



Innovativa elsystem i byggnader – konsekvenser för brandsäkerhet

Petra Andersson, Alexandra Byström, Ragni Fjellgaard Mikalsen,
Michael Försth, Patrick Van Hees, Peter Kovács, Marcus Runefors



Brandforsk

REFERENSGRUPP

Thomas Borglin, Svensk Elstandard
Mikael Carlson, Elsäkerhetsverket
Tomas Ekman, Länsförsäkringar Västerbotten
Andreas Forsberg, MSB
Thomas Gell, Brandforsk
Joakim Grafström, Svensk Elstandard
Thomas Järphag, NCC
Jonas Hansson, Akademiska Hus
Mattias Heimdahl, Nerikes Brandkår
Björn Jernström, Ferroamp
Anders Johansson, Boverket
Magnus Karlsson, Elsäkerhetsverket
Daniel Langenbach, Nerikes Brandkår
Per Ola Malmquist, Utkiken
Mari Sparr, Länsförsäkringar
Michael Steen, Attention Technical Consultant
Henrik Tornberg, Vattenfall
Hans-Eric Zetterström, Länsförsäkringar
Simon Älgne, Vattenfall

Nyckelord

Nyckelord: brandsäkerhet, brandrisker, solenergi, solpanel, PV, växelriktare, ljusbåge, regelverk, rekommendationer, energieffektiva byggnader, Li-jonbatterier, energilager, räddningstjänst, brandbekämpning, brandforsk

Denna rapport utgör ett slutligt arbetsmanuskript för det rubricerade projektet. Den officiella projektrapporten, till vilken referens bör ske återfinns på RISE:S hemsida:

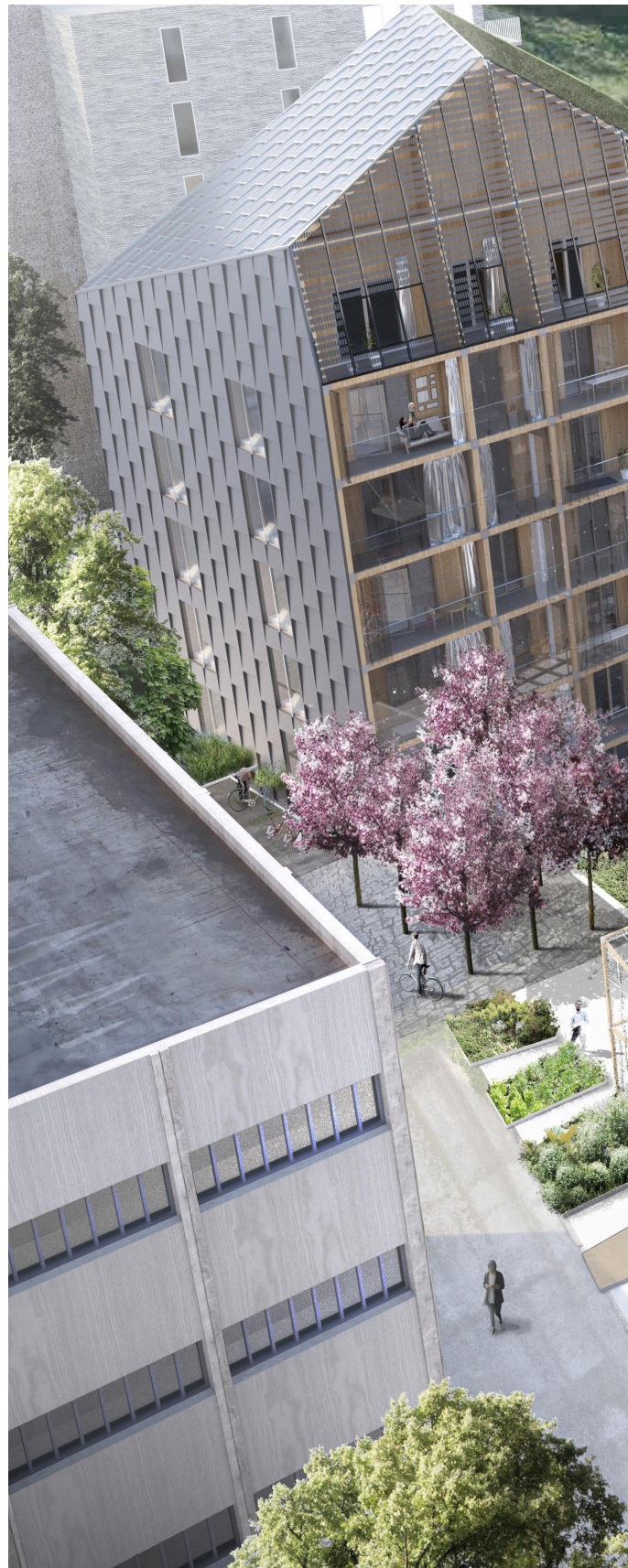
"Innovativa elsystem i byggnader – konsekvenser för brandsäkerhet"

RISE Rapport 2019:109
ISBN: 978-91-89049-34-5

www.ri.se

Bild på rapportens framsida: Stockholms hems hus Backåkra 2 i Norra Djurgårdstaden i Stockholm, Bild: Dinell Johansson

BRANDFORSK 2019:6



Brandforsk

Brandforsks verksamhet möjliggörs av stöd från olika organisationer i samhället. Läs mer om våra stödorganisationer på www.brandforsk.se

Abstract

Innovative electric systems in buildings – Consequences for fire safety

The electrical environment in buildings, especially residence buildings, is changing rapidly. One example is local generation of electricity, where solar power is becoming more and more popular. Such production of electricity also generates changes in other parts of the buildings' electrical infrastructure, such as DC-networks and in some cases storage of electrical energy in batteries. This development is to a large extent driven by the need for a sustainable solution, from a greenhouse gas perspective, for our supply of electricity, and is reinforced by governmental subsidies and increased market availability.

New electric technology may lead to increased fire risks, and the scope of this pre-study has been to investigate such risks. The method for the work has been workshop with stakeholders and experts within the field, interviews, and literature studies.

Among the studied areas it seems as if solar power in particular will give rise to major challenges in the future if no actions are taken. This is partly due to a lack of relevant regulations, but also partly due to the fact that these systems are distributed within the buildings, with numerous components that can initiate fires. Further, these components are in many cases exposed to an outdoor climate which might increase the risks for failures, and thereby also for fires.

The increased fire safety in our society, seen in a long perspective, has mainly been driven by improved regulations, often including improved test and qualification methods. A general observation in this project has been that regulations do not develop in the same pace as the technology. This is a recurrent challenge within fire safety but is particularly applicable for the technologies studied in this report where the development is very fast, and where the electrical components almost always have the potential to initiate fires. The report also concluded that applied research, so called prenormative research, within some prioritized areas is required in order to obtain the information needed to form a relevant and authoritative framework of regulations and standards. Some examples of such prioritized areas are: 1) complementing the so far relatively meager statistical data available for fire in solar power systems with investigation of such fires, or studies of already existing investigations, 2) investigation of the fire dynamics in solar power installations, building applied installations as well as buildings integrated installations, 3) studies of the creation of electrical arcs and how these can be avoided, alternatively how it can be avoided that they initiate fires, 4) create underpinning technical data for how to store electrical energy in batteries in a safe way, and 5) qualifying second-life batteries, that is used batteries, that are being used inside such battery storages.

Key words: fire safety, fire risk, solar power, solar panel, PV, photovoltaics, inverter, electric arcs, PV installation, PV module, regulations and recommendations, energy efficient buildings, Li-ion battery, energy storage, rescue service, firefighting

Innehåll

Abstract.....	2
Förord.....	6
Sammanfattning	7
1 Inledning och bakgrund	8
2 Metod.....	10
2.1 Workshops	10
2.2 Intervjuer	11
2.3 Litteraturstudier	11
3 Lokal elproduktion i byggnader	12
3.1 Solceller.....	13
3.1.1 Solcellssystem	16
3.1.2 Olika typer av solcellsinstallationer i byggnader.....	17
3.2 Exempel på tidigare översiktsstudier	19
3.3 Exempel på tidigare brandhändelser.....	19
3.4 Brandrisker	21
3.4.1 Uppkomst av brand i solcellinstallationer	21
3.4.2 Brandspridning i solcellinstallationer	22
3.4.3 Räddningstjänst	22
3.5 Regelverk	25
3.5.1 Testmetoder.....	31
4 Eldistribution i byggnader anpassad till lokal elproduktion.....	32
4.1 Ljusbågar	33
4.1.1 Parallella ljusbågar.....	34
4.1.2 Seriella ljusbågar	35
4.1.3 Åtgärder mot ljusbågar.....	36
4.2 Ramantennverkan	38
4.3 Induktion av strömmar i byggnadsdelar	38
4.4 Mättade jordfelsbrytare	39
4.5 Elförbrukare och lågspänningsnät i framtidens byggnader	39
4.5.1 Lågspännings DC-nät	40
4.5.2 Kontaktdon och -punkter vid laddning av elbilar	41
4.5.3 Uppvärmning av andra föremål vid trådlös laddning.....	41
4.5.4 Övertoner.....	42
4.6 Sammanfattning av identifierade risker	42
5 Energilagring i byggnader anpassad till lokal elproduktion	44
5.1 Batterier	45
5.2 Termiska lager	47

5.3	Power to gas	47
5.4	Brandrisker och faror	47
5.4.1	Brandrisker med batterilager	48
5.5	Inträffade bränder	50
5.5.1	Batterier.....	50
5.6	Regelverket i Sverige rörande elenergilagring.....	51
5.6.1	Regler i andra länder	55
5.6.2	Standardisering	56
6	Vanligt förekommande rekommendationer	58
6.1	För solcellsanläggningar	58
6.2	För eldistribution.....	59
6.3	För batterilager	59
7	Slutsatser	60
8	Förslag på fortsatt arbete	62
8.1	Solcellsanläggningar	62
8.2	Eldistribution.....	63
8.3	Batterilager	64
8.4	Kategorisering och prioriteringsförslag.....	66
	Referenser	68

Förord

Detta arbete finansierades till lika delar av Brandforsk (projekt nr BF17-0011), som är statens, försäkringsbranschens, kommuners och näringslivets gemensamma organ för att initiera, bekosta och följa upp olika slag av brandforskning, och Stiftelsen Länsförsäkringsgruppens Forsknings- & Utvecklingsfond (projekt nr P5/18).

Förutom rapportförfattarna har Frida Vermina Plathner och Alastair Temple från RISE samt Tomas Ekman från Länsförsäkringar Västerbotten bidragit till olika delar av rapporten vilket tacksamt erkännes.

Till projektet har knutits en referensgrupp som har bidragit till projektet främst genom deltagande i två kombinerade referensgruppsmöten/workshops samt getts möjlighet att ge synpunkter på slutrapporten innan dess publicering. I vissa fall har referensgruppsmedlemmar även stått i mer eller mindre kontinuerlig kontakt med projektet för att dela med sig av sina kunskaper. Referensgruppen har bestått av:

Thomas Borglin, Svensk Elstandard
 Mikael Carlson, Elsäkerhetsverket
 Tomas Ekman, Länsförsäkringar Västerbotten
 Andreas Forsberg, MSB
 Thomas Gell, Brandforsk
 Joakim Grafström, Svensk Elstandard
 Thomas Järphag, NCC
 Jonas Hansson, Akademiska Hus
 Mattias Heimdahl, Nerikes Brandkår
 Björn Jernström, Ferroamp
 Anders Johansson, Boverket
 Magnus Karlsson, Elsäkerhetsverket
 Daniel Langenbach, Nerikes Brandkår
 Per Ola Malmquist, Utkiken
 Mari Sparr, Länsförsäkringar
 Michael Steen, Attention Technical Consultant
 Henrik Tornberg, Vattenfall
 Hans-Eric Zetterström, Länsförsäkringar
 Simon Älgne, Vattenfall

Rapportförfattarna vill rikta ett stort tack till finansiärerna för att de har möjliggjort projektet och till referensgruppsdeltagarna för att de bidragit med sin expertis samt hjälpt till med prioriteringar så att projektet gör största möjliga samhällsnytta.

Sammanfattning

Det sker en snabb teknikutveckling i den elektriska miljön i byggnader, framförallt i våra bostäder. Ett exempel är lokal produktion av el, där solcellsinstallationer blir alltmer populära. Sådan elproduktion medför även förändringar i övriga delar av byggnaders elektriska infrastruktur, såsom DC-nät och i vissa fall energilagring i batterisystem. Utvecklingen sker till stor del som ett svar på behovet av mer hållbara lösningar, ur ett växthuseffektperspektiv, för vår elförsörjning, och förstärks bland annat av statligt stöd och ökad tillgänglighet på marknaden.

Ny elektrisk teknologi kan leda till ökad brandrisk och denna förstudie har haft som mål att undersöka denna problematik. Metoden har varit workshops med intressenter och experter inom området, intervjuer, samt litteraturstudier.

Av de studerade områdena förefaller solcellsanläggningar skapa störst utmaningar i framtiden om inget görs. Detta beror dels på bristfälligt regelverk men även på att dessa system är distribuerade i byggnaderna med flera delar som kan orsaka brand och att delar är exponerade för utomhusklimat vilket får stora konsekvenser vad gäller uppkomst av fel.

Brandsäkerheten i samhället har sett ur ett långt tidsperspektiv väsentligt förbättrats. Detta har huvudsakligen drivits fram med hjälp av ett förbättrat regelverk, som ofta inkluderat förbättrade provnings- och kvalificeringsmetoder. En generell observation i detta projekt är att regelverket inte hinner utvecklas i samma takt som tekniken. Detta är en ofta återkommande utmaning inom brandsäkerhet, men gäller speciellt för de teknikområden som behandlas i denna rapport där utvecklingen går mycket snabbt, och de ingående komponenterna nästan uteslutande har stor inneboende brandpotential. Rapporten konstaterar att för att skapa ett relevant regelverk behövs tillämpad forskning, så kallad prenormativ forskning, inom prioriterade områden för att besvara de frågor som ställs vid formulerandet av nya regler och standarder. Exempel på områden som bör prioriteras är 1) komplettering av det än så länge magra statistiska underlaget för bränder i solcellsinstallationer med olycksutredningar, och studier av redan befintliga olycksutredningar, 2) studier av branddynamiken i solcellsinstallationer, såväl byggnadsapplicerade som integrerade, och såväl tak- som fasadmonterade sådana, 3) studier av ljusbågars uppkomst och hur dessa kan undvikas, alternativt hur det kan undvikas att de ger upphov till bränder, 4) skapa underlag för säker installation av batterilager, samt 5) kvalitetssäkring av så kallade second-life batterier, dvs. begagnade batterier, som används i batterilager.

1 Inledning och bakgrund

Den elektriska miljön i våra bostäder förändras snabbt. Det handlar dels om en förändrad användning och produktion av elektrisk energi, där solcell [SEK, 2019], batterisystem (inklusive elbilar som en del av bostadens batterisystem), och eldistribution i DC-nät är specifika exempel. Det handlar också om digitaliseringen av våra hem, inklusive Internet of Things, som i framtiden troligen kommer att styra byggnadens elsystem och förbrukare. Den främsta drivkraften för denna förändring är behovet av bättre energihushållning för att minska den globala uppvärmningen [Forskningsrådet, Stortinget, 2016, Enova, 2017]. Utvecklingen av lokal elproduktion i byggnader, framförallt solcell i bostadshus, drivs framåt från flera håll. Exempelvis annonserade Ikea i maj 2019 att de börjar sälja solceller via sina nätbutiker [Ny Teknik, 2019]. I september 2019 kungjorde regeringen att de utökar investeringsstödet för solcellsinstallationer med 500 miljoner kronor [Regeringskansliet, 2019]. Speciellt solcellsanläggningar på byggnader har uppmärksammats för att de är mycket effektiva i att vända den ökande emissionen av växthusdrivande CO₂-ekvivalenter [Drawdown, 2019]. Denna drivkraft går hand i hand med vår strävan efter ett mer hållbart samhälle och det är därför av största vikt att vi proaktivt identifierar, och undanröjer, potentiella hinder för denna samhällsförbättrande utveckling. Detta projekt syftar till att minimera brandproblematiken i samband med den förändrade elektrifieringen av våra bostäder. För att bedöma vilka delområden av den nya elektriska miljön i byggnader som är mest sårbara vad gäller brandsäkerhet, och som därför bör prioriteras i fortsatt forskning och utveckling, har denna förstudie genomförts. Syftet med projektet sammanfattas i projektbeskrivningen enligt:

”... Projektet utgör en grund för fortsatta forskningsinsatser och avsikten är att detta övergripande projekt sammanställer tillgänglig kunskap och kunskapsläge samt initierar nya projekt. ...”

Projektet hade ett brett anslag men genom inledande litteraturstudier, intervjuer och diskussioner med referensgruppen fokuserades arbetet till det område som förefaller ligga närmast i tiden och potentiellt kan innebära stora brandproblem, nämligen solcellsanläggningar med tillhörande distributionsnät och batterilager.

I rapporten diskuteras brandfaror och brandrisker. En brandrisk är en sannolikhet × konsekvens av brand. Dock brukar man i dagligt språkbruk använda ordet brandrisk när brandfaror generellt diskuteras och båda ord används därför här även om det i det stora flertalet fall handlar om brandfara då statistiken än så länge är så pass begränsad att det inte går att ange en sannolikhet för att branden uppstår. En brandfara kan också vara den fara som uppstår till följd av en brand t.ex. utsläpp av toxiska gaser.

Kapitel 2 beskriver vilken metod som använts för att sammanställa kunskapsläget och prioritera bland möjliga fortsättningsstudier. Kapitel 3, 4 och 5 innehåller resultatet från litteraturstudier, intervjuer men också från de diskussioner som genomförts tillsammans med referensgruppen. Varje kapitel behandlar varsitt område inom värdekedjan för lokal

elförsörjning i byggnader, nämligen produktion, distribution, respektive lagring. Därefter följer i Kapitel 6 en sammanställning av de rekommendationer som framkommit i litteraturstudien. Kapitel 7 sammanfattar de erhållna resultaten medan kapitel 8 slutligen levererar förslag på fortsatt arbete för förbättrad brandsäkerhet.

2 Metod

Arbetet har utförts i form av

- Två referensgruppsmöten, vilka genomfördes i form av workshops. Medlemmarna i referensgruppen finns redovisade i rapportens förord.
- Intervjuer
- Litteraturstudie

Projektmöten har hållits cirka en gång per månad, via Skype.

2.1 Workshops

Det första referensgruppsmötet, tillika workshop, genomfördes 15 oktober 2018. Inför mötet hade projektgruppen sammanställt en övergripande presentation om moderna teknologier för elförsörjning i framtidens byggnader, samt övergripande identifierat delar av den brandproblematik som uppstått eller förväntas uppstå i samband med redan pågående, eller förväntad, teknikutveckling. Teknikområdena har i projektet delats upp i

- Lokal elproduktion i byggnader,
- Eldistribution i byggnader och
- Lokal lagring av energi i byggnader.

Inför mötet hade deltagarna ombetts tänka igenom följande frågeställningar, för var och ett av de tre teknikområdena ovan:

1. Vilken typ av lokal produktion, energilagring och eldistribution inom byggnader kommer att dominera utbyggnaden de närmaste 20 åren och på längre sikt?
2. Vilka nya brandrisker (t.ex. antändning, brandspridning etc.), jämfört med dagens situation, utgör den framtida lokala produktionen, lagringen och distributionen?
3. Vilka förbättringar, vad gäller brandsäkerhet, jämfört med dagens situation, utgör den framtida lokala produktionen, lagringen och distributionen?
4. Vilka nya utmaningar ställs räddningstjänsten inför (vid brandbekämpning och räddning) pga. de nya produktions-, lagrings- och distributionsmetoderna?
5. Vad finns det för olika lösningar för att motverka problemen och utmaningarna relaterade till de nya produktions-, lagrings- och distributionsmetoderna?

Mötesdeltagarna delades upp i mindre grupper för att diskutera svaren på frågorna och därefter diskuterades svaren gemensamt. Svaren och diskussionerna dokumenterades och tillställdes efteråt mötesdeltagarna via mejl. Detta inledande referensgruppsmöte hjälpte projektgruppen att få en fördjupad förståelse för vilka problem som olika aktörer identifierat eller misstänker kan komma att uppstå.

Det andra referensgruppsmötet genomfördes i projektets slutskede, 18 juni 2019, och hade som syfte att:

- Informera om uppnådda resultat
- Prioritera inriktning för projektets avslutande fas
- Prioritera och planera fortsättningsprojekt

Mötet inleddes med en presentation av dittills uppnådda resultat. Därefter följde grupparbeten där grupperna uppmanades identifiera gap som projektgruppen inte uppmärksammat, samt föreslå fortsättningsprojekt, gärna med förslag på finansiärer. Resultaten diskuterades därefter gemensamt, dokumenterades och tillställdes senare mötesdeltagarna via mejl. Detta avslutande referensgruppsmöte hjälpte projektgruppen att prioritera innehåll i denna rapport. Resultaten kommer dessutom att användas för att initiera nya projekt med så hög samhällsnytta som möjligt.

2.2 Intervjuer

Intervjuer genomfördes mellan november 2018 och juni 2019. Intervjuerna genomfördes huvudsakligen via telefon och med en semistrukturerad metod, dvs. med en gemensam mall för de olika intervjuerna men där diskussionerna tilläts anpassas efter informantens bakgrund och position. Informanterna listas nedan:

- Olof Samuelsson, Avd. för industriell elektroteknik och automation, LTH
- Fran Marquez, Avd. för industriell elektroteknik och automation, LTH
- Tomas Ekman, Länsförsäkringar Västerbotten
- Henrik Tornberg, Vattenfall
- Mikael Carlson, Elsäkerhetsverket
- Jonas Olsson, Räddningstjänsten Storgöteborg
- Thomas Borglin, SEK Svensk Elstandard
- Joakim Grafström, SEK Svensk Elstandard

Intervjuerna gav projektgruppen detaljerad kunskap om den nya teknologin och om de tekniska och regelverksmässiga utmaningar som identifierats av experter inom området. De gav på så vis direkt kunskap till projektet samt hjälpte projektdeltagarna att göra relevanta avgränsningar i litteraturstudien.

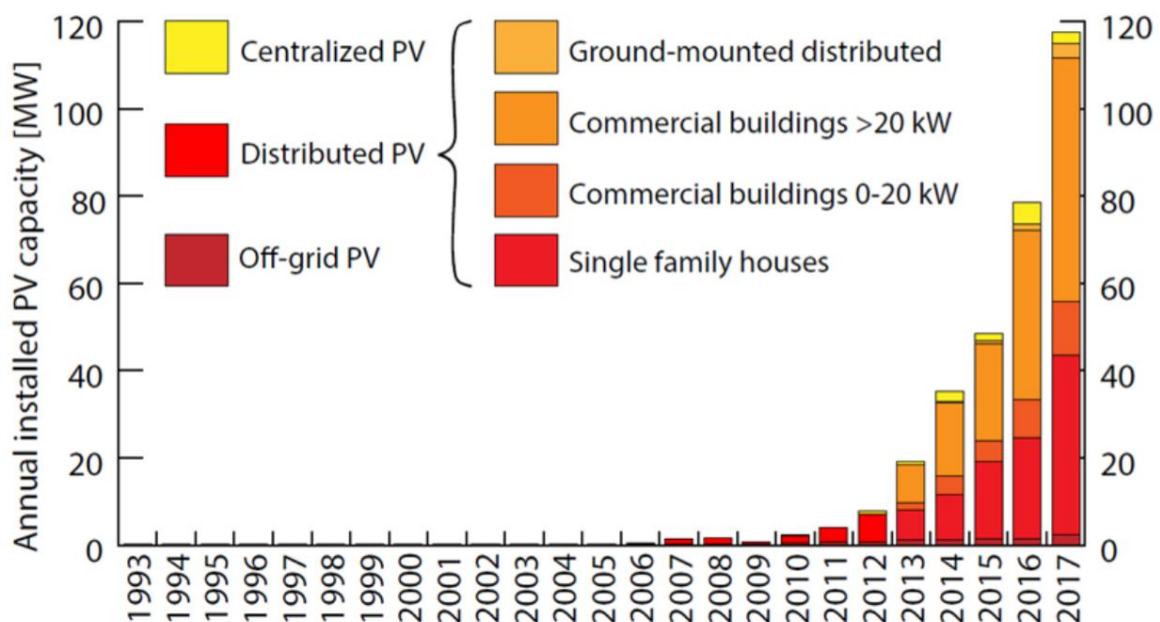
2.3 Litteraturstudier

Litteraturstudier genomfördes mellan november 2018 och september 2019. Sökningar gjordes främst via Google, via universitetsbibliotekens databaser och via olika förlags hemsidor. Litteraturstudien är baserad på publikt tillgänglig information företrädesvis i nordiska och engelskspråkiga publikationer. Dessutom studerades dokument som redan innehades av projektdeltagarna, eller som tillställdes projektdeltagarna i samband med de två referensgruppsmötena eller intervjuerna.

3 Lokal elproduktion i byggnader

Det finns många olika sätt att producera el lokalt. Med ökande fokus på behovet av förnybar energi och insikt om den absoluta nödvändigheten av hållbara lösningar så blir det mer och mer attraktivt att ta vara på hållbara tillgängliga resurser såsom vindkraft, solenergi, etc. Vilka alternativ som kommer att bli de dominerande beror på bland annat ekonomi (kostnad för installation och underhåll, vilken plats som behövs etc.), tekniska faktorer (tidsskala, effektbehov etc.) samt miljöfaktorer (faror, återanvändningsmöjligheter, etc.). Från intervjustudier framkom att den typ av lokal produktion som många tror kommer att bli dominerande i Sverige är solceller. De tar inte mer plats än själva byggnaden, så att ingen ytterligare yta behöver tas i anspråk. Teknikutvecklingen innebär också att fler integrerade solceller (sådana som integreras i fasader och tak) kommer att installeras.

Solceller har i Sverige använts sedan 70-talet för elproduktion i byggnader. Solcellsinstallationer ökar för varje år vilket framgår i Figur 1. Från 2017 till 2018 ökade antalet installerade solcellanläggningar med 67 % [Dagens Nyheter, 2019] och i stort sett alla anläggningar är nätanslutna.



Figur 1. Årlig solcellkapacitet installerade i Sverige mellan 1993-2017 [Lindahl and Stoltz, 2017].

Ökad användning av solceller innebär ett antal nya problem, både med avseende på brandsäkerhet under installation och drift, och som en komplikation under släckinsats av räddningstjänst. Solceller är mer utbredda på mer soliga platser i världen, exempelvis

Tyskland, Italien och USA, och lärdomar från dessa länder bör användas för att identifiera risker, analysera brandhändelsestatistik, regler och rekommendationer.

