



<http://www.diva-portal.org>

## Postprint

This is the accepted version of a paper presented at *Electronic Environment 2016 (EEC16)*, 20-21 april 2016, Stockholm.

Citation for the original published paper:

Ängskog, P., Bäckström, M., Vallhagen, B., Samuelsson, C. (2016)

Skärmverkan och mikrovågseffekter på fönster och fönsterglas.

In:

N.B. When citing this work, cite the original published paper.

Permanent link to this version:

<http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:hig:diva-21534>

# Skärmverkan och mikrovågseffekter på fönster och fönsterglas

Per Ängskog<sup>1,2</sup>, Mats Bäckström<sup>1,3</sup>, Bengt Vallhagen<sup>3</sup>, Carl Samuelsson<sup>3</sup>

<sup>1</sup> KTH, Elektroteknisk teori och konstruktion

<sup>2</sup> Högskolan i Gävle, Avd. för elektronik, matematik och naturvetenskap

<sup>3</sup> Saab Aeronautics, Saab AB

Ett allt vanligare fenomen är att mobil telekommunikation inte fungerar i moderna/nybyggda hus. Detta kan härledas till de moderna energisparfönster som monteras in. Denna skärmverkan är inte bara ett problem utan kan också vändas till en fördel i de fall man vill skydda verksamhet från yttre elektromagnetiska störningar, till exempel avsiktlig elektromagnetisk störning (IEMI), samt i de fall då man vill undvika att röjande strålning (RÖS) från elektronisk utrustning läcker ut och kan avlyssnas.

Här kommer vi presentera resultaten från mätningar av skärmverkan hos dels fönster av olika generation och dels enskilda fönsterglas med olika funktion som används för att bygga upp dessa fönster. Dessutom presenteras resultat från mätningar av hur skärmverkan påverkas vid bestrålning med högeffekts mikrovågsstrålning (HPM).

## I. INTRODUKTION

Utvecklingen hos fönster och fönsterglas har varit enorm under de senaste decennierna. Från kopplade bågar till termoglasskassetter och vidare till dagens energisparfönster bestående av glas med olika beläggningar för att åstadkomma allt större energibesparingar. Idag är moderna fönsterglas belagda med minst ett lager bestående av metall eller metalloxid för att minimera energitransporten genom fönstret. I kalla klimat är uppgiften att behålla det långvågiga infraröda ljuset (IR) inne i byggnaden medan i varma klimat behovet är det motsatta, det vill säga att utestänga den infraröda strålningen. Dessutom vill man i varmt klimat förhindra att energirikt, kortvågigt ultraviolett ljus (UV) träffar föremål inomhus som därigenom värms upp.

De olika typerna av beläggning på fönsterglas är optimerade för energibesparing med IR och UV i åtanke samtidigt som den synliga delen av spektrum skall påverkas minimalt, det vill säga den optiska transmissionen skall vara maximal och färgneutral. I denna optimeringsprocess har ingen (eller åtminstone mycket liten) tanke ägnats åt radiodelen av spektrum vilket har visat sig i åtskilliga rapporter om dålig inomhustäckning för mobiltelefonsystem, bland andra [1] – [4]. Praktiska mätningar inriktade på fönster har visat på höga dämpningar, mellan 10 och 40 dB, i spannet 1-18 GHz för olika typer av fönster med belagda glas [4] – [7].

Denna höga radiodämpning är inte bara av ondo, den kan även nyttjas som skärmverkan för ett ökat skydd

mot elektromagnetisk strålning riktad mot en byggnad (t.ex. avsiktliga elektromagnetiska störningar, s.k. IEMI – Intentional Electromagnetic Interference) respektive ett skydd mot att signaler avlyssnas utifrån (RÖS). I IEMI-fallet krävs dessutom att glasets beläggning tål att utsättas för bestrålning av starka elektromagnetiska fält (High Power Microwave, HPM-strålning) utan att skärmverkan försämras. Kunskapen om hur HPM påverkar skärmverkan hos belagda glasytor är begränsad varför en undersökning genomförts för att studera detta [8].

