



TEKNOLOGISK
INSTITUT

Højtemperaturs Faseskiftende Energilagre

Usikkerhed på La- gertilstand



“ – Aktiviteten er støttet af Styrelsen for Institutioner og Uddannelsesstøtte under Uddannelses- og Forskningsministeriet.

Titel:

Usikkerhed på Lagertilstand

Udarbejdet for:

| Aktivitetsplan | A3 | 2018 | MP1.4 |

Udarbejdet af:

Teknologisk Institut
Teknologiparken
Kongsvang Allé 29
8000 Aarhus C
Installation og Kalibrering

Januar 2019

Forfatter: Henrik Kjeldsen; medlæser: Jan Nielsen

Indholdsfortegnelse

1. Indledning	4
2. Opbygningen af smeltecellen	5
2.1. Kalibrering	5
2.2. Målinger	6
3. Termofysisk beskrivelse	9
3.1. Kapacitet og fyldningsgrad.....	9
3.2. Analyseteknik.....	10
3.3. Bestemmelse af fyldningsgrad.....	11
4. Måleresultater	13
4.1. Varmetab	13
4.2. Varmekapacitet	13
4.3. Smeltevarme	14
5. Usikkerhedsbudget	16
5.1. Eksempel på usikkerhedsbudget	17
6. Diskussion & Konklusion.....	19

1. Indledning

Behovet for lagring af energi bliver markant mere udtalt i forbindelse med den øgede anvendelse af sol- og vindenergi. En mulig løsning, som i princippet har stort potentiale, er at benytte højtemperaturs faseskiftende lagre, der er karakteriseret ved at udnytte den latente varme i forbindelse med faseskift (væske ↔ fast) til at lagre energi.

Lagring i faseskiftende materialer (PCM = Phase Changing Material) har flere fordele sammenlignet med mere traditionel lagring i ikke-faseskiftende materialer. Dette gælder særligt for metalliske faseskiftende materialer. For de første er energitætheden stor: I et lager baseret på aluminium vil den være 1 – 1,5 MJ/L, hvilket er sammenligneligt med energitætheden i de meget dyrere lithium batterier. For det andet er energikvaliteten relativt god pga. metallets høje smeltepunkt (ca. 600 °C for aluminiumslegeringer). For det tredje er prisen (kr/MJ) kun en brøkdel af, hvad den er for batteribaserede lagre.

En udfordring i forbindelse med PCM-lagre er at bestemme den aktuelle mængde energi lagret, fordi lagertemperaturen næsten er konstant. I denne rapport anvendes data fra testforsøg til at undersøge mængden af lagret energi. Specielt er nøjagtigheden af bestemmelsen af "lagerets fyldningsgrad" undersøgt gennem en opstillet model, forsøgsdata og analyse. Der er således opstillet et usikkerhedsbudget for fyldningsgraden efter retningslinjerne angivet i [1].

I forsøgene studeres en mindre smeltecelle indeholdende aluminiumslegeringen AlSi12 (aluminium iblandet 12 % silicium). Denne legering udmærker sig til formålet ved et smeltepunkt på ca. 576 °C og stor værdi (større end værdien for rent aluminium) for den specifikke smeltevarme [2].

Teknologisk Institut har tidligere undersøgt metoder til bestemmelse af energiindholdet lagret i faseskiftende lagre vha. modeller [3] og testforsøg [4]. Desuden deltages pt. et udviklingsprojekt som sigter mod at demonstrere anvendelsen af aluminium til et højtemperaturs-energilager [5]. Rapporten skal ses i sammenhæng med dette projekt.

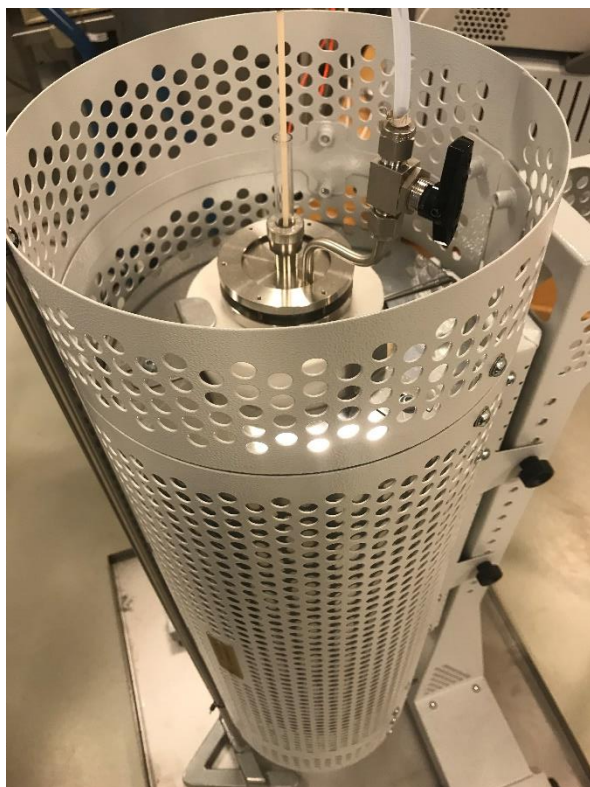
2. Opbygningen af smeltecellen

Denne rapport er baseret på forsøgsdata der er opnået med den testopstilling som er vist i Figur 1. Opstillingens princip svarer til et fikspunkt for temperaturkalibrering, som vist på skitsen i Figur 2 [6]. Det studerede faseskiftende materiale er en meget anvendt aluminiumsstøbelegering. I forsøget er der således anvendt 293 g AlSi12, som er indesluttet i en digel af højdensitets grafit. Digelen er placeret i en kvartsbeholder, der er lukket med en lufttæt flange i toppen (se figurerne). For at undgå oxidering af det faseskiftende materiale er kvartsrøret inden opvarmning evakueret for luft og fyldt med en inert beskyttelsesgas (argon). Et kvartrør i midten af opstillingen anvendes til måling af det faseskiftende materials centertemperatur (se nedenfor).