3.1 Solceller

Solceller kan delas upp i tre olika generationer som bygger på olika tekniker för omvandling av ljus till el. Kristallina kiselceller faller inom ramen för första generationens celler medan andra och tredje generationen bygger på tunnfilmsteknik respektive nanoteknik [Nohrstedt, 2017].

Kristallina kiselceller tillhör den första generationen solceller. Det är den vanligaste typen av solceller som installeras [Nohrstedt, 2017] och enligt statistik dominerar denna teknologi marknaden med 95% [IEA, 2014, Fraunhofer Institute, 2019] och tillväxten förväntas fortsätta [Ethan, 2019]. Denna typ av solcell har fått sitt namn från strukturen hos solcellernas kiselatomer, som är ordnade i kristaller och finns i två olika varianter: monokristallina och polykristallina. Dubbelsidiga, även kallade Bi-facial paneler är solpaneler som producerar el på bägge sidorna [Duran, 2012]. Den typen av solpaneler kan bli 20 % effektivare genom att de omvandlar både solljus mot konstruktionens framsida och reflekterat ljus mot dess baksida till elektricitet [Brown, 2012, Weaver, 2019a].

Tunnfilmssolceller består av extremt tunna skikt av material med fotoelektriska egenskaper, som placeras på glas eller plast och tillhör den andra generationen solceller. Dessa har lägre materialkostnad än kristallina kiselceller [Nohrstedt, 2017]. De påverkas inte lika negativt av värme som kristallina kiselceller [Dubey et al., 2013] och de anses fungera något bättre än kristallina kiselceller vid diffust ljus, till exempel när solen skymms av moln eller dis [Nohrstedt, 2017]. Ett exempel på tunnfilmssolceller är koppar-indium-gallium-selen (CIGS) som tillsammans med celler av kadmiumtellurid (CdTe) dominerar tunnfilmsmarknaden. De främsta tunnfilmssolcellerna idag tillverkas av galliumarsenid och har en verkningsgrad på cirka 28 procent. De är komplicerade och dyra att tillverka och används därför främst i solpaneler i rymden [Nohrstedt, 2018]. Kommersiella tunnfilmssolceller har i dagsläget en verkningsgrad på 13-18 procent [Fraunhofer Institute, 2019].

Det pågår alltså omfattande forskning på första och andra generationens solceller men också för att utveckla den **tredje generationens solceller**. I nuläget är lösningarna baserade på halvledande organiska makromolekyler, oorganiska nanopartiklar eller hybrider [Yan and Saunders, 2014]. Några exempel på tredje generationens solceller är organiskt baserade solceller (OPV – organic photovoltaic), perovskitsolceller, grätzelceller (DSSC, dye-sensitized solar cell), och kvantprickssolceller [Spooner].

Det görs stora forskningsinsatser för att få fram nya typer av solceller med lägre produktionskostnader som exempelvis tunnfilmssolceller, Grätzelceller och solkoncentrerande hybridceller. Även om några av dessa lösningar ger en lägre effektivitet per kvadratmeter än den gängse kiselbaserade solcellen så kan kostnaden för den producerade elektriciteten bli lägre genom att investeringen blir mindre [Sommerfeldt et al., 2016]. En stor utmaning för många av den tredje generationens

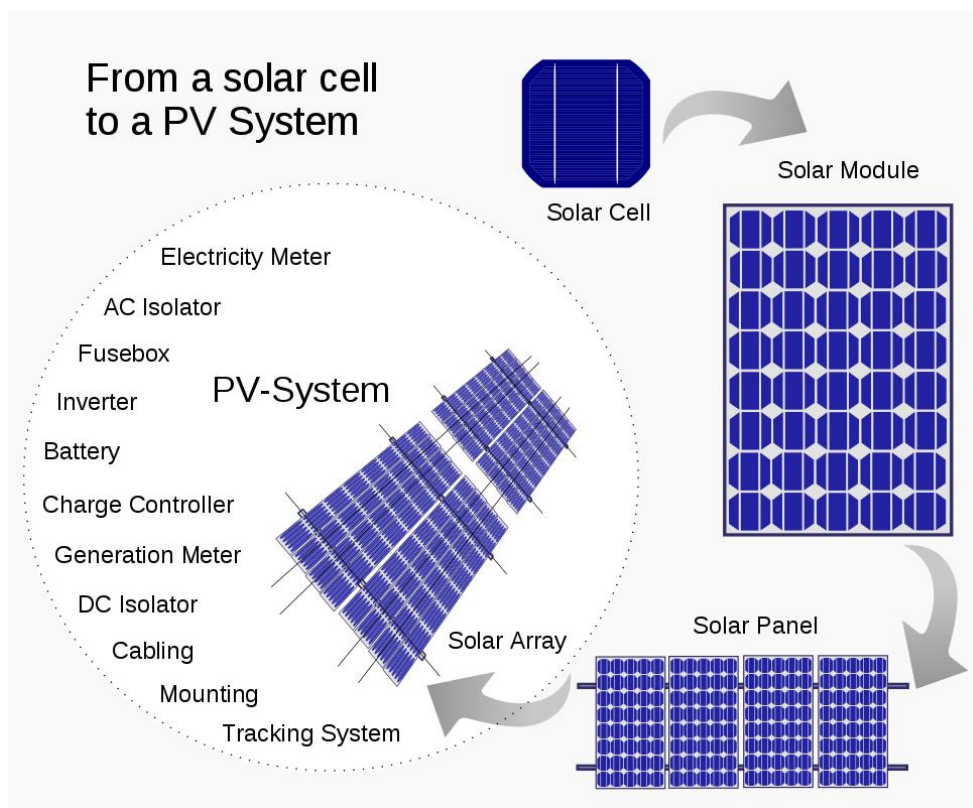
solceller är att livslängden är betydligt kortare än för kisel- eller tunnfilmsceller. En översikt över de olika typerna av solceller ges i Tabell 1.

Tabell 1 Översikt över olika typer av solceller

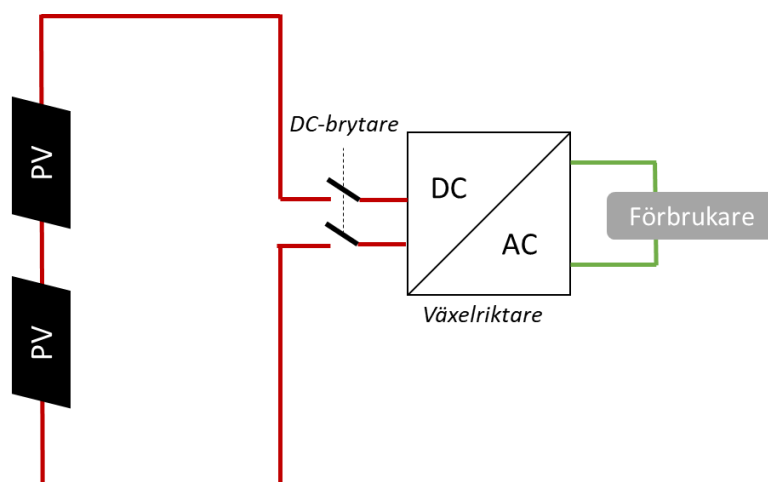
Typ av solcell	Beskrivning	Fördel	Nackdel
Kristallina	• vanligaste typen • två varianter: monokristallina och polykristallina. • finns också halvtransparenta dubbelsidiga solpaneler	• högre verkningsgrad • finns gott om kisel på jorden	• påverkas negativt av värme, vilket innebär att vid ökningen av solcellenstemperaturen sjunker modulens verkningsgrad. Hur varma solceller kan bli beror på installationen och drift. [Dubey et al., 2013] • Kräver mycket energi vid tillverkningen, och ger ett relativt stort klimatavtryck.
Tunntfilm	• finns två typer 1. <u>CdTe</u> (kadmiumtellurid) 2. <u>CIGS</u> (koppar-indium-gallium-selen)	• lägre materialkostnad och lägre klimatavtryck per producerad kWh (mindre material behövs) • påverkas inte lika negativt av värme som kristallina kiselceller. • kan appliceras på böjbara material	• innehåller miljö- och resursmässigt tveksamma ämnen som kadmium och tellur (gäller CdTe)
Tredje generationen	• organiska makromolekyler • oorganiska nanopartiklar • hybrider	• är enkla och billiga att tillverka	• problem med stabilitet • i experimentstadiet, forskning pågår • några (Perovskitsolceller) innehåller bly

3.1.1 Solcellssystem

I princip så konstrueras stora och små solcellssystem enligt samma princip. Skillnaden mellan systemen ligger framförallt i antalet solceller per modul. Solpanelerna består av små solceller, se Figur 2, som genererar likström (DC) genom elektrisk spänning mellan framsidan och baksidan av cellen. En växelriktare omvandlar därefter likströmmen till växelström (AC) som kan användas i hushållet, se Figur 3. Även lagring för senare användning kan göras, exempelvis i ett batterilager. För att förhindra att strömmen i systemet blir för hög kopplas solcellsmodulerna i serie tills de når en övre maximal spänning, normalt upp till 1000 V. Generellt sett kommer en stor solcellsinstallation att ha flera komponenter och flera anslutningspunkter som potentiellt kan leda till brand.



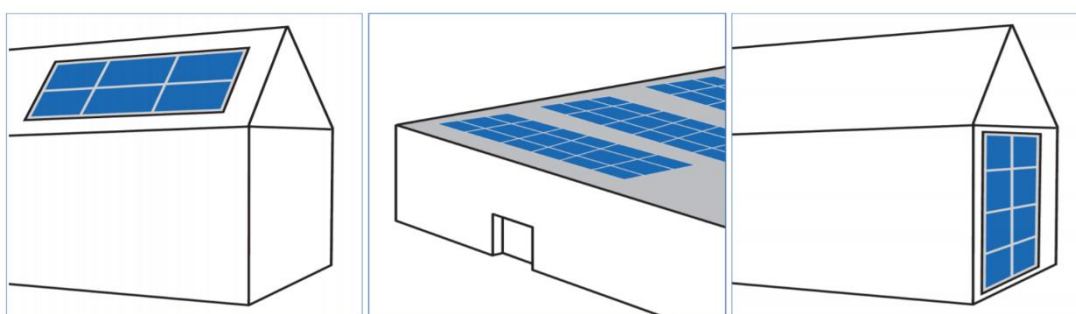
Figur 2. Från solcell till solcellsmodul. Bild från [Wikipedia].



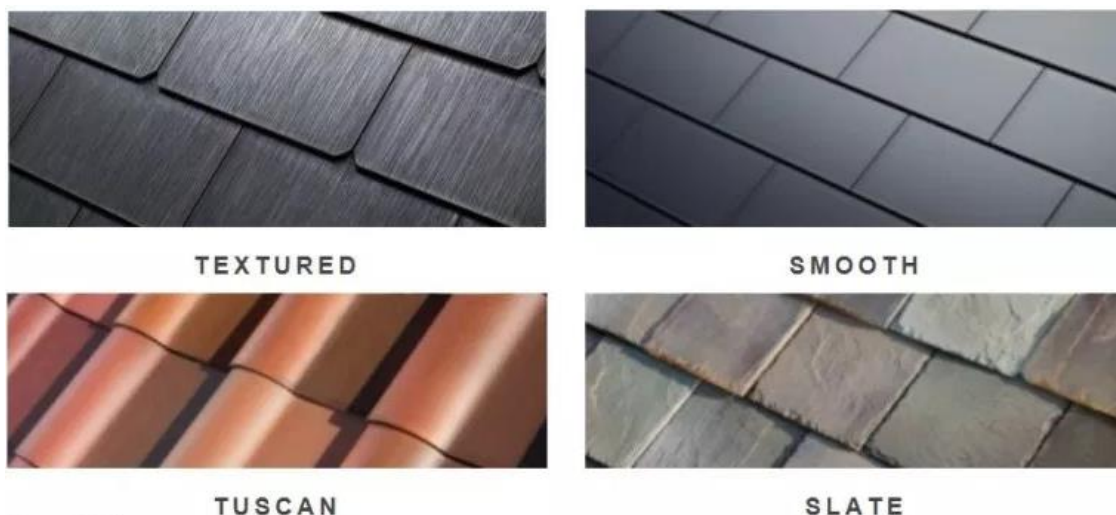
Figur 3. Enkel skiss av växelriktarens funktion i solcellssystemet. Illustration Marcus Runefors. På en mer detaljerad nivå finns även fler komponenter, se t.ex. Figur 10 och Figur 11.

3.1.2 Olika typer av solcellsinstallationer i byggnader

Solcellsinstallationer på byggnader kan delas in i två olika kategorier: byggnadsintegrerade solceller (BIPV, Building Integrated Photovaltaics) och byggnadsapplicerade solceller (BAPV, Building Applied Photovaltaics). BIPV definieras som en del av byggnadssystemet och kan vara integrerat i taket eller fasaden, se Figur 4. Exempel på takintegrerade solceller (takpannor med elproduktionsfunktion) visas i Figur 5. BIPV-systemet definieras som en solcellsanläggning som även uppfyller minst en konstruktionsfunktion, t.ex. regnskydd, termiskt skydd, solskydd, elektromagnetisk skärmning, eller bärförmåga.

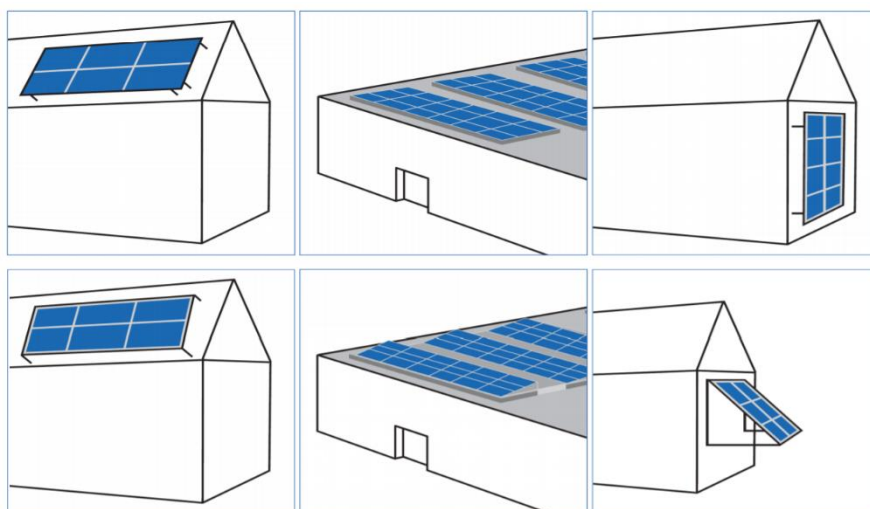


Figur 4 Byggnadsintegrerade solceller. Bild från [CFPA-E, 2018].



Figur 5 Exempel på byggnad integrerade solcellsinstallationer: olika takplattor, Tesla. Bild från [2017].

Standarden SS EN 50583-1 [SEK Svensk Elstandard, 2016] för byggnadsintegrerade solceller anger bland annat krav på alla byggnadsintegrerade moduler som innehåller glas. Standarden delar in solcellsmodulerna i kategori A-E. Klassificering beror på var i byggnaden solcellsmodulen placeras och olika krav ställs i enlighet med detta. Moduler integrerade i fasader, med åtkomst endast utifrån, faller under kategori C. Då modulen kan nå inifrån och är integrerad i till exempel ett fönster faller den under kategori D. Solcellsmoduler med funktion som till exempel solavskärmning hamnar under kategori E. BAPV panelers enda uppgift är att generera energi, se exempel på BAPV i Figur 6.



Figur 6. Byggnadsapplikerade solceller. Bild från [CFPA-E, 2018].

3.2 Exempel på tidigare översiktsstudier

BRE NSC (Building Research Establishment, National Solar Centre) har utförd flera studier om bränder i solcellsanläggningar. Studierna omfattar historiska incidenter med solcellsinstallationer samt litteraturstudier. Under ett 3-års projekt har BRE NSC bland annat sammanfattat statistik om bränder inträffade i byggnader med solcellsinstallationer i Storbritannien samt kartlagt potentiella brandrisker. Delrapporterna i Tabell 2 beskriver den hittills genomförda forskningen och rekommendationer till både solcellsindustri och räddningstjänst. Studierna är baserade på genomförda brandutredningar av aktuella incidenter, där så ansetts lämpligt. Studien baserades på ett begränsat antal bränder, 58 stycken, och gav ett antal rekommendationer för att minska brandrisker. Dessa rekommendationer inkluderar förbättringar av installationsmetoder [BRE, 2017c] och hur räddningstjänster ska hantera sådana bränder [BRE, 2017d].

Tabell 2. Sammanfattning av rapporter från BRE NSC i projekt "Fire Incidents involving Solar Power".

Kort namn	Titel
BRE P100874-1000 Issue 3.1 [BRE, 2017a]	Fire and solar PV systems – Literature review
BRE P100874-1004 Issue 2.5 [BRE, 2017b]	Fire and solar PV systems – Investigations and evidence
BRE P100874-1006 Issue 2.5 [BRE, 2017c]	Fire and solar PV systems – Recommendations for photovoltaic industry
BRE P100874-1008 Issue 2.4 [BRE, 2017d]	Fire and solar PV systems – Recommendations for fire and rescue service

De senaste åren har RISE Fire Research AS i Norge utfört flera studier inriktade mot brandsäkerhet i solcellsinstallationer [Mikalsen and Bøe, 2019, Stølen et al., 2018]. I den senaste studien [Mikalsen and Bøe, 2019] har utmaningar i samband med energieffektiva byggnader och brandsäkerhet kartlagts, med ett särskilt fokus på solceller, batterier och brandbekämpning. Flera exempel på energieffektiva byggnader i Norden presenterades. I studien framkom att samverkan mellan olika nya tekniska och energieffektiva lösningar kan påverka brandsäkerheten när det gäller antändning, brandutveckling, branddynamik, evakuering och brandbekämpning. Dessutom framkom att branschen ofta anser att regelverk inte hinner utvecklas i samma takt som nya lösningar lanseras.

3.3 Exempel på tidigare brandhändelser

Med ökande antal solcellsinstallationer har antalet bränder också ökat. Bränder i solcellsinstallationer anses dock som en sällsynt händelse. Detta är en av anledningarna till att USA saknar tydlig statistik över bränder som inträffat i solcellsanläggningar, eftersom denna typ av bränder klassificeras som "övrig" i National Fire Data Center [Weaver, 2019b]. Trots allt går det att identifiera stora bränder med solcellsmoduler. Butikskedjan Walmart i USA har installerat solcellspaneler i över 240 anläggningar. Den senaste branden inträffade 2018 och totalt har Walmart registrerat 7 bränder relaterade

till sina solcellsinstallationer [O'Kane, 2019, Supreme Court of the State of New York, 2019]. Liknande erfarenheter har gjorts i Danmark där ett mycket förmånligt statligt stöd fanns att tillgå under en mycket begränsad tidsrymd 2011-2012. Detta ledde till en mycket kraftig ökning av antalet installationer liksom en ökning i incidenter relaterade till bristande produkt- eller installationskvalitet [Katic, 2019].

De italienska myndigheterna har haft ett incitamentsprogram för att uppmuntra användning av solceller. Detta bidrog till en ökning av solcellsinstallationer på kort tid, och det finns indikationer till att detta ökade antal bränder [Fiorentini et al., 2016].

En rapport från BRE (Building Research Establishment) i Storbritannien sammanfattar totalt 58 olika brandhändelser med solpaneler inblandade under 2010-2016 [BRE, 2017b]. För dessa 58 händelser var brandorsaken fördelad enligt:

- 42 bränder orsakades av solcellsinstallationer
 - o 17 – stora bränder, med stora skador på fastigheter
 - o 16 – lokal brand, gick att stoppa och kontrollera med lokal skada av byggnader och solpanelsinstallationer
 - o 9 – lindring skada (rök, inte utvecklad till skadlig brand))
- 10 bränder orsakades inte av solcellsinstallationer, men dessa installationer bidrog till bränderna
- 6 bränder hade okänd orsak

I rapporten identifieras tre olika kategorier på vad som kunde vara fel.

- fel i systemdesign
- fel i själva produkterna (produktdesign eller kvalitet). Vissa komponenter var anpassad till DC enbart genom att ändra design av existerande AC-brytare.
- fel vid installationen. Exempelvis var i 9 fall av 58 DC-isolatorn fel installerad. Ett exempel är att felaktigt installerade isolatorer i flera fall var fyllda med vatten.

Mer om fel i delkomponenter och fel vid installationen som kan orsaka brand återfinns i kapitel 4.

I Sverige har flera bränder inträffat de senaste åren. Ett exempel på en sådan brand inträffade 2016, där ljusbågar och kortslutning i likströmskablar orsakade branden som uppstod på grund av slarvfel och okunskap i samband med installationen. Efteråt konstaterades att installationen inte hade följt svensk standard SS 436 40 00 utgåva 2, kapitel 712 Kraftförsörjning med elektriska solceller [Andersson-Carlin, 2016]. I detta fallet hade själva solcellsanläggningen installerad på taket brunnit, utan stora konsekvenser för byggnaden i övrigt.

Ett annat exempel är branden i en solcellsanläggning på en villa utanför Borås 2018, se Figur 7. Branden orsakades av en felaktigt utförd kontaktering av en DC-kabel på taket vilket ledde till överhettning i kontakten och antändning av takmaterialet [Espeling, 2019].



Figur 7. Brand i solcellsanläggning på villatak.

RISE Fire Research AS i Norge har gjort en brandutredning om branden i ASKO-byggnaden och hur de brandrelaterade utmaningarna från solcellinstallationen hanterades [Stølen et al., 2018]. Räddningstjänsten kände till att solcellsanläggningen var installerad på taket. Branden började inuti byggnaden och spred sig därefter till taket där solcellsanläggningen fanns. Även om inte själva anläggningen orsakade branden så komplicerade den likväl räddningsinsatsen, primärt i form av ännu ett riskmoment som räddningstjänsten behövde beakta.

3.4 Brandrisker

Solcellsinstallationer medför flera utmaningar som måste beaktas såväl vad gäller användning, brandspridning och släckning [Stølen et al., 2018].

3.4.1 Uppkomst av brand i solcellinstallationer

Utmärkande för solcellsinstallationer är att de innehåller många elektriska komponenter som är potentiella brandkällor [Stølen et al., 2018]. Detta inkluderar komponenter i själva solcellsmodulen, i likströmsanläggningen såväl som i växelriktaren [Laukamp et al., 2013, Alam et al., 2015]. Vanliga typer av fel är ljusbågar, jordfel och överslag mellan ledare [Alam et al., 2015], se även avsnitt 4.1. Speciellt ljusbågar kan initiera bränder eftersom de kan ge upphov till mycket höga temperaturer, flera tusen grader. Fackmannamässig installation och komponenter av hög kvalitet är åtgärder som reducerar risken för fel och därmed för bränder.

Det är relativt svårt att kvantitativt bedöma hur stort problemet med bränder i solcellsinstallationer är eftersom det statistiska underlaget är litet och inhämtat med olika metoder i olika länder. En noggrann studie av bränder i solcellsinstallationer skulle ge bättre kunskap om hur sådana bränder startar.

3.4.2 Brandspridning i solcellinstallationer

Solcellsmoduler består oftast av obrännbart material såsom metall och glas, och en liten mängd brännbara material, såsom plast i isolering och kablar [Kristensen et al., 2018]. Värmeenergin vid brand i olika solcellsmoduler har uppmätts till under 80 MJm⁻² i en studie [Ju et al., 2018] och mellan 38-57 MJm⁻² i en annan studie [Yang et al., 2015]. Som en jämförelse ger obrännbara material typiskt upphov till energier lägre än 10 MJm⁻², medan mycket brännbara material ger värden på hundratals MJm⁻² [Steen-Hansen, 2002]. Om en brand inträffar i en solcellsinstallation kan alltså det brännbara materialet i modulen ge upphov till värme och rök, men i begränsad omfattning. Om solcells-komponenter utsätts för mycket hög värmeeffekt kan de brännbara materialen bidra till produktion av giftiga gaser i stora mängder [Chow et al., 2017].

En central aspekt vad gäller brandspridning i solcellsanläggningar är hur systemet är sammansatt. Vid fasta installationer av solcellssystemet finns tomrum mellan moduler och byggnaden. Storleken på dessa tomrum beror på om modulerna är monterade utanpå byggnaden eller integrerade i t.ex. tak eller fasad. Vid en brand kan dessa utrymmen bidra till brandspridningen och till en kraftigare brandutveckling [Stølen et al., 2018, Kristensen et al., 2018]. Brandförsök med horisontellt monterade moduler visade att både mellanrummet och vinkeln mellan underlaget och modulen är av stor betydelse på grund av dessas påverkan på återstrålning av värme när branden når baksidan av modulen [Kristensen and Jomaas, 2018, Ju et al., 2019]. I storskaliga försök med takintegrerade solcellspaneler spreds branden under hela installationsområdet med solcellsmoduler, och värmeansamlingen i mellanrummet mellan modul och underlag bidrog starkt till brandspridningen [Kristensen and Jomaas, 2018].

3.4.3 Räddningstjänst

Solcellsanläggningar medför speciella risker för räddningstjänstens personal i samband med räddningsinsats. Brand i byggnad där det finns installerade solcellsanläggningar gör att personalen kan utsättas för strömgenomgång vid direktkontakt med spänningsförande ledningar, solpaneler eller byggnadsdelar [MSB, 2014a]. Ett problem med att brandbekämpning på solcellanläggningar kan vara att dessa är strömförande och att det inte är det möjligt stänga av strömmen [von Schultz, 2018]. Vid brand i takinstallerade solceller har följande faror för räddningstjänstpersonalen identifierats: elchock, halk- och fallrisk, elektriska ljusbågar [Namikawa, 2017]. I tillägg finns det risk för nedfallande paneler om infästningarna eller panelerna påverkas av brand. Solcellsmoduler ökar belastningen på konstruktionen och vid brand kan orsaka kollaps av byggnader eller bärande konstruktionselement inträffa [Namikawa, 2017]. Därför är det viktig att räddningstjänsten inför insatsrutiner vid brand i denna typ av anläggningar. Dessutom är det önskvärt att framtida elföreskrifter tar hänsyn till räddningspersonalens säkerhet i samband med insats vid brand.