I denna artikel presenteras resultat från mätningar av skärmverkan, hos enskilda fönsterglas och fönstermoduler, gjorda med kopplade modväxlade kammare och i skärmrum över frekvensområdet 1 – 18 GHz. Dessutom visas effekten av HPM-bestrålning på enskilda glas från mätningar gjorda i samma frekvensområde. Samtliga mätningar är gjorda i Saabs elmiljölaboratorium i Linköping.

## II. MÄTUPPSTÄLLNINGAR

Två olika metoder användes för att mäta skärmverkan hos testobjekten. Den första, en traditionell jämförelsemätning, ”lucka på/lucka av”, i skärmrum (semi-anechoic chamber, SAC) och den andra, mätning av isotropisk transmissionsarea, ( $\sigma_a$ ), med hjälp av kopplade modväxlade kammare (MVK).

För att studera effekterna av HPM-bestrålning gjordes en mätning av skärmverkan före respektive efter bestrålningen och resultaten jämfördes.

### A. Mätning i skärmrum

Mätningarna i skärmrummet gjordes med plan infallande våg vinkelrätt mot ytan på testobjekten i horisontell och vertikal polarisation, se Fig. 1. Skärmverkan (eng. Shielding Effectiveness, SE) för testobjektet,  $SE_{\text{apert,pw}}$ , fås ur följande beräkning:

$$SE_{\text{apert,pw}} = \frac{P_{\text{trans,ref}}}{P_{\text{trans,apert}}} \quad (1)$$

där  $P_{\text{trans,ref}}$  betecknar mottagen effekt i referensfallet och  $P_{\text{trans,apert}}$  betecknar mottagen effekt då testobjektet monterats över öppningen. För mer detaljer se [7].

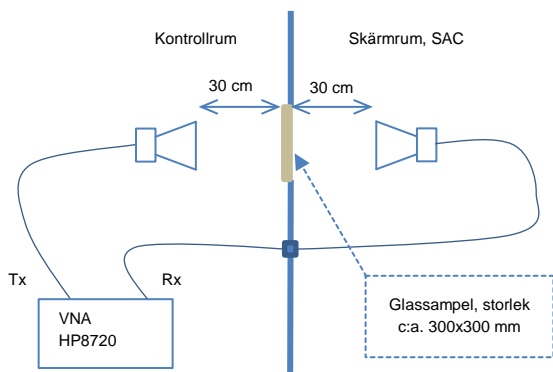


Fig. 1. Schematisk bild över mätupställningen för mätning av skärmverkan i skärmrum.

### B. Mätning i modväxlade kammare

Skärmverkan mäts också under isotropiska förhållanden i kopplade modväxlade kammare, se Fig. 2.

Isotropiska förhållanden skiljer sig från planvågsmätningar i det att man inte bara belyser mätobjektet från en infallsvinkel med en polarisation utan (i idealfallet) samtliga tänkbara infallsvinklar med alla möjliga polarisationer. I detta fall beskrivs skärmningsegenskaperna i termer av isotropisk transmissionsarea,  $\langle \sigma_a \rangle$ , hos testobjektet (vinkelparentesen indikerar att transmissionsarean är uppmätt under isotropiska förhållanden). Med hjälp av  $\langle \sigma_a \rangle$  kan man sedan beräkna testobjektets genomsnittliga skärmverkan,  $\langle SE \rangle$ , ur nedanstående ekvation.

$$\langle SE \rangle = \frac{2\pi \cdot V}{\sigma_a \cdot \lambda \cdot Q} \quad (2)$$

I (2) representerar  $V$  kavitetsens volym,  $\lambda$  våglängden och  $Q$  kavitetsens Q-värde. Medelvärde, som indikeras med vinkelparentes, beräknas med hjälp av data från mätningar med de två roterande "paddlarna" ställda i 252 olika positionskombinationer. Metoden och teorin bakom denna beskrivs närmare i [7], [9] och [10].

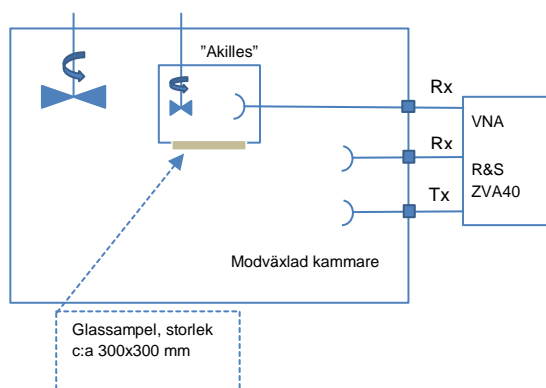


Fig. 2. Schematisk bild över mätupställningen för mätning av skärmverkan i kopplade modväxlade kammare. "Akilles" är den inre, "kopplade", kammaren.

