

Energi-effektivisering af anodiseringsprocessen

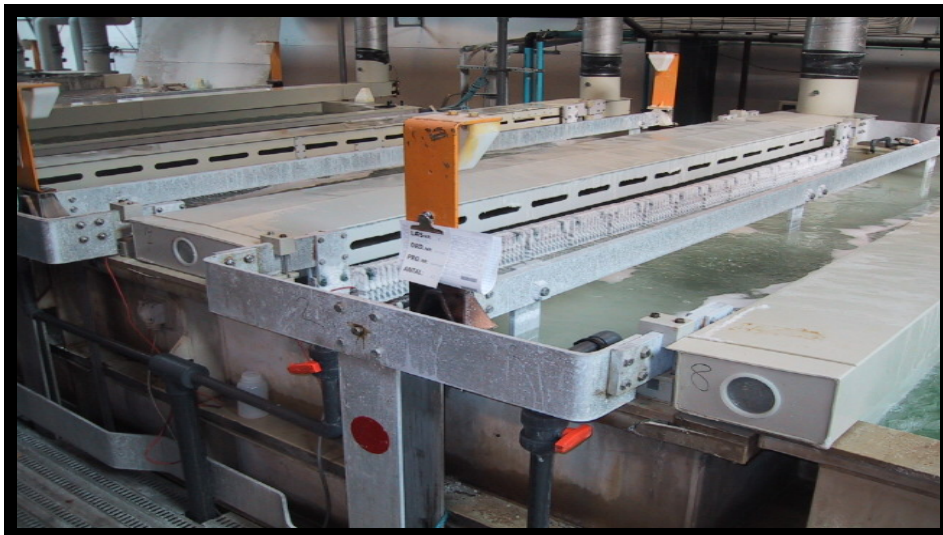
– En elektrolytisk proces.

Af:

Kirsten Burfelt, Sapa Profiler A/S

Anne Deacon Juhl, ALU-Consult ApS

Peter Weldingh, Lokalenergi Handel A/S



Titel: Energieffektivisering af anodiseringsprocesser
Serietitel:
Udgave: 1
År: 2007
Forfattere: Kirsten Burfelt, Anne Juhl Deacon og Peter
Weldingh
Sprog: Dansk
Sidetal: 41
Litteraturhenvi­sing: Side 41
Emneord: Anodisering, energieffektivisering, aluminium
ISBN: 87-993754-0-7
Pris: kr. 125,00 inkl. 25% moms
Redigering: Anni Hoffmann
Omslagsfoto: Peter Weldingh
Udgiver: Sapa Profiler A/S, Rolshøjvej 10, 8500 Grenaa
ALUConsult, Ingolfs Allé 9, 2300 København S
Lokalenergi Handel A/S, Skanderborgvej 180,
8260 Viby

Eftertryk i uddrag tilladt med tydelig kildehenvisning.

Indhold

Indhold	3
Forord	4
English summary	5
Indledning	6
Hovedkonklusion	8
Anodisering	10
Baggrund.....	10
Traditionel anodisering.....	11
Driftsparameter.....	12
Energiforbrug.....	13
Pulsanodisering	13
Forskellige styringsprincipper.....	14
Fordele og ulemper ved brug af pulsanodisering	15
Cases	16
Beskrivelse af Sapa Profiler A/S	16
Procesbeskrivelse, anodisering	16
Teknisk beskrivelse af anodiseringskredsen.	17
Specifikt energiforbrug til anodisering	18
Forsøgsrække 1 - referenceanlæg.....	19
Formål	19
Metodebeskrivelse.....	19
Analyseresultater.....	21
Konklusion forsøgsrække 1 – referenceanlæg	21
Forsøgsrække 2 – nyt anlæg / recovery.....	21
Formål	21
Metodebeskrivelse.....	22
Analyseresultater.....	23
Forsøgsrække 3 – hovedanalyse	24
Formål	24
Metodebeskrivelse.....	24
Analyseresultater.....	25
Energi: Parametervalg: Strømtæthed.....	26
Energi: Parametervalg: Pulstider.	30
Energi; hovedkonklusion.....	32
Energiforbrug til kølekreds,	32
Procestid.....	32
Kvalitet	33
Kvalitet; konklusion.....	35
Perspektivfasen	36
Energøkonomiske perspektiver.	36
Etablering af nye anodiseringsanlæg:	37
Perspektiver på sigt	38
Efterskrift.....	40
Referencer	41

Forord

Dette projekt er gennemført i samarbejde mellem parterne Sapa Profiler A/S, ALUConsult og Lokalenergi Handel A/S, og er finansieret af Dansk Energi Nets forsknings- og udviklingsmidler vedrørende effektiv energiudnyttelse.

Med denne rapport er det vores ønske at sætte fokus på mulighederne i brug af pulsanodisering frem for traditionel anodisering og dermed realisere det betydelige energisparepotentiale og den effektiviseringsgevinst, der ligger i denne proces teknologi.

Udover nævnte projektrapport er projektet og resultaterne præsenteret ved Aluminum Anodizers Council konference i Atlanta i 2004, samme organisations konference i Toronto 2006 samt ALU 2000 messen i Düsseldorf 2006.

Udover forfatterne har Søren Peter Poulsen, Lokalenergi Handel A/S, Henrik Hald Kristensen, Sapa Profiler A/S og John Steffensen, Sapa Profiler A/S deltaget i projektgennemførelsen.

Afslutningsvis skal lyde en tak til Jørn Borup Jensen, Dansk Energi Net for positivt og inspirerende samarbejde i projektførelsen.

Oktober 2007.

Kirsten Burfelt
Manager of Quality,
Environment, Health and Safety

Anne Deacon Juhl
Direktør

Peter Weldingh
Afdelingschef.

English summary

The purpose of the project is to create and spread out an operational tool – a calculation model - that optimises the energy consumption regarding pulse anodising of aluminium profiles.

The total amount of anodised aluminium are about 11.000 tons in Denmark. Since 1995 there has been an increase in using anodised aluminium and this increase will continue over the next decades. This is due to the well-known properties of aluminium, such as lightness, strength, decorative surface, huge resource in nature and 100% recycling ability.

The anodising process is very energy intensive and examples from SAPA Profiler A/S show a specific electrical use of 1.008 kWh/tons aluminium.

By changing from conventional anodising to pulse anodising the energy reduction will be as high as 30%. Unfortunately the technology is difficult to implement for the industry, primarily because of several technical regulation problems.

The running-in phase of the single, unique samples are too extensive and expensive, regarding economy, time and energy. The technology is due to this not in use in Denmark.

In this project the parameters for pulse anodising will be investigated and mapped through a couple of different test measurements on different aluminium alloys and samples. Through a statistic analysis an operational calculation model will be prepared.

Indledning

Projektet har til formål at udarbejde og udbrede et operationelt værktøj – en beregningsmodel – der optimerer energianvendelse i forbindelse med pulsanodisering af aluminiumsprofiler.

Det er i dag teknisk muligt at reducere procestiden og energiforbruget ved anodiseringsprocessen med ca. 30 % ved anvendelse af pulsanodisering frem for konventionel anodisering. Teknologien synes dog vanskelig at implementere for industrien, primært på grund af en række reguleringstekniske problemstillinger. Det skyldes, at hvert enkelt unikt emne har sine egne optimale driftsbetingelser for så vidt angår strømtæthed, spænding og pulstider m.v., og at virksomhederne hver især har et utal af forskellige emner og legeringer. Indkøringen bliver for omfattende og for bekostelig for industrien, både med hensyn til økonomi, tid og energi.

Selve anodiseringen er en elektrolytisk proces, der omdanner aluminium (Al^{3+}) i overfladen til aluminiumoxid (Al_2O_3) og derved fås en hård, slidfast, vejrbestandig, korrosionsbestandig og dekorativ overflade. Selve anodiseringsprocessen er særdeles energiintensiv, som omtalt i forordet.

Ved pulsanodisering varieres spændingen mellem to spændingsværdier (U_1 og U_2) eller to strømstyrker (I_1 og I_2) i tidsintervallerne (t_1 og t_2) frem for at køre med konstant spænding eller strøm.

Under anodiseringsprocessen sker der samtidig med omdannelse af aluminium til aluminiumoxid, en opløsning af aluminiumoxid. Denne opløsning kan opfattes som energitab.

Ved at kunne danne dette oxidlag hurtigere ved brug af pulsanodisering minimeres også tiden, hvori der opløses aluminiumoxid. Hvor meget, afhænger af de driftsparametre, der aktuelt anvendes. Netop dette forhold er årsagen til, at pulsanodisering bruger mindre energi, i det der ikke – som ved konventionel anodisering – skal bruges samme mængde energi for at gendanne det opløste oxidlag.

Formålet med dette projekt har derfor været at undersøge og kortlægge de forskellige driftsparametres indflydelse på ovennævnte, (og dermed direkte det specifikke energiforbrug), gennem en række testmålinger på forskellige legeringer og emner med forskellig geometri. Ud fra en statistisk analyse skulle der udarbejdes en operationel beregningsmodel, som kunne sætte rådgivere og produktionsplanlæggere i stand til at drive et pulserende anodiseringsanlæg energioptimalt.

Projektet vil derfor belyse sammenhængen mellem strømtæthed, spænding, pulstider, legeringsvalg samt anodiseringsareal (profilets udformning) ud fra en given temperatur og elektrolyt af badet.

Denne viden skal anvendes til vurdering af hvilke parametervalg (og fravalg) der reguleringsmæssigt giver optimal energidnyttelse.

Outputtet bliver således en beregningsmodel for optimal regulering/styring af anodiseringsprocessens forskellige parametre med laveste energiforbrug til følge.

Formålet kan beskrives med følgende punkter:

- 1) Udarbejde og udrede et operationelt værktøj
- 2) Undersøge og kortlægge driftsparametrenes indflydelse på energiforbruget
- 3) Belyse sammenhængen mellem strømtæthed/spænding/pulstider m.v.
- 4) Vurdering af parametrenes indflydelse på energien

Hovedkonklusion

Det har ikke været muligt at udarbejde et generelt værktøj, hvor areal, geometri, legering, lagtykkelse og andre parametre indsættes og herud fra udleder de omtalte pulsparametre. Til gengæld er der opnået en stor viden om samspillet mellem de forskellige parametre, og hvilke områder der har størst indflydelse på energien.

Ambitionen om at kunne udarbejde et operationelt værktøj er høj, og der skal foretages væsentligt flere testkørsler og yderligere arbejde, før et optimalt operationelt værktøj er til stede. Der er dog opnået nogle brugbare parametre, som vil kunne benyttes umiddelbart til energioptimal drift i en hvilken som helst anodiseringsvirksomhed.

Projektet har med tydelighed vist, at parametrene er meget anlægsspecifikke. Derfor vil det være umuligt at finde en generel ligning for hele industrien, som antaget ved projektets start.

Under forsøgskørslerne har det været vanskeligt at kortlægge energiforbruget i selve anodiseringsprocessens delelementer som f.eks. energitab i kontaktpunkter, energitab i elektrolytten m.fl. I løbet af projektet blev det derfor besluttet, at sætte fokus alene på den samlede procesenergi (anodisering og køling af anodiseringsprocessen).

Profiler med meget forskellig geometri er blevet undersøgt. Disse tests har vist, at der i anlægget hos Sapa Profiler A/S var en maksimal opnåelig strømtæthed på 3 A/dm^2 for meget komplicerede profilgeometrier. For mindre komplicerede geometrier, der udgør ca. 70 % af godsmængden, kunne der opnås strømtætheder på 4 A/dm^2 .

En af de vigtige parametre ved pulsanodisering er tiden af den såkaldte recoveryperiode. Recoveryperioden er den tid, hvor processen er i stand til at gendanne oxidlaget ved lav spænding. Forventningen om, at kendskabet til denne recoveryperiode ville kunne bestemme den optimale pulstid medførte, at der blev brugt meget tid og energi i første del af projektet på at finde denne parameters afhængighed af legering og spænding. Det viste sig dog umuligt at finde den optimale recoveryperiode på anlægget.

I stedet for at gøre brug af den specifikke recoveryperiode for anlægget, blev det besluttet, at benytte de parametre som var blevet brugt i tidligere Ph.d. arbejde¹. Pulstider, strømtætheder og spændinger blev varieret på forskellig måde, for at se om der var forskel i indflydelsen på energiforbruget.

Energiforbruget blev effektiviseret med op til 31 % ved brug af de pulsparametre som blev valgt i projektet. En høj strømtæthed kan dog kun udnyttes i produktion, såfremt en effektiv cirkulation og køling af elektrolytten er til stede, samtidig med, at alle kontaktpunkter er optimale med hensyn til energioverførsel. På den baggrund er kontaktpunkter optimeret og kølekredsen effektiviseret, således tilstrækkeligt køling kunne opnås på en energieffektiv vis.

Udover forbedring i energieffektiviteten er der opnået en betragtelig reduktion i procestiden ved pulsanodisering (op til 50 %). Dette vil i mange anodiseringsvirksomheder medføre et behov for udvidelse af et eller flere sealingkar for at modstå mulige flaskehalse i det sidste procestrin. En anden mulighed kan være at anvende kold sealing, hvor procestiden er reduceret.