Följande risker för räddningstjänstpersonalen har identifierats se Tabell 3:

Tabell 3 Potentiella faror för räddningstjänstpersonalen som arbetar nära en solcellsanläggning [Namikawa, 2017]

Möjliga risker	Beskrivning
Elchock	Elchock och brandskador vid direkt och indirekt kontakt med elkomponenter. Vatten har viss elektrisk ledningsförmåga. Skum ska inte användas mot spänningssatta anläggningar eftersom skummet har högre ledningsförmåga [Prume and Viehweg, 2018].
Halk- och fallrisk	Paneler är oftast lutande och har glatt yta.
Kollaps av konstruktioner	Taket riskerar att kollapsa under extra last av solcellmoduler, speciellt vid brand. Moduler kan också falla ner från taket på gatan.
Elektriska ljusbågar	Ljusbågar kan orsaka brand
Förbränning	Solcellsmodulkomponenter kan frigöra skadliga gaser

3.4.3.1 Risk för räddningstjänstpersonal

I Japan [Namikawa, 2017] har utförts analyser av riktlinjer i råd och anvisningar för räddningstjänstinsatser i olika länder, såsom Japan, USA, Tyskland, Australien, Österrike, Kanada, Frankrike, Italien, Spanien och Storbritannien, se Tabell 4.

Tabell 4. Sammanfattning av tillgängliga publikationer för räddningstjänsten i olika länder, delvis taget från [Namikawa, 2017] och kompletterat med andra studier.

Land	Titel	Författare	Datum
Japan	Technical information about firefighting operations in PV fire [Namikawa, 2017]	AIST (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)	Feb. 2014
USA	Fire Operations for Photovoltaic Emergencies [Office of the State Fire Marshal, 2010]	CAL FIRE - Office of the State Fire Marshal	Nov. 2010
	Firefighter Safety and Emergency Response for Solar Power Systems [Grant, 2013]	The Fire Protection Research Foundation	Mai 2010
	Firefighter Safety and Photovoltaic Installation Research Project [Backstrom and Dini, 2011]	UL - Underwriters Laboratories	Nov. 2011
Tyskland	Information about the use of photovoltaic systems for emergency responders, fire brigades and technical assistance services [DFV, 2010]	Deutscher Feuerwehr Verband	Oct. 2010
	Assessment of fire risk in photovoltaic systems and creation of security concepts to minimize the risk [Prume and Viehweg, 2015, Prume and Viehweg, 2018]	TÜV Rheinland Energie und Umwelt GmbH, Fraunhofer ISE	2015 (tyska) och juni 2018 (på engelska)
Australia	Safety Considerations for Photovoltaic Arrays [Namikawa, 2017]	Australasian Fire and Emergency Service Authorities Council	Apr. 2013
	Solar Electric Systems – Safety for Firefighters [Namikawa, 2017]	Ted Spooner (Chair of the Australian standards committee responsible for PV systems)	Sep. 2011
Österrike	PV systems – Additional safety requirements [Namikawa, 2017]	The Austrian Electrotechnical Association	Mar. 2013
Canada	Solar Electricity Safety Handbook for Firefighters [Namikawa, 2017]	Ontario Association of Fire Chiefs	Mar. 2015
Frankrike	Controlling Risk Linked to Photovoltaic System Installations [Namikawa, 2017]	CEA, INES, Gimelec, ADEME	Jun. 2013
Italia	Fire Safety of Photovoltaic Systems [Namikawa, 2017]	Province of Trento	2011
Spanien	Firefighter safety for PV plants [Namikawa, 2017]	Firefighters of Barcelona	Sep. 2013
Storbritannien	Photovoltaics and Fire: A guide from BPVA [Namikawa, 2017]	British PhotoVoltaic Association	2011
Norge	Brannveileder for solenergianlegg for brannvesen: En praktisk tilnærming til solceller og solfangere [Solenergiklyngen, 2019]	Solenergiklyngen	2019
Sverige	RÅD: Räddningsinsats i samband med brand i Solcellsanläggning [MSB, 2014b], Operativ metodik vid insatser där det finns solcellsanläggningar, Vägledning [Malmquist, 2019]	Myndigheten för samhällsskydd och beredskap	2014, 2019

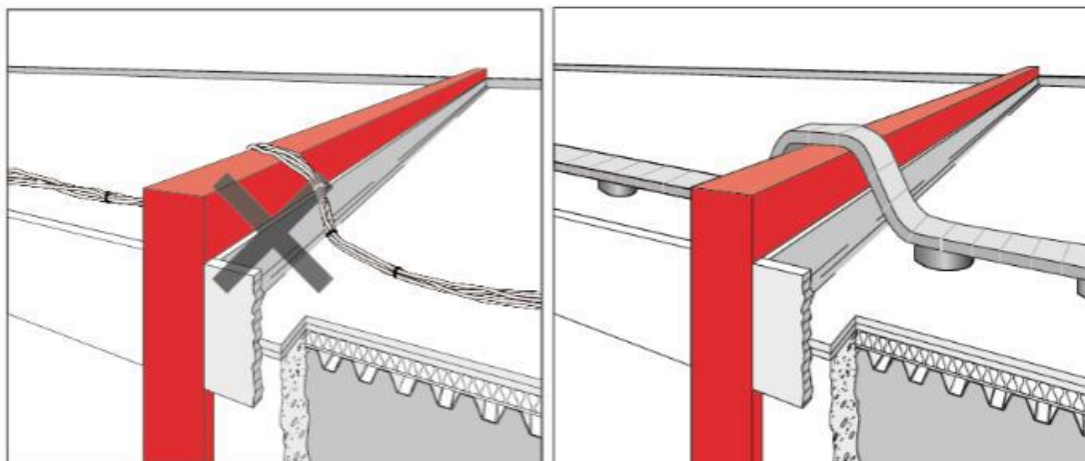
UL (Underwriters Laboratories) publicerade 2011 en rapport med serier av tester där olika släckmetoder provades i labbmiljö och i installationer utomhus [Backstrom and Dini, 2011]. Några av deras slutsatser var att risken för elektrisk chock på grund av släckinsats med vatten är beroende av spänning, vattnets ledningsförmåga, samt avstånd mellan spänningssatt komponent och sprutmunstycke. Med användning av kranvatten med spridd stråle på minst 3 m avstånd, eller samlad stråle på minst 5 m avstånd, blev strömmen lägre än 2 mA vilket anses säkert. I Sverige rekommenderas säkerhetsavstånd på 3 m för spridd stråle och 10 m för sluten stråle vid bekämpning av bränder i solcellsanläggningar [Malmquist, 2019]. Dessa säkerhetsavstånd varierar mellan olika länder [Office of the State Fire Marshal, 2010, Solenergiklyngen, 2019, Prume and Viehweg, 2018]. Saltvatten och skum ska inte användas på strömbelagd elektrisk utrustning pga. dessas högre elektriska ledningsförmåga. Metalltak är till skillnad från exempelvis takpannor ledande och kan därigenom skapa säkerhetsrisker vid bekämpning av bränder i solcellsinstallationer.

3.5 Regelverk

En mångfald av nationella och internationella standarder relaterade till solcellsteknik finns i världen. IRENA (International Renewable Energy Agency) publicerade en rapport 2013 där 149 solcellsinriktade standarder identifierades [IRENA, 2013]. Listan analyserades i annex B i en rapport från BRE [BRE, 2017a]. 90 % av de 149 standarderna är inriktade mot själva solcellsmodulerna, med mindre fokus på hur olika solcells-komponenter integrerade och samverkade som system, samt säkerheten av dessa komponenter som system och provmetoder.

En samverkansorganisation för nationella organisationer som arbetar med brandförebyggande, skydd och säkerhet i Europa, Confederation of Fire Protection Associations Europe (CFPA-E), har utvecklat riktlinjer och rekommendationer för solcellsinstallationer, förebyggande av brandinitiering och minskning av brandspridning. Dessa rekommendationer täcker bland annat följande delar:

- Rekommendationer riktade mot komponenter i solcellsanläggningar. De elektriska installationerna ska skyddas mot åska och överspänning. Brännbara komponenter som kablar får inte passera brandväggar. Om det är oundviklig så ska dessa installeras i brandsäkra kabelkanaler, se Figur 8.
- Ur ett räddningstjänstperspektiv rekommenderas att strömbrytare till solcellsanläggningar placeras på en lättillgänglig plats
- Rekommendationer för att dela upp stora installationer i mindre ytor, öppningar för ventilationskanaler och minimiavstånd till brandväggar

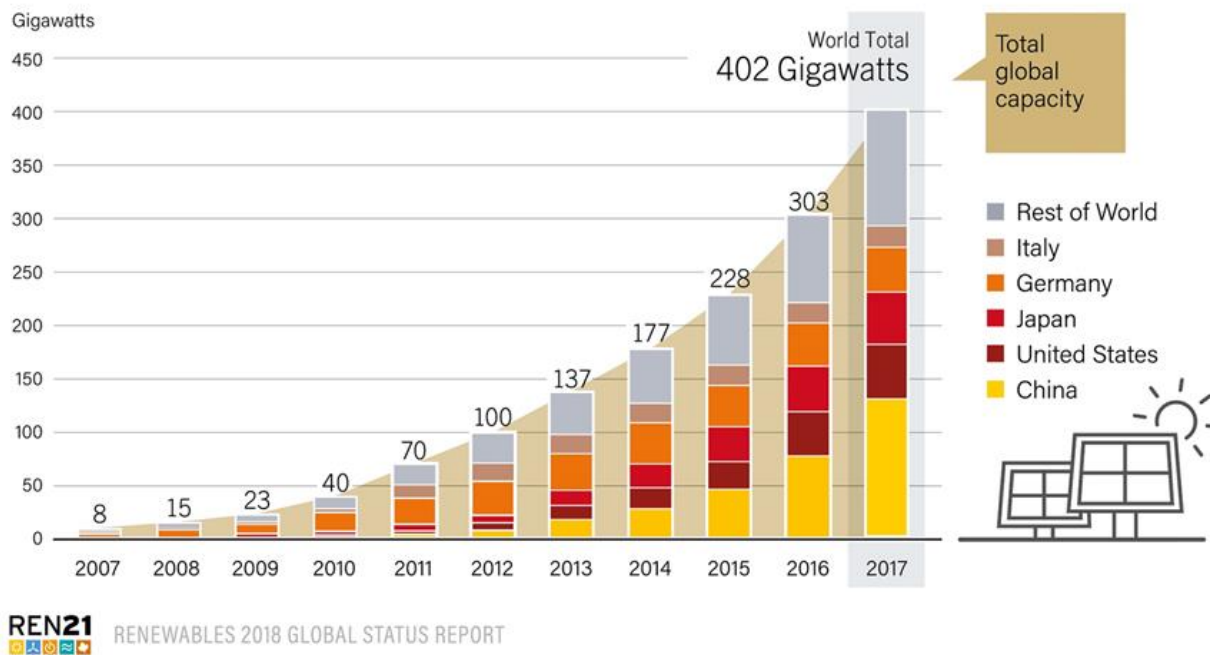


Figur 8. Installationen av kablar. Bild från (CFPA-E, 2018)

En studie [PVsites, 2016] sammanfattar befintliga standarder inom byggsektorn för 14 olika utformade byggnadsintegrerade solcellsmoduler (BIPV) i Europa. I denna rapport listas och analyseras standarder för BIPV-produkter. De viktigaste standarderna för BIPV-system för bygg- och solcellssektorer är inkluderade i standard EN 50583-1 (PV i byggnader). Dokumentet riktar sig till målgrupp av tillverkare, planerare, systemdesigners, installatörer, testinstitut och byggnadsmyndigheter. SS-EN 50583-1 [SEK Svensk Elstandard, 2016] anger bland annat att alla solcellsmoduler innehållande glas ska uppfylla brandkraven enligt SS-EN 13501-1 [CEN, 2019]. Byggnadsdelar kategoriseras efter funktion och hur dessa reagerar vid brand och bidrar till brandspridning.

I **Tyskland** har solcellsinstallationer genomförts i betydligt större utsträckning och under längre tid än i Sverige, och enligt en rapport från REN 21 (Renewable Energy Policy Network for the 21st Century) [REN21, 2018] har Tyskland den största installerade solenergi kapaciteten i Europa, se Figur 9. Tyskland har lång erfarenhet av solcellsinstallationer och därför finns det ett antal dokument med riktlinjer och rekommendationer för att säkerställa säker installation och drift.

Solar PV Global Capacity, by Country or Region, 2007-2017



Figur 9. Globalt installerad solcellseffekt, för olika länder eller regioner, 2007-2017 [REN21, 2018].

När det gäller solcellsinstallationer så är den viktigaste serien av standarder i Tyskland för lågspänningssystem DIN VDE 0100, baserat på det europeiska lågspänningsdirektivet. De flesta standarder för PV-system är sammanställda i DIN VDE 0126-serien. Utöver dessa standarder har Tyskland mer detaljerade riktlinjer från VDE, riktlinjerna för BDEW (Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft), i synnerhet riktlinjerna för medelspänning och reglerna förebyggande av olyckor.

Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt) har publicerat en uppsättning instruktioner för montering och installation av solcellssystem [DIBt], och konstruktionsföreskrifter med relevans för solcellsmoduler och deras tillämpning [Kummerow].

För byggregler och byggnormer uppdaterar Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt) regelbundet den så kallade byggreglerlistan och tolkar den europeiska byggproduktförordningen. Detta innefattar också krav på solcellssystem och deras komponenter. Kraven (mekanisk hållfasthet, strukturell stabilitet, brandskydd etc.) anges i bulletinen information om tillverkning, planering och implementering av solenergisystem ("Hinweise für die Herstellung, Planung und Ausführung von Solaranlagen").

En detaljerad lista på regler, standarder och rekommendationer sammanfattas av Prume och Viehweg [Prume and Viehweg, 2018].

I **Norge** finns idag inte något specifikt regelverk som gäller brand- och elsäkerhet i solcellsinstallationer. Enligt Byggesakföreskriften (SAK10) [Kommunal- og moderniseringsdepartementet, 2013] är sådana installationer att betrakta som byggnadstekniska installationer. Regelverket Byggteknisk forskrift (TEK17) [Kommunal- og moderniseringsdepartementet, 2017] föreskriver att tekniska

installationer ska projekteras och utföras på ett sådant sätt att de inte väsentligt ökar risken för uppkomst eller spridning av brand, samt att räddningstjänsten ska kunna genomföra en räddningsinsats utan att utsättas för onödig fara. Det byggnadstekniska regelverket är funktionsbaserat och det ställs inga krav om att specifika standarder ska uppfyllas eller följas för att bedöma eller godkänna brandsäkerheten hos ingående komponenter.

Föreskriften om elektriska lågspänningsinstallationer (FEL) [Justis- og beredskapsdepartementet, 1999] hänvisar till det norska elektrotekniska normen NEK 400 [Norsk Elektroteknisk Komité, 2018] som är ett centralt, preskriptivt dokument med detaljregleringar för elektriska installationer i Norge. NEK400-7-712 anger detaljer för installation av solcellsanläggningar vad gäller exempelvis avstånd, säkerhetssystem, märkning, etc. Mer information om det norska regelverket återfinns i två nyligen publicerade rapporter [Mikalsen and Bøe, 2019, Stølen et al., 2018]. Branschen tillsammans med räddningstjänsten har också utarbetat vägledning och rekommendationer för säkra installationer och insatser [Solenergiklyngen, 2019].

I **Sverige** har SEK Svensk Elstandard tagit fram en handbok, Handbok 457, om solcellsinstallationer [SEK, 2019] som hjälper alla som ska installera att få en helhetsbild av vad som krävs så att det blir enklare att göra rätt. Handboken grundar sig på Elinstallationsreglerna SS 436 40 00 och på europeiska standarder. I denna handbok finns bland annat ett kapitel Önskemål från Räddningstjänsten som baseras på rekommendationer framtagna av CFPA-E [CFPA-E, 2018]. Solcellsinstallationer bör delas in i mindre sektioner (max 40 m), ett passageutrymme mellan sektionerna på mer än 5 m rekommenderas, liksom ett avstånd till brandavskärmande vägg på minst 2,5 m. Modulerna bör inte heller monteras nära kanten på taket. När det gäller kablar som innehåller brännbar isolering ska dessa undvikas att läggas över brandavskärmande väggar och istället o förläggas i brandbeständiga kabelkanaler.

Enligt handboken ska alla elinstallationer kontrolleras under montage samt inspekteras och provas efter färdigställande, i enlighet med

- SS 436 40 00 del 6 [SEK, 2017]: Kontroll av solcellsmodulers funktion: polaritetstest, mätning av strängarnas tomgångsspänning, isolationsresistans på DC-sidan, osv.
- SS-EN 62446-1 [IEC, 2016b]: Riktade kontroller och provningar för solcellsanläggningar, fordringar på provning, idrifttagning, dokumentation, besiktning och underhåll
-

Det framkommer i Handbok 457 att det i dagsläget inte finns krav på att kablar ska fränkopplas och göras spänningslösa så nära solcellerna som möjligt och det saknas krav på teknisk lösning för detta. Sådana krav, med syfte att öka säkerheten för räddningspersonal i händelse av brand, finns till exempel i USA. I Sverige råder fortfarande stor osäkerhet kring hur en optimal lösning för detta ska se ut eftersom introduktion av extra komponenter för att möjliggöra fränkoppling av enskilda moduler samtidigt innebär fler potentiella felkällor i systemet. Studier som väger denna nytta mot tillkommande risker saknas ännu. I handboken nämns bland annat följande tekniska lösningar:

- Enklare anläggningar kan förses med lastfrånskiljare placerade så nära solcellspanelerna som möjligt
- Vid stora och mer komplexa anläggningar kan strängkablarna förses med kontaktdon som kan tas isär för att begränsa antalet spänningssatta DC-kablar
- Fjärrstyrda fränkopplingsanordningar, så kallade brandkårsbrytare

I övrigt kan följande delar av Boverkets byggregler tillämpas: Taktäckning definieras som skyddet av byggnaden mot det yttre klimatet. BAPV installeras på befintligt tak och har inte samma krav som BIPV som måste hanteras som del av byggnader, t.ex. som en takbeläggning. BAPV måste dock fortfarande uppfylla kraven för allmänt brandskydd, som beskrivs i avsnitt 3 kap. 8 § i plan- och byggförordningen (PBF). För BIPV är det viktigt att klassificera vilken funktion av byggnader dessa installationer ska ha, se bland annat:

- Byggnadsdelar klasser och definitioner (BBR 5:23)
- Skydd mot utveckling och spridning av brand och brandgas inom byggnader (BBR 5:5)
- Skydd mot brandspridning mellan byggnader (BBR 5:6) Brandspridning i byggnaden ska alltid begränsas. Fasadbeklädnader ska för alla byggnadsklasser motverka stor värme- och rökutveckling vid brand.

I **Australien** och **Italien** förs det numera register på huruvida brandutsatta byggnader hade solcellsanläggning installerat eller inte. Detta för att på sikt kunna bedöma brandrisken förknippat med dessa anläggningar [Stølen et al., 2018].

Dubai Electricity & Water Authority har publicerat rekommendationer för brandsäkerhet i solcellinstallationer [Dubai Electricity & Water Authority, 2015]. En solcellsmodul som används i stället för klassificerat takmaterial (BIPV) eller monterad på ett befintligt klassificerat tak (BAPV) måste brandprovas. Två tester rekommenderas: småskaliga flamspridningstester (spread-of-flame test) och brandtest (burning brand test) enligt IEC 61730 del 2, [IEC, 2016a] som i sin tur är baserad på ANSI/UL 790 [UL, 2004].

Installationsrekommendationer ges också för att förhindra brandspridning från solcellsmodulen till resten av byggnaden. Det rekommenderas att använda icke-brännbart material direkt under externa solcellsmoduler och att placera dessa minst en meter från rökventilationsluckor och minst 0,5 meter från fönster, skorstenar och öppningar i byggnaden.

Det rekommenderas vidare att en förenklad översikt över hela solcellsinstallationen, inklusive placering av moduler, elkablar och fränkopplingsmekanismer, placeras vid den aktuella mätaren för varje byggnad. Det måste också finnas säkerhetsmarkering i de områden där utrustningen är belägen.

Under 2019 har ett examensarbete vid Luleå tekniska universitet utförts där bland annat en jämförelse av regelverk och förordningar i olika länder sammanställts, se Tabell 5. Det framgår tydligt att Tyskland har mest rekommendationer och regler när det gäller solcellsininstallationer.

Tabell 5. Jämförelse av regler och förordningar i olika länder [Bergroth and Torstensson, 2019].

Rekommendationer för delkomponenter	CFPA-E	Tyskland	USA	Sverige	Dubai
Elkablar					
Elkablar på tak ska inte dras över brandväggar utan brandskydd	X	X			
DC-kablar > 1m ska brandskyddas och placeras utomhus.		X			
Inga DC- ledningar ska placeras i nödutgång eller räddningstjänst åtkomst		X			
DC-ledningar i slutna utrymmen ska skyddas (metallrör).			X		
Växelriktare och strömbrytare					
Växelriktare ska placeras vid ingången eller på utsida.		X			
Växelriktaren ska vara tillgänglig för räddningstjänsten		X		X	
Växelriktaren ska installeras på obrännbar vägg		X			
Krav på strömbrytare för räddningstjänstens behov	X		X	X	X
Rekommendationer angående installationen, passage och skyltning (BAPV).	CFPA-E	Tyskland	USA	Sverige	Dubai
Taktillgänglighet och sektioner för PV installationer					
Avstånd mellan PV-moduler och brandväggen	X (2.5m)	X (1.25m)			
Brandgata för räddningstjänst	X	X	X	X	
Maximal bredd på solcellsinstallationer.	X (40m)	X (40m)			
Minimalt avstånd mellan PV installationer.	X (5m)	X (1m)			
Avstånd mellan solcellsektioner och ventilationskanaler.	X		X	X	X
Återvändsgräns ska regleras (gångstig).			X		
Storleken på gångar		X	X		
Avstånd mellan modul och tak					X
Paneler ska installeras på obrännbart tak.					X
Rekommendationer angående installationen av elkomponenter	CFPA-E	Tyskland	USA	Sverige	Dubai
Skyltning					
Skyltning	X	X	X	X	X
Särskild plan vid nödsituationer.		X		X	
Kontaktinformation vid nödsituation			X	X	
Övriga rekommendationer	CFPA-E	Tyskland	USA	Sverige	Dubai

<i>Solcell installerade på fasad.</i>					
Installationen ska uppfylla samma krav som övriga delar av fasaden.	X			X	
Modul					
Relevanta provningar av PV moduler			X		X
Uppföljningskontroll.				X	

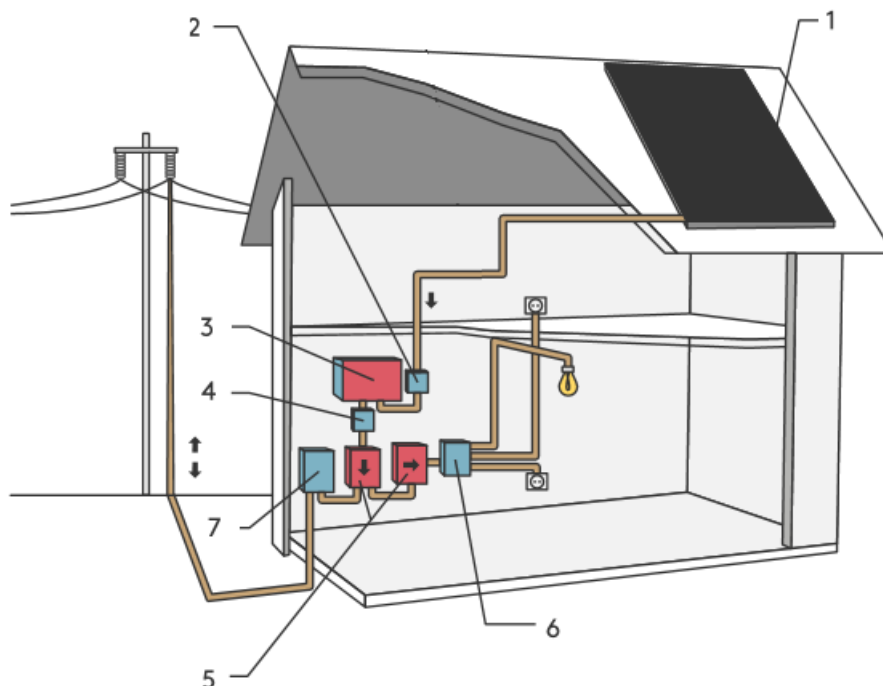
3.5.1 Testmetoder

Det finns ett flertal teststandarder för solceller. Det brittiska forskningsinstitutet BRE har genomfört en litteraturstudie och kartlagt standarder som är relevanta för brandsäkerhet i solcellinstallationer [BRE, 2017a]. Rapporten visar 87 standarder relaterade till solceller och brand. De flesta av dessa standarder kommer från International Electrotechnical Commission (IEC). Några av de mest centrala standarderna för solcellsinstallationer behandlas i en nyligen publiceras rapport från RISE Fire Research AS [Mikalsen and Bøe, 2019] och det konstateras att det europeiska regelverket för brandprovning av tak inte är anpassat för provning av tak med påmonterade solcellsmoduler. Den metod som är mest lämplig för att testa kombinationer av tak och solcellssystem finns beskrivit i den amerikanska standarden UL1703 [UL, 2002], men även denna har vissa svagheter. Solpaneler som monteras på fasader bör behandlas på samma sätt som annan fasadbeklädnad med luftspalt. Även vad gäller fasader så är det europeiska regelverket för brandprovning inte anpassad för solpaneler.

4 Eldistribution i byggnader anpassad till lokal elproduktion

Solcellsanläggningar producerar alltid likström och spänningen ligger normalt på runt 800 V. Detta medför vissa nya brandrisker jämfört med våra vanliga elsystem i byggnader som är växelström och normalt har en spänning på 230 V. I dagens solcellsanläggningar ansluts solcellerna direkt till en växelriktare som omvandlar strömmen till 230 V växelström för användning i byggnaden, men även om dagens växelriktare är mycket effektiva med effektivitetsgrader som ofta ligger på 93-95 % [Energimyndigheten] så innebär denna transformering vissa förluster.

För att slippa dessa förluster är det möjligt att fler förbrukare, dvs. elförbrukande produkter, i framtiden kommer att drivas med likström. Detta gör i så fall att likströmsnätet från solcellsanläggningar kommer att dras längre in i byggnaden. En illustration av de viktigaste komponenterna för en solcellsanläggning i en byggnad ges i Figur 10.



Figur 10. Huvudkomponenterna i ett solesystem, 1 = solceller, 2 = DC-brytare, 3 = växelriktare, 4 = AC-brytare, 5 = elmätare, 6 = husets elcentral och 7 = extern nätslutning. Anpassad från [Kovács, 2018].