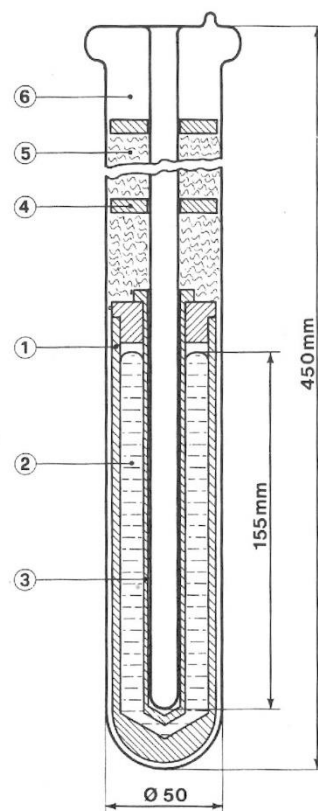
2.1. Kalibrering

Temperaturen midt i smeltecellen måles med et termoelement type S. Termospænding fra termoelement er målt og konverteret til temperatur med et *Fluke 1586A Super-DAQ Precision Temperature Scanner*. Kalibreringen af termoelementet er foretaget i 3 fikspunkter¹:

- 1) tins frysepunkt (231.928 °C),
- 2) zincs frysepunkt (419.527 °C) og

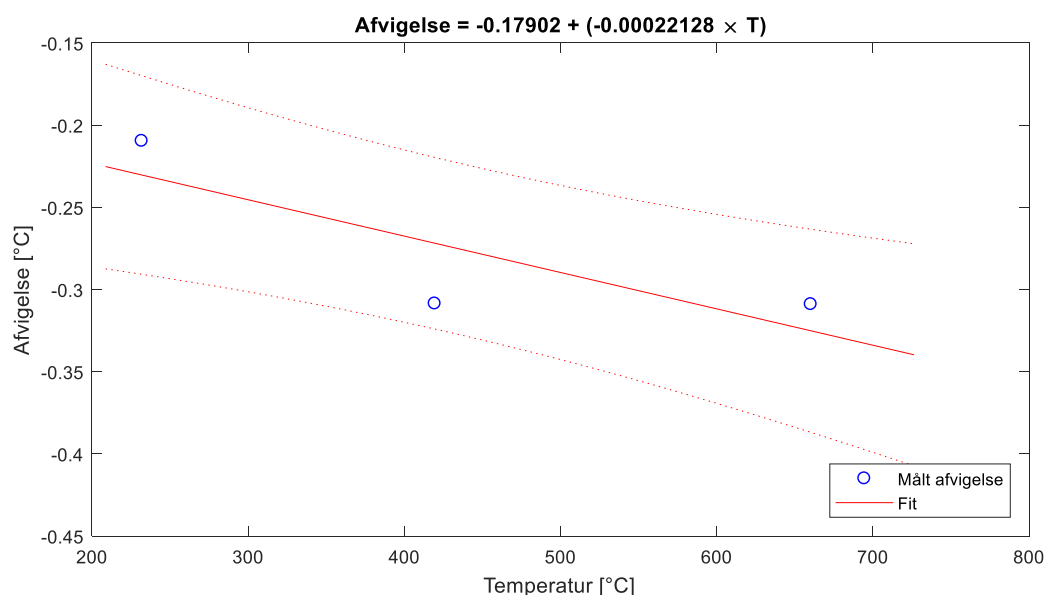


Figur 1. Foto af testovnen med smeltecelle. I midten ses et kvartsrør med termoføler og tilslutning til argon beskyttelsesgas. Selve smeltecellen med det faseskiftende materiale (AlSi12) er ikke synlig; den er udarbejdet i højdensitetsgrafit.



Figur 2. Principskitse for opbygningen af smeltecelle. Se tekst. Tallene angiver følgende: 1) Grafit digel, 2) metal, 3) kvartsbrønd til termoføler, 4) varmeskjold af grafit, 5) isolerende kvartsuld, 6) argon beskyttelsesgas. De angivne mål er omtrentlige.

¹ I denne rapport er der anvendt punktum (dvs. ".") som decimalskilletegn.



Figur 3. Kalibreringsdata for det anvendte referencetermoelement. Grafen viser temperaturafvigelsen som funktion af temperaturen. Blå cirkler: Kalibreringsdata; Rød fuldtoptrukken linje: Anvendt lineært fit; Rød stiplede linjer: Standard usikkerhed af fit.

3) aluminiums frysepunkt (660.323 °C)

Temperaturen er udregnet fra den målte termospænding, og derefter er afvigelsen til fikspunkterne beregnet, se [7]. Kalibreringsresultaterne er vist i Figur 3. Resultaterne senere i rapporten er alle korrigeret for den observerede afvigelse. I Tabel 1 er der udarbejdet et usikkerhedsbudget for termoelementet. Det kan ses at den ekspanderede usikkerhed ($k = 2$) er 0.37 °C.

Tabel 1. Usikkerhedsbudget for det termoelement som er placeret midt i den faseskiftende AlSi12-legering. Alle usikkerhedsbidrag er angivet i grader celsius. Som det kan ses er den totale ekspanderede usikkerhed 0.37 °C (angivet for $k = 2$, svarende til et konfidensinterval på ca. 95 %).

	Bidrag	Fordeling	Divisor	Følsomhed	u
Drift	0.1000	uniform	1.73	1	0.058
Kalibrering	0.3000	normal	3.46	1	0.087
Hysteres og inhomogenitet	0.2000	uniform	3.46	1	0.058
Inverse IEC584 omregning	0.0001	normal	1.00	1	0.000
Regression	0.0676	normal	1.00	1	0.068
Nulpunktskompensation	0.25	normal	2.00	1	0.125
Samlet standardusikkerhed					0.185
Ekspanderet usikkerhed					0.37

