

# Konsekvenser av Science based targets (SBT) för att skapa ett hållbart och energieffektivt måleri

Publik rapport - Förstudie



Författare: Patrik Rohdin, Johanna Wallin, Mariana Andrei och Magnus Tångring

Datum: 2022-05-31

Förstudie inom Hållbar produktion - FFI - december 2020

**FFI** Fordonsstrategisk  
Forskning och  
Innovation

VINNOVA

Energimyndigheten

TRAFIKVERKET

FKG

VOLVO

SCANIA

VOLVO

SCANIA

VOLVO

SCANIA

VOLVO

SCANIA

VOLVO

# Innehållsförteckning

<b>1 Sammanfattning .....</b>	<b>3</b>
<b>2 Executive summary in English.....</b>	<b>4</b>
<b>3 Bakgrund.....</b>	<b>4</b>
<b>4 Syfte, forskningsfrågor och metod.....</b>	<b>6</b>
<b>5 Mål .....</b>	<b>7</b>
<b>6 Resultat och måluppfyllelse.....</b>	<b>8</b>
6.1 Litteraturstudie – Deep decarbonisation och Science based targets .....	8
6.2 Fallstudie – Måleri - Volvo CE Hallsberg .....	11
6.3 Strategi för modellering, beslutsstöd och samarbeten.....	21
<b>7 Spridning och publicering .....</b>	<b>24</b>
7.1 Kunskaps- och resultatspridning.....	24
7.2 Publikationer.....	24
<b>8 Slutsatser och fortsatt forskning .....</b>	<b>25</b>
<b>9 Deltagande parter och kontaktpersoner.....</b>	<b>26</b>
<b>10 Referenser.....</b>	<b>26</b>

## Kort om FFI

FFI är ett samarbete mellan staten och fordonsindustrin om att gemensamt finansiera forsknings- och innovationsaktiviteter med fokus på områdena Klimat & Miljö samt Trafiksäkerhet. Satsningen innebär verksamhet för ca 1 miljard kr per år varav de offentliga medlen utgör drygt 400 Mkr.

För närvarande finns fem delprogram; Energi & Miljö, Trafiksäkerhet och automatiserade fordon, Elektronik, mjukvara och kommunikation, Hållbar produktion och Effektiva och uppkopplade transportsystem. Läs mer på [www.vinnova.se/ffi](http://www.vinnova.se/ffi).

# 1 Sammanfattning

En effektiv industriell resurs- och energianvändning är inte bara ett sätt att motverka klimatförändringarna, utan är även en nyckelkomponent för företags fortlevnad och konkurrenskraft. Europeiska unionen (EU) har definierat klimatförändringar som ett viktigt fokusområde för miljöpolitiken där energieffektivisering och konvertering bort från fossila bränslen är i fokus. Svensk industri som helhet står därmed inför betydande omställningar i form av en dekarbonisering som inte bara kan lösas med inkrementella förbättringar. Målet med denna förstudie är att (1) visa på en dekarboniseringsplan för ett stort måleri inom fordonsindustrin baserat på science based targets (SBT) som möjliggör nettonollutsläpp, (2) utveckla en strategi för tillämpandet av modeller för simulering av en komplex verksamhet som ett måleri, samt att (3) ta fram en färdplan som möjliggör förutsättningarna för ett långsiktigt samarbete mellan aktörer inom branschen.

Denna förstudie innehåller en detaljerad kartläggning och koldioxidallokering på processnivå som ett led i att prioritera åtgärder. Ett huvudresultat, förutom att få en djupare förståelse för energianvändning för enskilda processer, var att majoriteten av CO<sub>2</sub> är relaterad till gasolanvändning i ugnarna. En annan viktig slutsats är att det är viktigt med vilket perspektiv på CO<sub>2</sub> som ligger till grund för allokeringen.

Resultatet av detta arbete kan sammanfattas i tre alternativa övergripande strategiska tankebilder (färdplaner) för dekarbonisering av fordonsmålerier:

- (1) Konvertering till annat bränsle och systemförändring – där konvertering av gasol till exempelvis biogas genomförs i kombination med processinnovationer för förbehandling och skifte till låghärdande pulver. Fortsatt fokus på energieffektivisering och installation av lokal elproduktion (främst solel). För att kunna nå SBT-målet för 2040 krävs ytterligare åtgärder i form av kompensation, koldioxidavskiljning och lagring (CCS) eller annan process med negativa utsläpp för att kompensera för oundviklig användning av energi.
- (2) Elektrifiering och systemförändring – där konvertering av gasol till el genomförs i kombination med processinnovationer för förbehandling och skifte till låghärdande pulver. Konverteringen kräver extern infrastruktur som i nuläget ej finns tillgänglig. Processförändringen innehåller mer utredningsarbete och kräver ytterligare forskning, inte minst på processnivå. Fortsatt fokus på energieffektivisering och installation av lokal elproduktion (främst solel). För att kunna nå 2040 målet krävs även här ytterligare åtgärder i form av kompensation, CCS eller annan process med negativa utsläpp för att kompensera för konsekvenserna av återstående energianvändning.
- (3) Lokal produktion av värme och el (CHP) och systemförändring – där konvertering av gasol till egen värmeproduktion via lokal produktionsanläggning. Elanvändningen täcks till del med elproduktion från anläggningen, viss ansluten eleffekt kvarstår från nätet. Processförändring likt ovanstående tankebilder (1 och 2). Visst behov av ytterligare åtgärder för att nå 2040-måler kommer även här att kvarstå.

Dessa tre vägval utgör tankebilder för att diskutera och utreda frågan om hur 2030-mål och i förlängningen 2040-målen kan nås. I alla tankebilderna finns fortsatt energieffektivisering, implementering av lokal elproduktion (solel) och de centrala förändringarna på processnivå med (processinnovation).

En process för att ta fram nödvändigt beslutsstöd för de föreslagna åtgärdspaketet har också presenterats.

## 2 Executive summary in English

Efficient industrial resource and energy use is not only a way of counteracting climate change. It is also an important factor for competitiveness of companies, especially for companies acting on an international market. The European Union (EU) has defined climate change as an important focus area for environmental policy in its sixth environmental action program, which focuses on energy efficiency and conversion away from fossil fuels. Swedish industry as a whole is facing significant changes that can not only be solved with incremental change. Larger efforts are required to achieve net zero emissions of CO<sub>2</sub> in 2045. This will also require collaboration between a large number of actors from industry, the research community, research funders and industry. These types of innovations can be classified as disruptive where collaboration, state of the art research and major intra-organizational changes are required to achieve the goal. A concept describing this is “deep decarbonization” (Geels et al., 2017; Åhman et al., 2017). In the processes of deep decarbonisation, the current new technology or process has not even always been developed, ie. it is still classified at the lower levels of the Technology Readiness Level (TRL).

The aim of this pre-study is to (1) demonstrate a decarbonisation plan for a large paint shop in the automotive industry based on science-based targets (SBT) that enables net zero emissions, (2) develop a strategy, to generate decision support, using simulation and modelling of a complex industrial process as a paint shop, and to (3) produce a roadmap that includes identifying key actors in this transition process.

This pre-study includes a detailed mapping and carbon dioxide allocation at process level as part of prioritizing measures. One main outcome, in addition to getting a deeper understanding of energy use of individual processes, was that most of the CO<sub>2</sub> is related to LPG use in the ovens, and that the pre-treatment is a key process where large potential is found. The use of different perspectives on CO<sub>2</sub> allocation also is shown to be a key parameter. The pre-study also presents a set of decarbonisation measures. These measures and their degree of maturity differ and also when a potential implementation would be technically possible. The measures in this pre-study have been compiled based on three main sources and should not be considered complete. The three main sources are (1) a scientific review carried out within the pre-study, (2) planned and for VCE interesting measures that have been discussed or investigated to varying degrees and (3) energy system measures that the project group discuss or worked on in other projects related to the automotive industry. The measures have been categorized into four main groups (1) conversion of fuel (LPG), (2) local electricity and heat production (CHP) and local CO<sub>2</sub> reduction, (3) system changes (process innovation) of central processes in e.g. the pre-treatment and (4) energy efficiency.

The results of this work can be summarized in three alternative overall strategic paths (roadmaps) towards decarbonisation of paint shops:

(1) Conversion to other fuels and system change - where conversion of LPG to, for example, biogas is carried out in combination with process innovations for pre-treatment and shift to low-curing powder. The conversion can be carried out in the short to medium term, while the process change includes more investigative work and requires further research, not least at the process level. Continued focus on energy efficiency and installation of local electricity production (mainly solar). In order to achieve the SBT target for 2040, additional measures in the form of compensation, carbon dioxide capture and storage (CCS) or another process with negative emissions are required to compensate for the consequences of the remaining use.

(2) Electrification and system change - where conversion of LPG to electricity is carried out in combination with process innovations for pre-treatment and a shift to low-curing powder. The conversion requires external infrastructure that is not currently available. The process change contains more investigative work and requires further research, not least at the process level. Continued focus on energy efficiency and installation of local electricity production (mainly solar). In order to reach the

2040 target, additional measures in the form of compensation, CCS or another process with negative emissions are also required here to compensate for the consequences of the remaining use.

(3) Local production of heat and electricity (CHP) and system change - where conversion of LPG to own electricity and heat production using a local plant fired with, for example, wood chips is implemented. Electricity use is partly covered by local electricity generation from the plant, some grid-connected electricity remains. Process changes similar to the above paths (1 and 2). This path also requires additional measures with negative emissions to achieve the 2040 targets.

These three pathways towards decarbonization can be used to spark further discussing and investigations on how the 2030 goals and, by extension, the 2040 goals can be achieved. In all the paths, a continued focus on energy efficiency, implementation of local electricity production (solar) and the central changes at process level with (process innovation) is included.

A process for developing the necessary decision support for the proposed action packages has also been presented.

### 3 Bakgrund

En effektiv industriell resurs- och energianvändning är inte bara ett sätt att motverka klimatförändringarna, utan är även en nyckelkomponent för företags fortlevnad och konkurrenskraft, speciellt för de företag som levererar på en internationell marknad. Europeiska unionen (EU) har definierat klimatförändringar som ett viktigt fokusområde för miljöpolitiken i dess sjätte miljöhandlingsprogram, där energieffektivisering och konvertering bort från fossila processer är i fokus. Svensk industri som helhet står inför betydande omställningar som inte bara kan lösas med inkrementella förbättringar. Större ansatser krävs för att nå netto-nollutsläpp av CO<sub>2</sub> år 2045. Dessa delar kräver också samverkan mellan ett stort antal aktörer från industrin, forskarsamhället, forskningsfinansiärer och näringslivet. Dessa typer av innovationer kan klassas som disruptiva där samverkan, spetsforskning och stora inom-organisatoriska förändringar etc. krävs för att uppnå målet. Ett begrepp för detta är ”deep de-carbonisation” (Geels et al., 2017; Åhman et al., 2017). Inom området deep de-carbonisation finns inte ens alltid den aktuella nya tekniken eller processen framtagen, dvs. den klassas fortfarande in på de lägre nivåerna på TRL-skalan (Technology Readiness Level).