Idag orsakar ett fel i elinstallationen på ett solcellssystem i regel endast en extern brand som endast skadar solcellsanläggningen och/eller eventuellt ett mindre område på byggnadens exteriör. En studie [Laukamp et al., 2013] har emellertid kommit fram till att integrerade solceller, som endast stod för 1 % av antalet installationer, stod för 20 % av brandskadorna. Delvis kan detta bero på att tekniken med byggnadsintegrerade

solcellsanläggningar är yngre och att ingen nyare studie än den ovanstående från 2013 har identifierats. Det kan dock även bero på att branden har lättare att sprida sig när installationen inte är utanför en taktäckning eller monterad utanpå en fasad.

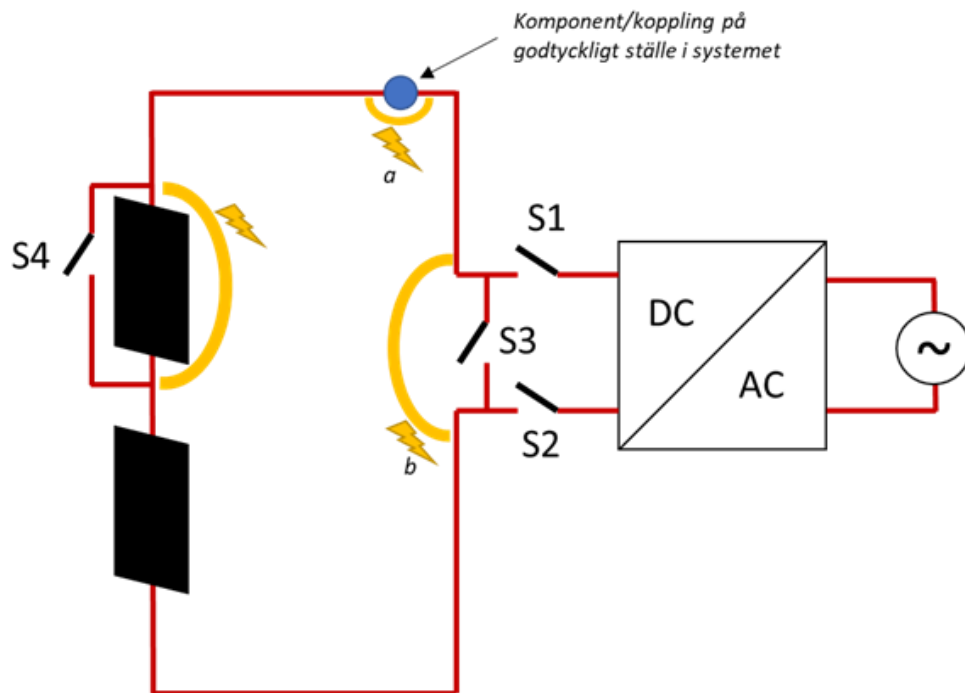
Om DC-installeras hela vägen fram till förbrukare (t.ex. torktumlare) så kan det innebära att de medför en betydligt större brandproblematik än dagens anläggningar där DC-komponenterna primärt installeras exteriört. Detta kan innebära att ytterligare krav bör ställas på dessa installationer [Reil et al., 2013]. Nedan presenteras de huvudsakliga sätt genom vilka dessa system utgör en brandrisk.

4.1 Ljusbågar

Två olika typer av ljusbågar kan uppstå i elektriska system. Den ena är seriella ljusbågar (a i Figur 11) som uppkommer vid dålig kontakt i en komponent. Ökad resistans till följd av t.ex. oxidation av en kontakt eller dåligt montage leder till värmeutveckling. Värmeutvecklingen leder till termisk påverkan av materialet i kontaktpunkten vilket över tid ökar avståndet mellan ledarna och till slut finns det ett luftgap där en ljusbåge kan bildas. Litteraturen handlar primärt om dessa ljusbågar, men det är även möjligt att antändning sker utan att det bildas en ljusbåge genom att den resistiva uppvärmningen i den dåliga kontakten i sig genererar tillräcklig värme för antändning även om vissa källor menar att det är osannolikt att tillräckligt höga temperaturer kan uppnås [Wohlgemuth and Kurtz, 2012]. Det är inte klarlagt om det i fallen där serielljusbågar anges som orsak verkligen har bildats en ljusbåge eller om den resistiva uppvärmningen har orsakat antändningen.

Den andra huvudtypen av ljusbågar är parallella ljusbågar (b i Figur 11) som sker mellan två olika ledare. Denna typ av ljusbågar är mer sällsynt än seriella [Schimpf and Norum, 2009], men kan å andra sidan ge större effektutveckling eftersom hela spänningen i systemet i vissa fall kan hamna över ljusbågen (beroende på var felet uppstår).

En variant av den parallella ljusbågen är en ljusbåge som uppstår parallellt med en enskild modul på en solpanel (c i Figur 11). Det som skiljer denna typ av ljusbåge från ljusbågen b är att den inte kan brytas på samma sätt som den vanliga parallella ljusbågen eftersom det kan finnas potentialskillnader i systemet även om brytare S3 sluts. Det gör att kortslutning måste utföras av den individuella modulen (S4 i Figur 11). Dock är spänningen över respektive solcellsmodul i en normal byggnadsinstallation förhållandevis låg, ofta i storleksordningen 40 V. Även om det är teoretiskt möjligt att generera en ljusbåge från ca 30 V [Schimpf and Norum, 2009] så är det högst osannolikt och effektutvecklingen i denna torde vara låg. Denna typ av ljusbåge bör därmed sannolikt kunna avskrivas för den aktuella installationstypen. Det finns även en möjlighet att en parallell ljusbåge skulle kunna uppstå mellan kablar som försörjer en del av en solcellsanläggning. Beroende på var denna uppstår kan den medföra en parallell ljusbåge som inte går att släcka med S3 utan för detta krävs antingen en brytare av typ S4 eller en lokal optimerare på varje modul.



Figur 11 Möjliga platser för ljusbågar och placering av brytare för brytning av ljusbågar. (a) Seriell ljusbåge, (b) Parallell ljusbåge i huvudkretsen & (c) Parallell ljusbåge över enskild modul. S1-S4 är reläer (eller motsvarande) för brytning av olika typer av ljusbågar. S3 och S4 syftar till att kortsluta ledarna för att på så sätt minska spänningen i kretsen.

De parallella och seriella ljusbågarna beskrivs mer i detalj i de kommande kapitlen och därefter beskrivs åtgärder som används för att bryta eller undvika ljusbågar.

4.1.1 Parallella ljusbågar

Luft är en mycket god isolator och eftersom spänningen i solcellssystem normalt ligger på max 1000 V är det maximala avståndet i luft för att en ljusbåge ska uppstå mellan ledarna 0,13-0,15 mm [CIRRIS Systems, 2019]. En sådan ljusbåge orsakar också en kraftig knall som inte har rapporterats vid inträffade bränder.

Detta innebär sammantaget att det är osannolikt att spontana ljusbågar i luft skapas vid aktuella spänningar. Mer sannolikt är att ljusbågen tar vägen via ett annat material. Detta skulle kunna vara genom isoleringsmaterial som brutits ner genom krypströmmar (arcing-through-char på engelska) vilket är vanligt för konventionella 230 V-system [Babrauskas, 2002]. Det kan även vara via t.ex. en vass kant på en byggnadsdel som har viss ledningsförmåga. Även ljusbågar skapade av skadedjur har rapporterats [Dini et al., 2011].

Det är inte fastställt vilken orsak till bildandet av parallella ljusbågar som är den vanligaste och det verkar som åsikterna om detta går isär. Intervjupersonerna har primärt framhållit vassa kanter medan den artikel som uttalar sig om förhållandet mellan andelen ljusbågar som tar vägen genom vilken typ av material [Alam et al., 2015] menar att nedbrytningen av isoleringsmaterialet är den vanligaste orsaken. Vad som är den vanligaste orsaken kan ha viss påverkan på vilken skyddsmetod som bör användas. Om annat byggnadsmaterial utgör ledaren så kan det räcka att skydda kablarna mot mekanisk

skada eller lokalt placera dessa på visst avstånd, men om ljusbågar primärt uppstår genom krypströmmar som bryter ner isoleringen så krävs andra åtgärder.

Risken för ljusbågar genom isoleringen beror på typ av isolering där t.ex. PVC, som är vanlig för lägre spänningar, har särskilt dålig motståndskraft [Babrauskas, 2006]. Riskfaktorer för ljusbågar genom isoleringen är fukt och orenheter i material. Även blixtnedslag kan i vissa fall skada isolationsmaterialet så att krypströmmar kan uppstå som i sin tur karboniserar isoleringen vilket leder till ytterligare försämring av isolationsförmågan.

Ingen systematisk genomgång av isolationsmaterialen för DC-kablar har gjorts, men ett stickprov visar att dubbelisolerade kablar isolerade med tvärbunden polyolefin, t.ex. [HIS Solar, 2018], är vanligt förekommande. Dessa får utsättas för en temperatur på maximalt 90°C (beaktat både omgivningstemperatur och egenuppvärmning) vilket kan ha samband med att vissa egenskaper hos polymeren påverkas vid temperaturer på 100°C [Chodák, 1995]. Emellertid förefaller det skilja mycket i egenskaperna mellan olika tvärbundna polyolefiner.

4.1.2 Seriella ljusbågar

Dålig kontakt i en krets kan genom värmeutvecklingen leda till bildning av ett oxidlager som genom sin sämre ledningsförmåga leder till att kretsen behålls, men samtidigt till att värmeutvecklingen ökar ytterligare (pkt 9.9.2.3 i NFPA 921-2017 [NFPA, 2017]). I en solcellsanläggning är även de små rörelserna till följd av temperaturcykler sannolikt en viktig faktor [Laukamp et al., 2013].

Fyra platser anses av flertalet informanter samt litteraturen vara särskilt utsatta för denna effekt;

- i. DC-brytare som inte motioneras [Laukamp et al., 2013]
- ii. Kontaktdon [Laukamp et al., 2013]
- iii. Växelriktare [Dini et al., 2011]
- iv. Säkringar [Kremer, 2011]

Befintliga DC-brytare som inte har motioneras på 6 respektive 10 år har testas i labbmiljö [Laukamp et al., 2013]. För den förstnämnda minskade resistansen, i genomsnitt, med en faktor 2 efter att den hade motionerats 10 gånger och för den andra anges inte minskningen exakt men var betydande. Detta innebär att effektutvecklingen i kopplingspunkten teoretiskt kan öka med en faktor två vid frånvaro av motionering. En möjlig lösning för att öka robustheten mot bristande underhåll kan vara att välja brytare med en högre strömklassning än den som egentligen behövs för anläggningen. I en studie observerades att en brytare med betydande oxidering hade klarat sig utan termiska skador, vilket ansågs bero på att den hade en högre klassning än vad som krävdes för den aktuella strömmen [Laukamp et al., 2013].

Problem i kontaktdon har sitt ursprung i undermåligt inkopplade ledare i kontakten som orsakar oxiduppbyggnad enligt första stycket i detta avsnitt. Fabriksbyggda kontakter förefaller vara av högre kvalitet och denna typ av fel är mindre vanligt förekommande för

sådana kontaktdon. Generellt bör skruvkontakter undvikas eftersom detta sannolikt är en viktig anledning bakom inträffade fel [Laukamp et al., 2013]. För att hindra att ett fel på ett kontaktdon orsakar denna typ av skada så kräver IEC 61730 i vissa fall att det finns två parallella kontaktdon som ger redundanta kopplingar [Wohlgemuth and Kurtz, 2012]. Problem kan även uppstå om terminalerna monteras på ett sätt så att de inte kan röra sig vid temperaturutvidgning.

Växelriktare, se avsnitt 3.1.1 och Figur 3, var den komponent som stod för störst andel av brandincidenter i Tyskland 2005-2012 [Laukamp et al., 2013]. Detta kopplades till en blandning av produktfel och installationsfel. Växelriktaren kommer också bli allt mer intressant eftersom i moderna mindre solcellsanläggningar så kopplas varje sträng (dvs. rad med seriekopplade solpaneler) individuellt till växelriktaren (stället för via en kopplingsbox) så denna står för en allt större andel av kopplingspunkterna i anläggningen.

Säkringar är möjligen av särskilt intresse eftersom detta är en säkerhetsåtgärd som föreskrivs i den svenska installationshandboken för solceller [SEK, 2019]. Detta medför ytterligare kopplingspunkter och därmed plats för ljusbågar att uppstå och nyttan behöver därför överväga risken. Litteraturen verkar mena att solcellsanläggningar inte behöver säkringar eftersom de har begränsad och variabel kortslutningsström [Schimpf and Norum, 2009] och därmed inte kan medföra farligt höga strömmar. Om säkringar medför en ökad eller minskad sammantagen risk bör analyseras i framtida studier.

Huvuddelen av detta avsnitt har behandlat hur en ökad värmeutveckling i kretsarna kan undvikas. Ett alternativt, eller kompletterande, angreppssätt är att minska tillgången till brännbart material vid dessa kritiska punkter. För kontaktdon är detta sannolikt ofta redan implementerat eftersom flertalet av kontaktdon används för anslutning av solceller till varandra och dessa placeras ofta ovan ett obrännbart tak. DC-brytare och växelriktare installeras dock mer frekvent på brännbart underlag, men för DC-brytaren, som i sig har begränsad mängd brännbart material, kan sannolikt en mindre obrännbar skiva minska risken för antändning. För växelriktaren bör sannolikt ett skal i plåt övervägas eftersom plasthöljet utgör en betydande bränslemängd som dessutom kan smälta och bilda en pölbrand.

4.1.3 Åtgärder mot ljusbågar

Sverige (och även Norge [Schimpf and Norum, 2009]) har valt en annan strategi än t.ex. USA. I Sverige minskar man risken för seriella ljusbågar genom att försöka bygga systemen med så få kontaktpunkter som möjligt och parallella ljusbågar genom att placera ledarna minst 0,1 m ifrån varandra när man passerar kritiska områden som t.ex. vassa kanter eftersom ljusbågarna slocknar vid avstånd på minst 0,05 m vid aktuella spänningar. Kravet på 0,1 m är hämtat från Lantbrukets Brandskyddskommittés regler, men anses vara indirekt krav genom SEK-handbokens krav på ”kortslutningsskyddad förläggning”.

Den amerikanska metoden är att istället kräva Arc Fault Circuit Interruptor (AFCI) om spänningen i anläggningen överstiger 50V (NEC pkt 690.5, [NFPA, 2020]). Dessa kan

ses som bestående av två delar, den ena är delen för detektion av ljusbågar (kallad Arc Fault Detector Device (AFDD)) och den andra är elektronik för att bryta ljusbågen.

Detektionen sker genom att analysera frekvensspektrat för att notera avvikelser ifrån det normala och en absolut majoritet av artiklarna i litteratursökningen presenterade olika algoritmer som snabbt detekterar fel utan att generera felaktiga resultat. Låga frekvenser är mest användbara för detektion eftersom den största delen av energin finns inom denna del av spektrat. Men eftersom variationer i solljus kan generera signaler upp till ca 1 kHz så används sällan denna del för detektion [Alam et al., 2015]. Även frekvenser över 100 kHz bortses ofta ifrån eftersom det kan finnas interaktioner med radiosignaler. Detta gör att frekvensområdet mellan 1-100 kHz oftast används [Alam et al., 2015]. Dessvärre ligger växelriktarnas switchfrekvens normalt mellan 10 och 50 kHz och detta gör att dessa (tillsammans med sina övertoner) kan påverka spektrat. Genom olika typer av avancerade metoder som t.ex. neurala nätverk [Appiah et al., 2019], wavelet transformationer [Wang and Balog, 2013] osv kan dock ljusbågar detekteras med förhållandevis hög sannolikhet utan att generera fel. Metoden måste dock vara mycket snabb eftersom en ljusbåge i en solcellsanläggning kan antända närliggande polymerer redan efter ca 0,1 sekunder [Johnson et al., 2012]. Generellt är parallella ljusbågar enkla att detektera medan seriella är mer utmanande [Strobl and Meckler, 2010].

För seriella ljusbågar räcker det att strömmen i kretsen bryts vid växelriktaren. Detta kan göras genom att installera en extra bytare (S1 och S2 i Figur 11) eller genom att stänga av inverteraren. För parallella ljusbågar räcker inte detta utan ledarna måste kortslutas (S3) för att på så sätt göra att potentialskillnaden mellan dessa blir noll. En alternativ metod som bryter både seriella och parallella ljusbågar är att kortsluta respektive solcellsmodul (S4). Denna metod löser även eventuellt enskilda kortslutna moduler, men det kräver fler brytare och därmed måste dessa vara billiga och dessutom kan det innebära en risk eftersom antalet kontaktpunkter ökar.

Arc Fault Circuit Interruptor (AFCI) prövas enligt standarden UL1699B [Underwriters Laboratories (UL), 2018] där en ljusbåge inte får orsaka en större energiutveckling än 750 J eftersom detta har identifierats som den energi som inte vid något försök förstörde plaströret som är monterat runt ljusbågspunkten i testet [Dini et al., 2011]. Det är därmed också rimligt att anta att den inte orsakar någon brand. Det finns två klasser av AFCI enligt UL1699B där klass 1 är för endast seriella ljusbågar och klass 2 är för både seriella och parallella ljusbågar.

En AFCI innebär en viss extrakostnad även om den med fördel kan integreras i inverteraren [Schimpf and Norum, 2009]. Givet den totala kostnaden för installationen bör dock den relativa extrakostnaden vara måttlig. Det är inte känt varför Sverige har valt att inte följa USA:s krav på att installera AFCI i alla solcellsanläggningar, men eventuellt kan det ha att göra med att felaktiga aktiveringar sker ibland även med produkter som i UL-tester (Underwriters Laboratories) gett godkända resultat [Johnson et al., 2015]. Även kostnaden skulle kunna vara ett argument, men många inverterare som säljs i Sverige har ändå denna funktion integrerad för att kunna säljas även på den amerikanska marknaden.

Det bör också noteras att en AFCI som är integrerad i inverteraren inte gör systemet strömlöst och därmed så finns fortfarande fara för räddningstjänstpersonal om inte en brytare vid respektive solcellsmodul (S4) installeras.

En variant på den parallella ljusbågen är jordfel där en ledare kommer i kontakt med jord. I amerikanska system är en av ledarna jordade och då kan en farlig situation uppstå så fort ett jordfel uppkommer [Dhere and Shiradkar, 2012], men i Sverige ska dessa anläggningar normalt utföras utan jordning (tidigare kallat flytande nolla). Om ett fel då uppkommer får den ledaren samma potential som jorden och ingen ljusbåge uppstår förrän vid eventuellt fel även på den andra ledaren. Om man lyckas detektera det första felet med en isoleringsövervakning så kan skadan undvikas. Därför rekommenderas i litteraturen att inte jorda solcellsanläggningar [Dhere and Shiradkar, 2012].

I Sverige finns inga krav på jordfelsbrytare för DC-sidan förutom inom jordbruk. Detta installeras inte heller i USA, men där finns det krav på jordfelssäkring. Nackdelen är att denna kräver relativt stora strömmar (normalt $>0,5$ A) och därför är en jordfelsbrytare att föredra, vilket också är krav i många europeiska länder [Alam et al., 2015]. Bakgrunden till att det inte är krav i Sverige är sannolikt att man anser att det faktum att det krävs dubbelfel på oisolerade system som har dubbelisolerade kablar med isoleringsövervakning gör att problemet inte är tillräckligt stort för att motivera krav på en sådan installation.

4.2 Ramantennverkan

En möjlig åtgärd för att undvika parallella ljusbågar hade varit att placera ledarna långt ifrån varandra. Ett problem med detta är dock att en s.k. ramantennverkan då uppkommer. Denna kan orsaka störningar i kringliggande utrustning, men den kan även göra att höga spänningar induceras vid t.ex. åska vilket i sig kan medföra brand.

Ingen analys av huruvida den sammantagna brandrisken ökar eller minskar genom att placera ledarna långt ifrån varandra har gjorts inom ramen för projektet. Detta beror på att de störningar som kan induceras i elektrisk utrustning vid normal användning gör att detta inte är ett möjligt alternativ utan ledarna bör, som idag, placeras nära varandra för att de elektriska fälten ska ta ut varandra.

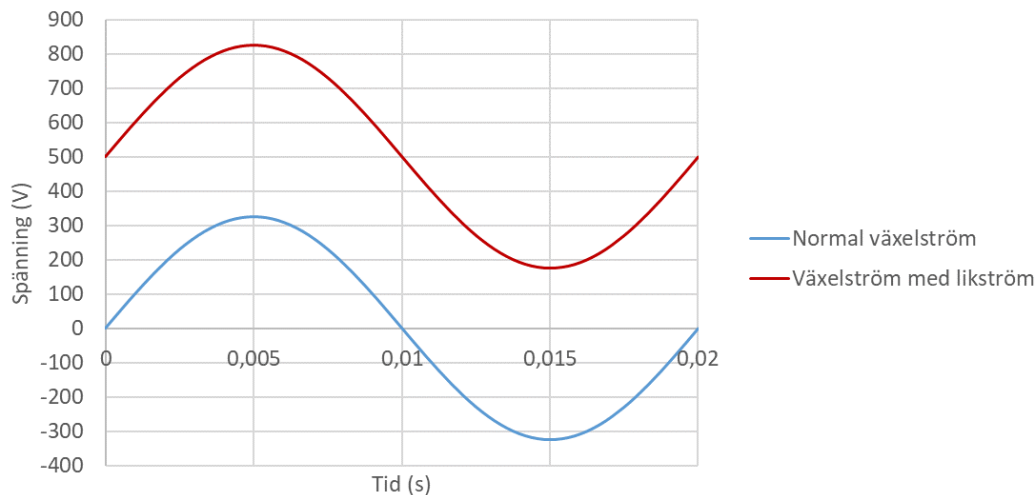
Det kan dock vara relevant att studera om den polseparering som föreskrivs för närvarande (0,1 m vid genomgång genom t.ex. en vägg) kan medföra ramantennverkan.

4.3 Induktion av strömmar i byggnadsdelar

En informant lyfte möjligheten att ledare som placeras på ett visst avstånd från varandra inducerar strömmar i byggnadsdelar av metall. Detta är emellertid inte möjligt eftersom endast växelström kan inducera strömmar. Likström genererar elektromagnetiska fält, men de är konstanta så de kan inte inducera strömmar.

4.4 Mättade jordfelsbrytare

Från solcellsanläggningar (och även ibland vid laddning) så kan i vissa fall likström läcka över till växelströmssidan. Formen blir fortsatt sinusformad, men hela kurvan är förflyttad så att den inte passerar nollan (se Figur 12). Detta gör att spolen i en normal jordfelsbrytare inte laddar ur och därmed kan den inte heller detektera jordfel. I dessa fall krävs en jordfelsbrytare typ B. Det är därför viktigt att man följer tillverkarens föreskrifter när denna typ av anläggningar installeras.



Figur 12 Påverkan av spridning av likström in i växelströmssystem

En artikel i Elinstallatören i maj 2019 [Granmar, 2019] väckte stor uppmärksamhet i branschen när de hävdade att effekten även kan sprida sig till andra fastigheter i området så att även deras jordfelsbrytare mätas. Flertalet informanter har uttryckt tveksamhet inför detta då det bör kräva väldigt stora läckströmar. Det bör dock utredas genom en kretssimulering.

4.5 Elförbrukare och lågspänningsnät i framtidens byggnader

Även om en anpassning till installation av solceller förväntas vara den stora förändringen när det gäller elsystem i byggnader så finns det även några andra möjliga förändringar som olika informanter har nämnt under intervjuerna. Dessa är dels lågspännings-DC-nät (se avsnitt 4.5.1) som är en anpassning till att många produkter går mot en lägre energiförbrukning och att det därför kanske inte är motiverat att installera 230V i alla rum, utan istället nät med lägre spänningar som inte kräver behörigheter vid installation kan vara aktuella.

Även ett ökat behov av laddning av olika produkter kan förutses i framtiden. Idag laddas elbilar genom fysisk inkoppling till elnätet vilket innebär problem om inte rätt kontaktyp används (se avsnitt 4.5.2), men i framtiden förväntas trådlös laddning bli mer vanligt förekommande. Vid laddning av produkter med stora energibehov (t.ex. bilar) krävs stora

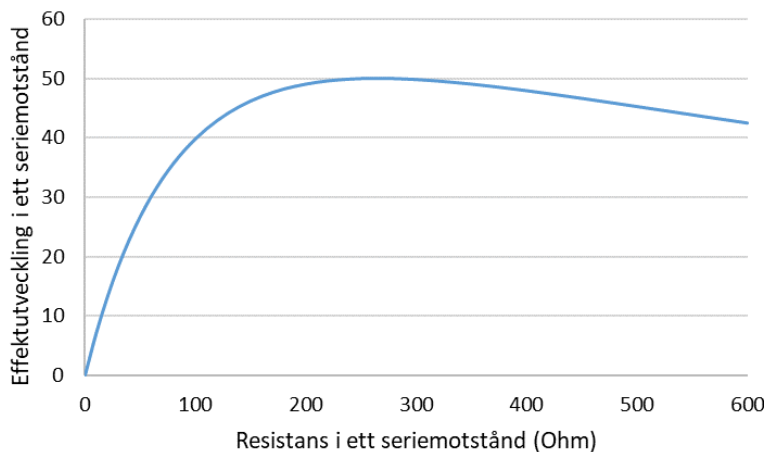
effekter för att hålla nere laddtiden och därmed kan föremål som utsätts för de elektromagnetiska vågorna värmas upp vilket kan innebära risk för antändning (se avsnitt 4.3). Slutligen innebär transformering till likström t.ex. vid laddning en risk för skapandet av övertoner vilket diskuteras i avsnitt 4.5.4.

4.5.1 Lågspännings DC-nät

Eftersom låga spänningar (<50V) med begränsade laster (max 200 W) inte kräver anlitaandet av installatör finns en ökad risk för kablar med för liten ledningsarea för strömmarna i systemet i fasta installationer. Till skillnad från vanliga glappkontakter så sker dock överströmmar längs kabelns längd och inte i en punktkälla.

En vanlig tumregel för brandutredare (se t.ex. [Widlund, 2009]) är att en effektutveckling på minst 25 W krävs i en glappkontakt för att kunna orsaka antändning under rätt förhållanden. Detta innebär att värmeförlusten i den punkten där glappkontakten inträffar är 25 W vid antändningstemperaturen. Värmeförlusten från en linjekälla, per meter, är ungefär lika stor som två punktkällor [Rundberg, 2005] vilket innebär att det behövs en effekt på 50 W/m för att uppnå motsvarande temperatur.