2.2. Målinger

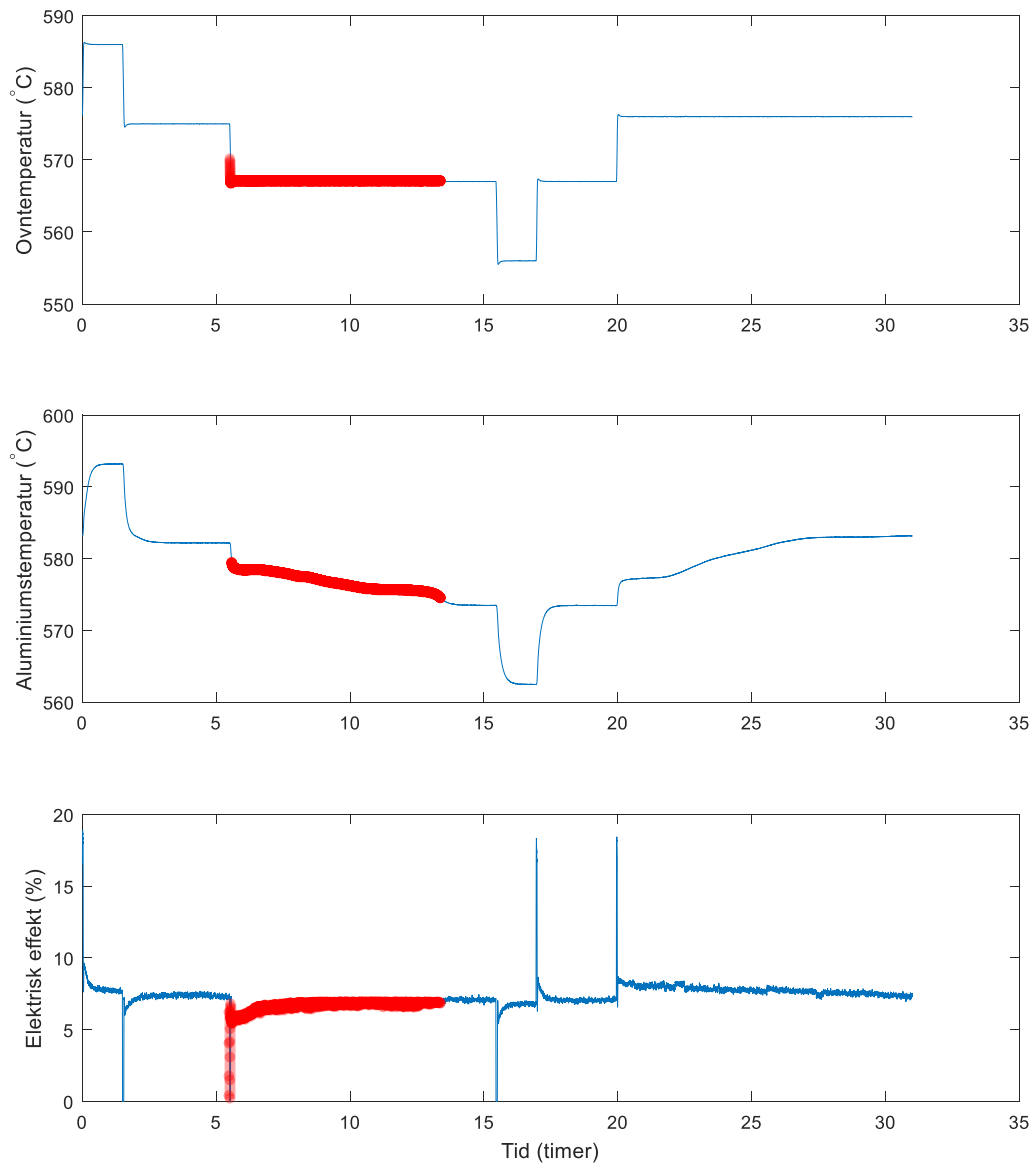
Målingerne er udført ved at styre test-ovnens temperatur omkring smeltepunktet af den faseskiftende AlSi12 legering (ca. 577 °C). Under målingerne er der foruden ovnens temperatur ("set point" samt "control value") registreret ovnens elektriske varmeeffekt (målt

i procent af ovnes maksimale effekt) og temperaturen i det faseskiftende aluminium. De nævnte parametre er logget med et tidsinterval på ca. 5 sekunder.

En typisk målecyklus er vist i Figur 4 og består af følgende faser:

1. Ekstraopvarmning (+10 °C ift. "Stabilisering i flydende fase" (punkt 2.), 0 – 1.5 time)
2. Stabilisering i flydende fase (1.5 – 5 time)
3. Størkning (5 – 15 time)
4. Ekstraafkøling (-10 °C ift. "Stabilisering i fast fase" (punkt 5.), 15 – 16.5 time)
5. Stabilisering i fast fase (16.5 – 20 time)
6. Smeltning (20 – 30 time)

Størkningsfasen er markeret med rødt i figuren.



Figur 4. En typisk målecyklus på ca. 30 timer med størkning (5 – 14 timer, markeret med rødt) efterfulgt af smeltning (20 – 30 timer). Øverst: ovntemperaturen ("set point"); midt: den målte temperatur i det faseskiftende aluminium; nederst: ovnens elektrisk varmeeffekt.

3. Termofysisk beskrivelse

Hvis der ikke sker faseskift er sammenhængen mellem den tilførte termiske energi, Q , og en temperaturændring $\Delta T = T_2 - T_1$ givet ved

$$Q = C \cdot \Delta T, \quad (1)$$

hvor C er varmekapaciteten (også kaldet "varmefylden"). Der er tale om sensibel varme, fordi tilførslen af termisk energi ("varme") er ledsaget af en temperaturændring. Varmekapaciteten kan i princippet bestemmes ud fra massen m_i af de opvarmede dele (aluminiumslegering, digel, kvartsbeholder, termoføler, ovn, ...) og deres respektive specifikke varmekapaciteter c_i ,

$$C = \sum_i c_i \cdot m_i. \quad (2)$$

Dette er dog ikke muligt i praksis for den anvendte smeltecelle, fordi de relevante parametre ikke er bestemt.

Tilførslen af termisk energi i forbindelse med faseskift er

$$Q = L_f \cdot m_{PCM}, \quad (3)$$

hvor L_f den specifikke smeltevarme og m_{PCM} massen af det faseskiftende medium (her: AlSi12). Man vil ofte komme ud for at kun en del af lageret skifter fase. Den del der er smeltet vil i denne rapport blive betegnet X_{MF} og tilsvarende den fraktion der skifter fase til smeltet, ΔX_{MF} . ($\Delta X_{MF} = -1$ svarer til en total størkning.)