Den totala slutenergianvändningen i Sverige är cirka 378 TWh/år, där industrins energianvändning utgör ca 143 TWh/år (Energimyndigheten, 2020). Av detta står den verkstadsindustrin för ca 7,6 TWh där tillverkning av arbetsmaskiner och fordonstillverkning till stor del ingår. I IVAs (2019) färdplan för den mekaniska verkstadsindustrin omnämns fyra primära områden som centrala i form av energieffektivisering, byta ut kol mot biokol i reduktionsprocesser, ersätta fossila bränslen med biobränslen eller el, samt återvinning och användning av restprodukter. Tillverkning av arbetsmaskiner, som är i fokus i denna förstudie, är en komplex och energi- och resursintensiv process som använder betydande resurser i form av energi, råmaterial och vatten. För att möjliggöra en konkurrenskraftig tillverkning av fordon ställs allt högre krav på förbättrad produktkvalitet, förbättrad hållbarhet och minskade koldioxidutsläpp. Detta innebär bland annat ett ökat fokus på konvertering av fossildrivna processer och energieffektivisering. För Sverige är fordonsbranschen, och tillverkning av arbetsmaskiner, en viktig aktör då fordonsbranschen står för ca 15% av exporten och 20 % av industriinvesteringarna. Dessutom är detta en av landets mest FoU-intensiva näringar, som står inför en stor utmaning att fasa ut fossila bränslen i produktionsledet och att krav på betydande energieffektivisering som går bortom inkrementella förbättringar. I samband med produktion av arbetsmaskiner, i denna förstudie vid Volvo Construction Equipment i Hallsberg, och inom fordonstillverkning är måleriet ur energi- och miljösynpunkt en viktig delprocess då den står för en betydande del av den totala resurs- och energianvändningen. I en internationell sammanställning av energianvändningen vid fordonstillverkning så rapporteras att 36% av energianvändning används i måleriet, 32% till motor, växellåda och montering av chassi och de resterande 32% till slutlig montering, ”press shop” och ”body shop” (Giampieri et al., 2020). En något högre siffra rapporterades även i forskningsprojektet ”Energieffektivt måleri” (2010-2013) där Högskolan väst, Linköpings universitet (Energisystem), Saab automobil, Volvo Cars AB, Scania CV och Pinifarina deltog (Rohdin et al., 2012a; Christiansson, 2013). För tillverkare av arbetsmaskiner ser förutsättningarna ut på liknande sätt. Detta pekar på vikten av ett energi- och resurseffektivt måleri.

### 4 Syfte, forskningsfrågor och metod

Volvo CE har tydliga mål om att uppnå en energieffektiv och deponifri anläggning med en högre andel förnybar energi. Denna offensiva strategi och användandet av mål (science based targets) kräver åtgärder som går bortom inkrementell utveckling utan förutsätter stora

tekniksprång, där beslutsunderlaget är begränsat. En nyckelkomponent tillsammans med konvertering, som innebär ett tekniskifte för måleriet, och som möjliggör detta är införandet av en ny typ av förbehandling. För att utreda och konkretisera konsekvenserna av dessa åtgärder krävs forskning och utveckling, vilket är det övergripande målet med denna förstudie.

## 5 Mål

De konkreta delmålen i denna förstudie är att:

1. Generera en state-of-the-art dekarboniseringsplan för ett stort måleri inom fordonsindustrin baserat på science based targets (SBT) som möjliggör nettonollutsläpp.
2. Utveckla en strategi för tillämpandet av modeller för simulering av en komplex verksamhet som ett måleri i fordonsindustrin samt sammanställa de utmaningar som uppkommer i samband med genomförandet av de omställningsåtgärder som krävs i form av produktmiljö, inomhusmiljö och externa effekter av dessa åtgärder.
3. Arbeta fram en färdplan som möjliggör förutsättningarna för ett långsiktigt samarbete mellan aktörer inom branschen. Detta såväl i form av underleverantörer, fordonstillverkare, teknikkonsulter, forskningsinstitut och universitet. Detta för att möjliggöra ett långsiktigt lärande mellan företagen och organisationer om införandet av SBT och effekter av deep decarbonisation för fordonsmålerier samt de konkreta åtgärder som blir en följd av detta arbetssätt. Projektet har genomförts i form av tre arbetspaket.

### **Arbetspaket 1: ”Deep de-carbonisation” i fordonsindustrin**

I detta arbetspaket genomförs (1) en sammanställning av kunskapsläget för deep decarbonisation, nationellt och internationellt för den studerade industrigrenen. Detta rör sig om exempelvis konsekvenser av elektrifiering av processer, alternativ till detta som exempelvis användning av vätgas, biogas- eller biobränslepanna, alt. mikro-kraftvärme, samt initialt kunskapsläge kring konsekvenser och krav för att kunna göra ett byte av förbehandling till tunnfilmsteknik, exempelvis oxsilan. (2) En förstudie av vägval (road-map) för målerier i fordonsindustrin, med Volvo CE Hallsberg som exempel, tas också fram och prioriteringsansatser sammanställs. (3) Resultatet av detta delprojekt är en sammanställning i form av en färdplan för Volvo CE, och en sammanställning av tänkbara åtgärder och åtgärdspaket.

### **Arbetspaket 2: Strategi för simulering, validering och uppföljning**

I detta andra arbetspaket sammanställs processlogiken för införandet och utredningen av åtgärder och åtgärdspaket. Inom ramen för förstudien utgörs detta arbetspaket av (1) påbörjad insamling av detaljerad driftdata och anläggningsinformation för måleri och förbehandling vid Volvo CE Hallsberg, (2) framtagandet av arbetsmetoder för att matematiskt modellera processflödet genom måleri och förbehandling. Även en sammanställning av potentiella konsekvenser för produktkvalitet och inomhusmiljö tas fram. Syftet med arbetspaketet är att fastställa en fungerande process för att skapa beslutsunderlag för de olika åtgärdspaketerna från arbetspaket 1 och inför eventuellt vidare arbete i ett fullskaligt forskningsprojekt.

### **Arbetspaket 3: Utveckling av samarbeten och arbete med en fullskalig ansökan**

I detta tredje arbetspaket skapas förutsättningarna för ett samarbete mellan aktörer inom branschen med koppling till detta arbete, både i form av kopplingen mellan underleverantörer och fordonstillverkare men också mellan olika fordonstillverkare och andra aktörer som forskningsinstitut mm. Detta för att lägga grunden för en fullskalig ansökan till Vinnova under 2022.

## 6 Resultat och måluppfyllelse

Resultatet av denna förstudie är att belysa och sammanställa konsekvenserna av att använda science based targets (SBT) och deep de-carbonisation i hållbarhetsarbetet för ett måleri inom verkstadsindustrin. Konkret kommer detta att leda till en sammanställning av möjliga vägval för målerier i form av åtgärds paket. Ett annat konkret resultat av förstudien är en fullskalig ansökan till FFI-programmet under 2021/2022.

### 6.1 Litteraturstudie – Deep decarbonisation och Science based targets

#### *Science based targets*

Svensk industri behöver ställa om och minska klimatutsläppen radikalt. Detta är en central del i att kunna uppnå Parisavtalet och de nationella målen. Ett initiativ för att stötta denna omställning är Science-based Targets. Science Based Targets (SBT) är ett internationellt initiativ som lanserades 2014 som uppmuntrar organisationer att förbinda sig till mål för att minska koldioxidutsläppen på ett sätt som är i linje med den nivå som krävs för att uppfylla målen i Parisavtalet (SBTi, 2020). Denna strategi för att fördela utsläppsminskningar bygger på de krav som behöver ställas för att följa IPCCs scenarion mot nettonollutsläpp 2050. Dessa krav skapar därmed förutsättningar för att med stor sannolikhet hålla den globala uppvärmningen kring 1,5°C. SBT ger därmed industriorganisationer ett ramverk för att sätta mål som bygger på dessa vetenskapligt förankrade krav. Science based targets initiative (SBTi) innehåller metoder, vägledning, kriterier, rekommendationer och bedömer och godkänner självständigt företagets mål (SBTi, 2019; SBTi, 2020). Fler och fler industriorganisationer, inklusive fordonsorganisationer, har anslutit sig till SBTi och förbundit sig att sätta mål som resulterar i nettonollutsläpp av växthusgaser senast 2050 (SBTi, 2019). SBT är inriktat mot exempelvis organisationer från de sektorerna med stora klimatutsläpp som spelar en avgörande roll för att säkerställa övergången till en koldioxidfri ekonomi.

#### *Dekarbonisering av fordonsindustrin – en genomgång av den vetenskapliga litteraturen*

Detta avsnitt börjar med att diskutera SBTi:s metod för att sätta mål. Sedan fortsätter den med att analysera tidigare publicerade artiklar relaterade till dekarbonisering som kan användas av fordonstillverkare för att nå nettonollutsläpp i målerier. Centrala publikationer inom ämnet inkluderar en vetenskapsbaserad manual för målformulering (SBT), valideringskriterier och rekommendationer, ett målvalideringsprotokoll, ett nytt målsättningsverktyg, samt studier som diskuterar utvecklingen av initiativet och grunderna för att sätta mål (SBTi, 2020; SBTi, 2021; Aden, 2016; Gieseke, 2021). SBT-initiativet har publicerat en rad sektorspecifika vägledningspaket för exempelvis flyg-, kläd-, el-, IKT-företag och finansinstitutioner. Liknande sammanställningar är under utveckling för transport-, stål-, olja, gas, cement, kemi och petrokemi, byggnader, aluminium, skogs-, mark- och jordbrukssektorerna. När organisationer väl anslutit sig till SBTi upplever flertalet svårigheter med att samla in data och sätta upp mål (Gieseke, 2021).

De metoder för att sätta mål som godkänts av SBTi bygger på tre huvudelement: (1) en budget för växthusgaser, (2) en uppsättning utsläppsscenarier och (3) en allokeringmetod. En klimatbudget är en maximal mängd utsläpp som tillåts under en tidsperiod. Den valda växthusgasbudgeten följer gällande utsläppsscenarier. Scenarierna är utvecklade från Integrated Assessment Modeling Consortium och International Energy Agency (SBTi, 2019).

Allokeringmetoden beskriver hur koldioxidbudgeten från ett givet utsläppsscenario fördelas mellan företag inom samma sektor, regionalt eller globalt. Två huvudansatser för



utsläppsallokering på företagsnivå presenteras: konvergens och kontraktion. Konvergensmetoden (convergence) innebär att alla företag inom en given sektor minskar sin utsläppsintensitet till ett gemensamt värde ett givet år. Minskningen beror på företagets initiala koldioxidintensitet och tillväxttakt i förhållande till branschens. Kontraktionsmetoden (contraction) för utsläppsallokering innebär att alla företag minskar sina absoluta utsläpp i samma takt, oberoende av initiala utsläppsresultat, och inte behöver konvergera mot ett gemensamt utsläppsvärde (SBTi, 2020; SBTi, 2019). Som exempel på denna metod kan man säga att om lika stora minskningar i alla organisationer genomförs, i en sådan takt att utsläppen 2050 minskar med minst 49 % under 2010 års nivåer, bedöms den globala uppvärmningen stanna under 2 grader (Aden, 2016). Men även om denna andra metod är enkel, så är varken rättvist eller kostnadseffektivt, eftersom de marginella reduktionskostnaderna varierar avsevärt mellan länder och sektorer (Aden, 2016; McKinsey, 2009).

I den vetenskapliga litteraturen finns det ett antal artiklar som beskriver dekarbonisering på anläggnings eller organisationsnivå med koppling till SBTi och målerier. Denna litteratur har kategoriserats baserat på typ av åtgärder, (1) produktionsoptimering, (2) energieffektivitetsåtgärder, (3) systemförändringar, (4) lokal elproduktion, och (5) konvertering. Utöver artiklarna som ingår i dessa kategorier anses studierna som publicerats av Gebler et al. (2020) och Giempieri et al. (2020) vara relevanta för denna förstudie då de båda använder ett övergripande tillvägagångssätt för att studera fordonstillverkning ur ett energi- och miljöperspektiv.