Energi-effektivisering af anodiseringsprocesser

Påvisning af den forøgede kapacitet, samtidig med en forbedret energiøkonomi anses for værende væsentlig for udbredelse af pulsanodisering som supplement til / erstatning af traditionel anodisering.

Anodisering

Baggrund

Brugen af aluminium – og derved også anodisering af aluminium - er stærkt stigende primært på grund af aluminiums mange gode egenskaber. Aluminium er desuden en naturressource, som findes i rigelige mængder, og er let at udvinde. Aluminium er også et metal, der kan genbruges næsten 100 %.

Stor interesse fra bl.a. bilindustrien, byggebranchen og "ALU-design relaterede virksomheder" forventes at medføre enorme stigninger i brugen og forarbejdningen af aluminium. Forbruget af aluminium i Danmark er fra 1995 – 2004 steget fra 19 kg/person til 25 kg/person, og tendensen ser ud til at fortsætte.

I Danmark anodiseres der for nuværende ca. 11.000 tons aluminium pr. år. Selve anodiseringsprocessen er særdeles energiintensiv, og eksempler fra Sapa Profiler A/S viser et specifikt elforbrug på 1.008 kWh/tons gods. Derudover anvendes der 120 kg olie /tons gods til eftertætning (sealing) efter anodiseringsprocessen. Desuden medfører anodiseringsprocessen et procesrelateret energiforbrug fra bl.a. køleanlæg, belüftningsanlæg og pumper. Med udsigten til yderligere stigning i brugen af aluminium, må betydelige stigninger i energiforbruget tilsvarende forventes.

De energimæssige forbedringer forventes i størrelsesordenen 30 % af det specifikke energiforbrug ved konvertering fra konventionel anodisering til "reguleringsvenlig pulsanodisering", hvilket betyder væsentlige potentielle besparelser på sigt, når stigningstakten i brugen af aluminium tages i betragtning.

Et værktøj/beregningsmodel, hvor der ved kendt legering og profiludformning kunne opnås optimale driftsbetingelser til anodisering med pulsensretter ville føre ny viden i den lavteknologiske anodiseringsproces. For det første muliggør det, at danske virksomheder bliver mere konkurrencedygtige indenfor et felt, hvor USA og Japan har befundet sig i 10-20 år. For det andet vil det være muligt at reducere driftstiden (minimere tomgangsforbrug), og eliminere den flaskehals som selve anodiseringen er for produktionslinien. For det tredje kan driftsomkostninger til energi reduceres – sidstnævnte er også en årsag til, at der anodiseres mere og mere både i Østeuropa og Asien.

Paradoksalt nok findes der i Danmark en stor forskningsmæssig viden inden for pulsanodisering – den største i Europa – og det er derfor oplagt at gå videre med eksisterende ekspertise og tage den sidste kobling over til industrien med, så pulsanodiseringen kan gøres operationelt her.

Ved udarbejdelse af værktøjet skal der lægges vægt på en sådan grad af enkelthed, at det er direkte brugbart under produktionsplanlægning og –drift samt under en eventuel rådgivning.

Traditionel anodisering

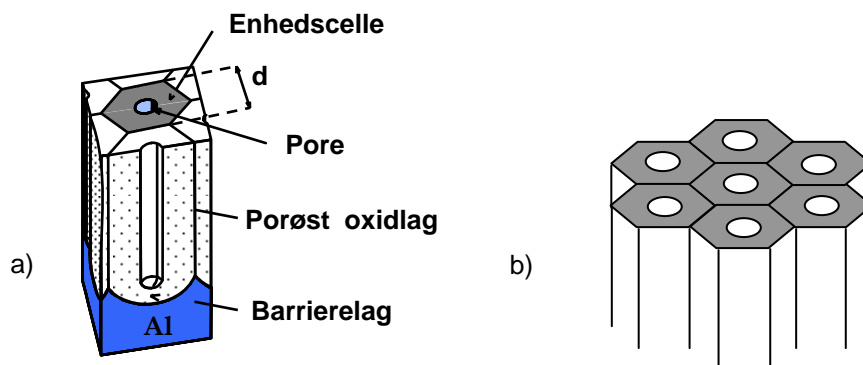
For at kunne udnytte pulsanodiseringens fordele, er det vigtigt at kende den grundlæggende proces ved anodisering.

Aluminium har fra naturen et beskyttende oxidlag på overfladen, som giver metallet et mat og hvidligt udseende på en ubehandlet overflade. Dette oxidlag bliver gennem anodiseringsprocessen gjort tykkere og ensartet, så der opnås forbedrede korrosions- og slidegenskaber. Ved valg af den rigtige elektrolyt vil der kunne dannes et porøst oxidlag, som giver mulighed for at indfarve overfladen i forskellige farver, se figur 1 b).

Under selve anodiseringsprocessen er aluminiumsprofilerne (godset) anode i proceskarret (derfor udtrykket anodisering). Aluminium går i opløsning (reaktion 1), og ved hjælp af oxygen i elektrolytten vil der ske en samtidig dannelse af aluminiumoxid (reaktion 2). Når anodiseringsprocessen foregår i f.eks. svovlsyre sker der en opløsning af aluminiumoxidlaget (reaktion 3). I løbet af de første 100 – 200 sekunder vil der indstille sig en ligevægt mellem dannelsen og opløsningen af aluminiumoxid.



Når processen foregår i en svovlsyreelektrolyt vil strukturen af oxidlaget bestå af to lag; et barrierelag helt tæt på aluminiumoverfladen og et ydre porøst oxidlag. Den teoretiske forestilling om hvordan dette lag ser ud kan ses i figur 1a².



• Figur 1, Skematisk tegning af det porøse oxidlag.

Undersøgelser har vist, at der foregår to forskellige opløsninger af aluminiumoxidlaget, en kemisk og en elektrokemisk opløsning³. Disse to forskellige opløsningsmekanismer må finde sted, for at kunne forklare følgende; for at holde en ligevægt mellem opløsning og dannelse af oxidlaget, skulle den kemiske opløsningshastighed fordobles, når anodisering foregår ved 2 A/dm^2 i forhold til 1 A/dm^2 under de samme anodiseringsparametre. Dette kan kun lade sig gøre ved, at der foregår en yderligere opløsningsmekanisme, nemlig den elektrokemiske.

Altså er anodiseringsprocessen mere kompleks end den ofte bliver forklaret. Disse to opløsningsreaktioner finder sted med meget forskellig hastighed³. Den elektrokemiske, også kaldet "field-assisted" opløsning, finder sted hen over

barrierelaget. Hastigheden af denne elektrokemiske opløsning kan være op til 3000 gange hurtigere end den kemiske opløsning. Den kemiske opløsning foregår i interfacen mellem barrierelaget og elektrolytten.

Tykkelsen af barrierelaget varierer med spændingen. Sker der ingen opløsning af laget, vil det være kompakt og isolerende.

Sker der en opløsning, vil processen have et andet forløb. Dannelsen af en enhedscelle (figur 1a) sker ved, at strømmen øges i områder med uregelmæssigheder i metalstrukturen (svaghedszoner), der fører til en temperaturstigning i elektrolytten. Den øgede temperatur vil medføre en yderligere opløsning af oxidlaget i svaghedszonerne, så oxidlaget her bliver tyndere. Det tyndere oxidlag fører til en lavere modstand og dermed vil strømstyrken forøges. Denne proces vil fortsætte til den porøse struktur er dannet.

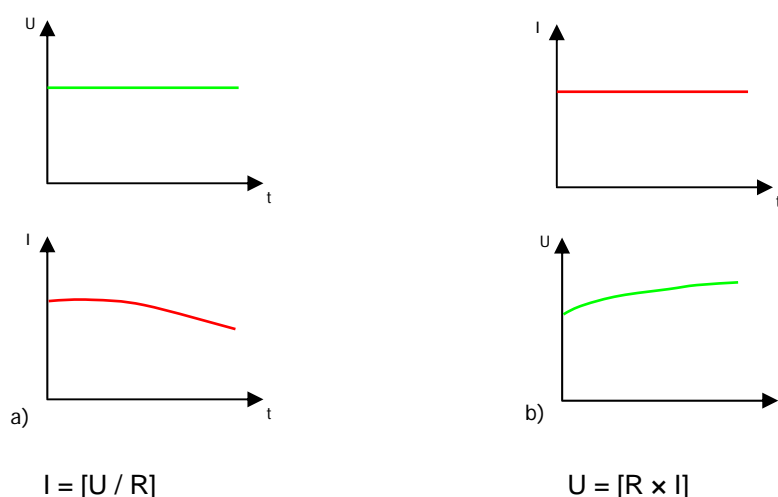
Driftsparameter

Der anvendes typisk to driftsstyringsprincipper i forbindelse med traditionel DC-anodisering.

Spændingsstyring (se fig. 2a) sker med fast spænding og variabel strømstyrke. På grund af modstanden i processen og i oxidlaget vil strømstyrken tilpasse sig den givne spænding. Undervejs i processen vil strømstyrken faldet grundet den stigende modstand i oxidlaget.

Strømstyring (se fig. 2b) sker med fast strømstyrke og variabel spænding. På grund af modstanden i processen og i oxidlaget vil spændingen tilpasse sig den givne strømstyrke. Undervejs i processen vil spændingen stige grundet den stigende modstand i oxidlaget.

Langt de fleste anodiseringsvirksomheder har valgt at spændingsstyre anodiseringsprocessen ved 15 – 17 V. Anodiseringsvirksomhederne modtager et utal af forskellige emner og dette er typisk årsag til valget af spændingsstyring frem for strømstyring. Det kræver ressourcer at udregne overfladearealet på forskellige geometriske emner og ved at bruge spændingen som driftsparameter frem for strømstyrken, er det ikke nødvendigt at kende til profilarealet.



- Figur 2, Skematisk tegning af de to forskellige procesforløb, spændingstyret a) og strømstyret b). Oxidlaget er en del af modstanden R.

I tilfælde, hvor det er væsentligt at kende til procestiden T, er strømstyring det mest hensigtsmæssige. Dannelsesiden for lagtykkelsen "µm" er direkte betinget af strømtætheden (J).

En tommelfingerregel for udregning af procestiden, hvis strømtætheden er kendt, er:

$$h = 0.3 \times J \times T,$$

hvor "h" er lagtykkelsen, "J" er strømtætheden (A/dm²), og "T" er den totale procestid i minutter. Når processen spændingsstyres, er procestiden typisk 40 – 60 minutter for at danne et oxidlag med tykkelse 15 – 20 µm, alt efter valg af spændingsniveau og maksimal strømkapacitet på ensretteren.

Energiforbrug

Det teoretiske energiforbrug, der skal anvendes til anodisering kan bestemmes med hjælp fra nedenstående udtryk, hvor arealet under strømkurven i figur 2 svarer til ladningen:

$$q = I \times \Delta t$$

Ud fra denne værdi kan energien "E" udregnes ved hjælp af formlen:

$$E = q \times U$$

Strømstyrken ved traditionel anodisering varierer fra produktion til produktion, afhængig af arealet, idet strømtætheden er konstant og typisk på 1,8 A/dm². Traditionelt er der tale om strømstyrker op til 22.000 A.

Pulsanodisering

Der er flere grunde til, at overveje brugen af pulsanodisering. Bl.a.

- 1) Energiforbrug
- 2) Procestid
- 3) Kvalitet.

Der kan opnås forbedringer (i hvert fald teoretisk) i form af større hårdhed og slidsstyrke samt korrosionsbestandighed ved pulsanodisering frem for traditionel anodisering.

Procestiden er også en vigtig faktor, når man taler om hårdanodisering. En lang procestid vil gøre det yderste lag af aluminiumoxiden blødt og pulveragtigt, "powdering". For at nedsætte procestiden øges strømtætheden, hvorved "brænding" kan opstå. Ønsket om at have så kort en procestid som muligt medfører ofte, at der ved kontaktpunkter opstår en ukontrollabel dannelse af oxidlag. "Brænding" skyldes at der i et bestemt område løber en meget høj strøm, hvilket medfører, at temperaturen i elektrolytten, og hermed den kemiske opløsning af laget, øges.

På grund af den kemiske opløsning sker den største opløsning centralt i porren, hvilket betyder, at modstanden i porrecentrum bliver mindre, hvorved strømmen ledes denne vej. I yderste konsekvens kan der opstå så store lokale strømtætheder, at emnerne brænder.

Pulsanodisering er ikke nogen ny teknologi^{4,5}. Flere anodiseringsvirksomheder har gennem de sidste 15 år anvendt teknologien uden at se den store fordel kvalitetsmæssig som energimæssig. En af grundene til dette kan være pulsmetoden, hvormed processen er styret.

Forskellige styringsprincipper

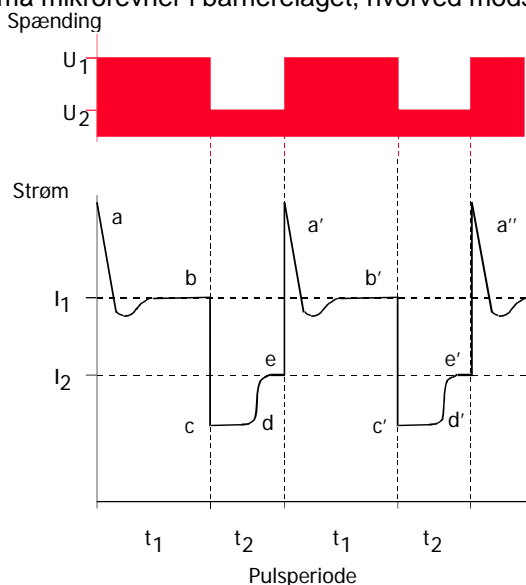
Anodisering kan foregå ved et af følgende principper:

- 1) DC = direct current (traditionel anodisering),
- 2) AC = alternate current,
- 3) AC/DC = direct current with superimposed alternate current,
- 4) PC = pulse current
- 5) PR = pulse reverse current.

