt. För det tredje är återanvändning en viktig väg till att hålla batterierna kvar i Sverige och Europa vilket i slutändan gynnar återvinningen och en svensk batteri- och batterimaterialindustri.

Detta är dock bara under förutsättning att återanvändningslösningar fungerar på det sätt som utlovats. Här har forskningen en viktig uppgift i att verifiera potentialen på både kort och lång sikt. Paradoxen kring återanvändning är att för att det ska fungera så väl som möjligt så måste anpassningar av produkterna göras redan när de designas för sin första applikation. Att fatta denna typen beslut, utan att veta vad den faktiska potentialen är om kanske så mycket som 10 år, är en utmaning.

Områden där forskningen kan spela en roll är:

**Utvärdering av storskaliga energilagringssystem (ESS)** – Den mesta forskningen har hittills gjorts på mycket små system. Det finns exempel där slutsatser om åldring och degradering dragits till och med på cellnivå och i flera fall på ett enskilt pack. Eftersom ett ESS tjänar pengar åt sin ägare skulle en fullskalig anläggning på MWh-nivå kunna fylla flera syften för t ex ett universitet eller institut. Fortfarande har här akademiska världen en möjlighet att ligga steget före industrin. Det finns också tillgång av batterier på marknaden. Det handlar bara om hur mycket man är beredd att betala för dem alternativt vilket erbjudande man har till enskilda företag.

**Testning och gradering av batterier** – Det finns en klar poäng med att en neutral aktör som ett institut eller ett universitet utvecklar standarder eller öppet tillgängliga metoder för test och gradering av batterier. Detta skulle kunna ha stor betydelse även för handeln med batterierna och öka användningen inom olika typer av applikationer.

**Kompleta cirkulära lösningar** – Återigen har universitet och institut i regel egna fordonsslottor eller arbetar i projekt med företag eller offentliga organisationer som har det. Att förse batterier i elfordon med olika sensorer och loggar som följer batterierna under användning för att sedan använda dem i sina egna återanvändningssystem skulle bidra med mycket nyttig kunskap. Även batterier utanför elbilsvärlden som t ex batterier från truckar, tåg, robotar, cyklar etc kan användas för detta. Vad skulle kunna förbättras i packen för att de bättre skulle fungera i återanvändningslösningar? Kan man kombinera energilagring med laddning och snabba batteribyten (swapping) etc. Forskning som både letar efter best practice och som skapar och följer egna lösningar skulle ge mycket.

**Förbättrad övervakning och kontroll av batteripack** – Utveckling och utvärdering av batteristyrningssystem (BMS) samt olika typer av sensorer och uppkopplingsmetoder kan ha stora betydelse för batteriernas kapacitet och livslängd samt även ligga till grund för olika tjänster och affärsmodeller.

**Återtillverkning** – Vilka krav ställs på återtillverkning av batterier där de används för samma applikation som tidigare? Tester som visar på hur väl det fungerar och som kan ge anvisningar om vilka krav som bör ställas.

**Översikt av ägar- och affärsmodeller** – En av de största utmaningarna med återanvändning är återigen att få tag på batterier. I regel ägs de av aktörer med ringa möjlighet eller intresse för att utnyttja batteriet vid EOL men ändå lär det snart bli allmänt känt att batteriet har ett värde. Med för många steg i värdekedjan äts företags marginaler upp och det riskerar att bli olönsamt för alla inblandade. Därför är det viktigt att studera vilka ägar- och affärsmodeller som bäst kan möjliggöra lönsamma återanvändningslösningar.

## Förslag på forskning inom återvinning

Återvinning är det område inom EOL där forskningen står som starkast. Speciellt gäller detta olika typer av separeringsmetoder. Det är vår uppfattning att det inte kan finnas något skäl att helt öppet gå ut och pröva nya metoder som inte med stor sannolikhet kan leda till avsevärda förbättringar mot de metoder som redan finns tillgängliga avseende t ex miljöprestanda, lönsamhet eller flexibilitet. Takten inom detta område är nu mycket hög speciellt i Asien och det bör från finansierars sida vara ett absolut krav att ny forskning inom återvinning redan vid ansökan ska ställas mot vad som redan finns tillgängligt.

Samtidigt finns det ett stort behov av att öka kompetensen inom mer avancerade återvinningsmetoder och inte minst inom tillverkning av batterimaterial. Därför bör denna typ av projekt prioriteras men de ska göra det i just ett sådant syfte och inte under förespeglning att man tar fram något som inte redan finns.

Ett annat stort behov finns inom de perifera delarna inom återvinning såsom sortering och förbehandling vilket också knyter an till behoven beskrivna under insamlingsdelen kring säkerhet och transporter. Allt som hindrar batterier att behandlas på ett effektivt sätt är viktigt att med hjälp av forskning röja undan.

Konkreta behov av forskning inom återvinning är:

**State of the art inom återtillverkning av katod- och anodmaterial** – Litteraturstudier och jämförande experiment som kan verifiera och överföra kunskap från befintlig forskning i världen inom direkt återvinning och återtillverkning av batterimaterial. Det är med denna förmåga (tillsammans med en lokal efterfrågan) som batterier i slutändan kan hållas kvar i Sverige, och även attraheras till Sverige från andra länder, då det säkerställer högsta möjliga lönsamhet för återvinningen.