I Gebler et al. (2020) utfördes en organisatorisk livscykelbedömning (LCA) av en fordonsfabrik. Denna publikation ger en tydlig bild av den övergripande miljöprestandan och fördelningen mellan olika processer. Förutom relevanta resursflöden, ger studien relevanta insikter om i) begränsningarna (effektivitet, ersättning och kompensation) för att uppnå en fullständig dekarbonisering, och ii) om de potentiella strategierna och utmaningarna i samband med dekarbonisering i enlighet med SBT. Huvudinsikterna i denna studie har gett inspiration till vissa av åtgärdspaketet i denna förstudie. Studien visar också på att processen börjar med ökad energieffektivitet genom införandet av effektiv teknik, optimering av organisatoriska rutiner och att undvika energianvändning under icke produktionsstid (tomgångsförluster etc.) (Gebler et al., 2020; Dehning et al., 2016). I ett andra steg är konvertering till alternativ med lägre klimatpåverkan i fokus (Gebler et al., 2020; GEA, 2012). Dessa kan vara konvertering av fossil el med vindkraft, ersättning av naturgas med biometan (efter en noggrann analys av leveranskedjan), följt av en ytterligare minskning genom implementering av syntetisk metan (power-to-gas). I ett tredje steg beskrivs klimatkompensationsmekanismer som det sista ledet för oundvikliga utsläpp. Detta är också en insikt som återkommer i vägvalsdiskussionen i slutet av denna förstudie.

I Giempieri et al. (2020) genomfördes en litteraturgenomgång för att utvärdera de potentiella steg som fordonstillverkare kan implementera för att minska energianvändningen i produktions- och stödprocesser, med fokus på värmeåtervinning och processintegration. I studien presenteras nuvarande praxis, tidigare hinder och drivkrafter för förändring samt hur detta håller på att förändras. En strategi, som till viss del även den är inspiration till ett av vägvalen som presenteras i denna förstudie, beskrivs för hantering av värmeflöden och hur kaskadkopplingar kan genomföras. Strategin bygger på solvärme och värmeåtervinning kan leda till lägre energianvändning (Giempieri et al., 2020; Zahler och Iglauer, 2012). Publikationen avslutas med att diskutera de strategier som kan användas för dekarbonisering.

En viktig grupp av publikationer tillhör kategorin "produktionsoptimering". I Bysko et al. (2021) tas problemet med sekvensering i målerier upp och syftar till att minimera antalet kostsamma byten av lackeringspistoler genom att synkronisera dem med periodiska rengöringar. Ett spelteoretiskt ramverk med realtidsanalys och beslutsfattande utgör ett

intressant tillvägagångssätt. I Edelvik et al. (2018) presenteras en lösning för självprogrammerande måleribås som exempelvis förbättrar förberedelsearbetet i målerier. I Zang (2018) beskrivs en optimeringsmetod för att undersöka miljökonsekvenserna av olika produktionsplanering i målerier. Syftet är att minimera frekventa utsläpp av kemiska föroreningar i samband med rengöring av redskap i samband med färgbyte. I Wang et al. (2011) utvecklas en optimal batch- och schemalägningsprocedur för fordon för att minska energianvändningen. I studien visas exempel på där man genom att välja en optimal batch kan förbättra färgkvaliteten och minska omlackering så att mindre energi kommer att användas och mindre utsläpp genereras. Olika verktyg för att modellera och simulera elanvändning i målerier är ett annat område som diskuteras i litteraturen (Oktaviandri och Safiee, 2018). Ofta med fokus på diskret händelsesimuleringsmetod (discrete event), dvs produktionsmodellering. En annan metod som förekommer i olika former är olika former av värdebaserade kartläggningsmetoder, som exempelvis (EVSM). I Rezaeian et al. (2018) användas EVSM för ett måleri.

En andra grupp paper fokuserar på enskilda eller grupper av energieffektiviseringsåtgärder och modellering av målerier. I Nikończuk och Tuchowski (2021) presenteras ett exempel på användning av värmepumpar för att tillgodose värmebehovet för en sprutbox. Åtgärder för ökad energieffektivitet till följd av effektiv styrning kan exemplifieras av studien av Cronrath et al. (2016). I Rao och Gopinath (2013) presenterar ett koncept för att minska energianvändningen i en ugn genom att använda ett hölje för att täcka bärarna. Modellering är en central del av beslutsstöd vid implementering av åtgärder som påverkar många parametrar som produktkvalitet, ekonomi, energianvändning etc. I Rao och Gopinath (2013) presenteras även simulering av energieffektivitet i industriella målerier. I arbetet används en modell som integrerar en tillverknings- och byggnadsmodell. Detta för att koppla produktionsrelaterade parametrar till strödmassprocesserna. I Feng och Mears (2015) presenteras en annan simuleringsmodell som inkluderar VVS-tekniska system. Simuleringar av typen Computational fluid dynamics (CFD) förekommer också i litteraturen och kan utgöra ett viktigt beslutsunderlag för att kunna beskriva såväl värmeöverföring som luftrörelser (Rohdin och Moshfegh, 2011; Rohdin et al., 2012).

I kategorin "systemförändringar" diskuteras flera viktiga hållbarhetsutmaningar inom beläggningsindustrin (Bhuiyan et al., 2016) och miljöfördelarna med pulverlackering i termer av energi- och materialkostnadsbesparingar diskuteras också de i Bell (2010). I artikeln beskrivs att den största delen av koldioxidavtrycket i samband med pulverlackering finns i appliceringen och härdningen av pulvret, följt av råvarorna och tillverkningsfasen. En genomförbarhetsstudie av värmeåtervinning i lackugnar och utformningen av värmeåtervinningssystem för ugn i en lackeringsverkstad finns presenterad i Bell (2010). Genom att använda värmeväxlare, gas-till-vätska, ökar potentialen för energiåtervinning från ugnsgaser radikalt (ca 90%). I Pakkala (2010) diskuteras en teknik som använder en regenerativ torrfiltreringsprocess vilket minskar energibehovet genom att det möjliggör återcirkulation. Detta minskar kraftigt behovet av tempererad tilluft.

Det tredje grupp av artiklar diskuterar lokal värme- och elproduktion i olika scenarier och system. Exempelvis genomför Arshad et al. (2021) scenarioanalyser som analyserar tillämpning av solvärmepumpar för att förbättra energieffektiviteten i ett måleri. Systemutvärderingen är en jämförelse baserad på bästa tillgängliga teknologi (BAT). I en scenarioanalys av Abdoli et al. (2020) diskuteras hur målen i SBT, under vissa förutsättningar, kan uppnås genom användningen av solenergi.

I Ayoub et al. (2019) diskuteras solceller och en investeringsstrategi för utsläpp av koldioxid som kan stödja beslutsfattare att minska sitt koldioxidavtryck på ett kostnadseffektivt sätt och därmed nå SBTs presenteras. Ekonomiska konsekvenser av att installera lokal kraftvärme (CHP) med låga koldioxidutsläpp och solceller utvärderades. Resultaten visar att 2030-målen

är genomförbara om tillräckligt med biometan finns tillgängligt, medan att nå 2050-målen beskrivs som mer problematiska. Kraftvärme och solceller har dock stora miljöfördelar och attraktiv avkastning. I Iglauer och Zahler (2014) studeras användningen av solkraftvärmeteknik som använder en mikrogasturbin och ett solprocessvärmesystem för att tillhandahålla processvärme till konvektionsugnar för ett måleri, tillsammans med elektrisk kraft. Denna kombination kan, potentiellt, under rätt förhållanden skapa en konstant tillförsel av processvärme och elektrisk kraft, oberoende av dagsljus och väder.

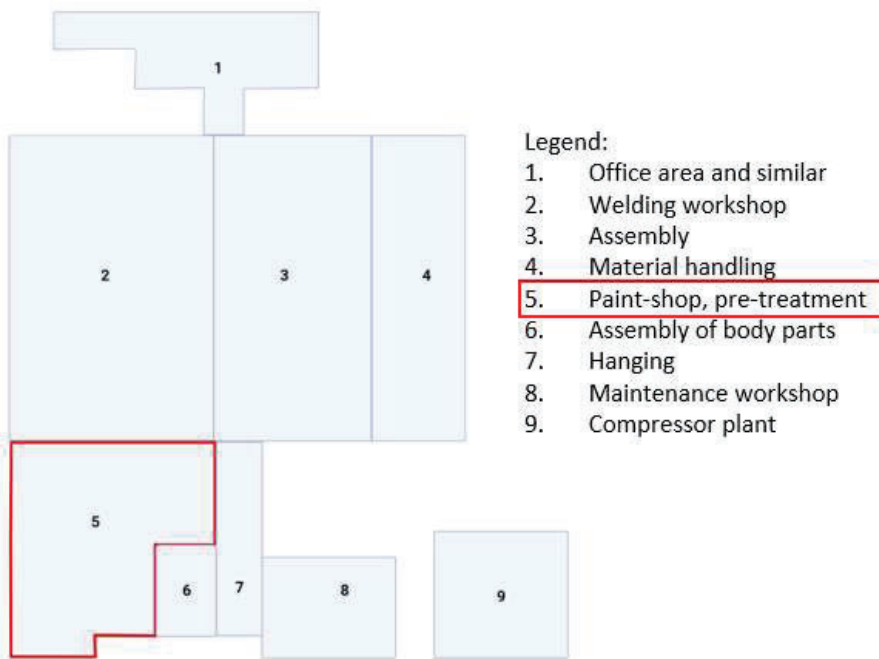
I den sista kategorin "konvertering" undersöker Aden (2016) åtgärder för att nå målen i SBT. Dekarbonisering via bränslebyte, användning av CCS för oundvikliga utsläpp och energieffektivitet via BAT anses vara huvudåtgärder för att nå målen. I McKinstry et al. (2012) undersöks tre alternativ för värmeförsörjning för måleriets sprutboxar med olika bränsle.

Den samlade bilden av i litteraturstudien pekar på ett antal viktiga delar i form av kategorier av åtgärder i form av konverteringsåtgärder, andra tillförselåtgärder och effektivisering som centrala alternativ i ett arbete med dekarbonisering. Flera av de refererade studierna ovan drar också slutsatsen att det är svårt att nå nollutsläpp utan kompensering eller teknik lik CCS. Utöver detta så visar sig också en bild av behovet av processinnovation, där förändrade temperaturnivåer i förbehandling och ugnar är centrala.

## 6.2 Fallstudie – Måleri - Volvo CE Hallsberg

I detta avsnitt presenteras fallstudien, som börjar med att beskriva målen, processerna, för att sedan gå vidare till energibalansen med allokering av slutanvändning av energi och växthusgasutsläpp per processenhet. En stor del av den mer tidskrävande datainsamlingen i denna förstudie är kopplad till undermätning av processflöden och el för att möjliggöra denna uppdelning på processnivå.

En illustration av hela den aktuella anläggningen återfinns i figur 1. Det i detalj studerade måleriet är markerat i samma figur. Den aktuella industrin tillverkar delar till entreprenadmaskiner. Produktionen består av tre huvudprocesser, målning, svetsning och montering. Den totala energianvändningen för 2019 (före pandemin) var ca 14400 MWh, fördelat på 3800 MWh Gasol, 2300 MWh Fjärrvärme och 8200 MWh el (Rimmerfors och Wallin, 2021). Av dessa står måleriet för ca 50 % av den totala energianvändningen för anläggningen.



Figur 1. Illustration av industrisiten med måleriet och förbehandlingen markerad.