Som allerede nævnt bruges DC stadig i langt de fleste tilfælde, hvor der skal dannes et dekorativt og beskyttende aluminiumoxidlag.

AC styret anodisering bliver sjældent benyttet, eftersom den maksimale anodiseringstykkelse er ca. 12 μm ved svovlsyreanodisering. Samtidig kræver processen højere spænding og langt mere effektiv "strømfordeling" i forhold til DC anodisering. Ved AC anodisering vil der ikke være tab i ensrettere, hvilket umiddelbart er en fordel, men behovet for effektiv "strømfordeling" eliminerer imidlertid dette³. Ved at udnytte fordelene ved AC anodisering og samtidig drage nytte af fordelene fra DC anodisering, opstår en styreprincip kaldet AC/DC.

PR anodisering er en metode, hvor aluminium er både anodisk og katodisk i processen. Denne proces er aldrig blevet fuldt udviklet, men nye teknologier inden for ensrettere dukker hele tiden op⁶. En af fordelene ved denne metode er, at spændingen under processen er lavere end ved traditionel anodisering. Dette skyldes, at der i de katodiske perioder dannes hydrogengas, som danner små mikrørevner i barrierelaget, hvorved modstanden i dette lag sænkes⁶.



- Figur 3, Spænding- strøm- og tidskurve, som viser recovery perioden

Den pulsmetode som benyttes i dette projekt er en PC metode, hvor pulstiderne varieres fra sekunder til minutter. Strømmen eller spændingen bliver påtrykt med firkantede pulser, som eksemplet i figur 3.

Ved at påtrykke en firkantet puls er det muligt at udnytte "recovery" effekten⁷.

I den første periode med den høje spænding U_1 (den øverste kurve fig. 3) vil strømstyrken I_1 tilpasse sig en værdi baseret på modstanden R og den påtrykte spænding U_1 (den nederste kurve fig. 3). Ved pludselig at sænke spændingen til en værdi U_2 vil strømmen I_2 falde drastisk på grund af den uændrede

modstand R . Strømmen vil være så lille, at der ikke dannes oxid i denne periode.

I perioden t_2 sker der indledningsvist en opløsning af barrierelaget, som bliver tyndere og tyndere. På et tidspunkt vil modstanden i dette lag være så lille, at strømmen vil stige igen. Denne periode kaldes "recovery" periode. Barrierelaget vil gen- og omdanne sig. Længden af perioden med den lave spænding, U_2 , er afhængig af, hvilken legering der skal anodiseres.

I nedenstående tabel ses parametrene for henholdsvis traditionel anodisering og pulsanodisering⁴. Ved pulsanodisering anvendes ofte højere spænding end ved traditionel anodisering på grund af de højere strømtætheder. Ved pulsanodisering sker der samtidig det, at temperaturen i elektrolytten er knap så følsom.

Parameter	Traditionel anodisering	Pulsanodisering
Badspænding, V	< 20 – 25	< 30
Strømtæthed, A/dm ²	< 1 – 2	2 - 20
Elektrolyttemperatur, °C		
Traditionelle oxidlag	< 25	< 35
Hårde oxidlag	0 – 5	20 – 25
Omrøring af elektrolyt	Valgfri	Nødvendig

- Tabel 1, pulsparametre for firkant-formede pulser og traditionel anodisering⁴. Disse parametre gælder for pulsanodisering med pulstider t_1 og t_2 fra 10 – 180 sekunder. Andre pulsanodiseringsmetoder benytter pulstider helt ned til millisekunder⁵.

Fordele og ulemper ved brug af pulsanodisering

Fordelene ved at bruge pulsanodisering, når det drejer sig om konventionel anodisering med lagtykkelser mellem 10 og 25 μm er, at procestiden nedsættes. Tidligere undersøgelser har vist, at der ikke opnås væsentlige ændringer af laget i form af hårdhed, slid- og korrosionsbestandighed, som ved hårdanodisering, når man sammenligner forskellige pulsmetoder¹. Der er dog en besparelse i procestiden på helt op til 50 % ved valg af den rigtige pulsanodiseringsproces.

Som allerede nævnt bliver oxidlaget dannet fra bunden af poren, hvilket medfører, at toppen af poren har været udsat for en kemisk opløsning fra elektrolytten i længst tid. Opløsningen kan medføre, at det yderste lag bliver porøst. Dette ses ofte på f.eks. sortindfarvede emner og kan afhjælpes ved brug af pulsanodisering, da procestiden kan nedsættes.

Cases

Beskrivelse af Sapa Profiler A/S

SAPA Profiler A/S er den danske enhed i SAPA Profiles, der er leverandør af strengpressede overfladebehandlede og bearbejdede aluminiumsprofiler. Virksomhedens nuværende produktionsfaciliteter er etableret i 1981 og 2001, og på virksomheden anodiseres og bearbejdes aluminiumsemner.

Virksomheden rådede over to anodiseringsanlæg i forsøgsperioden, der i daglig tale kaldtes "lang gods anodisering" og "stykgoods anodisering". Der anodiseres årligt 1.400.000 m² gods, og energiforbruget til anodiseringsprocessen udgør ca. 6.000 MWh/år fordelt ligeligt på opvarmning (eftertætning) og elektricitet (anodiseringsprocessen).

Procesbeskrivelse, anodisering

Procesflowet ved anodisering kan beskrives som følger:

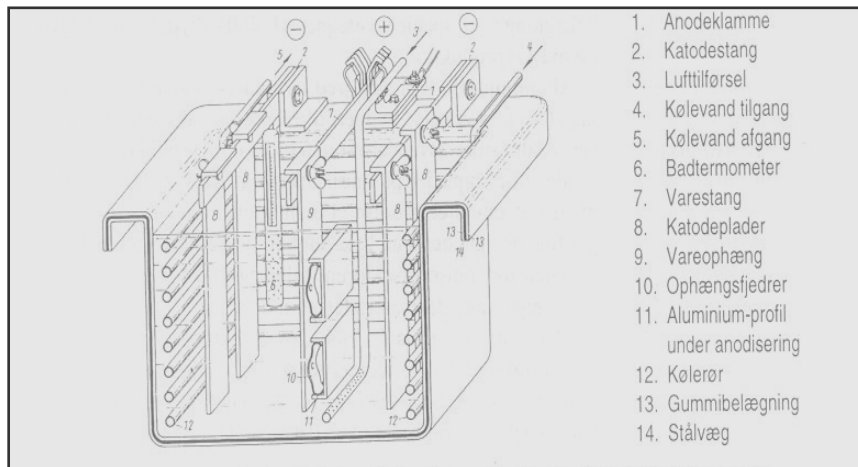
- 1) Aluminiumsprofilerne gennemgår en kemisk rengøring og skylning i forskellige kar.
- 2) Efterfølgende sker selve anodiseringen i et særligt proceskar, hvor jævnstrøm sendes gennem en elektrolytisk celle (syrebad), hvor aluminiumsprofilerne udgør anoden. Ved denne proces omdannes det yderste lag aluminium til aluminiumoxid. Oxidlagets kvalitet og lagtykkelse styres ved en kombination af anodiseringstiden, kemikaliekoncentrationen i karret samt af spændingen og strømstyrken. Det producerede oxidlags tykkelse er normalt mellem 5 og 25 µm (Anodiseringsprocessen).
- 3) Oxidlaget kan indfarves ved forskellige metoder.
- 4) Overfladebehandlingen afsluttes af en varm eller kold eftertætning (sealing), der forsejler det producerede oxidlag og forøger korrosionsbestandigheden.



Teknisk beskrivelse af anodiseringskredsen.

Selve anodiseringskredsen består af anodiseringskarrene, ensretteren og tilhørende kølekreds.

Anodiseringskarret er opbygget som vist nedenfor i figur 4. Anodiseringsgodset (inkl. dele af raket) udgør anoden i processen. Strømmen løber fra anoden gennem svovlsyre-elektrolytten til katodepladerne i siden af karret (2).



- Figur 4 Opbygning af anodiseringskar

Ensretning af strømmen sker ved hjælp af en pe 5040-W Power Station.

Teknisk specifikation:

Kapacitet:	30 V / 10.200 A (sekundærside), 306 kW.
Input:	400 V, 3 × 566 A
Styring:	Spændings- eller strømstyring Switch mode technology
Driftstyring:	WinCapp

For at sikre en optimal driftstemperatur i elektrolytten er der installeret ekstern vandkølekreds, der via en varmeveksler "afleverer" køling til syrekredsen.

Teknisk specifikation:

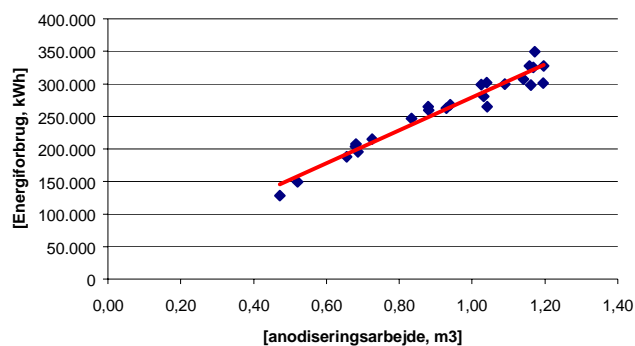
Type:	DAIKIN EUWAN 080 AZY
Kølekapacitet:	242,5 kW
Kompressor:	58,6 kW (opt. effekt 63,9 kW)
COP-faktor:	3,79
Kølemiddel:	R407C

Strømskinner og kontaktpunkter er omdimensioneret til en højere strømstyrke. Strømskinner er hovedsageligt udført i aluminiumsprofiler, mens kontaktpunkter (anodeklamme, jf. billedet nedenfor) er udført i kobber.



Specifikt energiforbrug til anodisering

Energiforbruget til anodisering er afhængig af det arbejde der udføres. Det vil sige af arealet på profilerne [m²] samt den tykkelse [μm], som anodiseringslaget skal have. Der er reelt tale om et volumen, hvorfor arbejdet i anodiseringsafdelingen kan beskrives som et anodiseret volumen udtrykt i [μm × m² = m³]. Der er foretaget en regressionsanalyse på forholdet mellem anodiseringsvolumet og den tilhørende energimængde (inkl. køling af anodiseringsbade) på baggrund af månedsvise rapporteringer. Den viser tydelig sammenhæng mellem volumen og energiforbrug.



• Figur 5: Regressionsanalyse, anodisering.

På grundlag af regressionen kan følgende udtryk definere energiforbruget:

$$E = 253.103 \times A + 26.121$$

hvor, E = Elforbruget til anodisering

A = Anodiseringsvolumet

Procesuafhængig del

Procesafhængig del

Pålideligheden i formeludtrykket er efterfølgende undersøgt:

	[m ²]	[μm]	[m ³]	Registreret t [kWh]	Beregnet [kWh]	[%]
	116.070	10,30	1,20	301.100	329.845	109,55%
	116.772	10,00	1,17	325.200	322.252	99,09%
	115.885	8,00	0,93	262.400	261.507	99,66%
	90.282	7,50	0,68	207.800	198.231	95,40%
	67.603	7,70	0,52	149.100	157.735	105,79%

- Tabel 2: Registreret og beregnet elforbrug ved anodisering.

Det kan med rimelighed konkluderes, at nævnte udtryk belyser energiforbruget som funktion af anodiseringsvolumet. Det procesafhængige forbrug er udtrykt i energi pr. måned. Skal udtrykket anvendes ved efterkontrol/prognostisering af årlig produktion og energiforbrug, må den procesafhængige del af forbruget forøges med en faktor 12.

Ved årlig produktion vil udtrykket derfor antage:

$$E = 253.103 \times A + 313.452$$

Forsøgsrække 1 - referenceanlæg

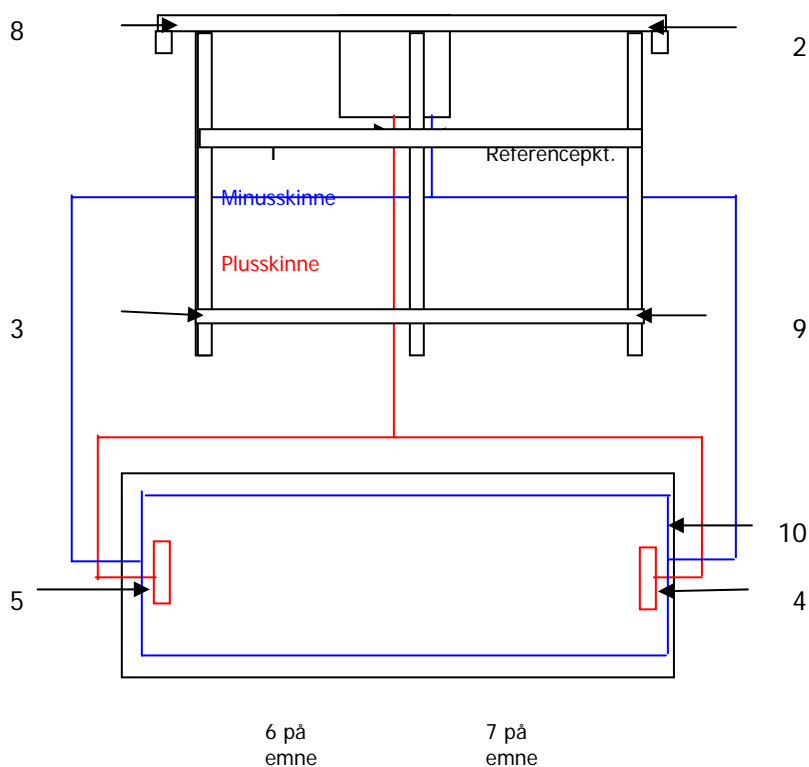
Formål

For at få et grundlag at vurdere et eventuelt reduceret energiforbrug ud fra, når anodiseringsprocessen ændres fra konventionel anodisering til pulsanodisering, var formålet med forsøgsrække 1 at skabe en reference.