**Holistisk utvärdering av processer** – Det finns fördelar och nackdelar med alla typer av processer, från kostnader och effektivitet till miljöpåverkan och effekter på transporter och arbetsmiljö. Vilken metod som väljs har också konsekvenser för hur ett material behöver förhandlas och sorteras samt vad som går att göra med det. Vad vi inte hittat är utvärderingar av metoder utifrån detta mer holistiska perspektiv vilket både kan peka ut den mest effektiva vägen för batterierna men även ge förklaringar till varför batterier tar andra vägar än vad man tänkt sig.

**Pilotprojekt som involverar återvinning och återproduktion** – Projekt i större skala, gärna involverande flera institutioner för att verkliga bli duktiga på hela kedjan från behandling av batterierna till produktion av nya material.

**Metoder för direkt återvinning** – Vissa katodmaterial har låga materialvärden och kan egentligen bara behandlas lönsamt i mycket effektiva processer när litium-priset är högt. Samtidigt går det att behålla katod- och anodmaterialet i sin nuvarande form för att återigen använda det i nya batterier efter viss termisk behandling. Samtidigt kräver detta inte bara teknik utan även en effektiv värdekedja där stora mängder av samma batterityp kan samlas in och där ett behov av de producerade materialen kan verifieras.

**Studier och lösningar för demontering av både pack och celler** – Det är här de största kostnaderna ligger för återvinning. Att hitta metoder som gör det mer effektivt att ta i sär både pack och celler är därför oerhört viktigt eftersom det krävs för att kunna jobba med t ex hydrometallurgiska processer.

**Identifiera behov och ta fram lösningar kring sortering, klassificering och märkning av batterier** – För många processer krävs att batterierna först är sorterade för att de ska ha så hög effektivitet som möjligt. Samtidigt är det inte alltid nödvändigt med sortering då problemet går att lösa på ett tidigare plan. Här finns en koppling till arbeten inom insamling då klassificering och förståelse för vad som sätts på marknaden är av hög vikt.

## Till sist – reflektioner om forskning och forskningsbehov inom EOL av litiumjonbatterier

I denna studie har vi gått igenom nästan 1000 olika artiklar, projektbeskrivningar och rapporter. Vi har konstaterat att området i många fall är tudelat. Dels tudelat i vad man prioriterat att forska om där den stora mängden ligger på processer för att behandla batterier och skapa nya produkter baserat på det återvunna materialet. Medan områden som design för recycling, insamling, transporter o dyl har studerats oerhört sparsamt. Trots att de i många fall utgör själva förutsättningarna för att materialet överhuvudtaget ska nå återvinningen. Av samma skäl har vi idag överkapacitet för återvinning på i princip varje marknad, inklusive Kina, i många fall för att man inte vet hur man ska få in batterierna.

Det finns också en geografisk tudelning. Där Kina och Sydkorea, som idag är absolut ledande inom återvinning av litiumjonbatterier, tidigt utvecklade metoder för att omsätta skrot till råmaterial. I andra länder har man i princip endast skrapat på ytan.

Att detta har skett är en sak. Men att det i princip har gått stora delar av forskningsvärlden i väst förbi är högst anmärkningsvärt. Vi har till exempel hittat översikter gjorda i både Europa och USA där man inte nämner kinesisk forskning i en enda referens. Trots att det nästan varje år publicerats välskrivna, pedagogiska litteraturöversikter på engelska i Kina, som berättar en helt annan historia än vad som sprids i väst.

När detta läggs samman med EU-projekt där stora mängder pengar går till att låta återvinningsföretag i princip göra samma sak gång efter gång, eller forskningsgrupper som får fortsätta forska på exakt det som de redan tidigare forskade inom tidigare så är det ett exempel på hur Europa blir systematiskt omsprunget av Asien. Det har redan hänt

inom batteriproduktionen. För 10 år sedan var batteriindustrin nästan helt koncentrerad till Japan och Sydkorea. Idag finns mer än två tredjedelar i Kina. Tillgång till avfallsbatterier och återvinningsteknik var en viktig del i den utvecklingen.

För att få till en förändring tror vi att det inte bara krävs strategiskt riktiga områden att forska på. Det krävs även ett annorlunda sätt att forska på. Vi tror forskningsprojekt inte bara kan finansiera forskningspersonal. Det behövs större budgetar för att investera i utrustning och material. Om forskningen ska ligga i framkant och vara relevant måste den också leda och inte vara beroende av företag som heller inte dem alltid har resurser att investera. Vilket innebär att man endast gör vad man alltid tidigare gjort. Vi tror att mer pengar behöver läggas på flygbiljetter. Inte för att åka varvet runt i Europa på projektmöten utan till Kina, Indien eller Kenya där man kan studera den snabba utvecklingen inom allt från återvinning till användning av energilagrar. Vi tror också att man i ett land som Sverige behöver kraftsamla och inte sprida ut resurserna för mycket. Den kompetens som finns inom området måste vara tydligt samlad på något sätt och den måste bygga rejäla broar internationellt för att hela tiden ha koll på vad som händer inom området, och var den bästa kompetensen finns.