### *Den studerade organisationens mål*

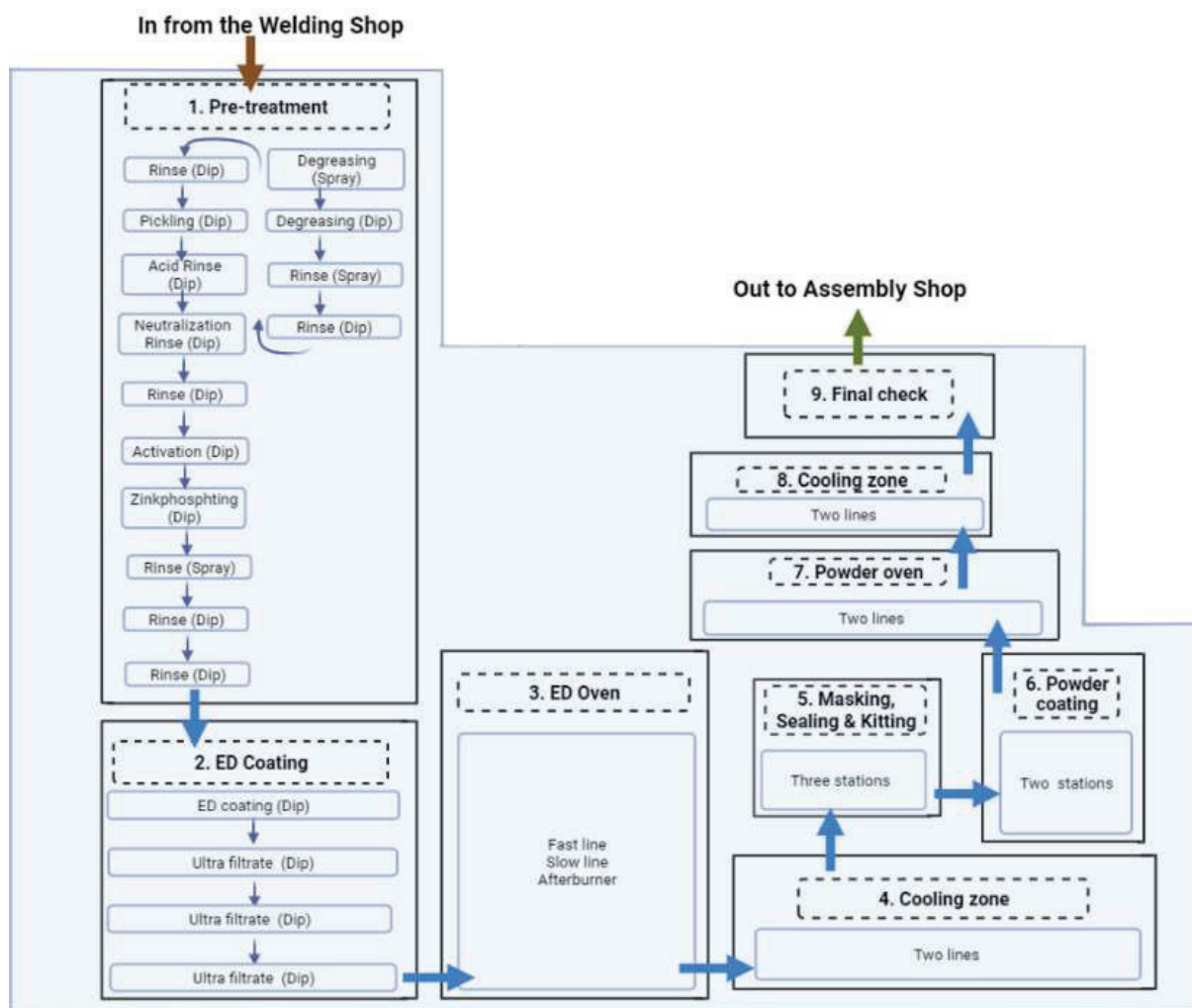
Den studerade organisationen har tre mål som direkt berör arbetet med SBT. Organisationen har ett generellt mål om att öka energieffektiviteten med 2% per år, vilket de haft sedan 2014. Inom ramen för SBT så har de ett mål för perioden 2025-2030 som innebär en 50% minskning av växthusgasutsläpp i Scope 1 och Scope 2, samt en minskning av utsläpp i Scope 3 med 30%. Organisationens långsiktiga mål är att ha netto-nollutsläpp i hela värdekedjan 2040 (Scope 1-3).

### *Beskrivning av det studerade måleriet*

Produktionsprocesserna i måleriet kan med fördel delas in i nio steg, från förbehandling till slutkontroll. De olika delstegen finns presenterade i figur 2 nedan. Hytter kommer till måleriet från svets. Nedan kommer de olika delstegen presenteras kortfattat.

#### **Steg 1: Pre-treatment (förbehandling)**

Hytter, detaljer och tankar går först genom förbehandlingen. Förbehandlingen huvudroll är att tillhandahålla korrosionsskydd och förbereda produkterna för ED-bad (electro dip coating). I det studerade måleriet är förbehandlingen en process i fjorton steg där flera är såväl energi- som vattenkrävande.



Figur 2. Illustration av godsets väg genom måleriet, från förbehandling till slutkontroll.

## Steg 2: Electro dip (ED) Coating

Syftet med ED-processen är bland annat att förbättra korrosionsskyddet och ytegenskaperna. Under ED-beläggningsprocessen sänks godset ner i ett elektriskt ledande bad där en rostskyddande primer appliceras på godset genom doppning.

## Steg 3: ED-oven (ED-ugn)

Efter att applicerat ED-beläggningen går godset in i ED-ugnen, som har en temperatur på 165°C. Uppvärmning av ugnsluften sker med gasolbrännare. Ugnen är också utrustad med en efterbrännare som värmer zon 2 (3 zoner i ugnen) samt bränner av VOC.

## Steg 4: Cooling zone (Kylzon)

Efter ED-ugnen leds godset ner till kylzonen för att svalna innan pulvermålning. I kylzonen används forcerad konvektion för att kyla av godset. Detta sker med genom att ca 20°C luft forceras över godset. Denna zon är kopplad till två ventilationsaggregat (FT). Efter att godset svalnat leds det sedan vidare av interntransportsystemet (conveyour-systemet) till nästa steg.

## Steg 5: Maskering, tätning och kittning

I detta steg maskeras yta som inte ska målas. Tätning utförs för att undvika läckage.

## Steg 6: Powder coating (Pulverbeläggning)

Två pulverstationer som drivs med sex robotar applicerar två färger. Tjockleken på pulverlackeringen är 90 µm med en taktid på 5 minuter.

### **Steg 7: Powder oven (Pulverugn)**

Efter pulverlackeringen går godset in i pulverugnen för torkning vid en temperatur på 210°C. Värmning av ugnsluften sker även här med gasol.

### **Steg 8: Kylzon**

Efter pulverugnen går godset till en kylzon för att kylas ner. Temperaturen i kylzonen ca 10-20 °C. Den följer utomhustemperaturen då den ventileras direkt med utomhusluft. Taktiden är ca 30 minuter. För att kyla delarna i tunneln används två ventilationsaggregat (FT). Tilluften tas från omgivningen, och frånluften leds från kyltunneln till lokal igen. Detta gör att systemet är balanserat.

### **Steg 9: Final check (Slutkontroll)**

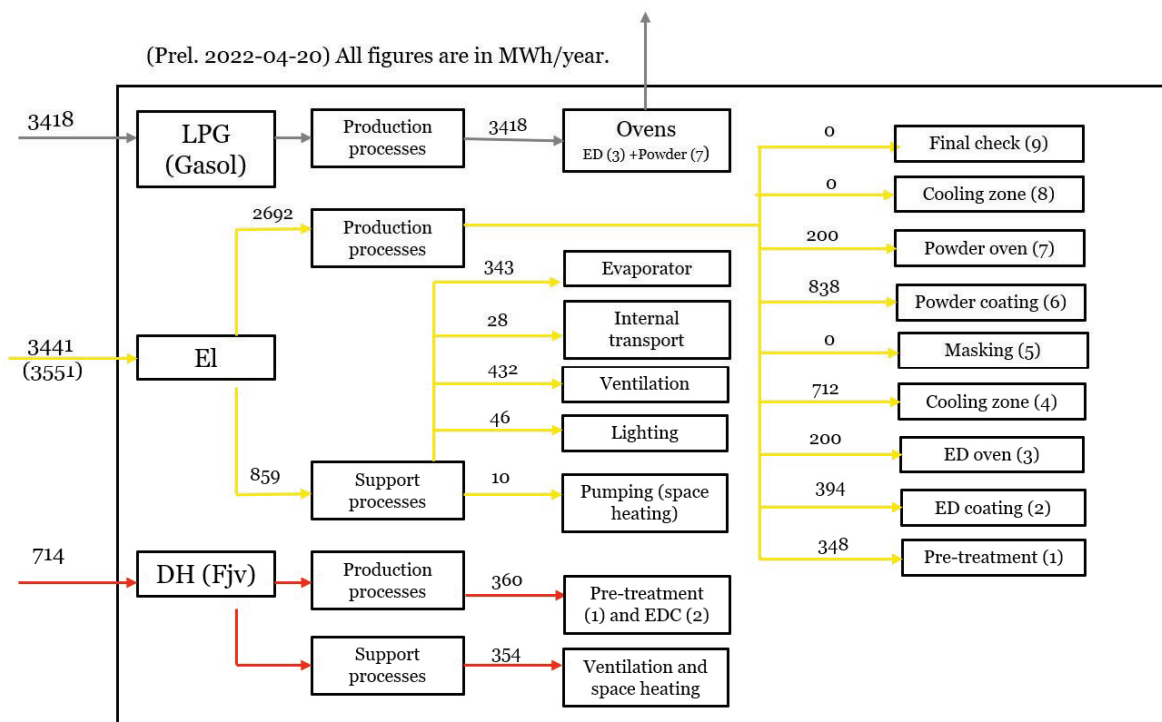
Vid slutkontrollen kontrolleras produktens kvalitet. I detta steg tas även erforderliga tester ut för kontroll och utvärdering.

### *Energianvändning och resulterande koldioxidutsläpp*

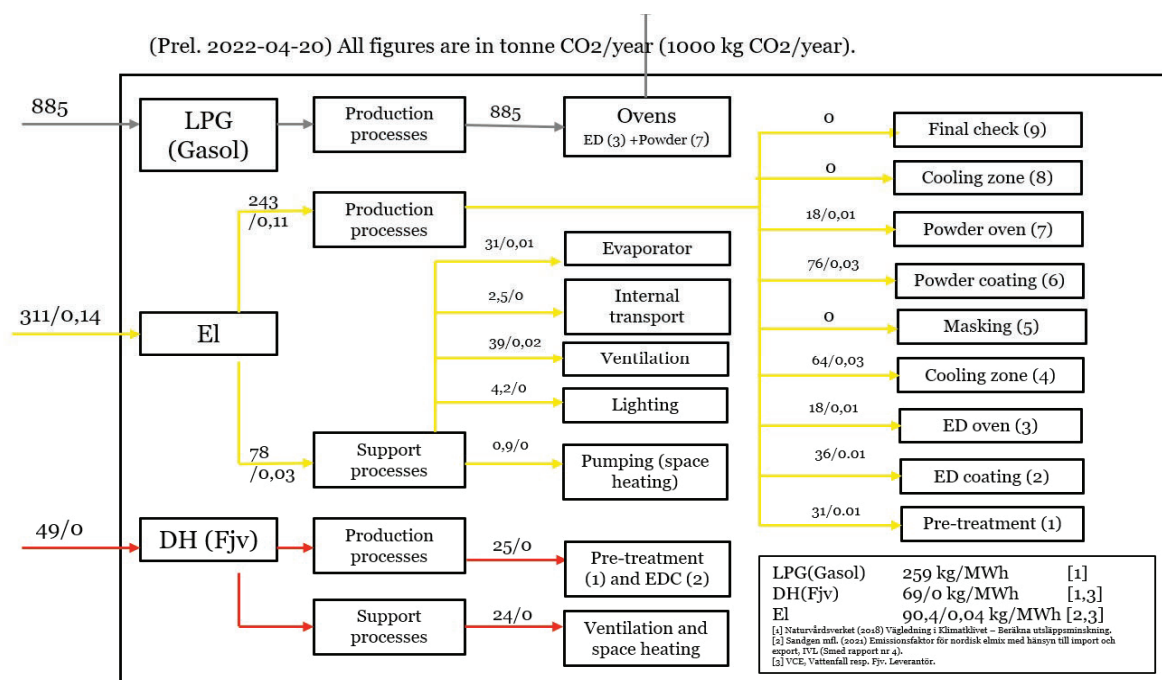
För att ge en bild av nuläget i det studerade måleriet har en kartläggning sammanställts. Denna sammanställning bygger på en enhetsprocesstanke (Söderström, 1996) där energianvändningen delas upp på energibärare och på olika enhetsprocesser. Grundtanken med denna uppdelning är att enhetsprocessmetoden möjliggöra jämförelser mellan anläggningar och företag på ett effektivt sätt då energibärarna allokeras till en uppsättning standardiserade processer. Typiska nyckeltal kan då tas fram av typen kWh/m<sup>2</sup> eller kWh/producerat ton eller annan relevant enhet för jämförelse (Thollander et al., 2020). Det är också en central del i att kunna prioritera vilka områden eller processer som har stor potential.