Feltforsøgene har som udgangspunkt været at gennemføre en række undersøgelser på traditionelle anlæg, for derigennem at opnå et referencegrundlag, som senere skal danne grundlag for evaluering af effekten ved brug af pulsanodisering, jf. projektbeskrivelsen.

Metodebeskrivelse

Selve feltforsøgene er gennemført ved spændingsmåling på i alt 9 bomme med forskellige racks, emner og krav til lagtykkelser. Målingerne er gennemført som spændingstabsmålinger over udvalgte kontaktpunkter i processen som skitseret nedenfor.



Figur 6, målepunkter til energimålinger

Målingerne er gennemført ved hjælp af ELTEK Datalogger SQ-1027 og med 1 minuts opløsning.

Målepunkt:	Komponent:	Bemærkning:
1	Anode, målt på sekundærsiden af ensretteren	Spænding
2	Katode, målt i anodiseringskar	Spænding
3	Anode, målt på bomoverligger på rack	Spænding
4	Anode, målt på højre bunddel af rack	Spænding
5	Anode, målt på venstre bunddel af rack	Spænding
6	Anode, målt på emne	Spænding
7	Anode, målt på emne	Spænding
8	Anode, målt på "bomhvil"	Spænding
9	Katode, målt på "bomhvil"	Spænding
10	Katode, målt på bomoverligger på rack	Spænding
Effektmåling	Måling på ensretter, primærside	Energi
Effektmåling	Måling på køleanlæg	Energi

Tabel 3,

Fordelingen af målepunkter gør, at følgende spændingsfald kan bestemmes:

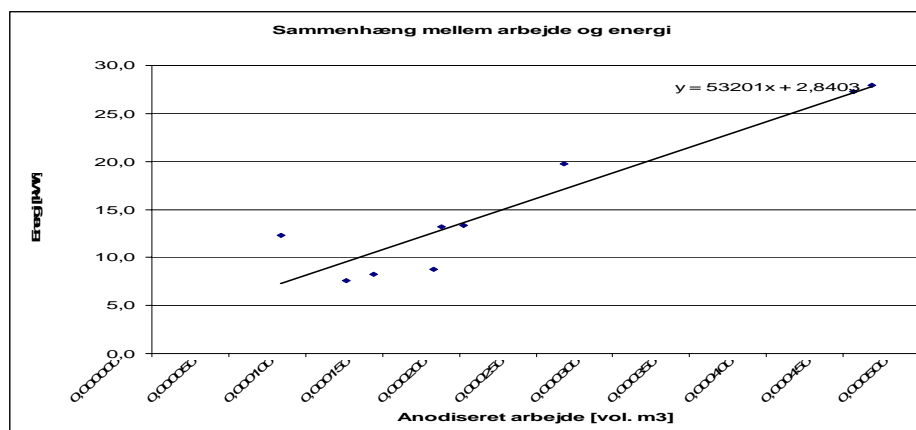
- 1) Spændingsfald i minusskinner
- 2) Spændingsfald i plusskinner
- 3) Spændingsfald i kontaktpunkter i bomovergange
- 4) Spændingsfald i rack
- 5) Spændingsfald i processen.

Med viden om strømstyrken kan energiforbruget i ovenstående punkter bestemmes.

Alle målinger er anvendt i forbindelse med projektet kan rekvireres særskilt.

Analyseresultater

På baggrund af spændingsfaldet mellem målepunkt 2 og målepunkt 3 kan energiomsætningen i selve anodiseringsprocessen bestemmes. Resultatet af forsøgsrøslerne i august er vist nedenfor:



• Figur 7,

I det resultat indgår desuden tabet til varmeudvikling i rack, bombe og profiler. I det fremadrettede arbejde søges det verificeret. Der er gennemført en række nye forsøgsrøslere med samtidige målinger af kølevandet. Formålet med dette har været at undersøge varmetabet fra selve raket.

Konklusion forsøgsrække 1 – referenceanlæg

Konklusionen på forsøgsrække 1 er, at det med rimelighed kan antages, at sammenhængen mellem anodiseringsarbejdet, udtrykt i volumen, og det tilhørende energiforbrug til anodiseringsprocessen er lineært, jf. fig. 5.

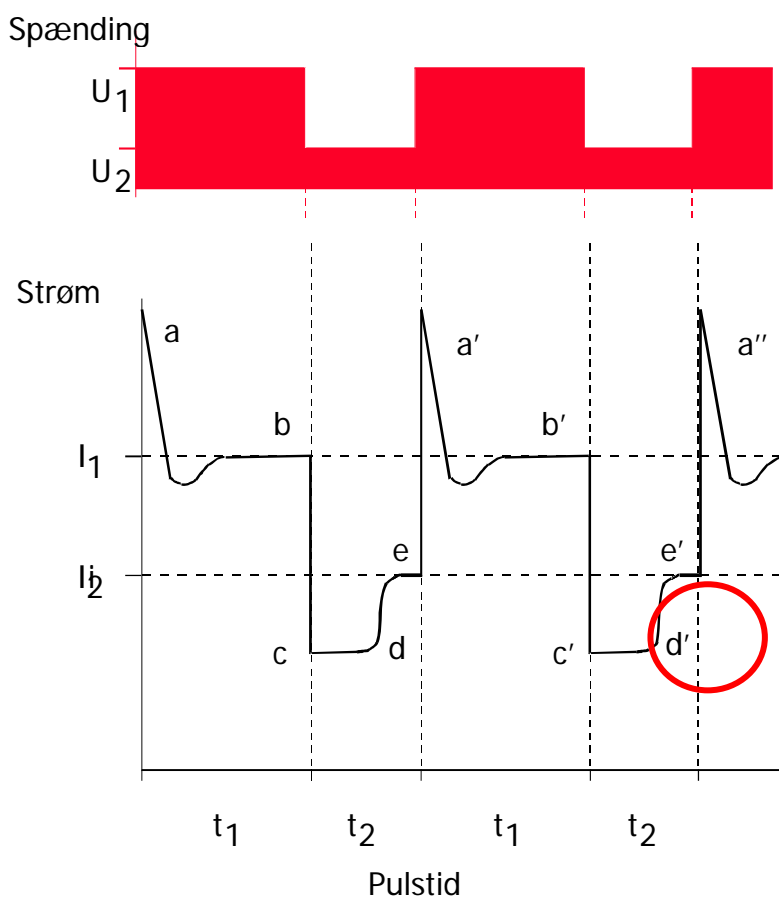
Forsøgsrække 2 – nyt anlæg / recovery

Formål

Målet med denne forsøgsrække var at finde recoveryperioden, altså at visualisere en kurve, som ville vise længden af t_2 -perioden (se figur 6). Området

i den røde cirkel er den periode, som er vigtig for at finde de mest optimale pulsparametre til det videre arbejde. Længden af recoveryperioden, hvor strømstyrken er konstant (ikke absolut nul) afhænger som tidligere nævnt af procesparametre som spændingsforskellen, elektrolytten, temperaturen i elektrolytten, kontaktpunkterne, geometri af profilen, overfladearealet og den benyttede legering.

Perioden med den lave spænding er også perioden, hvor oxidlaget bliver dannet meget langsomt. Så for at opnå den mest optimale anodiseringsproces skal spændingen stige til U_1 igen, lige efter at strømmen er steget til I_2 . På denne måde vil oxidationen i den kortest mulige periode være langsom.



- Figur 8, Spændings- strøm og tidskurve, som bl.a. viser recovery

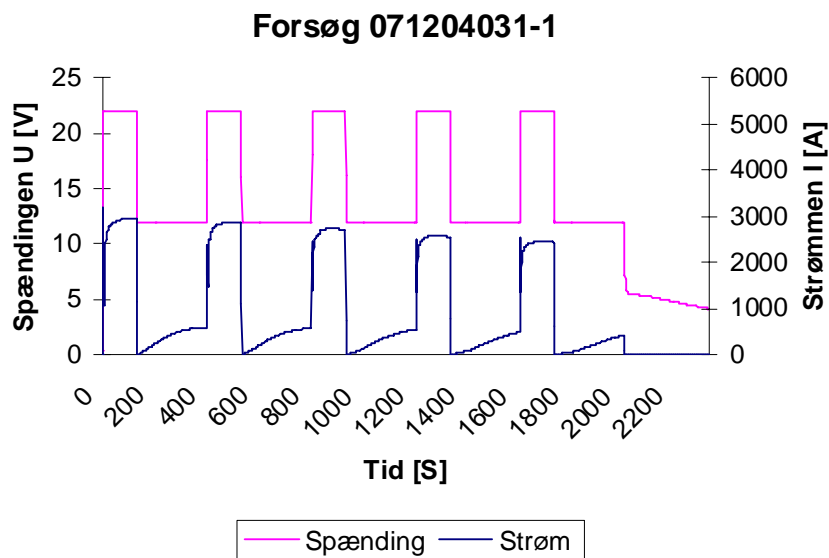
Metodebeskrivelse

For at være sikker på, at alle parametre undtagen spænding var konstante, blev disse første testkørsler til indkøring af recovery perioden kørt med bomme med kun to testplader på, som vist i figur 8. Under disse testkørsler blev der ikke logget energimålinger samtidig. Det interessante i denne fase var at finde recovery periode.

Forskellige spændingsvariationer blev afprøvet for at se om ΔU 's indflydelse på recoveryperioden kunne eftervises. Endvidere blev forskellige pulstiderne t_1 og t_2 afprøvet. I de fleste af testkørslerne var pulsperioden t_2 lang for at være sikker på, at hele processen i denne lave spændingsperiode blev logget.

Analyseresultater

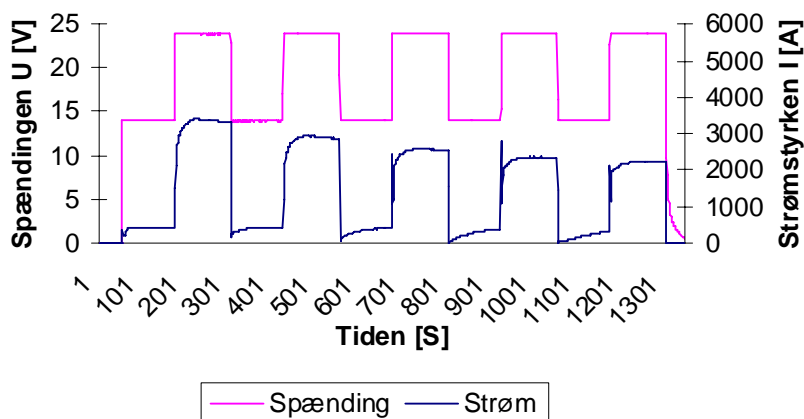
Figur 9 viser sammenhæng mellem strøm og spænding som funktion af tiden. Recoveryperiode skulle ifølge teorien ses ved, at strømstyrken i kortere eller længere perioder er lig 0 A (eller næsten 0 A), umiddelbart efter en forceret sænkning af spændingen. Ifølge tidligere studier^{1,4} vil en større forskel imellem U_1 og U_2 (høj og lav spænding) medføre en længere recovery periode.



- Figur 9, Spænding/strøm – tid kurve, testkørsel 071204031-1

I denne testkørsel var strømmen et kort øjeblik lig 0 A for herefter at stige til I_2 . Det fremgår af figuren, at recoveryperioden i dette forsøg var meget kort.

Forsøg 201004031-1



- Figur 10, Spænding/strøm – tid kurve, testkørsel 201004031-1

Sammenlignes kurveforløbene i to af de anvendte testkørsler 071204031-1, figur 9 og 201004031-1 i figur 10, som er testet ved forskellige U_1 og U_2 -værdier, dog med samme ΔU på 10 V, ses to vidt forskellige strømstyrke kurveforløb.

For begge strømstyrkeforløb ses det dog, at det er meget vanskeligt at opnå et recoverykurveforløb, svarende til det i figur 8 viste forløb. Det har vist sig, at anlægget hos Sapa Profiler A/S, uanset størrelsen af ΔU , altid sender en ganske lille strøm gennem kredsløbet.