I det generelle tilfælde hvor der både er opvarmning og faseskift adderes de ovenstående bidrag, og den totale tilførte termiske energi bliver

$$Q = C \cdot \Delta T + \Delta X_{MF} \cdot L_f \cdot m_{PCM}. \quad (4)$$

Virkeligheden er dog en smule mere kompliceret, fordi varmekapaciteten ikke er helt konstant, men derimod afhænger om det faseskiftende materiale er på fast eller smeltet form. Som eksempel bliver resultatet

$$Q = C(s) \cdot (T_{MP} - T_1) + L_f \cdot M_{PCM} + C(l) \cdot (T_2 - T_{MP}) \quad (5)$$

for en fuldstændig smeltning i forbindelse med opvarmning fra T_1 til T_2 via smeltepunktet T_{MP} , dvs. $T_1 < T_{MP} < T_2$. $C(s)$ og $C(l)$ er de respektive varmekapaciteter for systemet når det faseskiftende materiale er på henholdsvis fast og flydende form. Der skal nævnes at for AlSi12 gælder at $C(s) \approx C(l)$, så længe temperaturen er tæt på smeltepunktet.

3.1. Kapacitet og fyldningsgrad

Det er naturligt at definere den termiske kapaciteten af et faseskiftende lager som den termiske energi der kan frigives i forbindelse med en størkningsproces. Idet størkning og fyldning i praksis er forbundet med en temperaturændring inkluderes også et bidrag fra sensibel varme. Den samlede termiske kapacitet, $K_{absolut}$, bliver derfor

$$K_{absolut} = C(s) \cdot (T_{MP} - T_0) + C(l) \cdot (T_1 - T_{MP}) + L_f \cdot m_{PCM}. \quad (6)$$

Her er $T_0 < T_{MP}$ og $T_1 > T_{MP}$.

Et af hovedmålene med denne rapport er at kvantificere hvor meget termisk energi der på et givet tidspunkt er lagret ("lagertilstanden"). Ordet *fyldningsgrad* vil blive anvendt til at betegne den mængde energi der er lagret, udtrykt som procentdel af lagerets kapacitet. Fyldningsgraden betegnes med symbolet F . Der gælder at lageret er tomt ($F = 0\%$) når temperaturen er T_0 og det faseskiftende materiale er på fast form. Lageret er fyldt ($F = 100\%$) når temperaturen er T_1 og det faseskiftende materiale er på flydende form². Generelt kan fyldningsgraden beregnes ved

$$F = \frac{C \cdot (T - T_0) + X_{MF} \cdot L_f \cdot m_{PCM}}{C(s) \cdot (T_{MP} - T_0) + C(l) \cdot (T_1 - T_{MP}) + L_f \cdot m_{PCM}} \cdot 100\%. \quad (7)$$

I praksis kan fyldningsgraden på et givet tidspunkt bestemmes på flere forskellige måder som skitseret tidligere (se bilag i [4] samt [3]). En oplagt metode er at holde regnskab på tilført og afgivet energi ved at måle den tilførte nettoeffekt, P_{netto} . Ved at udnytte dette og definitionen i ligning (7) fås

$$F = \frac{\int_{t_0}^t P_{netto} dt}{C(s) \cdot (T_{MP} - T_0) + C(l) \cdot (T_1 - T_{MP}) + L_f \cdot m_{PCM}} \cdot 100\% + F_0. \quad (8)$$

Bemærk at konstanten F_0 inkluderet. Det er nemlig nødvendigt at have et veldefineret startpunkt. I integralet angiver t_0 tiden hvor lagerets fyldningsgrad er F_0 ; f.eks. er $F_0 = 0$ hvis lageret er tomt, dvs. $T = T_0$ til $t = t_0$. Den mest robuste procedure til at opnå et veldefineret startpunkt på er følgende. Først stabiliseres lageret ved en bestemt temperatur der er klart over eller under smeltepunktet, så lagerets fasetilstand (fast eller flydende) er veldefineret. Derefter registreres lagerets temperatur og fyldningsgraden F_0 bestemmes med ligning (7).

3.2. Analyseteknik

I de her udførte testmålinger bestemmes den tilførte energi ud fra den elektriske effekt som $P_+ \cdot t$, hvor t angiver tiden og $P_+ = P_{INPUT}$ er den elektriske effekt. Det er nødvendigt at tage højde for varmetabet til omgivelserne. Tabet afhænger af temperaturen og kan med god nøjagtighed udtrykkes som $P_0(T) = c_0 + c_1 \cdot T$, hvor c_0 og c_1 er konstanter bestemt ud fra målingerne (se nedenfor). For at generalisere beskrivelsen tages der også højde for tømning af energilageret, og idet den udgående tømningseffekt beskrives med parametere P_{OUT} bliver formelen for den samlede termiske effekt afgivet

$$P_-(T) = P_{OUT} + P_0(T) = P_{OUT} + c_0 + c_1 \cdot T. \quad (9)$$

I det her udførte målinger tømmes lageret kun vha. naturlig afkøling (dvs. varmetab), og derfor er $P_{OUT} = 0$.

Effekten er ikke konstant og følgende formel skal anvendes til at bestemme den tilførte energi:

² Bemærk at $F > 100\%$ opnås for $T > T_1$ og tilsvarende $F < 0\%$ for $T < T_0$.

$$Q = \int (P_+ - P_-) dt, \quad (10)$$

som reduceres til $Q = (P_+ - P_-) \cdot t$, hvis den elektriske effekt er konstant. I beregningerne tilnærmes integralet med en sum: $\int (P_+ - P_-) dt = \sum (P_+ - P_-) \cdot \Delta t$.