Om lasten är begränsad till 200W (vilket är den högsta tillåtna effekten utan att installatör krävs) så medför det, för flertalet laster, att den maximala effektutvecklingen i en resistiv last i serie kan vara max $\frac{1}{4}$ av denna [Widlund, 2009] detta framgår även av Figur 13 nedan som är baserad på ohms lag och effektlagen.



Figur 13 Effektutveckling i ett seriemotstånd baserat på olika resistanser i detta motstånd

Detta innebär att effektutvecklingen i en eventuellt underdimensionerad kabel begränsas till 50 W. Om detta jämförs med värmeförlusten per meter vid antändningstemperaturen i föregående stycke krävs därför att all värmeutveckling sker över maximalt en meter för att kunna orsaka antändning. Detta förefaller osannolikt med tanke på att det är en fast installation som sällan har så korta kabeldragningar mellan källa och last. Det gör att denna tändkälla bedöms vara mindre sannolik.

Detta motsäger inte att antändning kan ske inom olika elektriska produkter som faller inom annan lagstiftning där högre effekter kan tillåtas och kortare kabeldragning kan förekomma. Detta ligger dock utanför avgränsningen för detta projekt.

4.5.2 Kontaktdon och -punkter vid laddning av elbilar

Även om normala strömuttag (även kallade Schuko-uttag) är godkända för 16 A så gäller detta endast under en begränsad tid. För längre laddtider krävs speciella kontaktdon. Dessa kontaktdon finns tillgängliga på marknaden vilket innebär att det primärt handlar om kommunikation för att få målgruppen att byta typ av kontaktdon.

Ett troligen större problem är att eluttag normalt kopplas i kedjor vilket innebär att kontaktdonet närmast centralen får bära all last från de följande donen. Det gör att det inte räcker att byta själva kontaktdonet utan det behövs normalt en ny dragning mellan elcentralen och kontaktdonet.

4.5.3 Uppvärmning av andra föremål vid trådlös laddning

Flera olika typer av tekniker för trådlös laddning av elbilar undersöks för närvarande [Panchal et al., 2018]. Även andra produkter som till exempel mobiltelefoner övergår allt mer till trådlös laddning, men effekterna i dessa är så små och även om de kan leda till att föremål värms upp så utgör de sannolikt inte någon brandrisk utöver de för traditionella laddare.

Laddning av elbilar kräver dock höga effekter och dessa kan generera betydande uppvärmning av metalliska objekt som placeras på laddaren. Detta beror på att när konduktiva material (t.ex. metaller) exponeras för ett variabelt magnetfält så uppkommer så kallade "eddy-currents" i materialet som värmer upp materialet.

Trådlösa laddare har dock ständigt informationsutbyte med det som laddas för att optimera laddningen och därför är det högst osannolikt att ett objekt som placeras på en laddplatta, utan att det som ska laddas samtidigt ligger där, värms upp.

Större sannolikhet är det för uppvärmning av objekt som hamnar mellan det som laddas och laddplattan. Detta kan inträffa vid induktiv laddning av elbilar där avståndet mellan laddplattan och det som laddas normalt är 150-300 mm [Panchal et al., 2018]. För detta ska kunna undvikas krävs att föremålet detekteras så att laddningen kan avbrytas [Bablo et al., 2014]. Detta görs genom en familj av metoder som kallas "Foreign Object Detection" (FOD) där oväntade förändringar i den överförda effekten detekteras [Muratov, 2017].

Enligt en standard för trådlös laddning, Qi-standard, måste laddningen avbrytas om mer än 0,75 W förloras utöver de förväntade förlusterna [Muratov, 2017].

Enligt en informant så finns det även en sorts gardiner som sänks ner som försvårar att objekt kommer in mellan bilen och laddplattan.

4.5.4 Övertoner

Övertoner genereras vid transformering av spänningar och kan medföra värmeutveckling i motorer, transformatorer och kablar och, i vissa fall, blir temperaturen så hög att den kan leda till antändning. Dock minskar problemet vid högre växlingsfrekvenser eftersom övertoner alltid är multipler av växlingsfrekvenserna och därmed får även övertonerna högre frekvenser. Övertoner med höga frekvenser kan bära mindre effekt och lättare kan filtreras. Höga frekvenser medför även att komponenterna kan minskas i storlek och därför samverkar strävan mot mer kompakta produkter med brandsäkerhetsaspekterna. De flesta laddare ligger därför på ett antal kHz vilket innebär att värmeutvecklingen blir begränsad. Det gör att problemen med övertoner sannolikt kommer att minska i framtiden, eftersom det finns en efterfrågan på ständigt minskande storlek på produkter, och därför undersöks detta inte i mer detalj.

4.6 Sammanfattning av identifierade risker

I nedanstående tabell sammanfattas de risker som har identifierats i kapitel 4 med en bedömning och eventuellt känd lösning.

Beskrivning	Riskenivå	Lösning
<i>Solceller och DC-nät (ca 800V)</i>		
Parallella ljusbågar	Okänd	Ljusbågsvakt (AFCI)
Seriella ljusbågar	Troligen relativt stor	Ljusbågsvakt (AFCI), minimera antal kopplingspunkter samt välja bytare med högre strömklassning
Överströmmar	Ingen pga små kortslutningströmmar	(säkringar medför sannolikt en ökad risk pga. fler kontaktpunkter)
Jordfel	Sannolikt liten pga. dubbelisolering och ojordat utförande	Eventuellt jordfelsbrytare på DC-sidan
Ramantennverkan	Beroende på kabelförläggning	Förlägga kablar av motsatt polaritet nära varandra
Induktion av strömmar i byggnadsdelar	Ingen	-
<i>Förbrukare och lågspänning DC-nät</i>		
Liten ledningsarea i lågspänning-DC	Ingen	-

Beskrivning	Riskenivå	Lösning
Kontaktdon och – punkter vid billaddning	Betydande	Korrekt typ av kontaktdon samt att dessa kopplas direkt till elcentral och inte seriekopplas med andra don
Uppvärmning av andra objekt vid trådlös laddning	Okänt	Detektion av främmande föremål eller ”gardin” som skyddar laddpunkten
Övertoner	Sannolikt minskande	Filter och/eller produkter av hög kvalitet

5 Energilagring i byggnader anpassad till lokal elproduktion

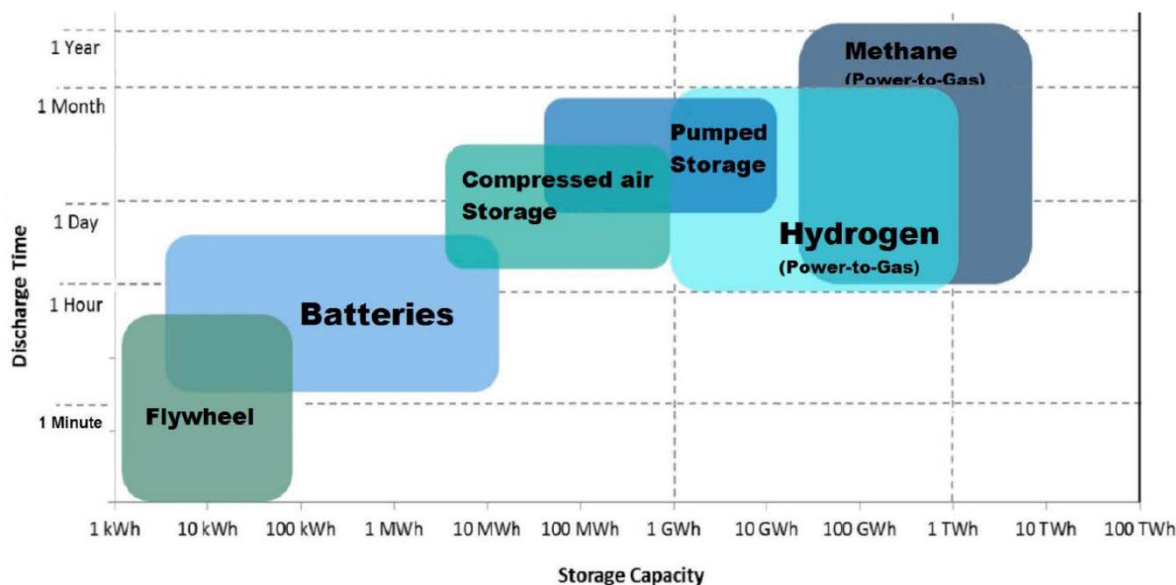
Det finns många olika sätt att lagra energi, även vad gäller lokal lagring, dvs. lagring nära konsument eller producent. Ett sätt som traditionellt har använts i bostäder är ackumulatortank där man värmer upp vatten, t.ex. när man eldar med ved, för att använda för varmvatten och för att värma upp huset när det behövs. Med en ökad lokal energiproduktion i form av t.ex. solpaneler och vindkraft behövs det ökad lagring och då företrädesvis lokal lagring för att kunna utnyttja dessa energislag till fullo, då dessa produktionsmetoder inte nödvändigtvis producerar el och energi vid det tillfälle när det behöver förbrukas. Solenergi produceras mest dagtid när vi inte är hemma och vindenergi produceras när det blåser. I ett dokument från EU-kommissionen, "Energy storage – the role of electricity" [EU, 2017], görs en genomgång av olika alternativ som finns och hur de kan fungera i elsystemet. Man delar in systemen i mekaniska (pumpkraftverk (pumped hydro storage), komprimerad luft, flytande luft och svänghjul), termiska (termokemiska, värmelagring (så kallad sensible thermal), fasomvandlingsvärme), kemiska (vätgas och syntetisk naturgas), elektrokemiska (Li-jonbatterier, blybatterier, natriumsulfatbatterier och flödesbatterier) samt elektriska (superkondensatorer) [EU, 2017, Ibrahim et al., 2008]. En del av dessa är mest lämpade för storskaliga lager såsom pumpkraftverk medan andra kan komma ifråga för lokal lagring. Vilka alternativ som kommer att bli dominerande beror på bland annat på ekonomi (kostnad för installation och underhåll, hur utrymmeskrävande de är etc.), tekniska faktorer (tidsskala (ska energin lagras mycket kort tid, någon dag eller en hel säsong), effektbehov, etc.) samt miljöfaktorer (faror, återanvändningsmöjligheter, etc.).

Lager som anses komma i fråga för lokal lagring är främst batterier och termisk lagring (traditionell värmelagring i t.ex. vatten samt fasomvandlingssystem) [EU, 2017, Lott et al., 2014, Nordling et al., 2015]. I viss mån används även komprimerad luft, svänghjul och "power to gas" där den producerade kraften används till att framställa gas som sedan kan omvandlas till energi igen (främst vätgas, se avsnitt 5.3) för lokal lagring. Dock är verkningsgraden lägre för power to gas än för batterier [Lewandowska-Bernat and Desideri, 2017]. Figur 14 visar olika lagringssystemers tidsskala, dvs. vilken tidsskala som behövs för att lagra och ge ifrån sig energi och effekt. Hushållens behov för daglig variation ligger i storleksordningen timmar och dagar vilket gör att batterilager är mest

relevanta

för

hushåll.



Figur 14 Lagringskapacitet och lagringstid/effektavgivningstid för olika typer av energilager. Bild från [EU, 2017].

Den typ av lagring som enligt informanter och litteratur kommer att bli dominerande de närmaste tiden i Sverige och många andra länder är batterier både i form av olika stationära lager och i form av elfordon [Nordling et al., 2015, Lott et al., 2014]. Den närmaste tiden är alla överens om att Li-jonbatterier kommer vara dominerande, medan osäkerhet råder, bland annat hos informanterna, vad som kommer att dominera på sikt, t.ex. bly-kisegel, natriumsalt, bly-batterier, Li-polymer, etc. Även andra icke-batterilager kan komma på sikt, t.ex. bränslecell/vätgas.

5.1 Batterier

Det finns många olika typer av batterier och utvecklingen på batteriområdet går snabbt, mycket beroende på den allt mer utbredda användningen av batterier, bland annat i fordon. Blybatterier var under lång tid den dominerande typen av laddningsbara batterier, sedan kom olika typer av nickelbatterier (NiCd och NiMH) men nu är det Li-jonbatterier som är den dominerande tekniken för många konsumentprodukter och elfordon och dessa bedöms därför även kunna bli en dominerande teknik för stationära tillämpningar.

Batterier kan kategoriseras inom olika områden:

Primär – sekundär

Ett primärbatteri är ett batteri som inte kan laddas igen. Typiska sådana är alkaliska batterier som t.ex. ficklampsbatterier samt litiummetallbatterier i form av knappcells-batterier. Primärbatterier var förr den typ av batteri som en konsument kom mest i kontakt med. Detta har numera svängt och de flesta batterier idag är laddningsbara sekundärbatterier. Observera att det inte går att se på formen av ett batteri om det är ett primär- eller sekundärbatteri, det kan istället utläsas t.ex. på texten på batteriet.

Cell – batteri

Ett batteri kan bestå av en eller flera celler. Typiska encellsbatterier är knappcellsbatterier, ficklampsbatterier och mobiltelefonbatterier, medan batterier i elfordon eller för energilagring i hemmet består av många celler (i Tesla används exempelvis ett par tusen celler), dessa celler är då ofta ihopsatta i moduler.

Paketering

Battericeller har olika format. De kan t.ex. vara cylindriska 18650 celler, dvs. celler som är cylindriska och som typiskt satt i gamla laptops, där siffrorna 18650 är storleken på cellen (18 mm diameter och 65 mm långt), prismatiska som har ett annat tvärsnitt än cirkulärt men ändå ett hårt hölje, eller så kan de vara så kallade påsceller (pouch) där höljet är liknande det i en kaffepåse.

Cellkemi

Det finns många olika typer av cellkemier. Traditionellt har bly-batterier, ofta kallade bly – syra batterier använts. Därefter blev NiCd batterier vanliga men de övergavs till viss del av miljöskäl för att ersättas av nickelmetallhydrid NiMH som blev de vanligaste uppladdningsbara batterierna i konsumentprodukter, men numera är Li-jon dominerande på marknaden. Alkaliska batterier har och är vanliga i småbatterier som inte är uppladdningsbara. Litium-metallbatterier är ofta små batterier som användes t.ex. i kameror och brandvarnare, det är batterier som inte är uppladdningsbara men som fungerar under lång tid. Alla dessa är antingen primär- eller sekundärbatterier och kan ha olika paketering. Litiumbatteri är ett samlingsnamn för litiummetall och Li-jonbatterier. Dessa två batterityper har fundamentalt olika egenskaper och det är olyckligt att detta begrepp används, dvs. litiumbatteri, eftersom det kan ge upphov till missförstånd hur ett batteri ska hanteras.

De batterier som uppmärksammas mest just nu för energilagring är Li-jonbatterier. Li-jon är ett familjenamn för en typ av batterier där litiumet inte förekommer i metallisk form utan i sin jonform. Li-jonfamiljen är stor och man hittar förkortningar som NMC, LFP, LCO etc. som beskriver vilken batterikemi det är. Förkortningen berättar i själva verket vad katoden i cellen består av, LCO är Litium Cobalt Oxid, NMC Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide, LFP Lithium Iron Phosphate etc. I övrigt består cellen av en grafitanod samt elektrolyt. Elektrolyten består av ett LiFP6 salt löst i en blandning av olika kolvätebaserade lösningsmedel, dvs elektrolyten är brännbar. Li-jonbatterier är stabila endast inom ett visst temperatur/spänning intervall. Om batterierna används utanför detta intervall kan de självuppvärmas och slutligen hamna i termisk rusning (thermal runaway) vilken kan resultera i brand/explosion.

För att skydda mot termisk rusning finns det olika skyddsmekanismer, dessa finns antingen i cellen eller så används BMS (battery management system) för att upprätthålla skyddsnivån. Skyddsmekanismer i cellen inkluderar:

- CID Current Interrupt Device som bryter kretsen om trycket stiger för mycket i cellen
- PTC positive temperature coefficient vilken gör att strömmen minskar om temperaturen ökar

Dessutom kan celler vara utrustade med säkerhetsventiler som släpper ut gas och elektrolyt för att undvika att cellen exploderar. Påsceller har inte sådana säkerhetsventiler men öppnar sig vid ganska låga tryck. Dessutom pågår det ständigt utvecklingsarbete med att förbättra separatorer mm i cellen för att undvika att den hamnar i thermal runaway.

BMS:en styr hur hela batteripacket arbetar. Detta pack kan bestå av en eller flera moduler. BMS:en styr sitt arbete baserat på spännings- och temperaturmätningar i modulerna. Inom fordonsindustrin har man i regel endast en spännings- och temperaturmätning per modul medan fartygsindustrin har en mätning per cell. BMS'en styr t.ex. för att balansera mellan moduler samt övervakar så att systemet befinner sig inom arbetsområdet och kan t.ex. stänga ner vid behov.

5.2 Termiska lager

Lagring av energi i form av värme har under lång tid skett i ackumulatortankar. Termisk lagring med uppvärmning av vatten från t.ex. solenergi har hög verkningsgrad och borde kunna nyttjas mer. Dock har det, åtminstone för småhus, hamnat lite i skymundan numera enligt en informant. På senare tid har andra former av termisk lagring som nyttjar fasomvandling i material börjat utvecklas, så kallad PCM (phase changing materials). Tanken är att sådana material ska kunna integreras i exempelvis väggar. För att energilagring i form av fasomvandling ska kunna ske behöver fasomvandlingen ske i det temperaturområde som önskas, dvs. för inomhusmiljöer cirka 20°C. Det pågår idag forskning avseende t.ex. olika organiska materials potential för att användas som PCM [Heier, 2013, Kalagasidis, 2018].

5.3 Power to gas

Power to gas innebär att man omvandlar elen till t.ex. vätgas genom elektrolys. Vätgasen kan sedan användas i en bränslecell för att skapa el när behovet uppstår. Verkningsgraden för omvandling av el till gas är dock endast cirka 75 % idag [Lewandowska-Bernat and Desideri, 2017], och ytterligare förluster sker sedan i återomvandlingen från gas till el. Dock kan det vara lönsamt för säsongslagring och det finns idag anläggningar i Vårgårda [von Schultz, 2019] samt hos en privatperson utanför Göteborg [von Schultz, 2017].

5.4 Brandrisker och faror

Brandrisker och brandfaror är olika för de olika typerna av energilager. Ackumulatortankar är känd teknik som har använts länge där inga särskilda brandrisker föreligger förutom en något förhöjd risk för antändning av t.ex. trä från temperaturer på ca 70°C [DeHaan and Icove, 2011]. För system som utnyttjar fasomvandling beror brandrisken för det fasomvandlande materialet på dess arbetstemperatur. Dessutom ökar brandbelastningen i byggnaden om det fasomvandlande materialet är organiskt. För system med power to gas är brandfarorna avsevärda då dessa använder brandfarliga/explosiva gaser. Det finns regelverk för hantering och lagring olika bränslen

såsom bensen, gasol, olja mm. T.ex. anger MSB att man högst får lagra 100 liter bensen eller 60 liter gasol hemma och varje gasolbehållare får vara högst 30 liter, behållarna får inte förvaras på vind eller källare, förutom om källaren utgör egen brandcell. Dock är det i regel vätgas som används i power to gas system. Vätgas har många mycket speciella egenskaper och diffunderar t.ex. mycket lätt igenom det flesta material, ett stort explosivt område och brinner med osynlig låga mm. Gemene man har idag ytterst begränsad erfarenhet av vätgas och vätgassystem, dessutom finns det inget regelverk/standarder anpassade för lekmannen. Om vätgassamhället ska kunna bli en realitet krävs det avsevärd utveckling inom detta område. Nyligen inträffade en explosion på en tankstation för vätgas i Norge som visar på att det antagligen behöver göras mer på säkerhetsområdet [Kristensson, 2019].

5.4.1 Brandrisker med batterilager

Batterier utgör en kategori av stationära energilager som vi än så länge inte har någon större erfarenhet av. Gemene man har erfarenhet av mindre batterier för olika konsumentprodukter såsom mobiltelefoner, ficklampor och bormaskiner, men inte för stationära lager. Vad gäller råd, t.ex. i arbetsmiljöverkets författningssamling, för laddningsbara batterier är de ofta utvecklade för blybatterier som avger vätgas under drift, medan det inte finns några särskilda råd eller regler för Li-jonbatterier eftersom dessa inte avger någon gas under normaldrift.

Li-jonbatterier har hög energitäthet och klarar av att laddas och laddas ur många gånger utan att förlora prestanda. Dock är de endast stabila inom ett visst spännings- och temperaturintervall. Utanför detta intervall förkortas livslängden och med större avvikelser från det stabila intervallet kan de hamna i termisk rusning då batteriet/cellen värmer upp sig själv för att slutligen explodera eller öppnas så att brännbara och giftiga gaser avges. Vid termisk rusning kan gaserna antändas av cellen själv eller av andra tändkällor i närheten. Cellen kan även hamna i termisk rusning genom t.ex. intern kortslutning eller olika former av åverkan ("abuse" på engelska), detta kan vara extern kortslutning, mekanisk påverkan mm. Många celler är utrustade med olika säkerhetssystem som förhindrar att cellen exploderar. Dessa gör t.ex. att elektrolyt ventileras ut ur cellen innan den exploderar och vilket innebär att brännbara och giftiga gaser avges innan en brand startar.

Det finns i litteraturen en uppsjö av temperaturvärden på när termisk rusning börjar. Detta beror dels på att det varierar för olika celler, men olika författare rapporterar också olika värden för samma cellkemi. De värden som anges varierar mellan 110-300°C [Bisschop et al., 2019, Golubkov et al., 2018, Xiang et al., 2009, Brand et al., 2016, Spotnitz and Franklin, 2003, Golubkov et al., 2015]. Detta är värden för vid vilken temperatursönderfallet av katod och elektrolyt börjar vilket är det stadium då självuppvärmningen är mycket snabb och inte går att häva. Dock sker andra processer vid lägre temperaturer som påbörjar uppvärmningen eller utgör en fara. Från ca 75°C kan elektrolyten, beroende på vilka lösningsmedel elektrolyten består av, börja förångas [Bisschop et al., 2019, Larsson, 2017, Eshetu et al., 2013], detta gör att trycket stiger i

cellen och brännbara gaser kan släppas ut; vid $>70^{\circ}\text{C}$ kan även SEI lagret (Solid Electrolyte Interface) börjar brytas ned [Herstedt, 2003, Xu, 2014, Spotnitz and Franklin, 2003] och vid 125 respektive 155 $^{\circ}\text{C}$ bryts separatoren ned (Polyeten respektive polypropen) [Larsson, 2017, Tobishima and Yamaki, 1999].

De gaser som avges vid en brand i ett Li-jonbatteri eller ventilerings av ett batteri är förutom att de är brännbara även giftiga. Den gas som rönt störst intresse är vätefluorid, HF. HF är mycket giftig att andas in och löst i vatten ger den en syra som ger skador på huden, även gasen i sig är antagligen farlig att få på huden även om osäkerhet råder vid vilka nivåer fara uppstår [Wingfors et al., 2019]. HF är mycket korrosivt och etsar även glas.

HF-produktionen är något som oroar räddningstjänsten. Det finns idag inga särskilda anvisningar för hur man bör angripa en brand som involverar batterier i en byggnad eller där det finns risk för att HF avges. Det närmsta man kommer ett råd är det som anges på Utkiken dvs. att inte gå in i en byggnad om man misstänker att det finns ett batterilager i byggnaden förutom i livräddande syfte [Utkiken, 2018]. Man råder också till att ta av kläderna efter insats direkt på plats, med andningsmask på sig, om man misstänker att man utsatts för HF [Wingfors et al., 2019].

När ett Li-jonbatteri har börjat brinna är det svårsläckt. Detta beror dels på att det är svårt att komma åt själva källan till branden då cellerna ofta är väl inkapslade, dels på att det behövs mycket kylning för att kunna kyla bort batteriets självuppvärmning. Cellerna avger också till viss del syre vid termisk rusning när katoden sönderfaller, vilket gör att kvävning av branden har begränsad effekt. Att isolera batteriet (dvs skilja flammor och batteri åt) ger i regel inte heller någon effekt då batteriet utvecklar värmen av sig själv och behöver inte förbränningen utanför för att utveckla värmen. Att släcka den cell som är i termisk rusning går inte utan åtgärder får istället inriktas på att förhindra spridning till intilliggande celler eller moduler. För att göra det behöver släckmedlet antagligen appliceras in i packen (beror på design av packen). Vid ett propageringstest finns det ofta möjlighet att klara testet antingen utan eller med släckmedel. Räddningstjänsten har ofta ingen möjlighet att komma åt inne i batteripacken, exempelvis bör en batteripack inte skäras upp, utan får istället fokusera på att förhindra brandspridning till andra föremål om det inte finns någon avsedd accesspunkt för i packen.

I många fall råder det osäkerhet om vilket släckmedel som är lämpligt. Ibland ges det felaktiga rådet att man ska använda släckmedel för metaller, detta på grund av förväxling mellan litiummetallbatterier och Li-jonbatterier. Vattenbaserade släckmedel är det bästa för Li-jonbatterier pga. dessa släckmedels goda kylförmåga [Andersson et al., 2018].

Många situationer som kan leda till termisk rusning går att förhindra genom design av systemet, såsom exempelvis var man placerar batteriet (temperatur, ventilation, mekaniskt skydd etc.) samt nyttjandet av batteriets styrsystem, BMS. BMS:en kan dock aldrig skydda mot intern kortslutning. Det bör därför säkerställas att en intern kortslutning i en cell med efterföljande termisk rusning inte leder till termisk rusning i intilliggande celler, något som testas i så kallade propageringstest.

Second life, dvs. användning av begagnade batterier, är något man hoppas ska ge batterier fler miljöfördelar då tillverkning av batterier är belastande för miljön. En möjlig sådan återvinningsväg är t.ex. återanvändning av batterier från fordon som nyttjas för stationära applikationer när prestanda har sjunkit så pass att de inte anses vara lämpliga för fordon. Detta skulle då kunna ske både genom hemmabyggen eller att olika tillverkarsamarbeten kommer till stånd som exempelvis har skett i BRf Viva i Göteborg. Vid återanvändning kan det, beroende på vem som sätter ihop second-life batteriet, bli så att delar plockas från olika batteripack och sätts ihop till ett nytt batteri. Vid en sådan hopsättning är det viktigt att säkerheten kan upprätthållas. Det finns idag dock inga metoder för att avgöra cellernas status säkerhetsmässigt och man vet inte vad celler har varit utsatta för under sin livstid. Celler och BMS är dessutom ofta tätt sammanlänkade, t.ex. har man i Teslas batterier tagit bort skydd på cellnivå [bro, 2015] och har ersatt det med en mer aktiv BMS och ett skum. Om man t.ex. använder en BMS avsedd för andra celler till Teslas celler kan det eventuellt få förödande konsekvenser. Att blanda olika celler/moduler utgör också en säkerhetsrisk då en viktig faktor i en batteripack är att cellerna är balanserade och reagerar på liknande sätt sinsemellan beroende på elektrisk last mm.