Den viste strømstyrkeforløb i figur 10 viser en meget kort recoveryperiode på 2 – 10 sekunder. Efter et utal af testkørsler, som alle i væsentlig grad var lig de to viste, blev det konkluderet, at recoveryperioden i Sapa Profilers anlæg er meget kort. For den valgte 6063-legering, elektrolyt og temperatur ville det dannede oxidlaget kunne nå at "recover" ved pulsperioden t_2 på mellem 10 - 30 sekunder.

Forsøgsrække 3 – hovedanalyse

Formål

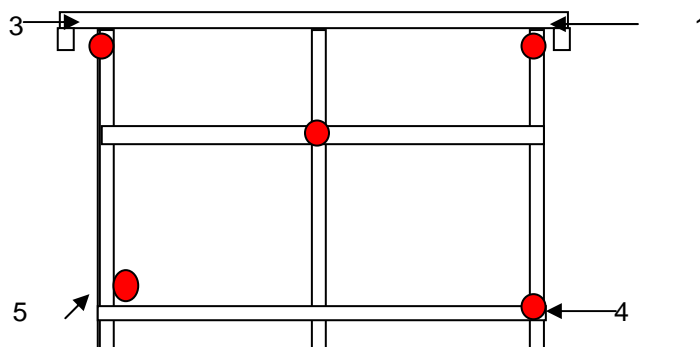
Denne forsøgsrække betegnes som selve hovedanalysen. I denne fase er der foretaget forsøg med strømstyring i stedet for spændingsstyring på kundegods.

Metodebeskrivelse

Der er kørt forsøg på 5 forskellige geometriske emner, hovedsageligt med legering 6063 (et enkelt emne dog 6005). Godsemnerne er anodiseret til en lagtykkelse på 10 – 30 μm .

Under de enkelte tests med høj strømtæthed er t_1 for de flestes vedkommende fastsat til 120 sekunder, enkelte dog 130 sekunder, mens perioden med lav strømtæthed, t_2 er anvendt med henholdsvis 10 sekunder, 20 sekunder og 30 sekunder.

Lagtykkelsen er bestemt som gennemsnittet af 5 målinger på kundegods placeret ved de røde punkter på figur 11.



• Figur 11.

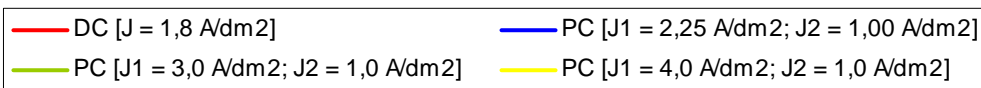
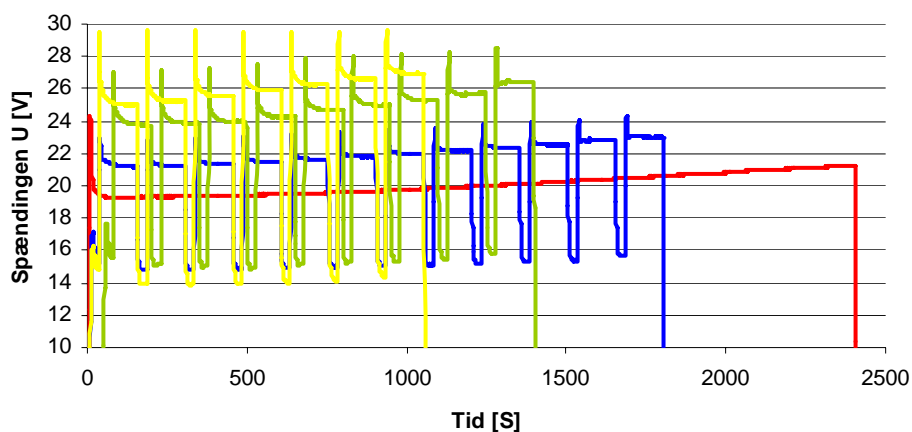
Analyseresultater

I forsøgsrække 3 er der kørt test på 170 kunderacks. Følgende registreringer er foretaget pr. test.

- Driftsspændingen (U_1 og U_2)
- Strømstyrken (I_1 og I_2)
- Pulstider (t_1 og t_2)
- Samlet areal af kundegods [m^2]
- Samlet areal af rack [m^2]
- Strømtæthed [J]
- Temperatur i elektrolyt [$^{\circ}C$]
- Ønsket lagtykkelse [μm]
- Faktisk lagtykkelse [μm]
- Energiforbrug ensretter [kWh]
- Energiforbrug køleproces [kWh]
- Procestid [s].

Ved disse tests har det vist sig, at anodiseringsanlægget kan anodisere selv ved meget høje strømtætheder uden at rack og emner brænder, når der periodevist anvendes lave strømtætheder (hvileperioder).

Figur 12 viser et eksempel på spændingsforløbet for 4 forskellige tests med konstant strømtæthed (procescyclus). Den geometriske profil, legering, mængde af gods, elektrolyt og temperatur er ens i alle tests. Eneste parameter der varierer, er strømtætheden.



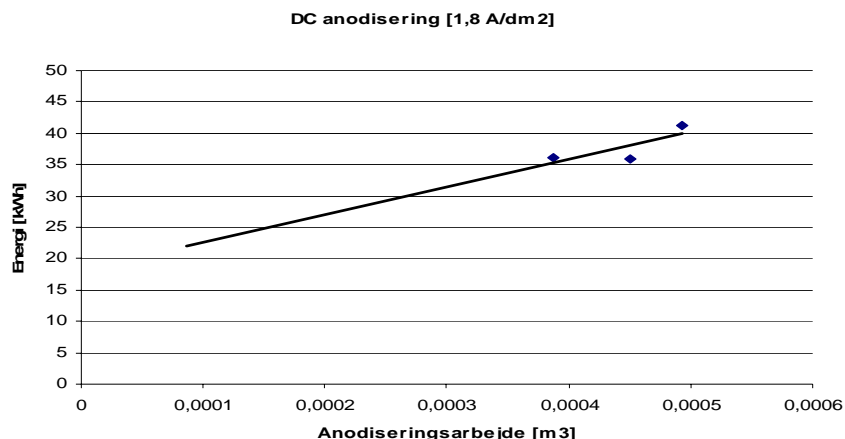
- Figur 12, Spændingskurverne for dannelse af $25 \mu m$ for de fire forskellige strømtætheder på legering 6063.

Energi: Parametervalg: Strømtæthed.

De følgende sider omhandler analyseresultater, hvor eneste variable parameter er forholdet mellem strømtæthederne J1 og J2 i pulsprocessen. I alle forsøg er pulsperioderne fastholdt til $t_1 = 130$ s og $t_2 = 30$ s.

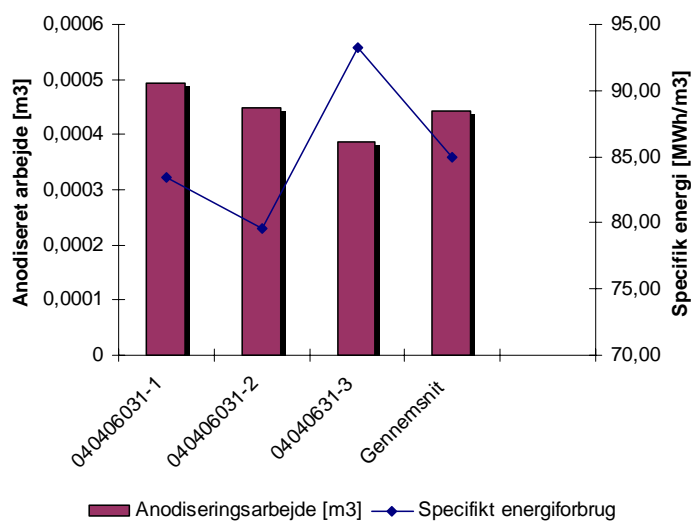
DC-styring:

Resultatet af de gennemførte tests på DC-styring, $1,8 \text{ A/dm}^2$ er vist nedenfor.



- Figur 13. Regressionsanalyse af forholdet mellem anodiseret arbejde samt tilhørende energiforbrug.

Det specifikke energiforbrug er sammenholdt med det anodiserede arbejde:



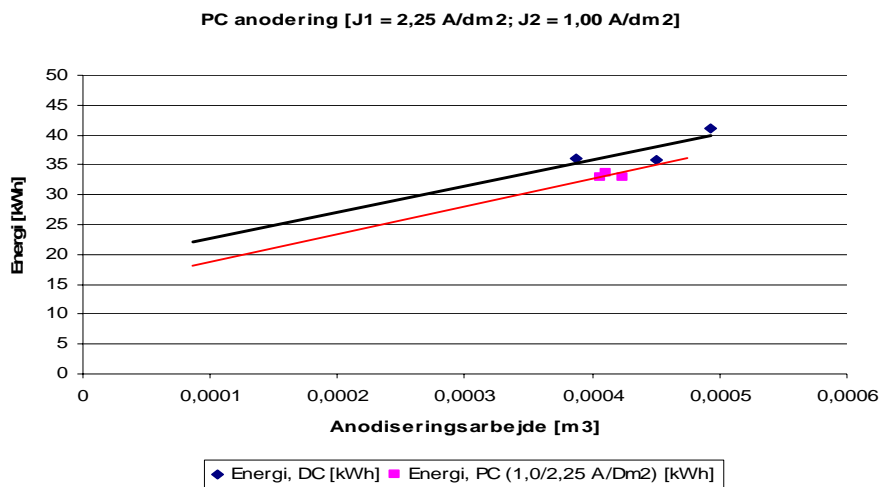
- Figur 14. Sammenhæng mellem anodiseret arbejde og specifikt energiforbrug.

Af figurerne fremgår det, at der er tilnærmelsesvis sammenhæng mellem energi og produktion. Endvidere ses det af figur 15, at for test "040406031-3" har kontaktpunktet mellem rack og "anodeklemme" ikke været optimalt.

Som gennemsnit har DC processen, ekskl. køling et specifikt energiforbrug på 87 MWh/m^3 .

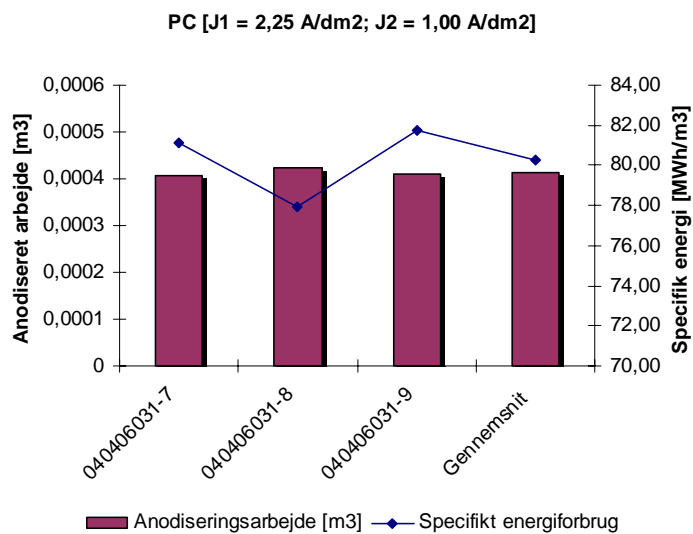
PC-styring ($J_1 = 2,25 \text{ A/dm}^2$; $J_2 = 1,0 \text{ A/dm}^2$)

Måleresultaterne af forsøg med PC-styring ved strømtætheder på henholdsvis $2,25 \text{ A/dm}^2$ og $1,0 \text{ A/dm}^2$ er vist efterfølgende,



- Figur 15: Regression for den valgte styringsform sammenlignet med referencen.

Det specifikke energiforbrug er sammenholdt med det anodiserede arbejde:

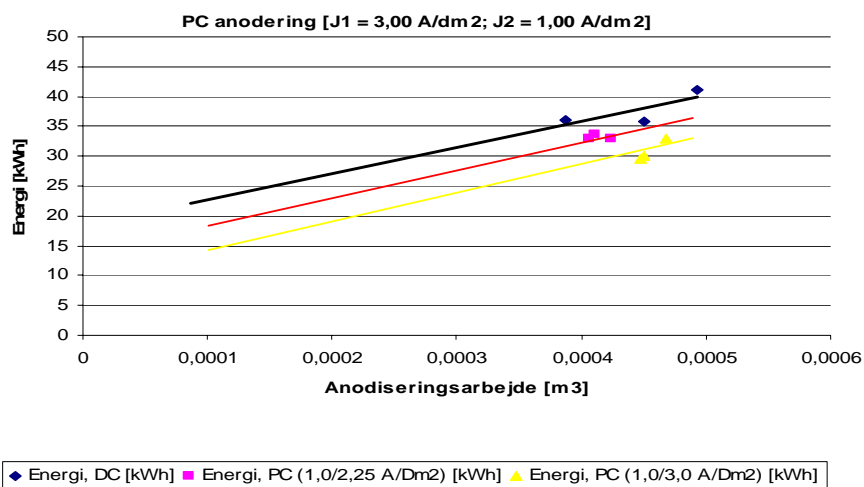


- Figur 16. Sammenhæng mellem anodiseret arbejde og specifikt energiforbrug.

Som gennemsnit har PC processen med strømtæthed $2,25 \text{ A/dm}^2$; $1,00 \text{ A/dm}^2$, ekskl. køling et specifikt energiforbrug på 80 MWh/m^3 .