Energikartläggningen, presenterad i figur 3 nedan, bygger på en samling av källor, som tidigare kartläggningar, data som VCE regelbundet samlar in och en uppsättning ytterligare mätningar inom ramen för denna förstudie. Den ytterligare information har samlats in då viss detaljerad information saknades på processnivå, exempelvis förluster från ugnar, internttransport (conveyor-system) och mer detaljerade mätningar av processflöden (transient mätning av flöde och temperatur) i förbehandlingen.

Måleriet står för en stor del av den totala energianvändningen vid anläggningen i Hallsberg. Totalt används ca 3400 MWh gasol, 3400 MWh el och ca 714 MWh fjärrvärme per år i måleriet. Gasolens primära användningsområde är som bränsle till ugnar (ED-ugn och pulverugn). Av den totala elanvändning går ca två tredjedelar till produktionsprocesser och ca en tredjedel till stödprocesser. Fjärrvärmens är till stor del kopplad till lokalkomfort, dvs uppvärmning, samt förbehandlingen. Det kan vara värt att nämna att fjärrvärmeanvändningen i förbehandlingen är en konvertering från gasol som VCE genomfört under projektiden för denna förstudie. Totalt används ca 2700 MWh fjärrvärme på hela siten.



Figur 3. Sammanställning av energianvändning för måleriet fördelar på energibärare och i möjligaste mån enhetsprocess.<sup>1</sup>



Figur 4. Sammanställning av koldioxidutsläpp för måleriet fördelar på energibärare och i möjligaste mån enhetsprocess.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Sammanställningen bygger på en samling av mätningar, beräkningar och datainsamling som inte alla är genomförda samtidigt. Inkommande gasol, el och fjärrvärme är information från leverantör. Fördelningen på process innehåller därför osäkerheter, men är tänkt som en grund för att diskutera och prioritera insatser.

<sup>2</sup> Figuren illustrerar resultatet av en omräkning med omräkningsfaktorerna från figuren. Omräkningsfaktorerna finns presenterade i nedre högra hörnet med tillhörande referens. Detta ska ses som ett exempel på teoretiska utsläpp från respektive process och likt energikartläggningen utgöra en stomme för diskussion om prioriteringar.

I VCEs mål som innehåller energieffektiviseringsmål såväl som mål formulerade i form av utsläpp av koldioxid så kan en omräkning av effekterna av denna energianvändning räknas om till koldioxid med hjälp av en uppsättning omräkningsfaktorer. Dessa omräkningsfaktorer beror på ett antal olika parametrar som exempelvis systemgräns, omvärldsantaganden, om de är konsekvensorienterade eller försöker beskriva medelutsläpp. Även vilken tidshorisont de beskriver påverkar. För att göra detta tydligt har två uppsättningar omräkningsfaktorer använts i denna förstudie för att visa på skillnaderna beroende på valet av perspektiv. Diskussionen kring detta och ur ett företagsperspektiv, de svårigheter som uppkommer till följd att det skapar ytterligare risk för målkonflikter och osäkerheter kring hur dessa faktorer kommer beräknas och användas i framtiden, återkommer i slutdiskussionen nedan. Men valet av perspektiv och värderingen är en omfattande och komplex diskussion som ligger utanför denna förstudie.

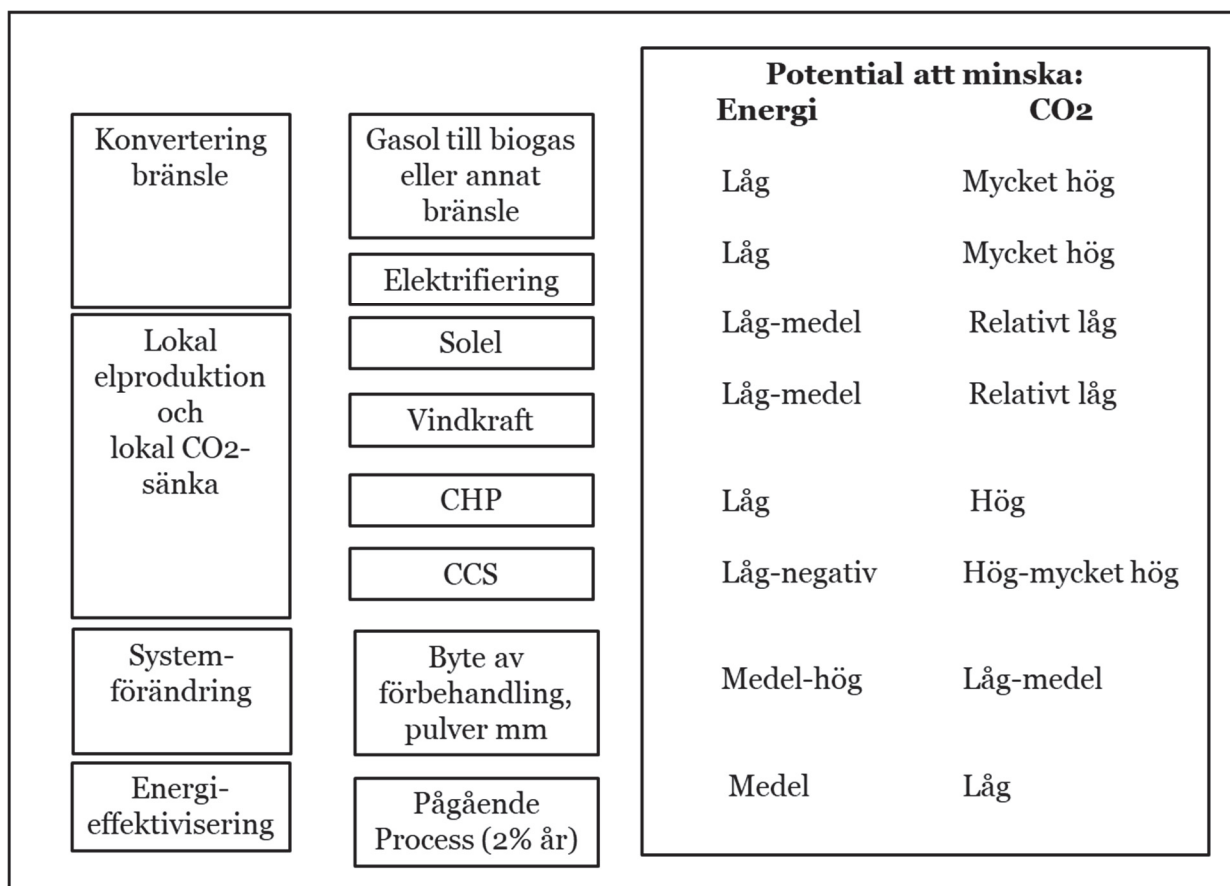
Två perspektiv på utsläpp från el och fjärrvärme har inkluderats för att visualisera denna spridning. Det första perspektivet är omräkningsfaktorerna som används inom klimatklivet<sup>3</sup>. För el och fjärrvärme presenteras även de lokala faktorer från el- respektive fjärrvärmeleverantör som används inom VCEs arbete med SBT. Den bild som visas då är att primärt fokus för VCE är att effektivisera och konvertera gasolanvändningen till ugnar (och tidigare förbehandlingen som redan genomförts av VCE sedan förstudien startade), se figur 4. Beroende på val av koldioxidallokeringsperspektiv finns sedan motiv för effektivisering av el och fjärrvärme.

#### *Åtgärdsförslag och paket av åtgärder som leder till eller mot koldioxidneutralitet*

För att kunna nå högt uppsatta mål avseende koldioxidminskningar och effektivisering krävs en kombination av flertalet åtgärder. Dessa åtgärder och deras mognadsgrad skiljer sig åt och när en potentiell implementering rent teknisk skulle vara möjlig skiljer sig också. Åtgärdernas ekonomiska hållbarhet, och kostnadseffektivitet, behöver i samtliga fall utredas ytterligare. Åtgärderna i denna förstudie har sammanställts baseras på tre huvudsakliga källor och ska inte ses som komplett. De tre huvudsakliga källorna är (1) den ovan presenterade vetenskapliga review som genomförts inom förstudien, (2) planerade och för VCE intressanta åtgärder som i olika grad diskuterats eller utreds samt (3) energisystemåtgärder som projektgruppen diskuterat eller arbetat med i andra projekt relaterade till fordonsindustrin. Åtgärderna har kategoriserats i fyra huvudsakliga grupper (1) konvertering av bränsle (gasol), (2) lokal el- och värmeproduktion samt lokal CO<sub>2</sub>-sänka, (3) systemförändringar (processinnovation) av centrala processer i måleriet och (4) energieffektivisering. I ett första steg har potentialen för dessa olika kategorier, som självständiga åtgärder, bedömts och resultatet presenteras i Figur 5.

<sup>3</sup> [1] Naturvårdsverket (2018) *Vägledning i Klimatklivet – Beräkna utsläppsminskning*. [2] Sandgen mfl. (2021) *Emissionsfaktor för nordisk elmix med hänsyn till import och export, IVL (Smed rapport nr 4)*. [3] VCE, *Leverantör El resp. fjv*.





Figur 5. Sammanställning av kategorier, ett urval av tekniker, tekniska åtgärder och systemförändringar med avseende på potentialen att påverka energibehov och CO<sub>2</sub> för det studerade måleriet.<sup>4</sup>

Konvertering av bränsle är en tänkbar åtgärd för att minska behovet av gasol. Tekniken finns tillgänglig på marknaden och är praktiskt möjlig att genomföra utan ytterligare teknikutveckling/forskning. Implementeringstiden är i målperspektivet 2030 respektive 2040 kort. Riskerna med implementeringen är förknippade med logistiska frågor och tillgänglighet. Även prisutveckling över tid är en central fråga. Viss ombyggnad på anläggningstid krävs som exempel dimensionsökningar av rörsystem då flödet behöver ökas pga. det lägre förbränningsvärdet, ny tank för lagring etc. Den initiala bedömningen är att ingen omfattande tillståndsprovning föreligger, men detta behöver utredas i detalj. Tillgång på biogas i framtiden samt hur biogas kommer att värderas i form av koldioxidutsläpp är andra frågor som behöver vägas in.