5.5 Inträffade bränder

Än så länge är lokal lagring av energi och elenergi relativt ovanligt förutom kanske ackumulatortankar, därför presenteras i detta avsnitt även bränder som härrör till de olika lagringsformerna även i andra applikationer.

5.5.1 Batterier

Batterier har nu använts i elfordon och hybridfordon under en längre tid och det börjar komma viss statistik på hur ofta det inträffar bränder. Generellt så brinner fordon, oavsett drivlina, ganska ofta. Bränderna kan delas in i tre typer: anlagda bränder (som är vanligast), bränder till följd av kollision och bränder som uppstår av andra orsaker. Av dessa tre typer är det den sistnämnda som är mest intressant för stationära lager. Tesla har den största elfordonsmarknaden och följer upp brandstatistik [Tesla, 2019]. För 2018 rapporterar de en tiondel så många bränder som övrig fordonsflotta per körmil. Av dessa bränder är 15 % bränder som inte har med fordonet i sig att göra. Det framgår dock inte hur många av bränderna som beror på kollision. Bisschop m.fl. [Bisschop et al., 2019] listar några brandincidenter för fordon, en del av dessa har inträffat under laddning. För Toyota Prius och Nissan Leaf finns det inga fall där branden har startat i traktionsbatteriet [Barth and Swaim, 2018] (batteriet som används för att driva bilen framåt). Data från MSB för åren 2011-2014 pekar på ungefär en brand per år pga. laddning i parkeringshus och dylikt [Gehandler et al., 2017].

I april skadades åtta brandmän i en brand i ett containerbaserat batterilager. Det finns fortfarande inte mycket information om händelsen men det tycks som att de brännbara gaserna som släppts ut från cellerna antändes [Spector, 2019].

I Malmö skadades en person efter att ha vistats en kort stund i rök från ett elcykelbatteri. Batteriet var inte på laddning utan hade legat orört i en månad.

Batterier till handhållna verktyg har även börjat brinna i en gruva [Gillis, 2019].

5.6 Regelverket i Sverige rörande elenergilagring

Elsäkerhetsverket gjorde 2016 en analys av informationsbehov och elsäkerhetskrav rörande små- och storskalig energilagring av el [Elsäkerhetsverket, 2016]. De finner där att:

- De krav som finns vad gäller installationen (ellagen [Regeringskansliet, 1997], starkströmsförordningen [Regeringskansliet, 2009], elinstallatörsförordningen [Regeringskansliet, 1990] och elsäkerhetsverkets utförandeföreskrifter [Elsäkerhetsverket, 2008]) är tillräckliga men att det finns brister vad gäller varselmärkning.
- Det är av största vikt att tillverkarna ser till att det finns en lättfattlig och tydlig installations- och bruksanvisning som följer med batterilagret.

De olika regelverken i Sverige är endast ramföreskrifter och har grundkravet att anläggningar ska vara utförda enligt god elsäkerhetspraxis. Tekniska krav finns i de olika standarder som ges ut av Svensk Elstandard som i praktiken är svensk återutgivning av europeiska eller internationella standarder. Om man följer dessa anses god elsäkerhetspraxis vara uppfylld.

Småskaliga batterilager hanteras av SS-EN 50438 [SEK Svensk Elstandard, 2014] medan storskaliga hanteras av SS-EN 50160 [SEK Svensk Elstandard, 2011]. Kraven på de småskaliga batterilagren ställs utifrån att lekmän kommer i kontakt med dem. Effektbehovet hos ett batterilager i en bostad är dock så stort att det ofta hamnar i gruppen storskaliga och därigenom är kraven som ställs avsedda för professionella och inte för lekmän, detta bör ändras så att ett batterilager i bostadshus täcks av SS-EN 50438 på samma sätt som t.ex. Cypern, Finland och Irland har gjort.

Man konstaterar även i rapporten att då utvecklingstakten inom batterier är hög ligger standardiseringen efter. Vidare konstaterar man att en installation kan vara bygglovspliktig. Enligt rapporten ska risken för brand hanteras i gällande och kommande standarder för batterikemi och styrelektronik. Speciellt nämner de ventilation av gaser som kan uppstå vid överladdning. Detta verkar dock inte ha inkluderats ännu i någon standard, de ventilationskrav som finns härrör från blybatterier som avger vätegas vid normal användning. Elsäkerhetsverket tar även upp second life av fordonsbatterier som möjliga batterilager i byggnader där man säger att åldringsaspekterna bör belysas och att tillverkare av batterilager därför bör kontrollera och dokumentera status för batteripacken. Än så länge finns det dock begränsad kunskap om hur detta bör göras.

Boverkets byggregler gäller för nyuppförande av byggnader samt vid ändring av byggnader. Dock går det inte att explicit hitta energilagring i form av batterier i Boverkets byggregler (BBR). De installationer som tas upp är uppvärmningsanordningar (eldstäder, askutrymme, skorstenar, anslutning till rök och avgaskanal, avskilt pannrum, rensning och inspektion), matlagningsanordningar (spisar, grillar, ugnar och fritöser) och garage. För fasta elinstallationer hänvisar man till Elsäkerhetsverket.

Brandkonsulter som dimensionerar brandskyddet i byggnader har idag ingen praxis vad gäller batterier. En del konsulter hävdar, åtminstone tidigare, att batterier är en lös installation och är därför inte inkluderat i BBR. Det är dock tveksamt om de installationer vi ser framöver ska anses vara en lös installation. Om batterierna stadigvarande ingår i byggnaden och bidrar till byggnadens funktion så räknas de som en byggprodukt.

Byggnader/utrymmen med förhöjd brandrisk klassas som verksamhetsklass¹ 6 enligt BBR och ska utgöra en egen brandcell. Dock passar beskrivningen av vad som karakteriserar ett sådant utrymme in dåligt på batterilager, ”Lokaler som omfattas av föreskriften är främst sådana där lättantändligt material tillverkas och bearbetas i mer än ringa omfattning eller där lättantändligt damm kan anhopas. Exempel på sådana lokaler är kvarnar, pappersindustri, textilindustri, produktionsbyggnader inom jordbruk och utrymmen för yrkesmässig bearbetning av trä.” Detta gör att batterier nog inte hamnar i verksamhetsklass 6 med dagens beskrivning.

Brandskyddet för batterilager skulle dock eventuellt kunna dimensioneras på samma sätt som likartade installationer [Ottosson, 2018]. BBR 5:4 berör skydd mot uppkomst av brand. I kapitlet regleras brandskyddet för närbelägna byggnadsdelar till fasta installationer som t.ex. uppvärmningsanordningar, matlagingsanordningar och lokaler för brandfarlig verksamhet. Kravnivån anger att (BFS 2011:26):

”Byggnader och fasta installationer ska utformas med tillfredställande skydd mot uppkomst av brand.

Temperaturen på ytan av närbelägna byggnadsdelar och fast inredning av brännbart material får inte bli så hög att materialet kan antända.”

Det allmänna rådet för att uppfylla andra stycket är att temperaturen på ytan av närliggande byggnadsdelar inte får överstiga 85°C. Paragraf 5:427 tar specifikt upp pannrum, vilket skulle kunna anses vara den fasta installation som mest liknar ett batterilager. Detta skulle då göra att man hamnar på samma nivå för bostäder och andra byggnader som människor vistas i som man ställer inom jordbruket [Brandskyddsföreningen, 2019], dvs att batterilagret bör vara i egen brandcell. I paragraf 5:427 i BBR anges att pannor som har en högre sammanlagd märkeffekt än 60 kW bör installeras avskilt från övriga rum i byggnaden. För bostäder i verksamhetsklass 3, och kontor i verksamhetsklass 1 gäller att pannrum endast genom luftsluss bör stå i förbindelse med utrymningsvägar.

¹ Utrymmen i byggnader ska, utifrån avsedd verksamhet, delas in i verksamhetsklasser (Vk). (BFS 2011:26). Allmänt råd Indelningen beror på – vilken utsträckning personerna har kännedom om byggnaden och dess utrymningsmöjligheter, – om personerna till största delen kan utrymma på egen hand, – om personerna kan förväntas vara vakna, samt – om förhöjd risk för uppkomst av brand förekommer eller där en brand kan få ett mycket snabbt och omfattande förlopp. Samma byggnad kan delas in i flera verksamhetsklasser.

Lag (SFS 2003:778) om skydd mot olyckor (LSO) anger generella skyldigheter för ägare eller nyttjanderättshavare av byggnader:

”2 § Ägare eller nyttjanderättshavare till byggnader eller andra anläggningar skall i skälig omfattning hålla utrustning för släckning av brand och för livräddning vid brand eller annan olycka och i övrigt vidta de åtgärder som behövs för att förebygga brand och för att hindra eller begränsa skador till följd av brand.”

”3 § Ägare av byggnader eller andra anläggningar, där det med hänsyn till risken för brand eller konsekvenserna av brand bör ställas särskilda krav på en kontroll av brandskyddet, skall i skriftlig form lämna en redogörelse för brandskyddet. En nyttjanderättshavare skall ge ägaren de uppgifter som behövs för att denne skall kunna fullgöra sin skyldighet.”

Avsnitt 5:4 i BBR skulle kunna användas som vägledning vid dimensionering av brandskydd för batteriförvaring, och på så sätt möta de krav som anges i SFS 2003:778 (LSO). Det är dock osäkert i vad mån det görs vid projektering av byggnader med batterilagring.

Enligt avsnitt 5:53 Brandcellsindelning i BBR:

”byggnader ska delas in i brandceller i sådan omfattning att det medför tillräcklig tid för utrymning och att konsekvenserna på grund av brand begränsas. För mindre byggnader med en verksamhet där konsekvenserna av en brand är ringa behövs inga brandceller. Brandcellsindelning får helt eller delvis ersättas av brandtekniska installationer.” Det allmänna rådet säger ”Utrymmen i olika verksamhetsklasser bör placeras i skilda brandceller. Som alternativ kan samtliga utrymmen i olika verksamhetsklasser inom brandcellen utformas så att kraven på brandskydd som gäller för varje ingående verksamhet uppfylls. Utrymningsvägar bör utgöra egna brandceller. Andra utrymmen som bör utgöra egna brandceller anges i avsnitt 5:54. Utrymmen i byggnader med verksamhet som medför stor sannolikhet för uppkomst av brand och där en sådan kan få stora konsekvenser för utrymningssäkerheten bör delas in i egna brandceller. Sådana utrymmen kan vara lokaler där man utför heta arbeten, garage, avskilda pannrum, storkök, avfallsrum och liknande. Brandceller bör avskilja rum med hög brandbelastning ($>1\,600\text{ MJ/m}^2$) eller lokaler i verksamhetsklass 6 från övriga utrymmen. Samma brandcell bör inte – med undantag av bostäder i verksamhetsklass 3A, trapphus, schakt och öppna garage – omfatta utrymmen inom fler än två plan.”

Möjligen kan ett batterilager hamna under detta och ska därigenom vara i en egen brandcell, det är dock osäkert i vilken mån så sker i praktiken.. Eventuellt bör man här tolka olika beroende på om det är ett platsbyggt energilager där man förlitar sig på byggnadens brandsäkerhet eller där man köper en färdig produkt och förlitar sig på

produktens säkerhet. För att kunna göra denna skillnaden är det dock viktigt att produkten är konstruerad så att brandpropagering i lagret förhindras.

Det saknas regelverk för stationära Li-jonbatterilager i byggnader i Sverige. Bly- och nickel-kadmiumbatterier är däremot reglerat i två standarder. I standarden SS-EN 50272-2 [SEK Svensk Elstandard, 2001] regleras stationära bly- och nickel-kadmiumbatterier och i SS-EN 62485-3 [SEK Svensk Elstandard, 2015] anges hur laddstationer för t.ex. truckar skall utformas. SS-EN 50272-2 upphävdes 2019-06-11 och ersattes av SS-EN IEC 62485-2 ”Laddningsbara batterier och batterianläggningar – Säkerhet – Stationära batterier” som i princip utgörs av IEC 62485-2:2010. Standarden reglerar blybatterier, nickel-kadmiumbatterier och Nickel-metallhydrid batterier upp till 1500 V DC. Den beskriver de viktigaste åtgärderna till skydd mot risker från elektricitet, gasavgivning och elektrolyt. Arbetsmiljöverkets föreskrift för blybatterier går även att hitta i AFS 1988:4 [Arbetsmarknadsstyrelsen, 1988]. Föreskriften anger att anläggningar för blybatterier ska utformas så att de är välventilerade och att de separeras från övrig industriell produktion. Begränsad information om brandsäkerhet i elektriska system kan även hittas på <https://www.brandskyddsforeningen.se/elbesiktning/informationmaterial/faktablad/>.

Boverket har idag inga regler eller rekommendationer kring stationära batterier annat än allmänna krav på exempelvis brandcellsindelning och utrymningssäkerhet. Det finns dock redan idag anläggningar installerade t.ex. i forskningsvillan på RISE i Borås och i bostadsrättsföreningen Viva i Göteborg där utjänta bussbatterier har installerats i ett bostadsområde. Ett annat närliggande problem är elfordon i garage. Bostadsrättsföreningar t.ex. vill gärna kunna erbjuda laddning för elfordonsägare, frågan är vilka krav bör man ställa på var laddstationer ska få finnas. Boverket fick i september 2018 ett regeringsuppdrag att utreda ”krav på laddinfrastruktur för elfordon enligt direktivet om byggnaders energiprestanda” [Regeringskansliet, 2018], men batterilager i byggnader tycks ännu inte ha aktualiserats från regeringens eller Boverkets sida.

Det finns idag möjlighet att från bilåtervinnare köpa battericeller som har använts i fordon. Av dessa kan privatpersoner själva bygga ett lager, eller så kanske de köps upp av någon tillverkare av lager. Det finns idag inga krav eller riktlinjer för hur man kan avgöra säkerhetsstatusen hos sådana lager.

Just nu pågår det många diskussioner om HF och dess påverkan på räddningstjänstpersonal vid en brand som involverar batterilager. Den rekommendation som finns idag på Utkiken.net är som tidigare nämnts att inte gå in i en byggnad om man misstänker att det finns ett batterilager i byggnaden, förutom i livräddande syfte.

För jordbruket finns det krav på att stationära batterilager ska vara i en separat brandcell, men för bostäder finns inget sådant krav.

SEKs Handbok för solceller [SEK, 2019] anger att:

”Om det finns batterier anslutna till anläggningen ska dessa vara försedda med ett eget överströmsskydd som ska placeras så nära batteriet som möjligt,

mellan batteriet och utrustningen för laddningsövervakning. Man bör också beakta risk för brand i själva batterisystemet och placera batterier i utrymmen så att konsekvenserna vid en eventuell batteribrand begränsas”

5.6.1 Regler i andra länder

I USA har NFPA gett ut regler för 20-600 kWh batterilager där man ställer krav på sprinkler, avstånd på minst 3 fot mellan varje lager på 50 kWh (250 kWh för batterilager som en färdig produkt) samt 1-2 timmars brandavskiljande konstruktion beroende på byggnadstyp. Dessutom anges var de får installeras i förhållande till inträngningsväg för räddningstjänsten.

I Australien avslutades en andra kommentarsomgång på DR2 AS/NZS 5139:2019 i april 2019. Dokumentet behandlar installation, driftsättande och dokumentation av batterilager. Man anger var olika batterilager får installeras, krav på miljön där de installeras, brandskydd, samt hur de ska märkas. Lagren ska inte installeras i bebodda rum utan placeras i garage, förråd el. dyl. Det ställs inget brandmotståndskrav på vägg mellan utrymme där lagret finns och boenderum förutom att det ska vara ett icke brännbart material och inga hål i det. Ventilation från lagerutrymmet ska ske till det fria. Detta förslag skiljer sig från 2017 års förslag som innebar att batterilager i bostadsbyggnad inte var tillåtet, att de inte får finnas inom 1 m från utrymningsväg eller ansamlingsplats, och att måste vara placerade i ett utrymme med en timmes brandmotstånd.

I Storbritannien varierar reglerna mellan England, Skottland och Nordirland men i princip ska brandspridning begränsas med hjälp av brandmotstånd och/eller släcksystem och det ska säkerställas att brandspridning inte sker i gömda utrymmen. Det finns två dokument som anger specifika krav på det som utgör en större brandrisk. Det anges inte explicit var batterilager hör hemma vilket ger utrymme för olika tolkningar.

I Danmark har en vägledning publicerats från projektet SafeBESS som pågick 2017-2018 [Tekniq Arbejdsgiverne]. Där anges att batteri inte bör placeras i rum där människor uppehåller sig, dvs. i hall, kök, vardags- och sovrum, utan bör placeras i pannrum eller dylikt som är avskärmat från boendedelen. Helst ska de placeras i uthus eller garage. Temperatur och fuktighet ska beaktas vid placeringen av batterilagret (20-30°C och ej hög luftfuktighet). Lagret bör inte placeras i små rum där det kan orsaka temperaturökning och rummet bör ha ventilation till det fria, eller möjlighet bör finnas att styra ventilationen till det fria vid behov. Ventilationen ska vara designad för att föra bort gaser vid felsituationer. Batteriets vikt ska beaktas vid installationen, liksom lufttillgång runt batteriet enligt tillverkarens anvisningar. Anläggningen bör fjärrövervakas genom internet. Brandskyddet i rummet ska vara anpassat till batteriet. Vid nybyggnad ska det finnas elnätanslutna brandvarnare med batteribackup och dessa ska ge larm i hela byggnaden. Max 30 kWh får installeras inomhus, medan max 100 kWh tillåts i garage

och dylikt. Större energier kan eventuellt installeras efter tillåtelse från brandmyndighet. Fristående utomhus tillåts väsentligt större anläggningar. Storleken på lager har bestämts genom analogi med mängden brännbar vätska/gas som får förvaras i en bostad. I en presentation anger SafeBESS även IEC 62619 inklusive propageringstest som ett råd för högre säkerhet samt IEC 61508-5 för krav vad gäller funktionssäkerhet.

NEK400 [Norsk Elektroteknisk Komité, 2018] beskriver i ganska allmänna ordalag vilka skyddssystem som ska finnas på batterier, mot överladdning etc. Man ställer krav på att man ska kunna koppla bort batteriet både utanför rummet samt lokalt vid batteriet. Man säger att det ska finnas märkning utanför batterirum. Man ställer krav på ventilationen men det är endast för batterier som avger t.ex. vätgas under normalanvändning. Batterier och batterisystem får endast installeras i skyddade omgivningar och det kan vara nödvändigt att placera dem i utrymmen med begränsat tillträde. Golvet ska vara anpassat för batteriet. Man ställer krav på dörrarna om endast auktoriserade personer har tillträde men inte annars.

5.6.2 Standardisering

Flera tekniska kommittéer behandlar batterilager och det finns därigenom en viss risk för överlapp eller att något hamnar mellan stolarna. Upplägget är att det för varje europeisk eller världsomspännande standardiseringsorgan finns en svensk spegelkommitté kallat TK, flera olika europeiska (CEN, CENELEC) och världsomspännande (IEC) kommittéer är kopplade till samma svenska kommitté. De olika kommittéerna och deras omfattning är:

TK8 – Elenergiförsörjningssystem

IEC TC8 utarbetar internationella standarder med tonvikt på elförsörjningens systemaspekter och en godtagbar balans mellan kostnad och kvalitet för elanvändarna. Med elförsörjningssystem menas transmissions- och distributionsnät och anslutna installationer, såväl generatorer som laster. Driftsäkerhet, nätövervakning, ödrift (dvs. när man kör ett lokalt nät utan anslutning till övriga nätet) och anslutningsvillkor är exempel på vad som ingår i kommitténs arbetsområde.

CENELEC TC 8X ska utarbeta de standarder som behövs för att underlätta den avreglerade elmarknaden.

I denna ingår SS-EN 50438. SS-EN 50438 kommer att bytas ut i februari 2022 mot EN 50549-1 lågspänning och -2 mellanspänning som tagits fram av TC8. Dessa standarder fokuserar på strömmens kvalitet vid transformering från DC till AC och handlar till stor del om frekvenssvar.

TK21 – laddningsbara batterier

IEC TC 21 utarbetar produktstandarder, inklusive allmänna fordringar och provningsmetoder, för laddningsbara celler och batterier, oberoende av tillämpning, och för deras installation. Dessa antas i allmänhet också som europeisk standard. CENELEC TC 21X utarbetar därutöver europeiska standarder för startbatterier. Särskild

uppmärksamhet har på senare år visats standarder för litiumbatterier, deras prestanda och säkerhet. Ett nytt arbetsområde inom IEC TC 21 är stationära flödesbatterier.

2017 kom SS-EN 62619 [SEK Svensk Elstandard, 2017] ut som ger säkerhetskrav på Li-jonbatterier och celler för tillämpningar inom industrin. Noterbart är att standarden har "Litiumbatterier" i titeln och så har även beskrivningen av IEC TC 21 ovan som har hämtats från Svensk elstandard, dvs samlingsnamnet för Li-jon och litiummetall batterier. Bruket av samlingsnamnet gör att missförstånd lätt kan uppstå.

I denna TK ingår även SS-EN 50272-2 och SS-EN 62485-3.

TK64- Elinstallationer för lågspänning samt skydd mot elchock

Inom TC64 pågår arbete på 60364 vad gäller bland annat uppställning av batterilager.

TK120 - Elektriska energilagringssystem

En ganska nystartad kommitté. Den har endast 4 medlemmar, 2 från Svensk Elstandard, en från Vattenfall och en från Northvolt. Den internationella kommittén har ca 60 medlemmar och arbetet just nu är fokuserat på 62933-5-2 "Electrical energy storage (EES) systems Part 5-2: Safety requirements for grid integrated EES systems - electrochemical based systems" som handlar om säkerhet hos elektrokemiska lager (batterier). Röstningen på detta dokument avslutades i maj i år. Ingen svensk deltar i det internationella arbetet. Internationella kommittén leds av Guy Marlair från INERIS. Arbetet med 62933-5-2 leds av Japan. Gruppen har sedan tidigare gett ut 62933-5-1 Elektriska energilagringssystem (EES) - Del 5-1: Säkerhetsöversväganden beträffande elektriska energilagringssystem i elnätet – Allmänt.

6 Vanligt förekommande rekommendationer

I delkapitlen nedan ger vi ett urval av de rekommendationer vi har funnit för respektive område solcellsanläggningar, distributionsnät och batterilager. Rekommendationerna är numrerade men inte angivna i någon prioriteringsordning. Huvudsyftet med projektet har dock inte varit att ta fram, eller snarare återge, rekommendationer, utan istället att sammanfatta kunskapsläget samt identifiera områden som bör prioriteras vad gäller fortsatt arbete för förbättrat brandsäkerhet. Dessa prioriterade områden anges i kapitel 8.

6.1 För solcellsanläggningar

1. Fackmannamässig installation och komponenter av hög kvalitet är åtgärder som reducerar risken för fel och därmed för bränder.
2. Solcellsinstallationer bör delas in i mindre sektioner, ett minsta passageutrymme mellan sektionerna rekommenderas, liksom ett minsta avstånd till brandavskärmade. Öppningar för ventilationskanaler bör säkerställas. Det bör också vara ett minimiavstånd från fönster, skorstenar och öppningar i byggnaden till solcellsinstallationen.
3. Brännbara komponenter som kablar bör inte passera över en brandvägg. Om det är oundvikligt så bör dessa installeras i brandsäkra kabelkanaler.
4. Använd icke brännbart material direkt under externa solcellsmoduler.
5. Vid brand i takinstallerade solceller kan faror för räddningstjänstpersonalen föreligga vad gäller bland annat elchock, halk- och fallrisk, elektriska ljusbågar, nedfallande paneler, kollaps av den bärande konstruktionen. Därför är det viktigt att räddningstjänsten inför insatsrutiner vid brand i denna typ av anläggningar.
6. Ur ett räddningstjänstperspektiv rekommenderas att strömbrytaren till solcellsanläggningar placeras på en lättillgänglig plats.
7. Saltvatten och skum bör inte användas på strömbelagd elektrisk utrustning.
8. Enklare anläggningar kan förses med lastfrånskiljare placerade så nära solcellspanelerna som möjligt. Vid stora och mer komplexa anläggningar kan strängkablar förses med kontaktdon som kan tas isär för att begränsa antalet spänningssatta DC-kablar.
9. Fjärrstyrda fränkopplingsanordningar, så kallade brandkårsbrytare, innebär en stor fördel för räddningstjänsten.

10. En förenklad översikt över hela solcellsinstallationer, inklusive placering av moduler, elkablar och frånkopplingsmekanismer, placeras vid den aktuella mätaren för varje byggnad. Det måste också finnas säkerhetsmarkering i de områden där utrustningen är belägen.

6.2 För eldistribution

1. DC-brytare som inte motioneras enligt tillverkarens föreskrifter får en förhöjd resistans och därmed temperatur. För att göra systemet mer robust mot bristande underhåll så bör DC-brytare med en högre strömklass än den som ges av den normala strömmen väljas. Det gör att temperaturen hålls nere trots att resistansen ökar.
2. Kopplingspunkter som t.ex. DC-brytare och växelriktare bör monteras på ett obrännbart material.
3. Använd fabriksbyggda kontakter i störta möjliga utsträckning. Speciellt bör skruvkontakter undvikas.
4. Växelriktaren bör byggas in i ett skal av plåt.
5. För längre laddtider av t.ex. elbilar krävs speciella kontaktidon. Även om normala strömuttag (även kallade Schuko-uttag) är godkända för 16 A så gäller detta endast under en begränsad tid.

6.3 För batterilager

1. Batterilager bör inte installeras i en brandcell där människor sover eller vistas långa tider.
2. Ventilationen bör vara designad för att föra bort gaser vid felsituationer
3. Tillverkarna bör säkerställa att det finns en lättfattlig och tydlig installations- och bruksanvisning som följer med batterilagret.
4. Det bör finnas ett för batteriet anpassat brandskydd och eventuellt sektionering
5. Harmoniserad varselmärkning bör utvecklas för batterilager.