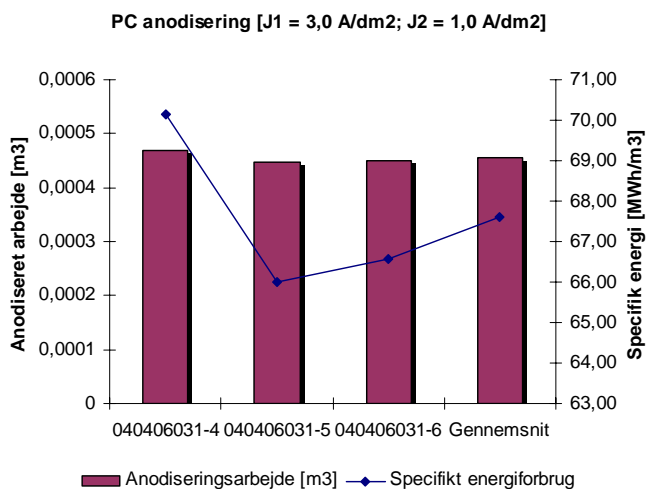
PC-styring (J1 = 3,00 A/dm²; J2 = 1,0 A/dm²)

Måleresultaterne af forsøg med PC-styring ved strømtætheder på henholdsvis 3,00 A/dm² og 1,0 A/dm² er vist efterfølgende.



- Figur 17: Regression for den valgte styringsform sammenlignet med referencen.

Det specifikke energiforbrug er sammenholdt med det anodiserede arbejde:

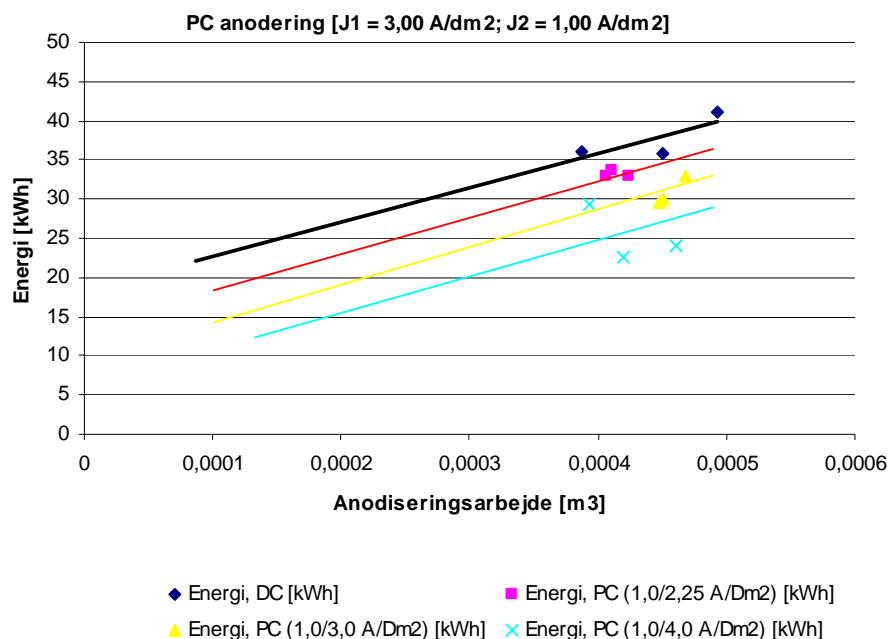


- Figur 18. Sammenhæng mellem anodiseret arbejde og specifikt energiforbrug.

Som gennemsnit har PC processen med strømtæthed 3,00A/dm²; 1,00 A/dm², ekskl. køling et specifikt energiforbrug på 67 MWh/m³.

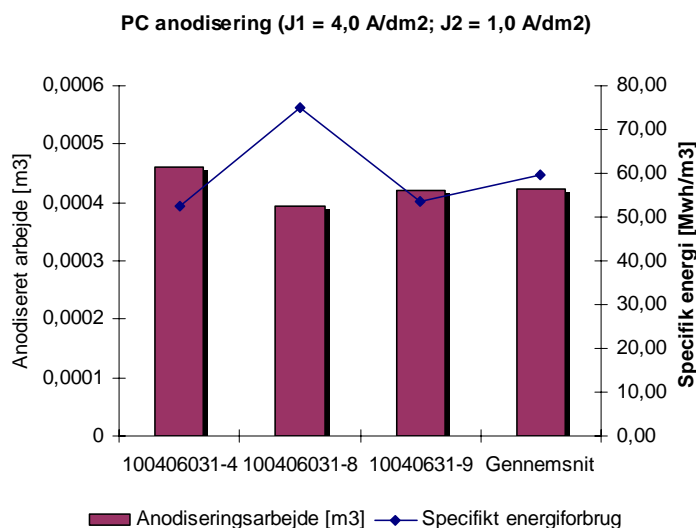
PC-styring (J1 = 4,00 A/dm²; J2 = 1,0 A/dm²)

Måleresultaterne af forsøg med PC-styring ved strømtætheder på henholdsvis 4,00 A/dm² og 1,0 A/dm² er vist efterfølgende.



• Figur 19

Det specifikke energiforbrug er sammenholdt med det anodiserede arbejde:



• Figur: 20. Sammenhæng mellem anodiseret arbejde og specifikt energiforbrug.

Som gennemsnit har PC processen med strømtæthed 4,00 A/dm²; 1,00 A/dm², ekskl. køling et specifikt energiforbrug på 60 MWh/m³.

Konklusion vedrørende strømtæthed

I forhold til variabel strømtæthed er det således muligt at reducere energiforbruget op til 31 % med J1 = 4,00 A/dm² og J2 = 1,00 A/dm².

I praksis har det dog vist sig på forsøgsanlægget, at en strømtæthed $J_1 = 4,00$ A/dm² medfører brændte profiler ved specifikke geometriske emner. Langt den største mængde kundegods, bør derfor PC-anodiseres ved strømtæthedsforholdet $J_1 = 3,00$ A/dm², $J_2 = 1,00$ A/dm². En mindre del kundegods vil kunne anodiseres med høj strømtæthed. Årsagen skal findes i, at der ved høj strømtæthed er større krav til kontaktpunkter mellem kundegodset og raket.

Det vil givetvis være muligt at operere med højere strømtætheder i andre anlæg, der er konstrueret herfor. I det anvendte forsøgsanlæg var $4,00$ A/dm² dog begrænsningen.

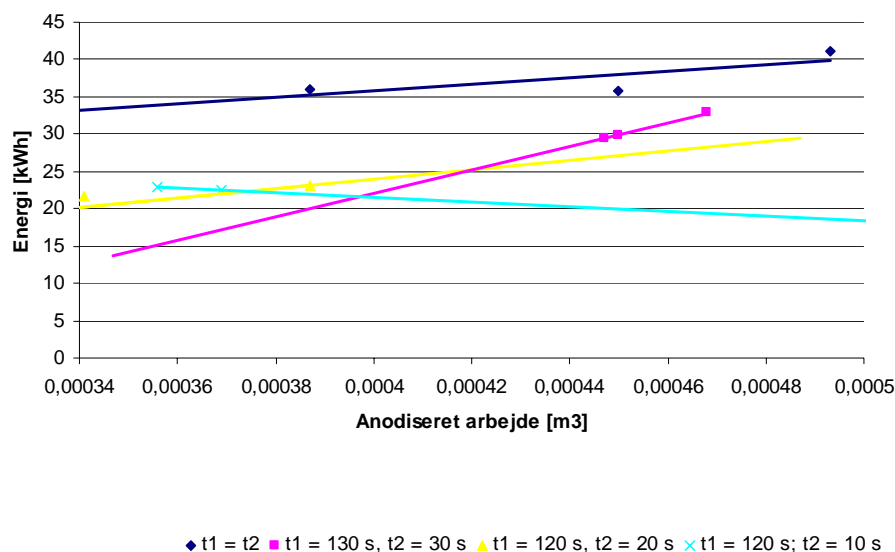
Af forsøgsmålingerne fremgik det også, at der er en nedre værdi for J_2 , idet det specifikke energiforbrug stiger når J_2 opnår værdier i størrelsen 50 A/dm².

Energi: Parametervalg: Pulstider.

I forrige afsnit blev det optimale strømtæthedsforhold identificeret ($J_1 = 3,00$ A/dm², $J_2 = 1,00$ A/dm²). I det følgende undersøges det, om forholdet mellem pulstiderne t_1 og t_2 har indflydelse på energiforbruget under ovenstående strømtæthedsforhold.

For at undersøge dette forhold er der foretaget test på ens gods med henholdsvis forholdet $t_1 = 130$ s, $t_2 = 30$ s og $t_1 = 120$ s, $t_2 = 20$ s.

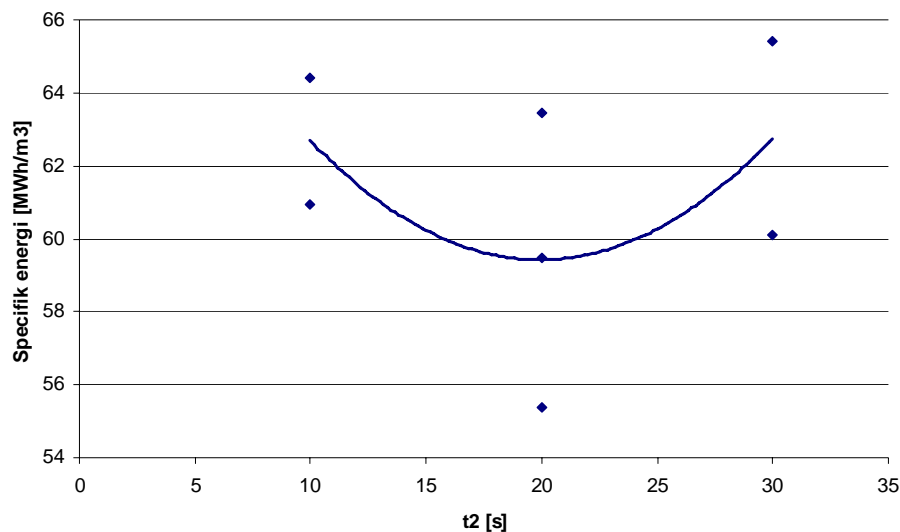
Resultatet ses af nedenstående figur:



• Figur 21: Forholdet mellem det anodiserede arbejde og det tilhørende energiforbrug.

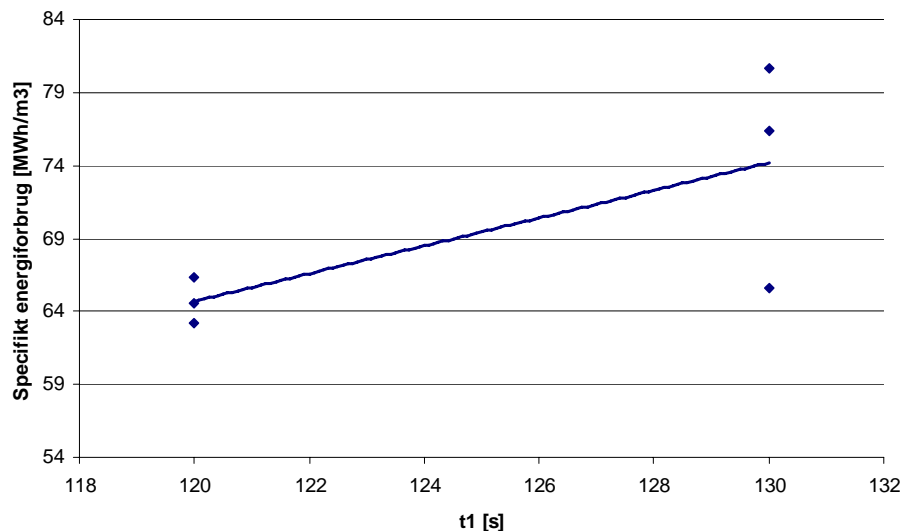
I figuren er de lineære regressioner udtryk for tangenten til den eksponentielle funktion, der udtrykker sammenhængen mellem anodiseret arbejde og tilhørende energi. At arbejde med det lineære udtryk i dette begrænsede arbejdsfelt anses dog for værende rimeligt.

For at finde den optimale pulstid t_2 er t_1 holdt konstant på 120 s, hvilket giver følgende udtryk:



• Figur 22. Specifikt energiforbrug med variable t_2 og fast $t_1 = 120$ s.

Figurens toppunkt findes ved $t_2 = 20$ sekunder, hvor det specifikke energiforbrug er 59,5 MWh/m³. Fastholdes t_2 i dette minimum opnås følgende figur ved variabel t_1 .



• Figur 23. Specifikt energiforbrug med variable t_2 og fast $t_1 = 120$ s.

Umiddelbart må det konkluderes, at så lav en pulsværdi t_1 som muligt giver lavest energiforbrug. Men eftersom pulstiden t_1 er den periode, hvor oxidlaget dannes, er der en sammenhæng mellem pulstiden og det anodiserede arbejde. Er pulstiden t_1 for lav, vil der ikke dannes den nødvendige lagtykkelse, hvorfor det specifikke igen vil stige. Imidlertid må det forventes, at pulstiden t_1 har samme matematiske parabelforløb som pulstiden t_2 , og at de her illustrerede driftspunkter er tæt på parablens toppunkt,

Energi; hovedkonklusion

De væsentligste energimæssige driftsparametre er efterprøvet. I det anvendte forsøgsanlæg er de optimale pulsparametre $J1 = 3,00 \text{ A/dm}^2$, $J2 = 1,00 \text{ A/dm}^2$ og det tilsvarende pulstider $t1 = 130 \text{ s}$, $t2 = 20 \text{ s}$.