Elektrifiering av ugnar är en annan konverteringsprocess som har potential att möjliggöra en minskning av koldioxidutsläpp på anläggningsnivå. Denna åtgärd kräver stora investeringar i infrastruktur utanför den egna anläggningen hos nätägaren, då denna konvertering skulle innebära en mycket stor ökad ansluten effekt för anläggningen. Denna infrastruktur finns inte i nuläget. Kostnaden för konvertering av ugnar mm bedöms som hög. Förvärmning av gods med IR är en potentiell teknik som behöver utredas i detalj. Diskuterade risker är framtida effektavgifter, elkostnader och koldioxidvärdering av el. Även frågan om att ensidigt bli beroende av el (ur exempelvis ett ekonomiskt perspektiv) behöver utredas och diskuteras.

<sup>4</sup> Värderingen av CO<sub>2</sub> baseras primärt på omräkningsfaktorerna som används inom klimatlivet och som beskrivs i tidigare fotnot.

Anläggningens framtida energianvändning och effektbehov är också en central fråga då denna åtgärd är starkt sammankopplad med detta.

Konvertering till fjärrvärme, som redan genomförts, för förbehandlingen är ytterligare en åtgärd. Potentialen för denna typ av åtgärd har minskat efter denna implementering, men kan bli aktuell efter större systemförändringar av måleriprocessen. Förutom tekno-ekonomiska risker, exempelvis lågt delta-T mot fjärrvärmenätet, driftavbrott (vilket är mycket ovanligt men som ändå togs upp i diskussionerna) och framtida leveranssäkerhet, så diskuterades framtida allokeringmetoder för koldioxid även i samband med fjärrvärme. Mervärdena med denna installation är arbetsmiljörelaterade värden, pga. mindre hantering av gasol och färre gasolledningar även minskade tomgångsförluster, minskat underhåll (lokalt), ingen årlig besiktning (av system med gasol) och att åtgärden frigjorde värdefull produktionsyta.

Konvertering till bergvärme med borrhål (alt borrhålslager) är ytterligare en möjlighet för att minska inköpt energi. Lokalt för denna anläggning är förutsättningarna för denna teknik inte optimala då anläggningen har för ändamålet dåliga markförhållande och där lämplig placering med bättre markförhållanden inte finns nära anläggningen. Ett av flertalet mervärden med denna typ av installation är möjligheten att även tillgodose eget kylbehov på ett effektivt sätt.

Lokal elproduktion kan ske med hjälp av ett flertal olika tekniker där ett urval av tillgängliga åtgärder studerats översiktligt inom ramen för denna förstudie. Ett antal av åtgärderna kräver ytterligare, och mer omfattande utredningar för att bedöma om de är lokalt lämpliga.

Lokal solelproduktion är en fråga som utretts av VCE och som ytterligare studerats inom ramen för förstudien. Denna teknik är mogen och möjlig att implementera. Aktörer finns på marknaden, referensanläggningar med mera finns tillgängligt. Denna åtgärd kan bidra med viss elproduktion, men påverkar inte ansluten effekt. Ett mervärde som lyfts fram är signalvärdet av lokal implementering av solel. Diskussioner om lämplig mark pågår, då installation på tak av praktiska skäl inte är optimal. Lokal vindkraft finns också som övergripande alternativ, främst från litteraturstudien, men tillståndsprocesser och tillgänglig mark är diskuterade hinder. Signalvärdet är även här ett mervärde.

Lokal el- och värmeproduktion (CHP) baserat på exempelvis flis som bränsle är en potentiellt intressant möjlighet att utreda vidare. Denna teknik kan även användas för att leverera värme vid de temperaturnivåer som är aktuella (såväl högtemperatur processvärme till ugnar efter systemförändringar), internt värmebehov och internt elbehov. Denna typ av åtgärd är storskalig och kapitalintensiv och flertalet risker finns som exempelvis inlåsnings effekter med befintliga fjärrvärmekontrakt, framtida bränslepriser (exempelvis flis) är osäkert, tillgång på bränsle i framtiden, eventuell tillståndsprovning mm. Hur denna lösning skulle kunna organiseras är också en viktig fråga. Mervärdena är att det möjliggör kontroll och en kraftig minskning av egna koldioxidutsläpp, minskar inlåsnings med framtida elpriser mm. Ytterligare utredningar krävs för att bedöma kostnadseffektivitet, sekundära risker mm.

Spillvärmedriven elproduktion kan också vara en åtgärd för att tillvarata restvärme från ugnar vid hög temperatur. Tekniken kan vara intressant, men bedöms inte kunna utgöra någon stor andel av totalt elbehov.

Stigande koldioxidhalter i atmosfären har resulterat i ett ökat fokus för koldioxidavskiljning och lagring (CCS). En annan dimension är också att denna typ av teknik har potentialen att generera negativa utsläpp, och är då potentiellt intressant som metod för att kompensera för de oundvikliga utsläpp som kvarstår efter konvertering och processinnovation. Området (CCS) beforskas i stor skala och exempelvis energibolag utreder olika tekniker för att implementera CCS. I Nilsson och Östlund (2021) beskrivs tekniken ligga i TRL 6-7, dvs pilot och demonstrationsanläggningar finns för vissa av teknikerna. I deras arbete var energibolag

med avfallsförbränning i fokus. I ett internationellt perspektiv så presenteras TRL-nivåer för CCS i Kearns et al. (2021), men stora skillnader presenteras beroende på tillämpning.

Ett centralt område i omställningsarbetet är processinnovationer, som ofta är disruptiva där samverkan mellan aktörer, forskning och stora inom-organisatoriska förändringar krävs för att kunna genomföra förändringen. För det studerade måleriet finns planer och utredningsarbete som arbetar för en implementering av ett låghärdande pulver i stället för nuvarande pulver som kräver högre temperaturer i processen. Målet är att sänka temperaturen från dagens nivå till 185-190°C, för att möjliggöra en godstemperatur på 160°C. Detta innebär en minskning av såväl energi som effekt, men gör också att tillförsel potentiellt kan ske med andra källor då temperaturnivån är lägre. Förändringen är inte kapitalintensiv och förändrar inte pulverprocessen lokalt. Däremot är utvecklingen beroende av pulverleverantören, och att produkten testas så att kvalitén på produkt blir tillfredställande. Detta är en pågående process och förhoppningen är att få till en implementering inom de närmaste åren.

Ett annat område som står inför en potentiellt större processförändring är förbehandlingen. I denna process utreds två parallella spår. Den första som utgör en mer omfattande förändring är övergången till NCT (ViaNT) där potentialen är stor för att minska energianvändning i förbehandlingen. Denna typ av förändring skulle också innebära att ingen efterbränning av ugnsluft krävs och att såväl temperaturreglering (värme och kyla) i förbehandlingen inte krävs. Vidare skulle även behovet av vatten minska. En ytterligare fördel skulle vara att möjligheterna för att kunna använda befintligt reningsverk för förbehandlingen ökar. Restavfallet från nuvarande ED går ej att rena i befintligt reningsverk utan hanteras separat. I form av ytterligare beslutsunderlag behövs omfattande testning, i extern testanläggning, konsekvenser av förändrad generering av fukt behöver genomföras. Vidare saknas utredning om konsekvenserna i form av externa effekter för denna teknik. Parallellt med detta arbete utreds möjligheterna att byta till tunnfilmsteknik (Oxsilan) i förbehandlingen.

Energieffektivisering är den i Figur 5 sista kategorin och ett framgångsrikt kontinuerligt arbete där VCE exempelvis genomfört tilläggsisoleringar av ugnar, vilket fått positiv påverkan på inomhusklimat utöver energianvändning, tidsstyrning av kylzoner, ventilationsåtgärder i pulverboxar, minskat tomgångsförluster med mera. Inom ramen för förstudien har en potentiellt användbar metod testats i ett examensarbete, som möjliggör studier av värmeväxlarnätverk. Metoden som kallas Pinch har traditionellt använts inom processindustrin och papper- och massaindustrin men testas här för ett fordonsmåleri. Avsikten är att metoden ger inspiration till förändring av värmeväxlarnätverk, där mer effektiv kaskadkoppling av varma och kalla strömmar identifieras.

### *Scenarier – tre typer av vägval och tankebilder*

Utifrån ovanstående diskussion om olika tänkbara tekniker så kan tre övergripande strategiska tankebilder beskrivas:

1. **Konvertering till annat bränsle och systemförändring** – där konvertering av gasol till exempelvis biogas genomförs i kombination med processinnovationer för förbehandling och skifte till låghärdande pulver. Konverteringen kan genomföras inom kort-medellång sikt medan processförändringen innehåller mer utredningsarbete och kräver ytterligare forskning, inte minst på processnivå. Övriga energibärare förändras endast i mindre omfattning. Fortsatt fokus på energieffektivisering och installation av lokal elproduktion (främst solel). För att kunna nå 2040 målet krävs ytterligare åtgärder i form av kompensation, koldioxidavskiljning och lagring (CCS) eller annan process med negativa utsläpp för att kompensera för konsekvenserna av återstående användning.

2. **Elektrifiering och systemförändring** – där konvertering av gasol till el genomförs i kombination med processinnovationer för förbehandling och skifte till låghärdande pulver. Konverteringen kräver extern infrastruktur som i nuläget ej finns tillgänglig. Utredning av såväl konsekvenser på omgivande energisystem som risker behöver utredas vidare. Processförändringen innehåller mer utredningsarbete och kräver ytterligare forskning, inte minst på processnivå. Fortsatt fokus på energieffektivisering och installation av lokal elproduktion (främst solel). För att kunna nå 2040 målet krävs ytterligare åtgärder i form av kompensation, koldioxidavskiljning och lagring (CCS) eller annan process med negativa utsläpp för att kompensera för konsekvenserna av återstående användning.
  
3. **Lokal produktion av värme och el (CHP) och systemförändring** – där konvertering av gasol till egen värmeproduktion via lokal produktionsanläggning eldad med exempelvis flis genomförs. Elanvändningen täcks till del med elproduktion från anläggningen, viss ansluten eleffekt kvarstår från nätet. Fortsatt fokus på energieffektivisering och installation av lokal elproduktion (främst solel). Processförändring likt ovanstående tankebilder (1 och 2). Kräver omfattande utredningsarbete för att avgöra om det finns såväl tekniska, ekonomisk och miljömässiga fördelar som väger upp att driva en anläggning av denna typ lokalt på anläggningen. Visst behov av ytterligare åtgärder för att nå 2040-måler kommer även här att kvarstå.

Dessa tre potentiella vägval kan potentiellt utgöra tankebilder för att diskutera och utreda frågan om hur 2030-mål och i förlängningen 2040-målen kan nås. I alla tankebilderna finns fortsatt energieffektivisering, implementering av lokal elproduktion (solel) och de centrala förändringarna på processnivå med (processinnovation).

### 6.3 Strategi för modellering, beslutsstöd och samarbeten

I det andra och tredje arbetspaketet i denna förstudie sammanställs processlogiken, dvs hur beslutsstöd kan tas fram, för införandet och utredningen av åtgärder, åtgärdspaket och tänkta relevanta aktörer i detta arbete. Syftet med arbetspaketet är att fastställa en fungerande process för att skapa beslutsunderlag för de olika åtgärdspaketen från arbetspaket 1 och inför eventuellt vidare arbete i ett fullskaligt forskningsprojekt.

Samtliga tre åtgärdspaket innehåller komplexa omställningar där tester, mätning och modellering i flera former kommer att behövas. I tabell 1, som är uppdelad i kategorierna *Tillförsel och konvertering*, *Lokal elproduktion och åtgärder*, *Processinnovation* och *Energieffektivisering och management* finns en beskrivning av ovan diskuterade åtgärder, potentiellt användbara metoder och en beskrivning av relevanta aktörer för att ta fram ett robust beslutsstöd.

De huvudsakliga metoderna som presenteras i tabell 1 finns mer i detalj beskrivna i tabell 2.

Tabell 1. Sammanställning av kategorier, ingående åtgärder potentiellt användbara metoder och potentiella aktörer.