### C. Högeffektbestrålning

Effekterna på skärmverkan efter att testobjekten utsatts för högeffekts mikro vågsstrålning studerades genom att före och efter bestrålningen mäta skärmverkan i MVK och på så sätt kunna studera eventuella skillnader. Högeffektbestrålningen gjordes med hjälp av FMV:s Microwave Test Facility (MTF) hos Saab Aeronautics, i Linköping. I MTF utsattes testobjekten för fältstyrkan 28 kV/m i 5  $\mu$ s långa pulser med en pulsrepetitionsfrekvens på 390 Hz under en 10 s lång sändning. Bestrålningen gjordes i L-bandet med radiofrekvensen 1,3 GHz.

### III. RESULTAT MVK OCH SAC

Här presenteras en kort beskrivning av de olika testobjekten samt ett urval av resultat från de mätningar som gjorts. Tabell I innehåller de olika fönsterglas som provats. De är

- CG – vanligt klarglas,
- Sp – spandrelglas (en typ av glas med låg transparens avsett för stora glasfasader där man vill dölja bakomliggande installationer, har samma färgton som fasadglaset),
- HC – lågemissionsglas med ett "pyrolyserat" metalloxidskikt på ytan samt
- 1Ag och 2Ag – två glas med omväxlande metalloxid-silver-metalloxid med ett respektive två silverskikt (där skikten lagts på med fysikalisk förångningsdeposition, PVD och är förhållandevis mjuka).

TABELL I.  
TESTOBJEKT – ENKLA FÖNSTERGAS

Enkla fönsterglas, standardtyper	
Testobjekt, benämning	Testobjekt, typ
CG-1 – CG-3	Klarglas
Sp-1 – Sp-5	Spandrelglas
HC-1 – HC-5	'Hard Coated' lågemissionsglas
1Ag-1 – 1Ag-5	'Soft Coated' lågemissionsglas 1 silverlager
2Ag-1 – 2Ag-5	'Soft Coated' lågemissionsglas 2 silverlager

Fig. 3 visar resultat från mätningar på fönsterglas i MVK; eftersom dämpningen genom klarglas ligger i området 0-2 dB kan den inte mätas i MVK och återfinns därför inte i figuren.

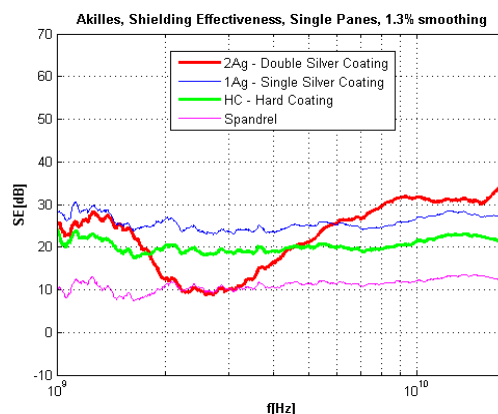


Fig. 3. Skärmverkan, (SE), uppmätt i MVK för enkla fönsterglas av typen 2Ag, 1Ag, HC, och Sp. Notera hur kurvan för 2Ag avviker kraftigt från övriga kurvor. Detta visade sig senare bero på att beläggningen på glaset vänts åt motsatt sida jämfört med de tre övriga typerna.

Tydliga skillnader i skärmverkan kan ses mellan de olika typerna av beläggning med ett undantag – glaset med dubbla silverskikt som avviker från de övriga glaserna. Vid en senare mätning kunde visas att beteendet kommer av att detta glas mätts med beläggningen utåt medan alla de andra mätts med beläggningen inåt, detta har orsakat ett sidoläckage som påverkat skärmverkanmätningen. Korrekt nivå ligger i storleksordningen 30-40 dB över bandet.

I tabell II återfinns de provade fönster-modulerna. Först två äldre energisparfönster av typen två-respektive tre-glas, baserade enbart på termosprincipen dvs. två eller tre glas som utgör en kassett med ett eller två isolerande mellanrum fyllda med torr luft. Därefter två modernare typer av tre-glasfönster med ett respektive två belagda glas och argonfyllda mellanrum.