7 Slutsatser

Brandsäkerheten i samhället har sett ur ett långt tidsperspektiv (~100 år) väsentligt förbättrats. Denna förbättring har huvudsakligen drivits fram med hjälp av ett förbättrat regelverk, som ofta inkluderat förbättrade provnings- och kvalificeringsmetoder. En generell observation i arbetet som presenteras i denna rapport är att regelverket inte hinner utvecklas i samma takt som teknikutvecklingen. Detta är en ofta återkommande utmaning inom brandsäkerhet, men gäller speciellt för de teknikområden som behandlas i denna rapport där utvecklingen går mycket snabbt, och de ingående komponenterna nästan uteslutande har stor inneboende brandpotential. Innovativa elsystem i bostäder har hög prioritet ur ett hållbarhetsperspektiv och det är därför av stor betydelse att denna utveckling kan ske utan bakslag i form av osäkerhet vad gäller bränder orsakade av dessa anläggningar. I det korta perspektivet säkerställs en tillräcklig brandsäkerhet genom regelverk och standarder. För att skapa ett relevant regelverk behövs tillämpad forskning, så kallad prenormativ forskning, för att besvara de frågor som ställs vid formulerandet av nya regler och standarder. I det långa perspektivet är det också intressant med mer grundläggande forskning om de bakomliggande brandorsakerna och hur dessa kan motverkas.

För att exemplifiera detta resonemang kan tankeexperimentet göras att det finns en viss typ av brytare som med mycket hög frekvens initierar bränder genom ljusbågar. I det korta perspektivet kan det då, med prenormativ forskning, utredas om dessa brytare skall förbjudas eller tillåtas men utan närliggande brännbart material. I det längre perspektivet kan mer grundläggande forskning genomföras för att minska frekvensen, eller eliminera, dessa ljusbågar. Det senare kan vara speciellt intressant om dessa brytare erbjuder stora fördelar ur andra aspekter, exempelvis låg kostnad eller en miljövänlig livscykel. Detta projekt fokuserar på att snabbt komma ikapp den tekniska utvecklingen inom området vad gäller krav på brandsäkerhet. Rekommendationerna som gavs i kapitel 6, och förslagen på fortsatta studier som ges i kapitel 8, handlar därför till största delen om åtgärder som kan genomföras i närtid, respektive prenormativ forskning för utveckling av förbättrade regelverk och provningsmetoder.

Under arbetets gång har slutsatsen dragits att solcellsproblematiken förefaller skapa mest problem i framtiden om inget görs, dels beroende på bristfälligt regelverk men även beroende på att dessa system är distribuerade i byggnaderna med flera delar som orsakar brand, och att delar är exponerade för utomhusklimat vilket får stora konsekvenser vad gäller uppkomst av fel.

Det finns idag ytterst begränsad erfarenhet av användandet av batterilager för lokal energilagring. Batterilager kan installeras i mer välkontrollerade miljöer eller i utomhusmiljö. Dock behövs det någon form av temperaturkontroll runt ett batterilager med Li-jonbatterier för att upprätthålla prestanda så det kanske mer troligt att de installeras inomhus. Det finns idag inga anvisningar för var lager ska installeras och man kan i princip installera det i ett sovrum. Det är av stor vikt att sådana anvisningar kommer fram, delvis för att skydda konsumenten då sådana batterilager utgör en personrisk,

genom produktion av toxiska gaser. Dessutom, om batteriet börjar brinna utgör det en stor och intensiv brandkälla med potentiellt stora materiella skador som följd. Dessutom bör lagren installeras på en plats som möjliggör räddningstjänstinsats i huset. Med anvisningar eller praxis för var och hur man ska installera batterilager möjliggör man också en snabbare introduktion på marknaden då den osäkerhet som råder kan orsaka fördröjning av installationerna.

Till solcellsproblematiken hör vissa delar från distributionsdelen. I övrigt finner vi att från det breda anslag som projektet hade (t.ex. vindel och Stirlingmotorer) inte finns några delar som i ett absolut brandfrekvensperspektiv kan jämföras med solcellssystem och batterilager. Utvecklingen inom vätgas och bränsleceller bör dock bevakas även ur ett bostadsbrandsperspektiv men det är svårt att i nuläget ge förslag på regelverk och forskning eftersom det idag är relativt okänt hur teknologin kommer att se ut, när och om den börjar installeras i byggnader.

8 Förslag på fortsatt arbete

Installationstakten av lokal elförsörjning i byggnader är idag hög och förväntas dessutom öka pga. ökat utbud och statliga subventioner, och som framgår av denna rapport är sådana installationer förknippade med betydande brandrisker. I detta projekt har ett antal kunskapsluckor identifierats som bedöms som speciellt viktiga att fylla för att lagstiftare, installatörer, fastighetsägare och andra kravställare ska kunna fatta informerade beslut vid utformandet av nya regelverk, vid upphandling och vid installation. Även tillverkare av system för lokal elförsörjning, eller komponenter i sådana system, samt räddningstjänst, skulle gynnas av ett fördjupat kunnande inom området. Detta gäller inte bara indirekt via förbättrade regelverk och kundkrav, utan i vissa av förslagen direkt genom detaljerad förståelse av de mekanismer som orsakar brand och hur sådana bränder kan bekämpas. De prioriterade områden, där fortsatt arbete föreslås, presenteras i delkapitlen nedan för respektive område solcellsanläggningar, distributionsnät och batterilager. I avsnitt 8.4 slutligen kategoriseras dessa områden efter avnämare och efter projektgruppens förslag på prioritet.

8.1 Solcellsanläggningar

- s1. Det är relativt svårt att kvantitativt bedöma hur stort problemet med bränder i solcellsinstallationer är eftersom det statistiska underlaget är litet och inhämtat med olika metoder i olika länder. En noggrann studie av olycksrapporter från bränder i solcellsinstallationer skulle ge bättre kunskap om hur sådana bränder startar. Med en sådan studie som bakgrund skulle det vara motiverat med insamlande av statistik över brandincidenter i solcellanläggningar i olika länder.
- s2. Detaljerad analys av existerande standarder, nationellt såväl som internationellt, för att bedöma vilka standarder som är relevanta för svenska förhållanden, t.ex. med avseende på klimat och med svenska byggregler som randvillkor.
- s3. Det finns mycket få experimentella och teoretiska studier av brandutveckling i solcellsinstallationer. Sådan prenormativ forskning är nödvändig för att utarbeta nya regler och riktlinjer.
 - a. Hur påverkar det underliggande materialets egenskaper brandutvecklingen?
 - b. Hur påverkar mellanrummet mellan moduler och underlag brandutvecklingen, exempelvis lutningsvinkel, avstånd och storlek på modul.
 - c. Under vilka förhållanden kan brandspridning till den underliggande konstruktionen ske.

- d. Speciellt för fasader saknas tekniskt underlag för hur branddynamiken påverkas av mellanrummet mellan underlag och solcellsmodul. Fasadbränder har visat sig kunna vara förödande om denna aspekt inte beaktas.
 - e. Hur bör sektionering utföras på ett effektivt sätt, med samtidigt beaktande av hur brandspridning undviks, hur tillträde för räddningstjänst underlättas (för takinstallationer), och behovet av största möjliga elgenererande yta.
 - f. Fullskaliga försök för att erhålla förståelse om hur brandrisken skiljer sig mellan byggnadsintegrerade och byggnadapplicerade solceller.
- s4. Vilka testmetoder ger mest relevant information om brandrisker i solcellsanläggningar.
- s5. Idag är de flesta testmetoder inte anpassade till solcellmoduler. Vilka testmetoder saknas och kan några väl valda existerande testmetoder vidareutvecklas?
- s6. Hur kan räddningstjänsten bekämpa bränder i solcellsanläggningar på effektivast möjliga sätt, utan att riskera sin egen säkerhet.
- s7. När frågorna ovan är besvarade: Var, hur och i vilken omfattning ska solcellsanläggningar tillåtas installeras och vilka krav ska ställas på brandskyddet.

8.2 Eldistribution

- d1. Vad är vanliga orsaker till att parallella ljusbågar uppstår? En metod för att undersöka detta är att studera skadorna på kablarna efter brandincidenter [NFPA, 2017]
- d2. Seriella ljusbågar:
- a. Var uppkommer de vanligen i moderna solcellssystem? Undersöks förslagsvis genom utredningar av inträffade bränder.
 - b. Ökar eller minskar en säkring den totala säkerheten med säkringar? Undersöks med experiment och beräkningar. Fokus bör ligga på eventuella konsekvenser av kortslutningsströmmar. Om dessa inte orsakar problem så har frågan besvarats, eftersom säkringar då inte har något bidrag till förbättrad brandsäkerhet, men om kortslutningsströmmarna kan medföra problem så blir det metodologiskt svårt att jämföra denna problematik med den ökade risken för seriella ljusbågar.
 - c. Krävs ljusbåge eller räcker resisitiv uppvärmning för antändning? Denna fråga är av generellt intresse för utredning av bränder.

- d3. Kan inverterare byggas så att en eventuell ljusbåge inte leder till brand? Utredds genom experimentella försök.
- d4. Kostnads-nytta-analys för Arc Fault Circuit Interruptor (AFCI).
- d5. Kostnads-nytta-analys för jordfelsbrytare, inkluderande jordfelsbrytare av typ B.
- d6. Hur bör komponenter placeras för att minska risken för att en eventuell brand sprider sig till övriga byggnaden? Utredds genom experimentella försök.
- d7. Kan föremål som kommer in under trådlöst laddade fordon leda till brand? Utredds lämpligen också genom experimentella försök.
- d8. När frågorna ovan är besvarade: Hur bör ett moderniserat regelverk och moderniserade provningsstandarder utformas.

8.3 Batterilager

Lokal lagring av energi med batterier kommer att bli aktuellt i närtid och energilager behöver beaktas i byggregler och andra regler. Flera olika krav bör beaktas. Både Danmark och USA anger storleksbegränsningar för batterilager. I USA anges var de får installeras medan Danmark har råd för var de bör installeras. USA har med brandmotståndet hos brandcellen/rummet medan Australien anger att väggen ska vara obrännbar. USA ställer krav på sprinkler. Danmark anger att brandskyddet ska vara anpassat till batterilagret. Danmark tar även upp ventilationen. Dessutom behöver det tillkomma regler för själva batterilagret eller installationen. Idag finns det möjlighet att köpa t.ex. krockade elfordonsbatterier och bygga ett lager. Märkning av var det finns batterilager är också något som behöver beaktas.

Standardiseringen drivs av de tillverkande företagen som i viss mån bevakar sina intressen. En del större testorganisationer utvecklar sina egna standarder såsom UL och VDE. Det finns även vissa branscher som utvecklar testmetoder och regelverk såsom den marina sektorn. Även om det pågår mycket standardiseringsarbete behöver regler utvecklas med vilka krav som ska gälla enligt vilken standard. Standarder är ofta internationella men det är upp till varje land att sätta sina krav. Den standardisering som görs beaktar ofta kanske inte räddningstjänsten. För att avhjälpa denna situation föreslås följande forskningsinsatser.

- b1. Ta fram regler och installationskrav för batterilager i byggnader.
 - a. Gå igenom de standarder som finns och den standardisering som pågår för att bestämma vilka standarder och krav som bör implementeras i Sverige. T.ex. ger många standarder inte ett klara / icke klara krav, utan man gör ett test och mäter resultatet. Det är viktigt att regelverk anger vilka utfall som är acceptabla.

- b. Är standarderna heltäckande eller är det något test/scenario som saknas? Behövs vidareutveckling av de test som finns? Många standarder har sitt ursprung i andra batterityper.
- c. Var och i vilken mängd kan/bör batterilager installeras?
- d. Krav på omgivande brandskydd/brandmotstånd?
- e. Vilka krav bör ställas på ventilationen för energilager med Li-jonbatterier? Det finns idag inga studier gjorda på hur gaserna sprider sig, ej heller finns det publika data för hur mycket som bildas vid fullskaleförsök.
- f. Utred om det behövs märkningsregler liknande regler för gasflaskor mm.
- g. Vilka krav bör man ställa på var laddstationer ska få finnas med tanke på t.ex. utrymningsvägar och access för räddningstjänsten.

När frågorna ovan är besvarade: Skapa regler och standarder eller praxis för var och i vilken omfattning man får installera batterier. Vilka krav ska ställas på batteriets skydd. Vilka krav ska ställas på brandskyddet. Batterier bör även nämnas i BBR

- b2. Hur göra insats mot brand som kan inkludera batterier? Här behöver både exponering mot giftiga gaser och släckmetoder beaktas.
- b3. Fortsatt utveckling och verifiering av släckmedel och släcksystem lämpliga för batterilager.
- b4. Hur kan termisk rusning förhindras och dess effekter minskas genom design av systemet, såsom exempelvis var man placerar batteriet (temperatur, ventilation, mekaniskt skydd etc.) samt nyttjandet av batteriets styrsystem.
- b5. Hur kan second life batterier kvalitetssäkras med avseende på så kallad SOH (State of Health)?
- b6. Se över gränsdragning mellan olika standarder så att t.ex. att en generatoranläggning i bostadshus täcks av SS-EN 50438 på samma sätt som görs på Cypern, i Finland och Irland.
- b7. Undersök produktion av HF och andra toxiska gaser från batteribränder, och vid behov även hur HF påverkar gemene man vid en brand samt hur det påverkar räddningstjänsten.
- b8. På längre sikt och som en utblick mot alternativ till batterilager: Kartlägga alternativa metoder för energilagring, t.ex. bränsleceller, och analysera risker kopplade till dessa

8.4 Kategorisering och prioriteringsförslag

Förslagen på fortsatt arbete har systematiserats i Tabell 6 där varje åtgärd har kategoriserats efter primär avnämare: räddningstjänst, myndigheter (främst med avseende på personsäkerhet), samt försäkringsbolag och bransch. Även projektgruppens förslag på prioritering för de olika åtgärderna anges.

Tabell 6 Systematisering av förslagen på fortsatt arbete

Åtgärd	Avnämare			Prioritet
	Räddningstjänst	Myndigheter	Försäkringsbolag och bransch	
s3 prenormativ forskning		x	x	hög
s5 vad saknas		x	x	hög
s7 krav, vägen vidare	x	x	x	hög
d1 parallella ljusbågar		x	x	hög
d2a uppkomst av seriella		x	x	hög
d8 regelverk och provning		x	x	hög
b1 regler		x		hög
b2 insats	x			hög
b7 gaser	x	x	x	hög
b8 vätgas, bränsleceller	x	x	x	hög
s1 olycksrapporter	x (tillsyn)		x (kvalitetssäkring)	medel
s4 relevanta metoder		x	x	medel
s6 bekämpa effektivt	x	x		medel
d2c resistiv uppvärmning		x	x	medel

Åtgärd	Avnämare			Prioritet
	Räddningstjänst	Myndigheter	Försäkringsbolag och bransch	
d3 förlåtande inverterare		x	x	medel
d4 Nytt ljusbågsvakt		x	x	medel
d6 Placering av produkter		x	x	medel
b3 släckmedel	x		x	medel
b4 termisk rusning			x	medel
b5 SOH		x	x	medel
b6 gränsdragning		x		medel
s2 svensk anpassning		x (regelverk)	x (skadeförebyggande)	lägre
d2b säkringar i PV-system		x	x	lägre
d5 Jordfelsbrytare		x	x	lägre
d7 Trådlös laddning		x	x	lägre

Referenser

- ALAM, M., JOHNSON, J. & FLICKER, J. 2015. A Comprehensive Review of Catastrophic Faults in PV Arrays: Types, Detection, and Mitigation Techniques. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 5, 1-16
- ANDERSSON-CARLIN. 2016. *Felmontering av solceller bakom brand* [Online]. Tjugofyra7. Available: <http://www.tjugofyra7.se/arkivet/Avdelningar/Erfarenheter/brand-solcell/> .
- ANDERSSON, P., ARVIDSON, M., EVEGREN, F., JANDALI, M., LARSSON, F. & ROSENGREN, M. 2018. RISE Report 2018:77 Lion Fire: Extinguishment and mitigation of fires in Li-ion batteries at sea. <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ri:diva-36683>
- APPIAH, A. Y., ZHANG, X., AYAWLI, B. B. K. & KYEREMEH, F. 2019. Long Short-Term Memory Networks Based Automatic Feature Extraction for Photovoltaic Array Fault Diagnosis. *IEEE Access*, 7, 30089-30101
- ARBETARSKYDDSSSTYRELSEN 1988. Arbetarskyddsstyrelsens kungörelse med föreskrifter om blybatterier för drivning av fordon. <https://www.av.se/globalassets/filer/publikationer/foreskrifter/blybatterier-afs1988-4.pdf>
- BABLO, J., BOYCE, K. & JIANG, H. 2014. *The Unique Safety Concerns of Wireless Charging* [Online]. IEEE Transportation Electrification eNewsletter. Available: <https://tec.ieee.org/newsletter/september-october-2014/the-unique-safety-concerns-of-wireless-charging> .
- BABRAUSKAS, V. 2002. How do electrical wiring faults lead to structure ignitions? *Fire and Arson Investigator*, 52, 39-45,49
- BABRAUSKAS, V. 2006. Mechanisms and modes for ignition of low-voltage, PVC-insulated electrotechnical products. *Fire and Materials*, 30, 151-174. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/fam.900>
- BACKSTROM, R. & DINI, D. A. 2011. Firefighter Safety and Photovoltaic Installations Research Project. Underwriters Laboratories, UL. https://ulfirefightersafety.org/docs/PV-FF_SafetyFinalReport.pdf
- BARTH, T. & SWAIM, R. 2018. NTSB Investigations of EV Fires. UNECE. <https://wiki.unece.org/download/attachments/60358932/EVS16-E7OI-0600%20%5BUS%5DNTSB%20electric%20vehicle%20fire%20investigations.pdf?api=v2>
- BERGROTH, E. & TORSTENSSON, G. 2019. *Solar Photovoltaic Fire Risks: FE-analysis of fire exposed solar photovoltaic systems and comparison of current legislation and recommendations from different countries*. Master, Luleå tekniska universitet
- BISSCHOP, R., WILLSTRAND, O., AMON, F. & ROSENGREN, M. 2019. Fire Safety of Lithium-Ion Batteries in Road Vehicles. *RISE Rapport*. <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ri:diva-38873>
- BRAND, M., GLÄASER, J., GEDER, S., MENACHER, S., OBPACHER, S., JOSSEN, A. & QUINGER, D. 2016. Electrical Safety of Commercial Li-Ion Cells Based on NMC and NCA Technology Compared to LFP Technology. *World Electric Vehicle Journal*, 6, 1-9
- BRANDSKYDDSFÖRENINGEN 2019. LBK-pärmen, 5. Elinstallationer i lantbruk och hästverksamhet. Brandskyddsföreningen. <https://www.brandskyddsforeningen.se/lbk/lbk-parmen/5elhandbok/>
- BRE 2017a. BRE report P1000874-1000 Issue 3.4 Fire and Solar PV Systems - Literature Review. United Kingdom: BRE National Solar Centre. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/630638/fire-solar-pv-systems-literature-review.pdf
- BRE 2017b. BRE report P1000874-1004 United Kingdom: BRE National Solar Centre. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/630639/fire-solar-pv-systems-investigations-evidence.pdf
- BRE 2017c. BRE report P1000874-1006 Issue 2.5 Fire and Solar PV Systems – Recommendations for the Photovoltaic Industry. United Kingdom: BRE National Solar Centre. <https://www.bre.co.uk/filelibrary/nsc/Documents%20Library/fireproject/P100874-1006-D6-Interim-Report---Recommendations-for-PV-Ind-Feb-2017-Issue-2.5.pdf>

- BRE 2017d. BRE report P1000874-1008 Issue 2.4 Fire and Solar PV Systems – Recommendations for the Fire and Rescue Services. United Kingdom: BRE National Solar Centre. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/630641/fire-solar-pv-systems-frs-recommendations.pdf
- BRO, B. 2015. *The different kinds of protection inside and outside your 18650 batteries*. [Online]. Available: <https://batterybro.com/blogs/18650-wholesale-battery-reviews/18306003-battery-safety-101-anatomy-ptc-vs-pcb-vs-cid>.
- BROWN, N. 2012. *Double-Sided Solar Cells from BSolar Produce Up to 50% More Energy* [Online]. CleanTechnica. Available: <https://cleantechnica.com/2012/07/07/double-sided-solar-cells-from-bsolar-produce-up-to-50-more-energy/>.
- CEN 2019. EN 13501-1:2019 Fire classification of construction products and building elements - Part 1: Classification using test data from reaction to fire tests. In: CEN, E. C. F. S. (ed.). <https://www.sis.se/en/produkter/environment-health-protection-safety/protection-against-fire/fireresistance-of-building-materials-and-elements/ss-en-13501-120192/>
- CFPA-E 2018. CFPA-E Guideline No 37:2018 F, Photovoltaic systems: Recommendations on loss prevention. The European fire protection associations (CFPA E). http://cfpa-e.eu/wp-content/plugins/pdfjs-viewer-shortcode/pdfjs/web/viewer.php?file=http://cfpa-e.eu/wp-content/uploads/2018/03/CFPA_E_Guideline_No_37_2018-F.pdf&download=false&print=false&openfile=false
- CHODÁK, I. 1995. Properties of crosslinked polyolefin-based materials. *Progress in Polymer Science*, 20, 1165-1199. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/007967009598859N>
- CHOW, C. L., HAN, S. S. & NI, X. M. 2017. A study on fire behaviour of combustible components of two commonly used photovoltaic panels. 41, 65-83. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/fam.2366>
- CIRRIS SYSTEMS. 2019. *High Voltage Arc Gap Calculator* [Online]. CIRRI Systems. Available: <https://www.cirris.com/learning-center/calculators/50-high-voltage-arc-gap-calculator> [Accessed 2019-04-29].
- DAGENS NYHETER. 2019. *Stor ökning av solceller* [Online]. Dagens Nyheter. Available: <https://www.dn.se/ekonomi/stor-okning-av-solceller/?forceScript=1&variantType=large>.
- DEHAAN, J. D. & ICOVE, D. J. 2011. *Kirk's Fire Investigation (7th Edition) (Brady Fire)*, Pearson
- DFV 2010. Einsatz und Photovoltaikanlagen. Deutscher Feuerwehr Verband, DFV. https://www.solarwirtschaft.de/fileadmin/media/pdf/bsw_feuerwehrbroschuere_2010.pdf
- DHERE, N. G. & SHIRADKAR, N. S. 2012. Fire hazard and other safety concerns of photovoltaic systems. 2, 1-14, 14. <https://doi.org/10.1117/1.JPE.2.022006>
- DIBT Hinweisen für die Herstellung, Planung und Ausführung von Solaranlagen. https://wirtschaft.hessen.de/sites/default/files/HMWVL/hinweise_fuer_die_herstellung_planung_und_ausfuehrung_von_solaranlagen.pdf
- DINI, D. A., BRAZIS, P. W. & YEN, K. Development of Arc-Fault Circuit-Interrupter requirements for Photovoltaic systems. 2011 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 19-24 June 2011 2011. 001790-001794
- DRAWDOWN, P. 2019. *Summary of Solutions by Overall Rank* [Online]. Available: <https://www.drawdown.org/solutions-summary-by-rank>.
- DUBAI ELECTRICITY & WATER AUTHORITY 2015. PV ON BUILDINGS AND FIRE SAFETY: RECOMMENDATION FOR DRRG SOLAR PV SYSTEMS. Dubai Electricity & Water Authority. https://www.dewa.gov.ae/images/smartinitiatives/PV_on_Buildings.pdf
- DUBEY, S., SARVAIYA, J. N. & SESHADRI, B. 2013. Temperature Dependent Photovoltaic (PV) Efficiency and Its Effect on PV Production in the World – A Review. *Energy Procedia*, 33, 311-321. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610213000829>
- DURAN, C. 2012. *Bifacial Solar Cells: High Efficiency Design, Characterization, Modules and Applications*. Universität Konstanz. <https://d-nb.info/102641542X/34>
- ELSÄKERHETSVERKET 2008. ELSÄK-FS 2008:1 Elsäkerhetsverkets föreskrifter och allmänna råd om hur elektriska starkströmsanläggningar ska vara utförda. In: ELSÄKERHETSVERKET (ed.). <https://www.elsakerhetsverket.se/globalassets/foreskrifter/2008-1.pdf>
- ELSÄKERHETSVERKET 2016. Informationsbehov och elsäkerhetskrav rörande små- och storskalig energilagring av el. Kristinehamn: Elsäkerhetsverket

- ENERGIMYNDIGHETEN. *Solceller växelriktare* [Online]. Available: <https://www.energimyndigheten.se/tester/tester-a-o/solceller-vaxelriktare/>.
- ENOVA 2017. Markedsutviklingen 2017 - Hovedtrender i Enovas satsingsområder, Enova SF, 2017:4. Enova. https://www.enova.no/download/?objectPath=upload_images/ABD83ED9E3034857AEA4491813420101.pdf&filename=Markedsutviklingen%202017.pdf
- ESHETU, G. G., GRUGEON, S., LARUELLE, S., BOYANOV, S., LECOCQ, A., BERTRAND, J.-P. & MARLAIR, G. 2013. In-depth safety-focused analysis of solvents used in electrolytes for large scale lithium ion batteries. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 15, 9145-9155. <http://dx.doi.org/10.1039/C3CP51315G>
- ESPELING, J. 2019. *RE: Personlig kommunikation*. Type to KOVÁCS, P.
- ETHAN. 2019. *Crystalline Silicon PV Market Forecast (2018-2026)* [Online]. Turned News. Available: <https://turnednews.com/2019/08/16/crystalline-silicon-pv-market-forecast-2018-2026/>.
- EU 2017. COMMISSION STAFF WORKING DOCUMENT, Energy storage – the role of electricity. Brussels, Belgium: European Commission. https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/swd2017_61_document_travail_service_part1_v6.pdf
- FIORENTINI, L., MARMO, L., DANZI, E. & PUCCIA, V. 2016. Fire risk assessment of photovoltaic plants. A case study moving from two large fires: From accident investigation and forensic engineering to fire risk assessment for reconstruction and permitting purposes. *CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS*, 48, 427-432. <https://www.aidic.it/cet/16/48/072.pdf>
- FORSKNINGSRÅDET. *Forskningssentre för miljövänlig energi (FME)*. [Online]. Available: https://www.forskningsradet.no/prognettenergisenter/Om_sentrene/1222932140880.
- FRAUNHOFER INSTITUTE 2019. PHOTOVOLTAICS REPORT. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems. <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>
- GEHANDLER, J., KARLSSON, P. & VYLUND, L. 2017. Risks associated with alternative fuels in road tunnels and underground garages, SP Report 2017:14. SP. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1081095/FULLTEXT01.pdf>
- GILLIS, L. 2019. *December fire at Red Lake Mine raises red flags about lithium batteries* [Online]. Northern Ontario Business. Available: <https://www.northernontariobusiness.com/industry-news/mining/december-fire-at-red-lake-mine-raises-red-flags-about-lithium-batteries-1440101>.
- GOLUBKOV, A. W., PLANTEU, R., RASCH, B., ESSL, C., THALER, A. & HACKER, V. Thermal runaway and battery fire: comparison of Li-ion, Ni-MH and sealed lead-acid batteries. Proceedings of 7th Transport Research Arena TRA 2018, 2018 Vienna.
- GOLUBKOV, A. W., SHEIKL, S., PLANTEU, R., VOITIC, G., WILTSCHE, H., STANGL, C., FAULER, G., THALER, A. & HACKER, V. 2015. Thermal Runaway of Commercial 18650 Li-Ion Batteries with LFP and NCA Cathodes - Impact of State of Charge and Overcharge. *RSC Advances*, 5, 57171-57186
- GRANMAR, M. 2019. *Obehagligt när jordfelsbrytarnas skydd försvinner i det tysta* [Online]. Elinstallatören. Available: <https://www.elinstallatoren.se/innehall/nyheter/2019/maj/obehagligt-nar-jordfelsbrytarnas-skydd-forsvinner-i-det-tysta/>.
- GRANT, C. C. 2013. Fire Fighter Safety and Emergency Response for Solar Power Systems. NFPA Fire Protection Research Foundation. https://www.solsmart.org/media/FPRF_FireFithSafety.pdf
- HEIER, J. 2013. Energieffektivisering via termisk energilagring. *Teknik och Forskning*. <http://www.diva-portal.se/smash/get/diva2:660209/FULLTEXT01.pdf>
- HERSTEDT, M. 2003. *Towards Safer Lithium-Ion Batteries*. Ph.D., Uppsala Universitet. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:163204/FULLTEXT01.pdf>
- HIS SOLAR. 2018. *HIKRA ® PLUS (EN50618)* [Online]. Available: <https://www.his-solar.com/en/solar-wiring-system/hiskon/hikra-solar-cable>.
- IBRAHIM, H., ILINCA, A. & PERRON, J. 2008. Energy storage systems—Characteristics and comparisons. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12, 1221-1250. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032107000238>