Kategori	Åtgärd	Potentiellt användbara metoder	Aktörer
Tillförsel och konvertering	Konvertering av gasol till biogas	(EnergyPlan)	VCE, FloGas, Örebro gasteknik och biogasleverantör (exempelvis Kalrskoga Biogas), Energisystem LiU, BRC
	Elektrifiering	EnergyPlan, Modest och reMind	VCE, Energibolag (E.On och exempelvis Vattenfall), Energisystem LiU
Lokal elproduktion och åtgärder	Solel	(EnergyPlan, reMIND)	VCE, Solcellsinstallatör, (Energisystem LiU)
	Lokal el- och värmeproduktion (CHP)	CFD, EnergyPlan, Modest och reMIND	VCE, pannleverantör och Energisystem LiU
	Vätgas	EnergyPlan	VCE, potentiella leverantörer, och Energisystem LiU
	CCS	EnergyPlan	VCE, energibolag och Energisystem LiU
Processinnovation	Byte av förbehandling (ViaNT, NCT)	BES, CFD, fältmätning	VCE, Chemetall och Energisystem LiU
	Oxsilan - tunnfilmsteknik	BES, CFD, fältmätning	VCE, Chemetall och Energisystem LiU
	Byte av pulver (lågghärdande pulver)	BES, CFD, fältmätning	VCE, Teknos och Energisystem LiU
Energieffektivisering och management	Industriventilation	BES, CFD, fältmätning	VCE, leverantör och projektör industrivent och LiU
	Värmning och kylning av produkter, processer och lokaler	Pinch, CFD och BES	VCE, LiU
	Belysningsåtgärder	(BES)	VCE
	Effektstyrning	EnergyPlan, Modest och reMind	VCE och Energibolag (E.On och exempelvis Vattenfall), ev. Energisystem LiU
	Energimanagement		VCE, Energisystem LiU.
	Digitalisering	BES, Produktionssimulering	VCE, (Energisystem LiU) m. fl.

Tabell 2. Beskrivning av relevanta modeller för modellering av åtgärder eller åtgärds paket. Referenserna i figuren återfinns i fotnot nedan.<sup>5</sup>

Metod	Användningsområde	Indata	Utdata och resultat	Faktorer	Tänkt programvara	Exempel på relevanta referenser	Erfarenhet
Byggnadssimulering	Möjliggör studier av konsekvenser av effektiviseringsåtgärder och processförändringar och deras konsekvenser för energianvändning och inomhusmiljö. De primära systemen som avbildas är installationstekniska system inklusive värmning, kylning och ventilation.	Processernas energianvändning med hög tidsupplösning, klimat, ventilationsflöden och byggnadstekniska egenskaper. Även användningsrelaterade parametrar ingår i indata	Energianvändning med medelhög tidsupplösning, temperaturer på ytor och i luft, luftfuktighet i lokaler, konsekvenser av olika reglertekniska val och användning.	Transient simulering Möjliggör koppling mellan tänkta åtgärder och deras konsekvenser på inomhusklimat, ventilation, energi och energibärare. Låg spatial upplösning.	IDA ICE 4.8	[1,2,3]	Projektgruppen har mycket omfattande erfarenhet av metoden.
Computational Fluid Dynamics (CFD)	Möjliggör detaljerade studier av värmeöverföring, föroreningstransport med hög rumslig upplösning	Ytemperaturer, temperaturer på flöden och processer. Även föroreningsalstring behövs som indata när dessa parametrar är av intresse	Temperatur, luft hastighet, föroreningskoncentrationer med hög rumslig upplösning.	Stationär simulering. Länkas med fördel till byggnadssimulering.	ANSYS CFD	[4,5]	Projektgruppen har mycket omfattande erfarenhet av metoden.
Optimering	Det tänkta verktyget har utvecklats för optimering av dynamiska industriella energisystem. Koden bygger på MILP (mixed integer programming) för att minimera systemkostnaderna. Systemkostnaderna kan utgöras av exempelvis energikostnader och kostnader för råvaror.	Tidsupplöst behov av energi för de ingående processerna, energi och råvarupriser etc.	En kostnadsoptimal lösning på hur anläggningen bör drivas för att uppnå lägsta kostnad. Optimering kan även ske på andra parametrar som exempelvis lägsta CO <sub>2</sub> -utsläpp.	Inkluderar kostnader i form av drift och råvaror i analysen.	reMIND	[6,7]	Projektgruppen har mycket omfattande erfarenhet av metoden. Metoden är skapad vid Energisystem, LiU.
Pinch	Pinch är en metod för att undersöka lägsta värme och kylbehov. Metoden syftar även till att på ett effektivt sätt konstruera värmeväxlarnätverk. Metoden har främst använts i kontinuerlig processindustri som papper och massa och petrokemisk industri. I denna förstudie har ett test genomförts vid VCE i Hallsberg med denna metod för ett måleri.	Temperatur och flöde för alla ingående processer i en anläggning. Fokus på värmeväxling av kalla och varma strömmar.	Lägsta möjliga externa värmebehov och kylbehov samt ett systematiskt sätt att finna den optimala lösningen för värmeväxlarnätverk	Möjliggör processoptimering av värmeväxlare i industrin och utgör ofta ett diskussionsunderlag för hur värmeväxling mellan olika processer bör gå till. Detta är centralt när många temperaturnivåer finns så att kaskadkopplingar kan utföras på ett väl genomtänkt sätt.	ProPI	[8]	Projektgruppen har erfarenhet av metoden, men främst från andra typer av industri.
Koppling till omgivande energisystem	EnergyPLAN är en miljö för att simulera driften av t.ex nationella energisystem på timbasis, inklusive el-, värme-, kyla-, industri- och transportsektorerna. Den är utvecklad och underhållen av Sustainable Energy Planning Research Group vid Aalborg Universitet, Danmark	Ett av huvudmålen med EnergyPLAN-verktyget är att hjälpa till med utformningen av 100% förnybara nationella eller regionala energisystem.	Utdata i form av timvis användning och generering av el, värme och kyla för olika sektorer.	Ökad försäelse för hur en förändring internt i en industr påverkar det regionala och nationella energisystemet.	Energy Plan	<a href="https://www.energyplan.eu/">https://www.energyplan.eu/</a>	Projektgruppen har viss erfarenhet av energy plan, men främst från andra sektorer och områden.

En generell indelning kan göras i systemnivå, där CFD ger möjlighet att simulera inomhusmiljökonsekvenser och värmetransport i lokaler och processer, byggnadssimulering (BES) skapar möjligheten att knyta detta till de centrala stödprocesserna, exempelvis industriventilation, uppvärmning och kylning på rums eller anläggningsnivå. Metoden Pinch, som testats i denna industrikategori i denna förstudie, ger inspiration kring hur mer effektiva värmeväxlarnätverk kan byggas för att minimera tillförsel av värme och kyla. För att besvara frågor och avvägningar mellan investerings och energikostnader på anläggningsnivå finns möjligheter till tekno-ekonomisk optimering (exempelvis reMIND). Den sista typen av modellering med EnergyPlan eller Modest ger möjligheter att se konsekvenser av åtgärder på anläggningsnivå och effekter på det lokala eller regionala energisystemet.

<sup>5</sup> [1] Rohdin, P., Moshfegh, B. (2007), [2] Nilsson, E., Rohdin, P. (2019) [3] Nilsson, E., Rohdin, P. (2019), [4] Rohdin, P., Moshfegh, B. (2007) [5] Rohdin, P., Moshfegh, B. (2011), [6] Broberg Viklund, S., Karlsson, M. (2015) [7] Karlsson, M., Mardan, N.(2013) [8] Gunnarsson, A., Magnusson, C. (2011).

## 6.4 Måluppfyllelse och avvikelser

Förstudiens primära mål var bland annat att sammanställa kunskapsläget kring dekarbonisering och SBT för fordonsmålerier. Detta arbete, och kommunikation med de medverkande och andra organisationer, gav flertalet insikter om alternativ som i denna förstudie redovisas som tre potentiella alternativa vägval. Det första målet med förstudien får därmed anses vara väl uppfyllt. I det andra arbetspaketet som kopplar till mål två så har en kombination av datainsamling, analys och flertalet mindre utredningar genomförts. Dessa utredningar har exempelvis varit mer detaljerad undermätning av såväl elanvändning som processvärme för att kunna fördela energianvändningen på energibärare och process, analys av solelpotentialen på anläggningen, undermätning av system för intertransport (conveyorsystem) och ugnsisolering. Att fördela energianvändningen på rätt process är ett centralt steg i kartlägningsarbetet för att kunna göra en korrekt analys om vilka områden som ska prioriteras. Inom ramen för förstudien har också en ny metod, i form av Pinch, testats. En process för att ta fram nödvändigt beslutsstöd för de föreslagna åtgärdsparaten har också presenterats. En positiv utveckling under förstudien var att VCE har genomfört flera åtgärder med betydande påverkan på antingen koldioxidutsläpp, energianvändning eller båda. Exempelvis kan en större konvertering av gasol till fjärrvärme som genomförts av VCE i måleriet skett under det senaste året. En annan större åtgärd som relaterar till detta arbete är en framgångsrik isoleringsåtgärd kopplat till anläggningens ugnar. Flera av dessa utredningar och den mycket mer omfattande datainsamlingen blev möjlig då projektet förlängdes på grund av pandemin. Det tredje arbetspaketet som kopplar till det tredje målet i förstudien syftade till att identifiera relevanta aktörer för fortsatt arbete, med såväl konvertering, tillförsel, effektivisering som processinnovation. Detta arbete ingår som en grund för en tänkt fullskalig ansökan till FFI-programmet under 2022.

## 7 Spridning och publicering

### 7.1 Kunskaps- och resultatspridning

Hur har/planeras projektresultatet att användas och spridas?	Markera med X	Kommentar
Öka kunskapen inom området	X	Förstudien har bidragit med ökad kunskap om SBT, dekarbonisering och fordonsmålerier.  Två examensarbetare som arbetat med mätning och Pinch inom ramen för förstudien examineras och bidrar till kunskapsspridning i industrin.
Föras vidare till andra avancerade tekniska utvecklingsprojekt	X	Syftet med förstudien är att den ska ligga till grund för en fullskalig ansökan om den processinnovation och åtgärder som presenterats i denna rapport.
Föras vidare till produktutvecklingsprojekt	X	Flera av åtgärderna som diskuterats i förstudien planeras att implementeras vid VCE.
Introduceras på marknaden		
Användas i utredningar/regelverk/tillståndsärenden/ politiska beslut		

### 7.2 Publikationer

#### Publicerat med koppling till förstudien (ISI):

Andrei, M., Thollander, P., Pierre, I., Gindroz, B., Rohdin, P. (2021) Decarbonization of industry: Guidelines towards a harmonized energy efficiency policy program impact evaluation methodology, Energy Reports, 2021, 7, pp. 1385–1395.

#### Kommande publikation med koppling inom förstudien:

Andrei, M., Wallin, J., Thollander, P., Rohdin, P. (2022) Exploring decarbonization pathways for automotive paint shops - A case study (to be submitted for journal publication).

*Peng, C., Österberg, J. (2022) Energy efficiency analysis of painting process through energy auditing and pinch method – A case study at Volvo CE in Hallsberg, Sweden, Master's thesis - Sustainability Engineering and Management, Linköping University.*



## 8 Slutsatser och fortsatt forskning

Denna förstudie har belyst och sammanställt konsekvenserna av att använda science based targets (SBT) och deep de-carbonisation i hållbarhetsarbetet för ett måleri inom verkstadsindustrin. Konkret har detta lett till en sammanställning av möjliga vägval för målerier. Tre huvudsakliga vägval har identifierats, konvertering och processinnovation, elektrifiering och processinnovation och lokal produktion och processinnovation. Förstudien visar också på att gasolanvändningen i ugnar och förbehandlingen på måleriet är centrala processer för dekarbonisering. En annan övergripande slutsats är att de långsiktiga målen i någon form kräver kompensation eller åtgärder med negativa utsläpp för att kompensera för oundviklig energianvändning.