Det er ikke foretaget en absolut bestemmelse af størrelserne i dette projekt. I stedet for $Q = C \cdot \Delta T + \Delta X_{MF} \cdot L_f \cdot m_{PCM}$ benyttes således

$$\int (P_+ - P_-) dt = a \cdot \Delta T + \Delta X_{MF} \cdot b, \quad (11)$$

hvor effektangivelserne P_+ og P_- er angivet i procent af ovnens maksimale effekt (i stedet for watt), og a og b er konstanter som afhænger af henholdsvis varmekapaciteten og smeltevarmen. Med denne notation kan fyldningsgraden bestemmes som

$$F = \frac{a \cdot (T - T_0) + X_{MF} \cdot b}{a(l) \cdot (T_1 - T_{MP}) + a(s) \cdot (T_{MP} - T_0) + b} \cdot 100\%. \quad (12)$$

Her er der taget højde for at varmekapaciteten ændrer sig ved smeltepunktet, og derfor er parameteren a erstattet med $a(l)$ og $a(s)$, hvor $l = liquid$ og $s = solid$.

Analysen foregår nu i følgende trin.

1. Først bestemmes $P_-(T) = c_0 + c_1 \cdot T$ ud fra målinger hvor temperaturen er holdt konstant over en længere periode.
2. Herefter bestemmes varmekapaciteten, dvs. konstanterne $a(s)$ og $a(l)$, ved at måle effekten og samtidigt ændre temperaturen af lagermaterialet. Målingerne foretages således at der ikke forekommer faseændringer, f.eks. som $T: 620 \rightarrow 600 \rightarrow 620 \text{ }^\circ\text{C}$ eller $T: 560 \rightarrow 540 \rightarrow 560 \text{ }^\circ\text{C}$.
3. Til sidst bestemmes smeltevarmen, dvs. konstanten b , ved at ændre temperaturen således at der forekommer faseændringer, f.eks. som $T: 600 \rightarrow 560 \text{ }^\circ\text{C}$ eller $T: 560 \rightarrow 600 \text{ }^\circ\text{C}$.

I bestemmelsen af smeltevarmen tages højde for den sensible varme (varmekapaciteten), og den anvendte formel er derfor

$$\frac{\int (P_+ - P_-) dt - a \cdot \Delta T}{\Delta X_{MF}} = b, \quad (13)$$

hvor $\Delta X_{MF} = +1$ for smeltning (fyldning) og -1 for størkning (tømning).

3.3. Bestemmelse af fyldningsgrad

Ved at kombinere ovenstående ligninger, dvs. (9), (11) og (12), opnås følgende resultat:

$$F = \frac{\int_{t_0}^t (P - (c_0 + c_1 \cdot T) - P_{OUT}) dt}{a(l) \cdot (T_1 - T_{MP}) + a(s) \cdot (T_{MP} - T_0) + b} + F_0. \quad (14)$$

Her er konstanten F_0 tilføjet. Det er nemlig nødvendigt at have et veldefineret startpunkt. I formelen her angiver t_0 således tiden hvor lagerets fyldningsgrad er F_0 ; f.eks. er $F_0 = 0$ hvis lageret er tomt, dvs. $T = T_0$. Den mest robuste procedure til at opnå et veldefineret

startpunkt på er følgende. Først stabiliseres lageret ved en bestemt temperatur der er klart over eller under smeltepunktet, således at lagerets fasetilstand (fast eller flydende) er veldefineret. Derefter registreres lagerets temperatur og fyldningsgraden F_0 bestemmes med ligning (12).

Det skal bemærkes at $P_{OUT} = 0$ for målingerne beskrevet i det følgende. Der er nu muligt at bestemme fyldningsgraden i praksis ud fra denne formel.

4. Måleresultater

Ud fra målinger som dem vist i Figur 4 er størrelserne varmetab, varmekapacitet og smeltevarme bestemt.

4.1. Varmetab

Varmetabet, P_0 , er bestemt ved at måle midleffekten krævet for at holde temperaturen af smeltecellen konstant. Målingerne er foretaget over perioder af 20 minutters varighed. Resultaterne er vist i Figur 5. Resultatet er

$$P_0 = c_0 + c_1 \cdot T = -7.3752 + 0.02527 \cdot T.$$

Den tilhørende standardusikkerhed er 0.10. Ved at udføre testberegning for kortere og længere perioder viser det sig at denne usikkerhed er uafhængig af periodens varighed³.

4.2. Varmekapacitet

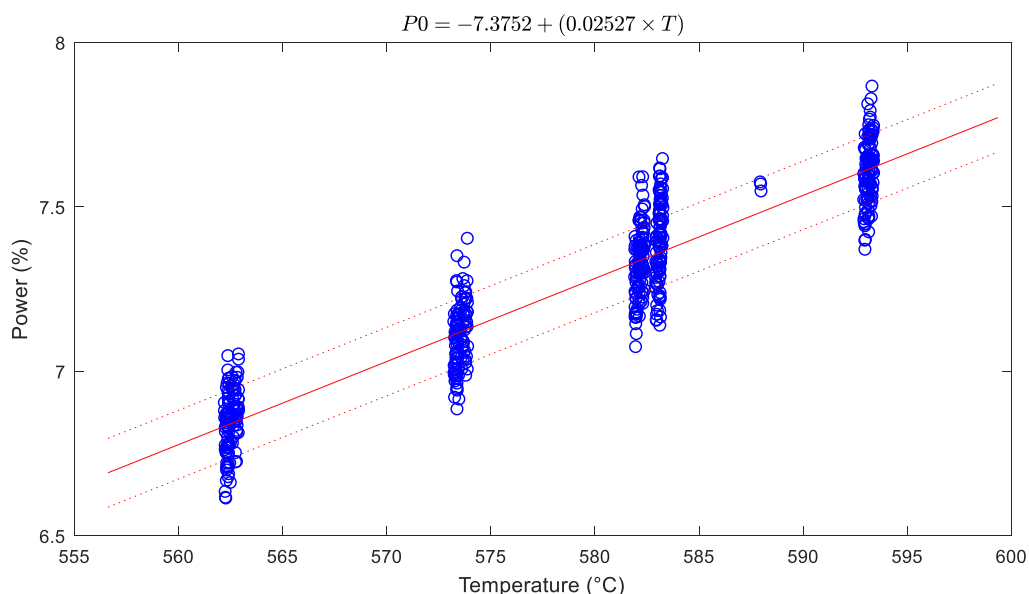
Data for varmekapaciteten er vist i Figur 6 (øverst). Den målte varmekapacitet for temperaturer under smeltepunktet er