TABELL II. TESTOBJEKT – FÖNSTERMODULER (UTAN RAM OCH KARM).	
Fönstermoduler	
Testobjekt, benämning	Testobjekt, typ
W2I	Två-glas energisparfönster
W3I	Tre-glas energisparfönster
W3LE	Tre-glas lågemissionsfönster
W3UL	Tre-glas ultralågemissionsfönster

Mätningarna på fönstermoduler visade på tydliga generationsskillnader mellan energisparfönstren å ena sidan och lågemissionsfönstren å andra sidan. Precis som i Fig. 3 ovan saknas energisparfönstren i Fig. 4 på grund av att skärmverkan är för låg för att mätas i MVK.

Även mellan lågemissionsfönstret och ultralågemissionsfönstret kunde skillnader ses. Främst i de nedre och övre delarna av det uppmätta spektret. Mellan 3 och 6 GHz ger de i stort sett samma skärmverkan.

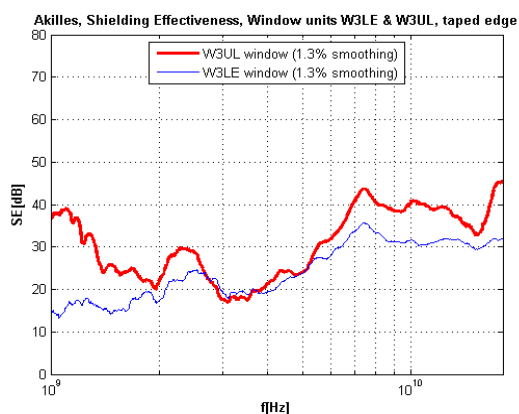


Fig. 4. Skärmverkan,  $\langle SE \rangle$ , uppmätt i MVK, för W3LE-, och W3UL-fönstermoduler.

#### IV. RESULTAT MTF

Efter att testobjekten exponerats för högeffekts mikrovågsstrålning kunde konstateras att varken spandrelglaset eller det "hårdbelagda" lågemissionsglaset påverkats alls. Däremot uppvisade båda silverbelagda glas sprickor i beläggningen synliga för blotta ögat, se exempel i Fig. 5.



Fig 5. Sprickor i beläggningen på 2Ag-glasets som resultat av HPM-exponering.

Mätningarna av skärmverkan i MVK bekräftade vad som kunde iaktas visuellt, en försämring med 7-15 dB kunde iaktas för enkelsilvergaset och i storleksordningen 5 dB för dubbelsilvergaset, Fig. 6. Dock måste tilläggas att i 2Ag-fallet som syns i figuren är glaset konsekvent placerat fel så en större förlust av skärmverkan kan förväntas, detta har dock ej verifierats ännu.

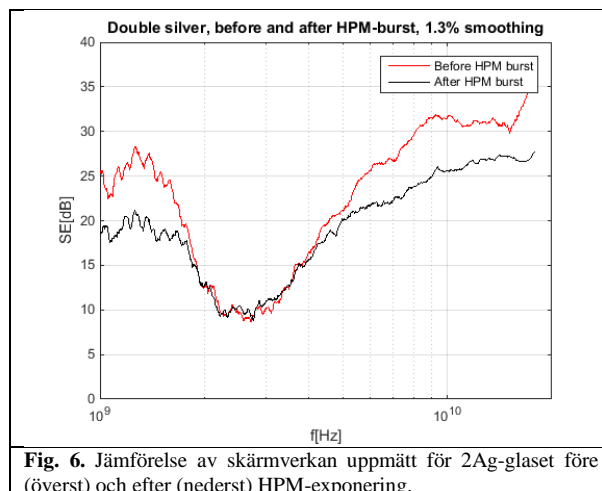


Fig. 6. Jämförelse av skärmverkan uppmätt för 2Ag-glasets före (överst) och efter (nederst) HPM-exponering.

#### V. SAMMANFATTNING

Skärmverkan har uppmätts över bandet 1-18 GHz för ett antal typer av fönsterglas och fönstermoduler av olika generation. Tydliga generationsskillnader kan iaktas där typen av beläggning och antal skikt

påverkar dämpningen av radio och mikrovågsstrålning.