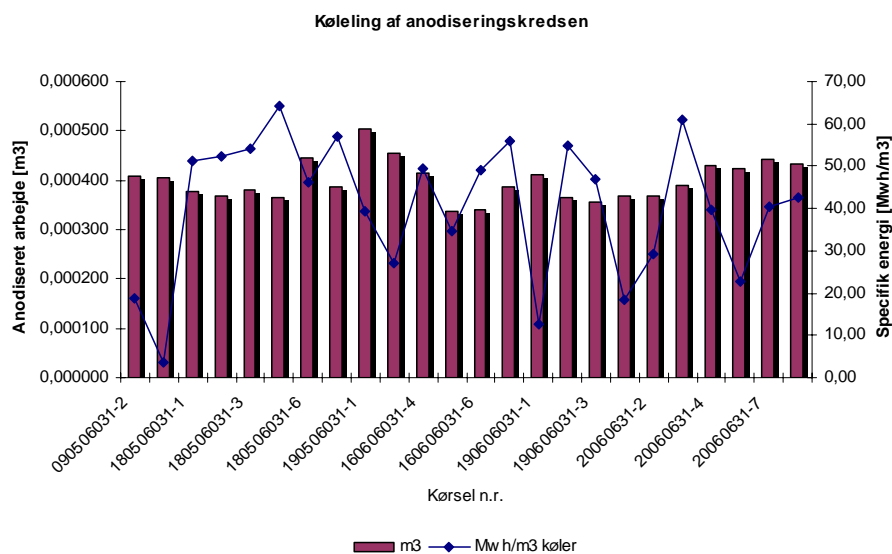
De nævnte parametre sikrer et specifikt energiforbrug på 59,5 MWh/år.

Energiforbrug til kølekreds,

Køling af elektrolytten har til formål at sikre driftstemperaturen under anodiseringen (varmeafgivende) ikke overstiger en kritisk værdi på 22 - 24 °C. Selve kølekredsen er beskrevet tidligere.

Da hele ideen med pulsanodisering er at reducere den tilførte energimængde, må det forventes, at energien til køling af anodiseringskredsen samtidig falder, og dermed effektiviserer energiforbruget yderligere. Dette er et forhold, som branchen tidligere har været tvivlende overfor. Det ligger dog udenfor kommissoriet for dette F&U projekt at udrede dette i dybden, men for at sikre, at en eventuel energiforbedring ved pulsanodisering frem for traditionel anodisering ikke blev elimineret af et højere energiforbrug til køleprocessen er energiforbruget hertil "overvåget" under forsøgene.

Under DC-drift er det gennemsnitlige energiforbrug til køling målt til 104 MWh/m³ mens energiforbruget under PC-drift varierer fra ca. 25 MWh/m³ – 63 MWh/m³.



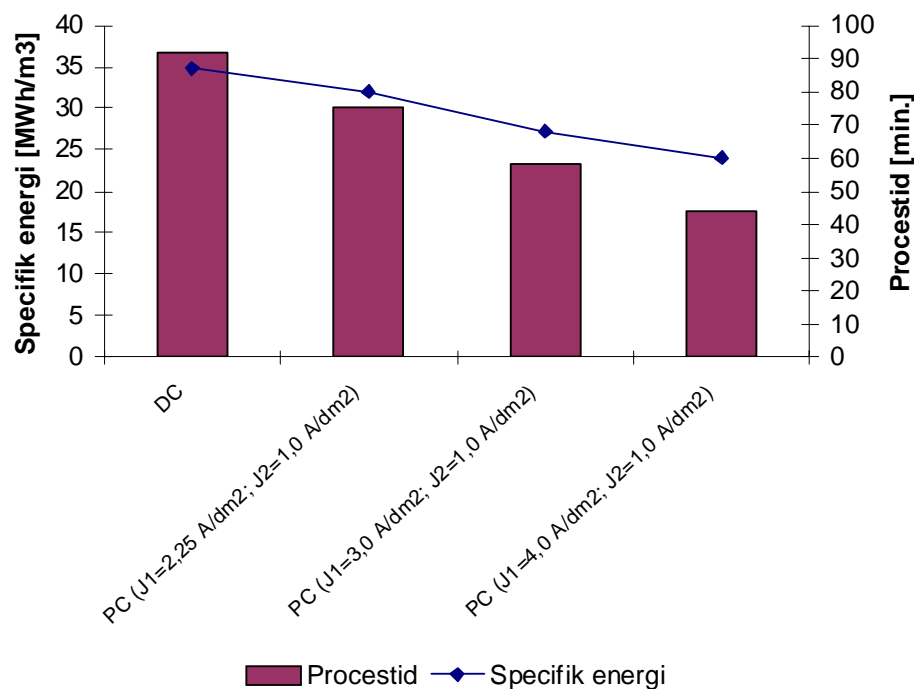
• Fig. 24: Køleenergi anvendt under forskellige PC-procesforløb.

I det følgende ses der bort fra den energimæssige gevinst der opstår i kølekredsen, men det er overvejende sandsynlig, at forbedringen udgør et væsentligt potentiale.

Procestid

En væsentlig fordel ved pulsanodisering er reduktion i procestiden. Procestiden er nedenfor vist for de forskellige kørsler, der er testet.

Når vi ser på procestiden (se figur 25), kan man se, at der er en stor reduktion i dannelsesiden for dannelsen af samme tykkelse.



- Figur 25, Procestid for de forskellige processer med fast lagtykkelse.

Det er således muligt at reducere procestiden fra 36,7 minutter til 17,5 minutter, svarende til 47 %.

Kvalitet

Egenskaberne af et aluminium oxidlag dannet med forskellige procesparametre kan varieres betydeligt. For at kunne sammenligne kvaliteten af de dannede oxidlag, har der på en stor del af testkørslerne været ophængt 10x10 cm testplader. Der er foretaget måling af lagtykkelse på godset samt foretaget salttågetest.

Lagtykkelsen er målt som beskrevet tidligere, se figur 11. Her ses en ensartethed, hvad enten godset har været pulsanodiseret eller konventionel anodiseret.

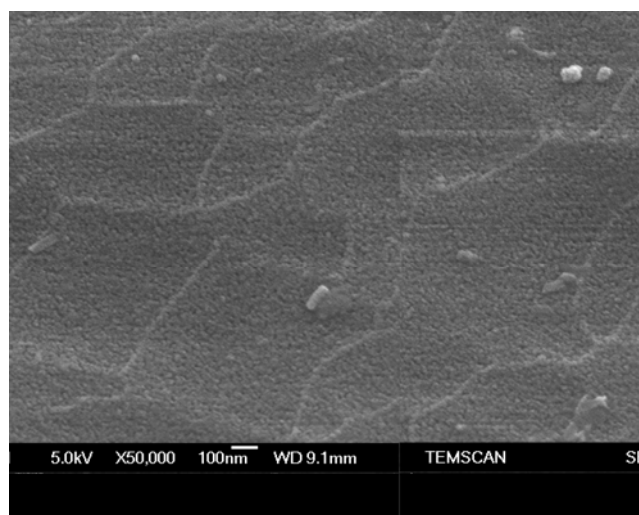
Endvidere blev en udvalgt del af testpladerne korrosionstestet i neutral salttågetest efter EN/ISO 9227 og vurderingen blev foretaget efter DS/EN ISO 10289:2001, se tabel 4. Eksponeringstiden var 1008 timer, og der blev foretaget en vurdering efter 240, 504 og 1008 timers eksponering med samme resultat. På alle emner ses hvide løbere fra indgraveret mærkning, hvor oxidlag er ødelagt.

Aluminiumoxidlag dannet på almindelige korrosionsbestandige legeringer, som 6060 og 6063, skal med en tykkelse på 20 μm kunne modstå minimum 1.000 timers neutral salttågetest⁸. Af resultatet i tabel 4 fremgår det, at alle test udviser enslydende resultater, uanset driftsform.

Emne mrk.	Visuel vurdering/Vurderingstal	Anodisering
060306031-3	10	3/1 A/dm ² – 120/30 sekunder
060306031-6	10	3/0.5 A/dm ² – 120/30 sekunder
080306031-2	10	3/0.5 A/dm ² – 120/20 sekunder
140306031-3	10	4/1 A/dm ² – 120/30 sekunder
160306031-6	10	3/1 A/dm ² – 120/10 sekunder
070406031-2	10	3/1 A/dm ² – 120/10 sekunder
100406031-3	10	3/0.5 A/dm ² – 120/20 sekunder

- Tabel 4: Vurdering af testplader efter 1008 timer i neutral salttågetest

Figur 13 viser et TEM billede af oxidlaget dannet med strømtæthed J1 = 4,00 A/dm²; J2 = 1,00 A/dm² og t1 = 120 s; t2 = 30 s. Billede er taget fra oven og afslører en meget ensartet struktur.



- Figur 26, TEM billede af testkørsel – 10040631-9.

Generelt vil hårdheden af oxidlaget øges ved aftagende temperatur, mindre aggressiv elektrolyt, kortere procestid og en højere strømtæthed. Derfor giver testen af hårdheden af de dannede oxidlag en mulighed for sammenligning af kvaliteten af samme.

Som det ses af nedenstående tabel 5 er der ikke nogen signifikant forskel i hårdhedsmålingerne, hvilket indikerer, at kvaliteten af oxidlaget forbliver uændret uanset om det er dannet ved traditionel eller puls anodisering med varierende strømstyrker. Det skal nævnes, at de målte værdier ligger højt, sammenlignet med tidligere målinger på tykkere hårdanodiserede lag¹. Disse hårdanodiserede oxidlag havde hårdhedsværdier på 441 – 575 HV0.2. I litteraturen foreslås belastningen ikke at være mere end 25 g, endog helt ned til 10 g for oxidlag med tykkelser under 25 µm.

Emne mrk.	Hårdhedsmåling	Anodisering
060306031-3	668 HV	3/1 A/dm ² – 120/30 sekunder
010306031-5	685 HV	1.8 A/dm ²
140306031-3	685 HV	4/1 A/dm ² – 120/30 sekunder
010306031-2	683 HV	2.25/1 A/dm ² – 120/30 sekunder

- Tabel 5, Vickers hårdhedsmålinger målt med HV 0.05

En anden kvalitetstest er, test i slidbestandigheden af de forskelligt dannede oxidlag. Den valgte slidtestmetode er DS/EN 12373-9 (Suga testen, ISO 8251). Denne slidtest er designet specielt til abrasive slidmålinger på anodiseret aluminium. Den testede overflade kører frem og tilbage hen over et testhjul med et abrasivt slidpapir (mesh 320). Testemnet bliver presset mod testoverfladen med en vægt på 4.9 N (500g).

Slidtesten bruger værdien W om antallet af rotationer, der er nødvendige for at fjerne 1 µm af belægningen. I alle 3 tests er antallet af cykler 1200. Oftest måles W i cykler pr. µm, men i dette tilfælde blev værdien W fundet ved hjælp af vægtmålinger, se tabel 6. Jo større værdi af W, jo bedre slidbestandighed.

Emne mrk.	Slid [cykler/mg]	Anodisering
100406031-3	267	3/1 A/dm ² – 120/20 sekunder
080306031-2	240	3/1 A/dm ² – 120/20 sekunder
150306031-3	300	4/1 A/dm ² – 120/20 sekunder
Tidligere arbejde ¹	267	1.35 A/dm ²

- Tabel 6, W målt i cykler pr. mg

Der er heller ikke her nogen signifikant forskel på de forskellige anodiseringsparametre.

Kvalitet; konklusion

Ud fra ovenstående tests kan det konkluderes, at forsøg foretaget i det specifikke anlæg hos Sapa Profiler A/S ikke fører til hverken forbedringer eller forringelser i kvaliteten, hvad enten der anodiseres traditionel eller med pulsanodisering.

Perspektivfasen

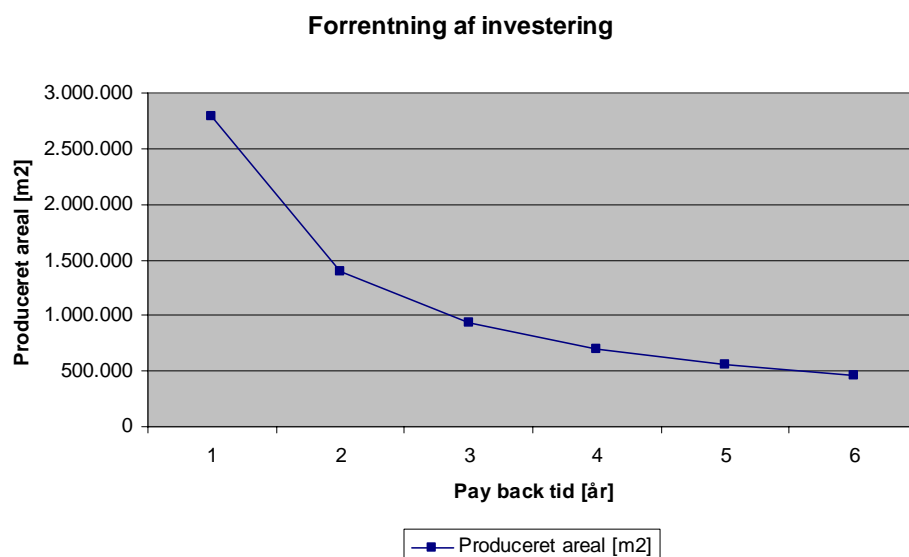
Som nævnt tidligere er perspektiverne i dette projekt lovende, idet energiforbruget er reduceres ca. 30 %, mens effektiviteten kan øges op mod 50 %. Brugen af aluminium og dermed også brugen af anodisering er stigende, både på lands- og europæisk plan. Det giver perspektiver for projektets resultater.