$$a(s) = 195 \pm 6,$$

og over smeltepunktet er den

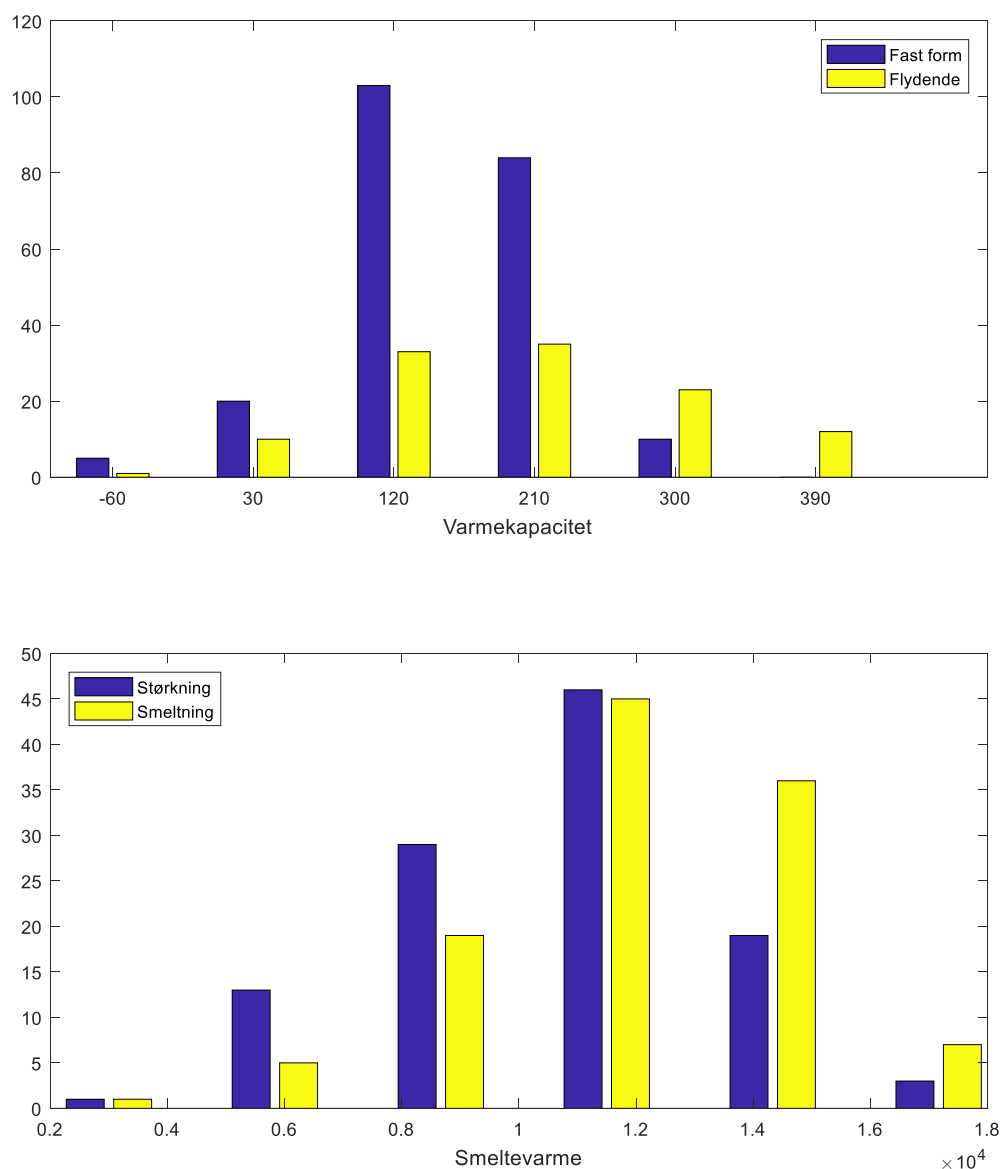
$$a(l) = 250 \pm 7.$$

Idet effekten er udtrykt som procent af ovnens maksimale effekt bliver enheden for varmekapaciteten $\% \cdot s/^\circ\text{C}$ (SI-enhed: $\text{W} \cdot \text{s}/^\circ\text{C} = \text{J}/\text{K}$).



Figur 5. Varmetabet fra forsøgsopstillingen udtrykt som funktion af temperaturen. Blå cirkler: Midleffekten krævet for at holde cellen på konstant temperatur; rød linje: lineært fit; stiplede linjer: spredning.

³ Dette er et resultat som er specielt for den studerede opstilling, som ikke umiddelbart kan generaliseres.



Figur 6. Fordeling af resultaterne for varmekapacitet og smeltevarme. De horisontale akser viser måleresultaterne, og de vertikale akser viser antal bestemmelser. Øverste: Måledata for varmekapaciteten for flydende og fast lagermedium (AlSi12). Nederst: Smeltevarmen bestemt ud fra målinger under hhv. størkning og smelting.

Det kan ses at varmekapaciteten tilsyneladende er størst når det faseskiftende materiale er på fast form, men forskellen er lille.

4.3. Smeltevarme

Data for smeltevarmen er vist i Figur 6 (nederst). Der er målt både for smelte- og størkningsprocesser. Ud fra det fundamentale princip om energibevarelse forventes de to værdier at være identiske, og det stemmer overens med at forskellen på de forskellige målte

værdier er væsentligt mindre end usikkerhederne. Ved at kombinere alle målinger fås resultatet

$$b = 12700 \pm 190.$$

Enheden for smeltevarmen er $\% \cdot s$ (SI-enhed: J).

5. Usikkerhedsbudget

Princippet bag udarbejdelsen usikkerhedsbudgettet bag fyldningsgraden er at bestemme usikkerheden på alle de parametre som indgår i formel (14), og derefter bestemmes deres betydning for den resulterende fyldningsgrad. Der er kun medtaget de usikkerhedsbidrag som er relevante for de her beskrevne testforsøg. I den mere generelle situation vil det formentligt være mere relevant at tage udgangspunkt i ligning (8) og medtage yderligere usikkerhedsbidrag.