De olika typerna av individuella fönsterglas utsattes också för pulssad högeffekts mikrovågs-bestrålning (bärfrekvens 1,3 GHz och fältstyrkan 28 kV/m) med resultatet att på de ”mjukbelagda” glasen med silverskikt krackelerade beläggningen och skärmverkan föll med 5-15 dB över bandet 1-18 GHz.

Dessutom visade det sig att sidoläckaget från släpande instrålning inte kan försummas utan tvärtom har signifikant betydelse för skärmverkans storlek över frekvens.

Slutsatser man kan dra är att ju modernare fönster desto högre skärmverkan och om avsikten med fönsterinstallationen är att skydda mot avsiktliga störningar, s.k. IEMI är Hard Coated (pyrolyserad beläggning) glas att föredra före Soft Coated glas (förlängningsdeponerad beläggning) då de inte påverkas nämnvärt av HPM-exponering.

En iakttagelse är att eftersom sidoläckaget har påfallande stor påverkan bör fönsterbågar av metall (vanligen aluminium) väljas före trä eller plast. En annan parameter att vara vaksam på är att distanslisten mellan fönsterglasen som tidigare varit av metall nu börjat bytas ut mot icke-metallisk s.k. varm-kant. Där öppnas ytterligare en väg för sidoläckage.

#### BAKGRUND

Detta arbete har utförts som en del i det MSB-finansierade projektet ”Skydd mot elektromagnetiska risker. Avsiktliga elektromagnetiska störningar”. Medfinansierare har varit Fortifikationsverket, Post- och telestyrelsen och Livsmedelsverket. Ett stort tack till personalen vid Saabs elmiljölaboratorium för all assistans vid mätningarna och personal vid Glasforskningsinstitutet, Glafo, för hjälp med anskaffning av testobjekt och undervisning om hur olika glas byggs upp.

#### REFERENSER

- [1] A. Asp et al, ”Radio Signal Propagation and Attenuation Measurements for Modern Residential Buildings,” *Globecom Workshops (GC Wkshps), 2012 IEEE*, Anaheim, CA, USA, 2012. N. Köhler och J. Åfreds, ”Täta fönster stryper signalen”, *Byggindustrin*, 2013-11-04.
- [2] G. I. Kiani et al, ”Glass Characterization for Designing Frequency Selective Surfaces to Improve Transmission through Energy Saving Glass Windows,” *Asia Pacific Microwave Conference, 2007. (APMC-2007)*, Bangkok, Thailand, 2007.

- [3] I. Rodriguez et al, ”Radio Propagation into Modern Buildings: Attenuation Measurements in the Range from 800 MHz to 18 GHz,” *Vehicular Technology Conference (VTC Fall), 2014 IEEE 80th*, Vancouver, Canada, 2014.
- [4] N. Köhler och J. Åfreds, ”Täta fönster stryper signalen”, *Byggindustrin*, 2013-11-04.
- [5] P. Ragulis, Ž. Kancleris och R. Simniškis, ”Transmission and Reflection of Microwave Radiation from Novel Window Panes,” *AMEREM-2014*, Albuquerque, NM, USA, 2014.
- [6] E. Krogager och J. Godø, ”Attenuation of Building used for HPM Testing,” *AMEREM-2014*, Albuquerque, NM, USA, 2014.
- [7] P. Ängskog, M. Bäckström och B. Vallhagen, ”Measurement of radio signal propagation through window panes and energy saving windows,” in *Electromagnetic Compatibility (EMC), 2015 IEEE International Symposium on*, vol., no., pp.74-79, 16-22 Aug. 2015
- [8] P. Ängskog, M. Bäckström och B. Vallhagen, ”High Power Microwave Effects on Coated Window Panes,” *ASIAEM-2015*, Jeju, Republic of Korea, 2015.
- [9] M. Bäckström, T. Nilsson och B. Vallhagen, ”Guideline for HPM protection and verification based on the method of power balance,” *Electromagnetic Compatibility (EMC Europe), 2014 International Symposium on*, Gothenburg, Sweden, 2014.
- [10] D. A. Hill et al, ”Aperture Excitation of Electrically Large, Lossy Cavities,” *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 36, no. 3, pp. 169-178, August 1994.