- IEA. 2014. *Technology Roadmap - Solar Photovoltaic Energy 2014* [Online]. The International Energy Agency, IEA. Available: <https://webstore.iea.org/technology-roadmap-solar-photovoltaic-energy-2014>.
- IEC 2016a. IEC 61730-2 Photovoltaic (PV) module safety qualification - Part 2: Requirements for testing. International Electrotechnical Commission. <https://shop.elstandard.se/Handlers/PreviewHandler.ashx?code=1718701>
- IEC 2016b. IEC 62446-1 Photovoltaic (PV) systems - Requirements for testing, documentation and maintenance - Part 1: Grid connected systems - Documentation, commissioning tests and inspection. International Electrotechnical Commission
- IRENA 2013. International Standardisation in the Field of Renewable Energy. IRENA, International Renewable Energy Agency. http://www.ecowrex.org/system/files/documents/2013_international-standardisation-in-the-field-of-renewable-energy_irena.pdf
- JOHNSON, J., ARMIJO, K. M., AVRUTSKY, M., EIZIPS, D. & KONDRASHOV, S. Arc-fault unwanted tripping survey with UL 1699B-listed products. 2015 IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), 14-19 June 2015 2015. 1-6
- JOHNSON, J., BOWER, W. & QUINTANA, M. 2012. Electrical and thermal finite element modeling of arc faults in photovoltaic bypass diodes. Albuquerque, NM: Sandia. <https://prod-ng.sandia.gov/techlib-noauth/access-control.cgi/2012/120743.pdf>
- JU, X., ZHOU, X., GONG, J., ZHAO, K., PENG, Y., ZHANG, C., REN, X. & YANG, L. 2019. Impact of flat roof-integrated solar photovoltaic installation mode on building fire safety. *Fire and Materials*, o. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/fam.2755>
- JU, X., ZHOU, X., ZHAO, K., PENG, F. & YANG, L. 2018. Experimental study on fire behaviors of flexible photovoltaic panels using a cone calorimeter. *Journal of Fire Sciences*, 36, 63-77. <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0734904117740855>
- JUSTIS- OG BEREDSKAPSDEPARTEMENTET 1999. Forskrift 6.november 1998 nr. 1060 om elektriske lavspenningsanlegg (FEL). In: BEREDSKAPSDEPARTEMENTET, J.-O. (ed.).
- KALAGASIDIS, A. S. 2018. Värmelager med fasändringsmaterial för bättre energihushållning. Chalmers tekniska högskola. https://www.e2b2.se/library/4483/slutrappport_projekteringsverktyg_for_sol_varmelager_med_fasandringsmaterial.pdf
- KATIC, I. 2019. *RE: Personlig kommunikation*. Type to KOVÁCS, P.
- KOMMUNAL- OG MODERNISERINGSDEPARTEMENTET 2013. Forskrift 26. mars 2010 nr. 488 om byggesak (byggesaksforskriften SAK10). In: MODERNISERINGSDEPARTEMENTET, K.-O. (ed.).
- KOMMUNAL- OG MODERNISERINGSDEPARTEMENTET 2017. Forskrift 19. juni 2017 nr. 840 om tekniske krav til byggverk (Byggteknisk forskrift, TEK17). In: MODERNISERINGSDEPARTEMENTET, K.-O. (ed.).
- KOVÁCS, P. 2018. *Solel i renovering och nybyggnation* [Online]. Informationscentrum för hållbart byggande. Available: <https://ichb.se/innehall/guider/guide-solel/>.
- KREMER, P. Arcing potential in fuses: missing standards for adequate testing of fuses in PV application. Arcing in PV DC-Arrays, 2011. DKE. http://www.solarabcs.org/about/publications/meeting_presentations_minutes/2_011/02/pdfs/Kremer-Arc_Potential_in_fuses.pdf
- KRISTENSEN, J. S. & JOMAAS, G. J. F. T. 2018. Experimental Study of the Fire Behaviour on Flat Roof Constructions with Multiple Photovoltaic (PV) Panels. 54, 1807-1828. <https://doi.org/10.1007/s10694-018-0772-5>
- KRISTENSEN, J. S., MERCI, B. & JOMAAS, G. 2018. Fire-induced reradiation underneath photovoltaic arrays on flat roofs. 42, 316-323. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/fam.2494>
- KRISTENSSON, J. 2019. Detta låg bakom explosion på vätgasmack. *Ny Teknik*. <https://www.nyteknik.se/fordon/detta-lag-bakom-explosion-pa-vatgasmack-6962266>
- KUMMEROW, A. *Abteilung I – Konstruktiver Ingenieurbau* [Online]. Available: <https://www.dibt.de/de/wir-sind/organisation/abteilung-i/>.
- LARSSON, F. 2017. *Lithium-ion Battery Safety: Assessment by Abuse Testing, Fluoride Gas Emissions and Fire Propagation*. Ph.D., Chalmers University of Technology
- LAUKAMP, H., BOPP, G., GRAB, R., PHILLIP, S., SCHMIDT, H., REIL, F., SEPANSKI, A., THIEM, H., VAASEN, W., HÄBERLIN, H. & HEECKEREN, B. PV fire hazard-analysis and assessment of fire incidents. 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 2013.

- LEWANDOWSKA-BERNAT, A. & DESIDERI, U. 2017. Opportunities of Power-to-Gas technology. *Energy Procedia*, 105, 4569-4574. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217310974>
- LINDAHL, J. & STOLTZ, C. 2017. National Survey Report of PV Power Applications in Sweden 2017. Swedish Energy Agency, IEA International Energy Agency. https://energiforskmedia.blob.core.windows.net/media/25135/national_survey_report_of_pv_power_application_in_sweden2017.pdf
- LOTT, M., KIM, S.-I., TAM, C., ELZINGA, D., HEINEN, S., MUNUERA, L. & REMME, U. 2014. Technology Roadmap: Energy storage. Paris, France: International Energy Agency (IEA). <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapEnergyStorage.pdf>
- MALMQUIST, P.-O. 2019. Operativ metodik vid insatser där det finns solcellsanläggningar, Vägledning. MSB, Myndigheten för samhällsskydd och beredskap. <https://www.msb.se/RibData/File/pdf/28805.pdf>
- MIKALSEN, R. F. & BØE, A. S. 2019. Energieffektive bygg og brannssikkerhet RISE-rapport 2019:02. Trondheim, Norway: RISE Research Institutes of Sweden
- MSB 2014a. Kartläggning risker vid räddningsinsats i samband med brand i solcellsanläggning. MSB, Myndigheten för samhällsskydd och beredskap. <https://www.msb.se/RibData/File/pdf/27458.pdf>
- MSB 2014b. RÅD Räddningsinsats i samband med brand i solcellsanläggning. MSB, Myndigheten för samhällsskydd och beredskap. <https://www.msb.se/RibData/File/pdf/27459.pdf>
- MURATOV, V. Methods for Foreign Object Detection in Inductive Wireless Charging. Qi Developer Forum, 2017. https://www.wirelesspowerconsortium.com/data/downloadables/1/9/0/9/wpc17_04-vladimir-muratov-methods-for-foreign-object-detection.pdf
- NAMIKAWA, S. 2017. IEA-PVPS-TASK 12 Photovoltaics and Firefighters' Operations: Best Practices in Selected Countries.: International Energy Agency IEA. http://www.iea-pvps.org/index.php?id=449&eID=dam_frontend_push&docID=4044
- NFPA 2017. NFPA 921: Guide for Fire and Explosion Investigations, 2017 edition. National Fire Protection Association:
- NFPA 2020. NFPA 70, National Electrical Code. NFPA, National Fire Protection Association. www.nfpa.org
- NOHRSTEDT, L. 2017. *Guide: Solcellernas tre generationer* [Online]. Ny Teknik. Available: <https://www.nyteknik.se/energi/guide-solcellernas-tre-generationer-6880611>
- NOHRSTEDT, L. 2018. *Solenergi, Guide för dig som vill skaffa solceller* [Online]. Ny Teknik. Available: <https://www.sunroof.se/wp-content/uploads/2019/02/20181129-ny-teknik-solenergiguide.pdf>
- NORDLING, A., ENGLUND, R., HEMBJER, A. & MANNBERG, A. 2015. Energilagring - Teknik för lagring av el. Kungliga Ingenjörsvetenskapsakademien (IVA). <https://www.iva.se/globalassets/rapporter/vagval-el/201508-iva-vagvalel-ellagring-rapport-j-ny.pdf>
- NORSK ELEKTROTEKNISK KOMITÉ 2018. NEK 400:2018 Elektriske lavspenningsinstallasjoner, Norsk elektroteknisk norm.: Norsk Elektroteknisk Komité
- NY TEKNIK 2019. Ikea börjar sälja solceller i Sverige. Ny Teknik. <https://www.nyteknik.se/energi/ikea-borjar-salja-solceller-i-sverige-6957856>
- O'KANE, S. 2019. Walmart sues Tesla over several solar panel fires caused by 'negligence' [Online]. The Verge. Available: <https://www.theverge.com/2019/8/20/20825566/walmart-tesla-solar-panel-fire-lawsuit-negligence>
- OFFICE OF THE STATE FIRE MARSHAL 2010. Fire Operations for Photovoltaic Emergencies. CAL FIRE—Office of the State Fire Marshal. http://www.ncdoi.com/OSFM/RPD/PT/Documents/Coursework/PhotovoltaicEmergencies/Fire%20Ops%20W_PVs.pdf
- OTTOSSON, J. 2018. *Hållbart samhälle – nya brandtekniska utmaningar* [Online]. WSP. Available: <https://www.wsp.com/sv-SE/insikter/hallbart-samhalle-nya-brandtekniska-utmaningar>
- PANCHAL, C., STEGEN, S. & LU, J. 2018. Review of static and dynamic wireless electric vehicle charging system. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 21, 922-937. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221509861830154X>
- PRUME, K. & VIEHWEG, J. 2015. Bewertung des Brandrisikos in Photovoltaik-Anlagen und Erstellung von Sicherheitskonzepten zur Risikominimierung. Bundesministerium für

- Wirtschaft und Technologie, TÜV Rheinland, Fraunhofer. http://www.pv-brandsicherheit.de/fileadmin/downloads/fe/Leitfaden_Brandrisiko_in_PV-Anlagen_Vo2.pdf
- PRUME, K. & VIEHWEG, J. 2018. Assessing Fire Risks in Photovoltaic Systems and Developing Safety Concepts for Risk Minimization. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, TÜV Rheinland, Fraunhofer. https://www.energy.gov/sites/prod/files/2018/10/f56/PV%20Fire%20Safety%20Fire%20Guideline_Translation_Vo4%2020180614_FINAL.pdf
- PVSITES 2016. Standardization needs for BIPV. CEA, Tecnalia, CTCV. <http://www.pvsites.eu/downloads/download/report-standardization-needs-for-bipv>
- REGERINGSKANSLIET 1990. Elinstallatörsförordning (1990:806). https://www.riksdagen.se/sv/dokument-lagar/dokument/svensk-forfattningssamling/elinstallationsforordning-1990806_sfs-1990-806
- REGERINGSKANSLIET 1997. Ellag (1997:857). https://www.riksdagen.se/sv/dokument-lagar/dokument/svensk-forfattningssamling/ellag-1997857_sfs-1997-857
- REGERINGSKANSLIET 2009. Starkströmsförordning (2009:22). https://www.riksdagen.se/sv/dokument-lagar/dokument/svensk-forfattningssamling/starkstromsforordning-200922_sfs-2009-22
- REGERINGSKANSLIET 2018. Uppdrag att utreda nya krav på laddinfrastruktur för elfordon enligt direktivet om byggnaders energiprestanda. *Diarienummer: M2018/02402/Ee*.
- REGERINGSKANSLIET. 2019. 500 miljoner kronor mer till solcellsstödet i höständeringsbudgeten [Online]. Regeringskansliet. Available: <https://www.regeringen.se/artiklar/2019/09/500-miljoner-kronor-mer-till-solcellsstodet-i-hostanderingsbudgeten/>.
- REIL, F., SEPANSKI, A., VAAßEN, W., HEECKEREN, B. V., RAUBACH, S., VOSEN, M., THIELE, M., VOLBERG, G., SCHULZ, A., SCHMIDT, H., LAUKAMP, H., HALFMANN, M., BANSEMER, B. & LOEBBERT, A. Determination of arcing risks in PV modules with derivation of risk minimization measures. 2013 IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 16-21 June 2013 2013. 3159-3164
- REN21 2018. RENEWABLES 2018 GLOBAL STATUS REPORT. Paris: REN21 Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. <http://www.ren21.net/gsr-2018/pages/foreword/foreword/>
- RUNDBERG, G. 2005. Individuell värmedebitering från uppstart i kv grynmalaren till igångsättning i kv Labben. Avd Installationsteknik, LTH, Lunds universitet. <http://lup.lub.lu.se/record/1513721>
- SCHIMPF, F. & NORUM, L. 2009. *Recognition of electric arcing in the DC-wiring of photovoltaic systems*,
- SEK 2017. SEK Handbok 444, SS 4364000 med kommentarer, utgåva 3, 2017. SEK Svensk Elstandard
- SEK 2019. SEK Handbok 457, Solceller - Råd och regler för elinstallationen. SEK Svensk Elstandard. <http://www.elstandard.se/handbok/visa.asp?HandbokId=1549020154>
- SEK SVENSK ELSTANDARD 2001. SS-EN 50272-2 Laddningsbara batterier och batterianläggningar - Säkerhet - Del 2: Stationära batterier.
- SEK SVENSK ELSTANDARD 2011. SS-EN 50160 Spänningens egenskaper i elnät för allmän distribution.
- SEK SVENSK ELSTANDARD 2014. SS-EN 50438 Fordringar på mindre generatoranläggningar för anslutning i parallelldrift med det allmänna elnätet.
- SEK SVENSK ELSTANDARD 2015. SS-EN 62485-3 Laddningsbara batterier och batterianläggningar - Säkerhet - Del 3: Traktionsbatterier.
- SEK SVENSK ELSTANDARD 2016. SS-EN 50583-1 Byggnadsintegrerade solceller - Del 1: Moduler.
- SEK SVENSK ELSTANDARD 2017. SS-EN 62619 Laddningsbara celler och batterier med alkalisk eller annan icke syrabaserad elektrolyt - Säkerhetskrav på litiumceller och litiumbatterier för tillämpningar i industrin.
- SOLENERGIKLYNGEN 2019. Brannveileder for solenergianlegg for brannvesen: En praktisk tilnærming til solceller og solfangere. <http://solenergiklyngen.no/app/uploads/sites/4/brannveileder-for-solenergianlegg-for-brannvesen.pdf>

- SOMMERFELDT, N., AF KLINTBERG, T., MUYINGO, H. & KRISTOFFERSSON, J. 2016. Solceller ur flera perspektiv : Handbok för beslutsfattare. Stockholm: KTH Royal Institute of Technology. <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-185002>
- SPECTOR, J. 2019. *What We Know and Don't Know About the Fire at an APS Battery Facility* [Online]. gtm. Available: <https://www.greentechmedia.com/articles/read/what-we-know-and-dont-know-about-the-fire-at-an-aps-battery-facility#gs.5f6blu>.
- SPOONER, E. *Organic Photovoltaics vs 3rd-Generation Solar Cell Technologies* [Online]. Ossila. Available: <https://www.ossila.com/pages/organic-photovoltaics-vs-3rd-gen-solar-tech>.
- SPOTNITZ, R. & FRANKLIN, J. 2003. Abuse behavior of high-power, lithium-ion cells. *Journal of Power Sources*, 113, 81-100. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775302004883>
- STEEN-HANSEN, A. 2002. No fire without smoke : prediction models for heat release and smoke production in the SBI test and the Room Corner test based on Cone Calorimeter test results. Trondheim, Norway: Norwegian University of Science and Technology
- STORTINGET 2016. Norsk stortingsmelding som sier: befolkningsutvikling, økonomisk vekst, endret næringsstruktur, teknologisk endring og endrede energipriser vil være drivere for energibruken fremover Ref: «Stortingsmelding nr. 25 (2015-2016), Kraft til endring – energipolitikken mot 2030». 15 apr. 2016.:
- STROBL, C. & MECKLER, P. 2010. *Arc Faults in Photovoltaic Systems*,
- STØLEN, R., MIKALSEN, R. F. & STENSAAS, J. P. 2018. Solcelleteknologi og brannssikkerhet RISE-rapport 2018:31. Trondheim, Norway: RISE Research Institutes of Sweden
- SUPREME COURT OF THE STATE OF NEW YORK, N. Y. C. 2019. *Walmart Inc. (f/k/a Wal-Mart Stores, Inc.) v. Tesla Energy Operations, Inc. (f/k/a SolarCity Corporation)*, Document 1 [Online]. class actions reporter. Available: http://www.classactionsreporter.com/sites/default/files/gov.uscourts.654765_2019.1.0.pdf.
- TEKNIQ ARBEJDSGIVERNE. *Anbefalinger ved installation af batterianlæg* [Online]. Tekniq Arbejdsgiverne. Available: <https://www.tekniq.dk/~media/files/videncenter/installationerogautorisation/elteknik/anbefalinger-ved-installation-af-batterianlaeg.ashx?requestid=5f261333-037d-44cd-9f3d-2e0a5fd9eca5>.
- TESLA. 2019. *Tesla Vehicle Safety Report* [Online]. Available: https://www.tesla.com/sv_SE/VehicleSafetyReport?redirect=no.
- TOBISHIMA, S.-I. & YAMAKI, J.-I. 1999. A consideration of lithium cell safety. *Journal of Power Sources*, 81-82, 882-886. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775398002407>
- UL 2002. UL 1703 - Standard for Flat-Plate Photovoltaic Modules and Panels. UL, Underwriters Laboratories. https://standardscatalog.ul.com/standards/en/standard_1703_3
- UL 2004. UL 790 Standard for Standard Test Methods for Fire Tests of Roof Coverings. UL, Underwriters Laboratories
- UNDERWRITERS LABORATORIES (UL) 2018. Standard for Photovoltaic (PV) DC Arc-Fault Circuit Protection.
- UTKIKEN. 2018. *Operativa instruktioner, batteribränder inomhus (tillgängligt för abonnenter)* [Online]. Available: <https://www.utkiken.net/energilagrar-och-batteri/50035-operativa-instruktioner-batteribr%C3%A4nder-inomhus>.
- WANG, Z. & BALOG, R. S. Arc fault and flash detection in DC photovoltaic arrays using wavelets. 2013 IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 16-21 June 2013 2013. 1619-1624
- WATT-LOGIC. 2017. *Will new BIPV technologies finally see the concept go mainstream?* [Online]. Watt-Logic. Available: <http://watt-logic.com/2017/08/17/bipv/>.
- WEAVER, J. 2019a. If bifacial panels can compete on price the (backsheet) choice is clear. *pv magazine*. <https://www.pv-magazine.com/2019/02/28/if-not-bifacial-then-what/>
- WEAVER, J. 2019b. *There are –data missing– solar power fires per year* [Online]. *pv magazine*. Available: <https://pv-magazine-usa.com/2019/08/22/there-are-solar-power-fires-per-year/>.
- WIDLUND, D. 2009. Elektricitet och bränder – med inriktning på brandutredning. MSB, Myndigheten för samhällsskydd och beredskap. <https://www.msb.se/RibData/Filer/pdf/24918.pdf>
- WIKIPEDIA. Available: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/ao/From_a_solar_cell_to_a_PV_system.svg.

- WINGFORS, H., FREDMAN, A. & THUNELL, M. 2019. Brandskyddskläders motståndskapacitet-materialtester med kemikalier som bildas vid bränder och termisk rusning i Li-jon batterier i e-fordon MSB, Myndigheten för samhällsskydd och beredskap. <https://www.msb.se/RibData/Filer/pdf/28786.pdf>
- WOHLGEMUTH, J. H. & KURTZ, S. R. How can we make PV modules safer? 2012 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 3-8 June 2012 2012. 003162-003165
- VON SCHULTZ, C. 2017. *Skippar elnätet – med bränsleceller i källaren* [Online]. Elinstallatören. Available: <https://www.elinstallatoren.se/innehall/nyheter/2017/maj/skippar-elnatet--med-bransleceller-i-kallaren/> .
- VON SCHULTZ, C. 2018. *Mycket rök när solcellsanläggning tog eld* [Online]. Elinstallatören. Available: <https://www.elinstallatoren.se/innehall/nyheter/2018/juni/mycket-rok-nar-solcellsanlaggning-tog-eld/> .
- VON SCHULTZ, C. 2019. *Mr. Vätgas lagrar solenergin till vintern* [Online]. Elinstallatören. Available: <https://www.elinstallatoren.se/innehall/nyheter/2019/januari/mr.-vatgas-lagrar-solenergin-till-vintern/> .
- XIANG, H. F., WANG, H., CHEN, C. H., GE, X. W., GUO, S., SUN, J. H. & HU, W. Q. 2009. Thermal stability of LiPF₆-based electrolyte and effect of contact with various delithiated cathodes of Li-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 191, 575-581. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775309003504>
- XU, K. 2014. Electrolytes and Interphases in Li-Ion Batteries and Beyond. *Chemical Reviews*, 114, 11503-11618. <https://doi.org/10.1021/cr5000003w>
- YAN, J. & SAUNDERS, B. R. 2014. Third-generation solar cells: a review and comparison of polymer:fullerene, hybrid polymer and perovskite solar cells. *RSC Advances*, 4, 43286-43314. <http://dx.doi.org/10.1039/C4RA07064J>
- YANG, H.-Y., ZHOU, X.-D., YANG, L.-Z. & ZHANG, T.-L. 2015. Experimental Studies on the Flammability and Fire Hazards of Photovoltaic Modules. 8, 4210-4225. <https://www.mdpi.com/1996-1944/8/7/4210>

Through our international collaboration programmes with academia, industry, and the public sector, we ensure the competitiveness of the Swedish business community on an international level and contribute to a sustainable society. Our 2,200 employees support and promote all manner of innovative processes, and our roughly 100 testbeds and demonstration facilities are instrumental in developing the future-proofing of products, technologies, and services. RISE Research Institutes of Sweden is fully owned by the Swedish state.

I internationell samverkan med akademi, näringsliv och offentlig sektor bidrar vi till ett konkurrenskraftigt näringsliv och ett hållbart samhälle. RISE 2 200 medarbetare driver och stöder alla typer av innovationsprocesser. Vi erbjuder ett 100-tal test- och demonstrationsmiljöer för framtidssäkra produkter, tekniker och tjänster. RISE Research Institutes of Sweden ägs av svenska staten.



RISE Research Institutes of Sweden AB
Box 857, 501 15 BORÅS
Telefon: 010-516 50 00
E-post: info@ri.se, Internet: www.ri.se

Safety
RISE Rapport 2019:109
ISBN: 978-91-89049-34-5



**RI
SE**



LUNDS
UNIVERSITET

L
LULEÅ
TEKNISKA
UNIVERSITET

 **Länsförsäkringar**



Brandforsk

Brandforsks verksamhet möjliggörs av stöd från olika organisationer i samhället. Läs mer om våra stödorganisationer på www.brandforsk.se

BRANDFORSK REPORTS FROM 2019:

- 2019:1 Measuring the impact of fire on the environment.
Fire Impact Tool, version I
- 2019:2 Systemperspektiv på industriell brandsäkerhet - en studie av organisering och användbarhet i brandskyddet
- 2019:3 Dammexplosioner i metallbearbetande industri
- 2019:4 Fire safe furniture in a sustainable perspective
- 2019:5 Bostadsbränder och äldre personer - tvärvetenskapliga framgångsfaktorer för reducering av döda och svårt skadade
- 2019:6 Innovativa elsystem i byggnader – konsekvenser för brand säkerhet



Insamlingsstiftelsen Brandforsk verkar för ett brandsäkert samhälle byggt på kunskap. Det gör vi genom att initiera och finansiera kunskapsutveckling inom området brandsäkerhet, och vi arbetar för att sprida den kunskapen så att den ska göra nytta. Vi finansierar detta med insamlade medel från våra stödorganisationer som på så sätt bidrar till vår vision om ett brandsäkert samhälle byggt på kunskap.

Brandforsk har under 40 år fungerat som ett samverkansorgan för samhällets intressenter för att öka kunskapen om, och minska konsekvenserna av, bränder och det fortsätter vi att vara.



Brandforsk

Årstaängsvägen 21 c
P.O. Box 472 44, SE-100 74 Stockholm, Sweden
Phone: 0046-8-588 474 14
info@brandforsk.se
www.brandforsk.se