Utöver detta så är en slutsats att poängtera vikten av hur allokeringen av klimatutsläpp allokeras till olika energibärare görs, då detta påverkar hur åtgärder prioriteras ur ett klimatperspektiv. Förstudien visar också på vikten av att sätta mål likt de i SBTi för att konkretisera arbetet. Den genomförda litteraturstudien visade också, förutom på tekniska åtgärder och systemförändring, på ett ökat fokus på just dekarbonisering, i kontrast till endast energieffektivisering, under senare år.

En central del i det nödvändiga forsknings och utvecklingsarbete som behövs relaterat till förbehandling och konvertering är att skapa relevant beslutsstöd och att ge möjligheten till att testa och simulera innan fullskaliga test i anläggningen. Detta arbete kan organiseras i form av en kombination av experimentella tester och med relevant modellering.

## 9 Deltagande parter och kontaktpersoner

Deltagande parter är Volvo Construction Equipment och Linköpings Universitet.

Kontaktuppgifter:

Docent Patrik Rohdin ([patrik.rohdin@liu.se](mailto:patrik.rohdin@liu.se)), vid Energisystem LiU.

Johanna Wallin ([johanna.wallin@volvo.com](mailto:johanna.wallin@volvo.com)), vid VCE Hallsberg.

*Volvo Construction Equipment*

**V O L V O**

*Linköpings Universitet*



## 10 Referenser

- Abdoli S, Pamulapati M, Kara S. (2020) An investigation into the role of PV industry in meeting the growing energy demand towards absolute sustainability. *Procedia CIRP*, vol. 90, Elsevier B.V.; p. 383–7. <https://doi.org/10.1016/J.PROCIR.2020.02.128>.
- Aden N. (2016) Dynamic foundations: The role of industrial efficiency in limiting 21st century warming to 2 degrees. *Eceee Ind Summer Study Proc 2016;2016-Sept:101–8*.
- Arshad KMAK, Ho WS, Asli UA, Muis ZA, Hashim H. (2021) Solar Assisted Heat Pump Application in the Automotive Manufacturing Industry. *Chem Eng Trans 2021;89:49–54*. <https://doi.org/10.3303/CET2189009>.
- Ayoub AN, Gaigneux A, Le Brun N, Acha S, Lambert R, Shah N. (2019) The development of a carbon roadmap investment strategy for carbon intensive food retail industries. *Energy Procedia 2019;161:333–42*. <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2019.02.107>.
- Bell G. (2010) Energy and material cost savings. *Polym Paint Colour J 2010;200:34–6*.
- Bhuiyan MTI, Zhang H, Zhu J. (2016) Automotive coating industry: Sustainability challenges and smart innovations. *Challenges Technol. Innov. An Agenda Futur. - Proc. Int. Conf. Sustain. Smart Manuf. S2M 2016, 2017*, p. 65–70.
- Broberg Viklund, S., Karlsson, M. (2015) Industrial excess heat use: Systems analysis and CO2 emissions reductions, *Applied Energy 152*, pp. 189-197.
- Bysko S, Krystek J, Bysko S. (2021) Two approaches to car sequencing in the paint shop. *J Phys Conf Ser 2021;1780:012028*. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1780/1/012028>.
- Chang A, Anderson C, Aden N. (2021) PATHWAYS TO NET-ZERO SBTi Technical Summary.
- Christiansson, A-K. (2013) Energieffektivt Måleri, Slutrapport inom FFI-Hållbar produktion.
- Cronrath C, Lennartson B, Lemessi M. (2016) Energy reduction in paint shops through energy-sensitive on-off control. *IEEE Int. Conf. Autom. Sci. Eng.*, vol. 2016- Novem, IEEE Computer Society; 2016, p. 1282–8. <https://doi.org/10.1109/COASE.2016.7743555>.
- Davé A, Oates M, Turner C, Ball P. (2015) Factory eco-efficiency modelling The impact of data granularity on manufacturing and building asset simulation results quality. *Int J Energy Sect Manag 2015;9:547–64*. <https://doi.org/10.1108/IJESM-05-2013-0004>.
- Dehning P, Thiede S, Mennenga M, Herrmann C. (2017) Factors influencing the energy intensity of automotive manufacturing plants. *J Clean Prod 2017;142:2305–14*. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2016.11.046>.
- Edelvik F, Tiedje O, Jonuscheit J, Carlson JS. (2018) SelfPaint-A self-programming paint booth. *Procedia CIRP 2018;72:474–9*. <https://doi.org/10.1016/J.PROCIR.2018.03.167>.
- Energimyndigheten (2020) Energiläget 2020 – En översikt.
- Feng L, Mears L. (2015) Analysis of HVAC energy in automotive paint shop. *ASME 2015 Int. Manuf. Sci. Eng. Conf. MSEC 2015*.
- GEA (2021) Global Energy Assessment: toward a sustainable future (Cambridge University Press, Cambridge UK and New York, NY, USA and the International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria).
- Gebler M, Felipe J, Thiede S, Herrmann C. (2020) Life cycle assessment of an automotive factory: Identifying challenges for the decarbonization of automotive production - A case study. *J Clean Prod 2020;270:122330*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122330>.
- Geels, F.W., Sovacool, B.K., Schwanen, T., Sorrell, S. (2017) Sociotechnical transitions for deep decarbonization, *Science 357(6357)*, pp. 1242-1244.
- Giampieri A, Ling-Chin J, Ma Z, Smallbone A, Roskilly AP. (2020) A review of the current automotive manufacturing practice from an energy perspective. *Appl Energy 2020;261*. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2019.114074>.

- Giesekam J, Norman J, Garvey A, Betts-davies S. (2021) Science-Based Targets : On Target ? Sustainability 2021;13.
- Gunnarsson, A., Magnusson, C. (2011) Pinch analysis of Nynas refinery -an energy efficiency study , Master's Thesis within the Sustainable Energy Systems programme at CHALMERS.
- Iglauer O, Zahler C. (2014) A new solar combined heat and power system for sustainable automobile manufacturing. Energy Procedia 2014;48:1181–7. <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2014.02.133>.
- IVA (2019) Så klarar det svenska energisystemet klimatmålen, En delrapport från IVA-projektet Vägval för klimatet. (<https://www.iva.se/globalassets/bilder/projekt/vagval-klimat/201909-iva-vagval-for-klimatet-delrapport4-i.pdf>)
- Karlsson, M., Mardan, N. (2013) Considering start-ups and shutdowns using an optimisation tool - Including a dairy production planning case study, Applied Energy 107, pp. 338-349.
- McKinsey and Company. (2009) Pathways to a low-carbon economy: Version 2 of the global greenhouse gas abatement cost curve.
- McKinstry K, Arin J, Bi S, Dornfeld D. (2012) Decision Making Methodology to Reduce Energy in Automobile Manufacturing. Leveraging Technol. a Sustain. World - Proc. 19th CIRP Conf. Life Cycle Eng., 2012, p. 67–71.
- Kearns, D., Liu, H. & Consoli, C., 2019. Technology Readiness and Costs of CCS, USA: Global CCS Institute.
- Nikończuk P, Tuchowski W. (2021) Analysis of electric power consumption by the heat pump used in the spray booth. Smart Innov Syst Technol 2021;200:555–62.
- Nilsson, E., Rohdin, P. (2019) Empirical validation and numerical predictions of an industrial borehole thermal energy storage system, Energies 12(11),2263.
- Nilsson, E., Rohdin, P. (2019) Performance evaluation of an industrial borehole thermal energy storage (BTES) project – Experiences from the first seven years of operation, Renewable Energy 143, pp. 1022-1034.
- Nilsson, E., Österlund, E. (2021) Möjligheterna att implementera bio-CCS och CCS på Högdalenverket: En fallstudie över fyra olika koldioxidavskiljningsteknologier och deras kompatibilitet på Högdalenverket med avseende på tekniska, ekonomiska, miljömässiga och energirelaterade aspekter, Masteruppsats, LIU-IEI-TEK-A--21/03992—SE.
- Rimmerfors, L., Wallin, J. (2021) Energikartläggning, Volvo Construction Equipment, Hallsberg
- Oktaviandri M, Safiee AS Bin. (2018) Modelling Electrical Energy Consumption in Automotive Paint Shop. IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng., vol. 319, Institute of Physics Publishing; 2018. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/319/1/012060>.
- Pakkala J. (2010) Spray booth technology for the green paint shop. Pollut Eng 2010;42.
- Rao PP, Gopinath A. (2013) Energy savings in automotive paint ovens: A new concept of shroud on the carriers. J Manuf Sci Eng Trans ASME 2013;135:1–9. <https://doi.org/10.1115/1.4024537>.
- Rezaeian J, Parvizomran I, Mahdavi I. (2018) Increasing energy productivity in lean production system with energy oriented value-stream mapping. Int J Product Qual Manag 2018;24:495–506.
- Rohdin, P., Johansson, M., Löfberg, J., Ottosson, M. (2012) energy efficient process ventilation in paint shops in the car industry – Experience and an evaluation of a full scale implementation at SAAB automobile in Sweden, Ventilation 2012 – The 10th International Conference on Industrial Ventilation, Paris, France, September 17-19 2012.
- Rohdin, P., Moshfegh, B. (2007) Variable air volume-flow systems - A possible way to reduce energy use in the Swedish dairy industry, International Journal of Ventilation 5(4), pp. 381-392.
- Rohdin, P., Moshfegh, B. (2011) Numerical modelling of industrial indoor environments: A comparison between different turbulence models and supply systems supported by field measurements, Building and Environment 46(11), pp. 2365-2374
- SBTi. (2019) Foundations of Science-based Target Setting. 2019.

SBTi. (2021) SBTi CORPORATE NET-ZERO STANDARD. 2021.

SBTi. (2020) Science-based Target Setting Manual – Version 4.0. 2020.

Sharma S, Gaikwad GN. (2015) Heat recovery system for oven in paint shop. 2015 Int. Conf. Pervasive Comput. Adv. Commun. Technol. Appl. Soc. ICPC 2015, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.; 2015. <https://doi.org/10.1109/PERVASIVE.2015.7087052>.

Söderström, M. (1996) Industrial electricity use characterized by unit processes – a tool for analysis and forecasting. In: Proceedings of the 13th international congress on Electricity, Materials and Application, June 16-20. Birmingham, UK.

Thollander, P., Karlsson, M., Rohdin, P., Wollin, J., Rosenqvist, J (2020) Introduction to industrial energy efficiency – Energy auditing, energy management and policy issues, Elsevier Academic Press. (ISBN: 978-0-12-817247-6).

Wang J, Li J, Huang N. (2011) Optimal vehicle batching and sequencing to reduce energy consumption and atmospheric emissions in automotive paint shops. *Int J Sustain Manuf* 2011;2:141–60.

Zahler C, Iglauer O. Solar (2012) Process Heat for Sustainable Automobile Manufacturing. *Energy Procedia* 2012;30:775–82. <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2012.11.088>.

Zhang R. (2018) Environment-aware production scheduling for paint shops in automobile manufacturing: A multi-objective optimization approach. *Int J Environ Res Public Health* 2018;15. <https://doi.org/10.3390/ijerph15010032>.

Åhman, M., Nilsson, L.J., Johansson, B. (2017) Global climate policy and deep decarbonization of energy-intensive industries, *Climate Policy* 17(5), pp. 634-649