Først betragtes nævneren, som angiver lagerets kapacitet med de anvendte enheder:

$$K_{relativ} = a(l) \cdot (T_1 - T_{MP}) + a(s) \cdot (T_{MP} - T_0) + b. \quad (15)$$

Tabel 2. Usikkerhedsbudget for lagerets kapacitet, jvf. ligning (15).

Parameter	Værdi	Usikkerhed	Fordeling	Divisor	Følsomhed	Standard-usikkerhed
$a(s)$	250	7	Normal	1	7	47
$a(l)$	195	6	Normal	1	8	50
b	12700	190	Normal	1	1	188
T_{MP}	577	5	Uniform	$2 \cdot \sqrt{3}$	48	69
T_1	570					
T_2	585					
Samlet standardusikkerhed						212

For at evaluere usikkerheden skal parametrene $a(l)$, $a(s)$, b og T_{MP} undersøges. De tre første er evalueret som type-A usikkerhedsbidrag, dvs. usikkerheden er evalueret statistisk ved at sammenligne gentagne målinger. Usikkerheden på T_{MP} er vurderet. T_1 og T_2 er fastlagt ved definition og bidrager derfor ikke til usikkerheden på fyldningsgraden. Usikkerhedsbudgettet er angivet i Tabel 2. Ved indsættelse i ligning (15) fås således⁴

$$K_{relativ} = 16000 \pm 210.$$

Tælleren i ligning (14) angiver den netto tilførte energi. Som nævnt ovenfor evalueres integralet som sum, dvs. i programkoden anvendes

$$F = \frac{(\langle P \rangle + \langle P_0 \rangle + \langle P_{out} \rangle) \cdot n \cdot \delta t}{a(l) \cdot (T_1 - T_{MP}) + a(s) \cdot (T_{MP} - T_0) + b} + F_0. \quad (16)$$

Her er n antallet af målepunkter og δt tidsintervallet mellem tilstødende målinger. Størrelserne $\langle P \rangle$, $\langle P_0 \rangle$ og $\langle P_{out} \rangle$ angiver middelværdierne for hhv. P (input effekt), P_0 (varmetab) og P_{out} (nytteeffekt). Indsættes ligning (15) fås

$$F = \frac{(\langle P \rangle - \langle P_0 \rangle - \langle P_{out} \rangle) \cdot n \cdot \delta t}{K_{relativ}} + F_0. \quad (17)$$

For at evaluere den tilhørende usikkerhed bør følgende bidrag betragtes:

- 1) Tømningseffekt er nul: $\langle P_{OUT} \rangle = 0 \Rightarrow \langle P \rangle - \langle P_0 \rangle - \langle P_{out} \rangle = \langle P \rangle - \langle P_0 \rangle$.
- 2) Usikkerheden på antallet af målepunkter, n , og tidsinterval, δt , er uden betydning.

⁴ Den anvendte enhed er (% af maksimal ovneffekt) \times (sekund).

Usikkerheden på nettoeffekten, $(\langle P \rangle - \langle P_0 \rangle - \langle P_{out} \rangle)$, er allerede bestemt i sektion 4.1. Følsomhedskoefficienten får ved at differentiere ligning (17), og resultatet er

$$\frac{dF}{d(\langle P \rangle - \langle P_0 \rangle - \langle P_{out} \rangle)} = \frac{n \cdot \delta t}{K_{relativ}}. \quad (18)$$

Bemærk at følsomhedskoefficienten er proportional med tiden, $n \cdot \delta t$.

Usikkerheden på lagerets kapacitet er angivet i Tabel 2. Følsomheden bliver

$$\frac{dF}{dK_{relativ}} = - \frac{(\langle P \rangle - \langle P_0 \rangle - \langle P_{out} \rangle) \cdot n \cdot \delta t}{(K_{relativ})^2} = - \frac{F}{K_{relativ}}. \quad (19)$$

Typisk benyttes $F = 1$ i denne formel, hvilket svarer til at lagerets totale kapacitet udnyttes.

Usikkerheden på fyldningsgraden til tiden t_0 , dvs. $F(t_0) = F_0$ er bestemt ud fra usikkerheden på kapaciteten $K_{relativ}$ (se ligning (15)) og en statistisk spredning. Følsomhedskoefficienten er 1.

5.1. Eksempel på usikkerhedsbudget

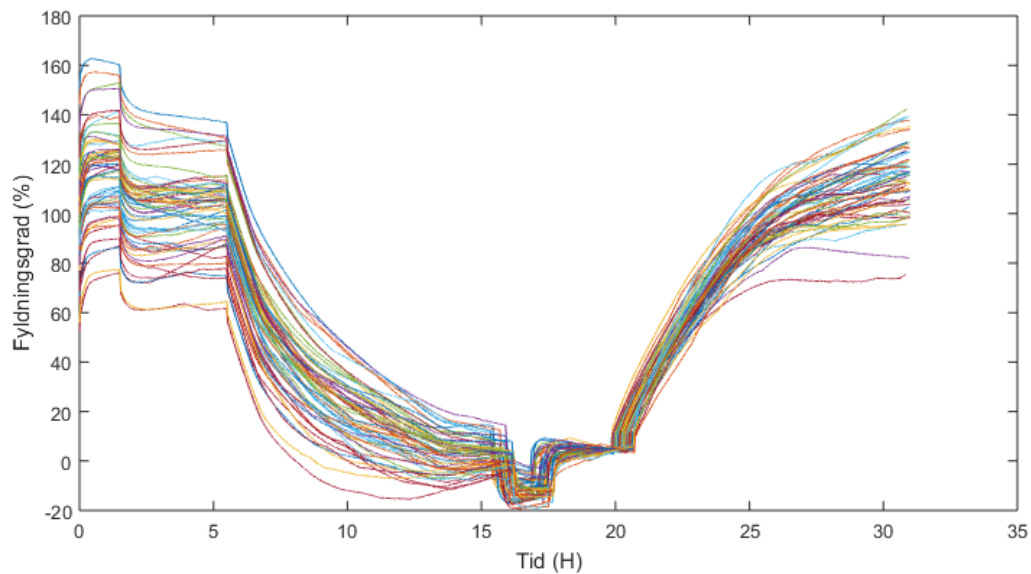
I Tabel 3 er givet et eksempel på en usikkerhedsberegning for fyldningsgraden af den studerede smeltecelle/energilagere. Beregningerne svarer til usikkerheden som opstår under en fyldning af lageret over 10 timer. For at illustrere usikkerheden er der foretaget beregninger af fyldningsgraden for en række individuelle målinger i Figur 7.