Energiøkonomiske perspektiver.

I den anvendte case er der investeret ca. 1.200.000 kr. i ny pulsensretter og optimering af kølekredsen. Kravet til pay back tid er typisk under 2 år i dansk industri. Men et forventet energisparepotentiale på 22 MWh/m³ anodiseret arbejde, svarende til 14.300 kr./m³ er kravet således, at der årligt skal anodiseres 2.000.000 m², såfremt kravet til pay back tiden skal være 2 år og ved en gennemsnitligt lagtykkelse på 20 µm.

I relation til den anvendte case, svarer det til årligt trehold skift på anodiseringsanlægget.

På nedenstående figur er kravet til produktionsmængden vist som funktion af tilbagebetalingstiden.



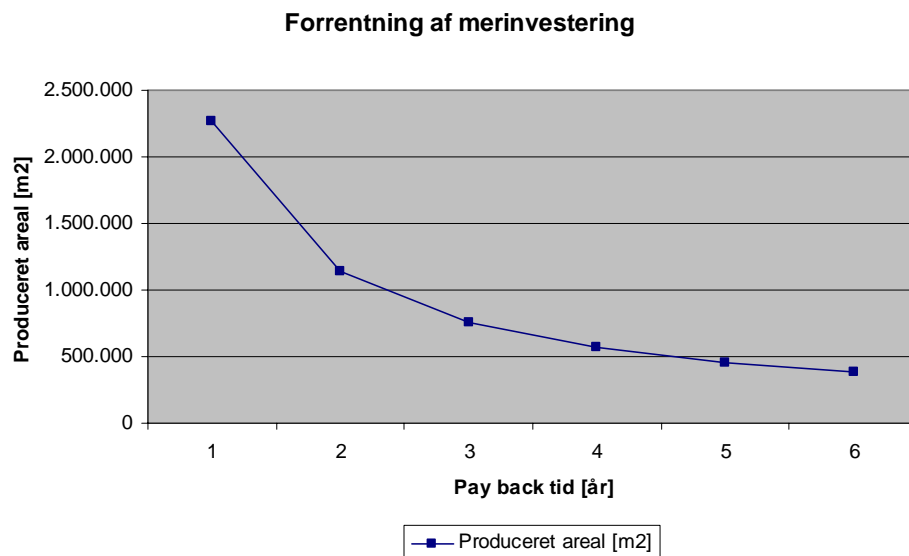
- Figur 27: Med en investering på DKK 1.200.000 er sammenhængen mellem den godsmængde der skal anodiseres og pay back tiden vist.

Etablering af nye anodiseringsanlæg:

I forbindelse med etablering af nye anodiseringsanlæg, udgør "merinvesteringen" forskellen mellem køb af en traditionel ensretter og en pulsensretter. For mindre anodiseringsanlæg (6000 A) udgør investeringen i en traditionel ensretter ca. DKK 150.000 mens den tilsvarende pulsensretter udgør ca. DKK 800.000. Merinvesteringen udgør således ca. DKK 650.000.

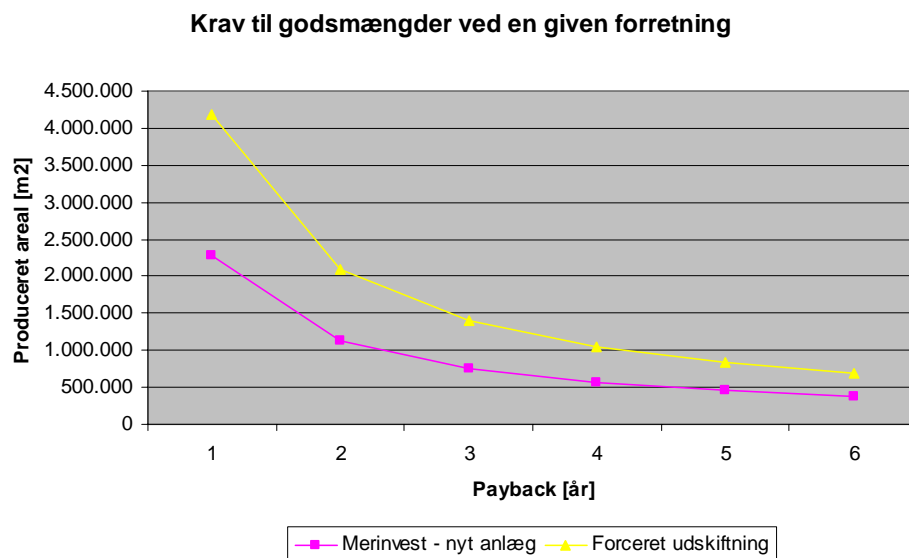
Investering i større ensrettere med ca. 18.000 A ydelse udgør ca. DKK 350.000, mens den tilsvarende pulsensrette udgør ca. DKK 1.000.000.

Kravet til godsmængden sammenholdt med forrentningskriteriet ved merinvestering i pulsanodisering er vist nedenfor:



• Figur 28:

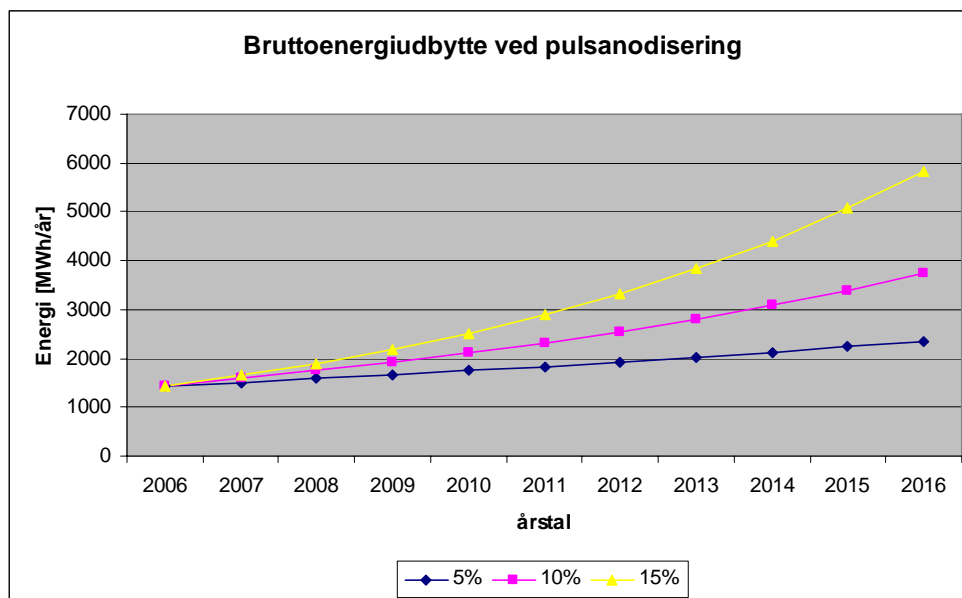
Sammenstilles de to figurer ses følgende sammenhæng:



• Figur 29:

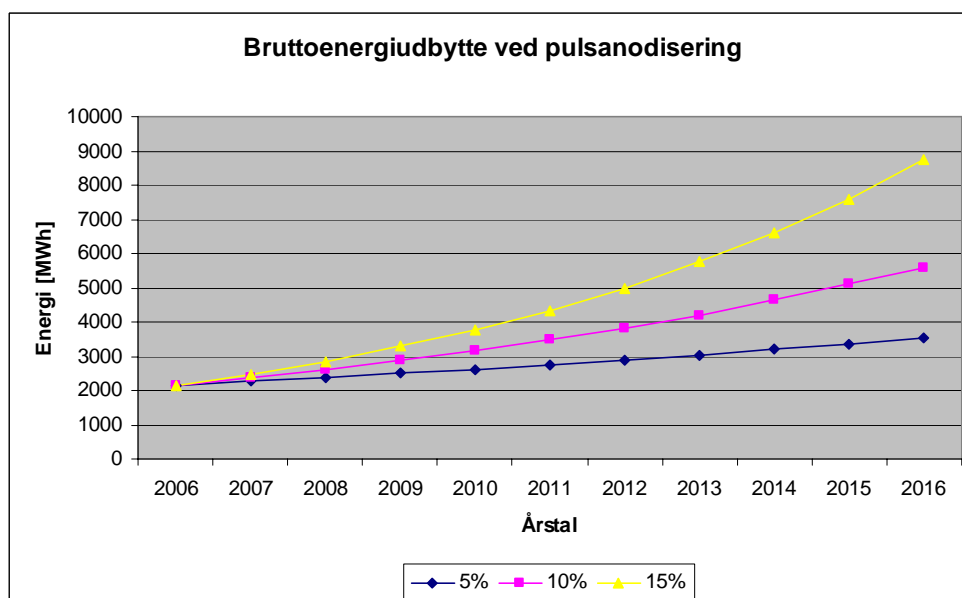
Perspektiver på sigt

Mængden af anodiseret aluminium udgør ca. 12.000 tons i 2006, og stiger ca. 3 – 5 % årligt. Ikke al gods er velegnet til pulsanodisering, men det vurderes, at ca. 40 % af produkterne vil kunne pulsanodiseres. Nedenstående figur viser energibesparelsen fremadrettet.



- Figur 30: Energibesparelse ved pulsanodisering. Udviklingen beskrevet frem til 2016 ved en stigning på henholdsvis 5, 10 og 15 %. Det antages, at 40 % af godsmængden kan pulsanodiseres.

Den samlede energibesparelse i 10 år vil således udgøre 20.000 MWh – 35.000 MWh. Hvis det er muligt at pulsanodisere 60 % af godsmængden kan følgende udvikling ses:



- Figur 31: Energibesparelse ved pulsanodisering. Udviklingen beskrevet frem til 2016 ved en stigning på henholdsvis 5, 10 og 15 %. Det antages, at 60 % af godsmængden kan pulsanodiseres.

Energi-effektivisering af anodiseringsprocesser

Den samlede energibesparelse i 10 år vil således udgøre 30.000 MWh – 52.000 MWh på landsplan.

Efterskrift

I nærværende F&U projekt er det vist, at pulsanodisering har store perspektiver for industrien. Energibesparelsen ved anodisering med puls frem for traditionel anodisering er op til 30 %, og procestiden kan reduceres med næsten 50 %, afhængig af hvilke driftsparametre der anvendes i processen.

For at udnytte dette potentiale er der imidlertid en række forhold, som bør overvejes og tænkes ind i processen.

- 1) Køleanlæggets kapacitet kan være en flaskehals, idet der i perioder kan være behov for stor kølekapacitet. Typisk er køleanlæg dimensioneret efter behovet ved traditionel anodisering. Den nye situation kræver derfor ud over øget kapacitet også en effektiv styring, således energiforbruget altid er optimalt uanset driftspunkt.
- 2) Kontaktpunkter i anodiseringskredsen skal være optimale, hvad angår størrelsen af kontaktfladen. For at kunne udnytte en høj strømtæthed uden at brænde profiler m.v. skal kontaktpunktet mellem f.eks. bom og anodeklemme slutte tæt og have en relativ stor kontaktflade.
- 3) Den største energibesparelse opnås ved strømstyring af ensretteren, hvorfor det er vigtigt ved valg af ensretter og styring at sikre sig, at den kan både strøm- og spændingsstyres.
- 4) En af fordelene ved pulsanodisering er den reducerede procestid, hvilket betyder mulighed for øget produktivitet. Imidlertid kan der opstå flaskehalse i både foregående procestrin og i den efterfølgende sealingproces. En løsning på dette mulige problem er at udvide processen med yderligere kar-kapacitet eller ændre sealingteknologi.

Referencer

- 1) Juhl, A. D., Ph.D thesis, Pulse anodising of extruded and cast aluminium alloys, 1999.
- 2) Wernick, S., Pinner, R. and Sheasby, P.G., The Surface Treatment and Finishing of Aluminum and its Alloys, 5. Ed., ASM, Ohio, 1987.
- 3) Thompson, G.E., Xu, Y., Skeldon, P., Shimizu, K., Han, S.H. and Wood, G.C., Anodic Oxidation of Aluminium, Philosophical Magazine B, Vol. 55, No. 6, 1987.
- 4) Yokoyama, K., Konno, H., Takahashi, H. And Nagayama, M., Advantages of Pulse Anodizing, Plating and Surface Finishing, July, 1982.
- 5) Colombini, C., The use of pulse rectifiers for anodising, Finishing, Vol. 14, No. 2, Feb. 1990.
- 6) Munk, F., New Developments on Rectifiers for Hard Anodizing, IHAA meeting, Apr. 2007
- 7) Murphy, J. F. and Michelson, C. E., Conf. on anodising (ADA), Nottingham, Sept. 1961.
- 8) Brace, A. W., The Technology of Anodizing Aluminium, 3th ed. Interall S.r.l, Modena, Italy.