Bidragene til usikkerheden er delt i tre grupper: Den første gruppe er relateret til lagerets kapacitet, den anden gruppe til effektmålingen og den tredje til F_0 , dvs. fyldningsgraden til tiden t_0 . Den første og sidste gruppe er "faste", dvs. tidsuafhængige. Derimod er den anden gruppe – altså bidraget fra målingen af den tilførte nettoeffekt – som nævnt proportional med tiden. Dette ses af at tiden indgår i følsomhedskoefficienten i ligning (18).

Tabel 3. Eksempel på usikkerhedsbudget for AlSi12-energilagere's fyldningsgrad. I eksemplet er lageret fyldt ($F: 0 \rightarrow 100\%$) i løbet af $n \cdot \delta t = 7200 \cdot 5 \text{ sek} = 10 \text{ timer}$.

Parameter	Værdi	Usikkerhed	Fordeling	Divisor	Følsomhed	Standard-usikkerhed
Kapacitet, $K_{relativ}$	16000	210	Normal	1	$6.0 \cdot 10^{-5}$	1.3%
Effekt $(\langle P \rangle - \langle P_0 \rangle)$		0.10	Normal	1	0.13	22.5%
Start, F_0	4.5%	0.5%	Normal	1	1	0.5%
F	100%					
δt	5 sek.					
n	7200					
Samlet standardusikkerhed						23%

I det her illustrerede tilfælde er usikkerheden på bestemmelsen af fyldningsgraden relativt stor: 23%. Det skyldes at er bestemmelsen af den tilførte nettoeffekt er unøjagtig og at energilagere er lille.



Figur 7. Fyldningsgraden for den studerede smeltecelle/energilagere beregnet ved at benytte effektmålinger som den vist i Figur 4 og ligning (17). Beregningerne er normaliseret ved $t_0 = 20$ timer. Fra $t = 5$ til $t = 15$ timer tømmes lageret og fra $t = 20$ til $t = 30$ timer fyldes det igen. Der er anvendt samme tidsprofil for ovntemperaturen til alle målingerne, og spredningen af kurverne skyldes usikkerheden på bestemmelsen af nettoeffekten.

6. Diskussion & Konklusion

Der er i denne rapport foretaget en usikkerhedsanalyse på mængden af lagret energi i at højtemperaturs faseskiftende metal-energilagere. Analysen er udarbejdet for måledata fra testopstilling i form af en smeltecelle indeholdende aluminiumslegeringen AlSi12.

Mængden af lagret energi er kvantiseret i form af en fyldningsgrad, der er defineret som den lagrede energi i forhold til lagerets termiske kapacitet. Til bestemmelsen af fyldningsgraden er størrelsen af den tilførte nettoeffekt anvendt, mens lagerets termiske kapacitet er defineret ud fra summen af smeltevarme og varmekapacitet (såkaldt ikke-sensibel og sensibel varme) ved en given temperaturændring omkring faseskiftet fast \leftrightarrow flydende.

Selv om der her er beskrevet et særligt tilfælde kan metoden uden videre generaliseres. Analysen angiver metoder til praktisk bestemmelse af lagerets kapacitet og energitab. Desuden viser arbejdet at følgende punkter kræver særlig opmærksomhed.

- Referencemålinger af et energilagere tilstand (= fyldningsgrad) kan foretages ud fra en temperaturmåling på det faseskiftende materiale. En sådan måling kræver dog at lageret er i en isotherm tilstand og at det faseskiftende materiale er på en veldefineret tilstandsform (enten fast eller flydende). Bestemmelsen kan derfor ikke foretages under normal drift, dvs. under tømning eller fyldning.
- Det bidrag til usikkerheden på bestemmelse af fyldningsgraden, der stammer fra effektmålingen, vokser som funktion af tiden. Efter en periode – kortere eller længere – vil usikkerheden blive så stor at fyldningsgraden reelt ikke længere er veldefineret. Det vil derfor være nødvendigt at foretage referencebestemmelser af fyldningsgraden ud fra temperaturen med jævne tidsintervaller.
- Det skal sikres at bestemmelsen af den tilførte nettoeffekt er nøjagtig. Nettoeffekten er givet ved differensen mellem tilført energi og afgivet nytteenergi samt energitab. Bestemmelsen af hver af disse bidrager til usikkerheden. Ved præcis effektbestemmelse sikres, at lageret kan være i kontinuert drift i en lang periode, uden at det er nødvendigt referencemålinger (se ovenfor).
- Lagerets kapacitet og energitab kan bestemmes ud fra målinger af den tilførte effekt og lagerets temperatur.

Bibliografi

- [1] *JCGM 100:2008 (Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement)*. Bureau International des Poids et Mesures, 2008.
- [2] J. P. Kotzé, T. W. von Backström, and P. J. Erens, "High Temperature Thermal Energy Storage Utilizing Metallic Phase Change Materials and Metallic Heat Transfer Fluids," *J. Sol. Energy Eng.*, vol. 135, no. 3, p. 035001, 2013.
- [3] Teknologisk Institut (intern rapport), "Bestemmelse af Energiindhold i Højtemperatur Energilagring," 2016.
- [4] Teknologisk Institut (intern rapport), "Lagertilstand," 2017.
- [5] Energinet.dk, "ForskEL-projekt 2014-1-12204: Energilagring i aluminiums faseovergang." 2014.
- [6] BIPM, "Supplementary information for the international temperature scale of 1990," 1990.
- [7] A. Peruzzi, E. Mendez-Lango, J. Zhang, and M. Kalemci, *Guide to the Realization of the ITS-90*. Bureau International des Poids et Mesures Guide, 2015.