

# Af segulspætum og þunnum húðum



## Um höfundinn:

Jón Tómas Guðmundsson lauk C.S. prófi í rafmagnsverkfræði frá Háskóla Íslands árið 1989. Hann lauk M.S. prófi í eðlisfræði frá Háskóla Íslands árið 1991 og Ph.D. frá Kaliforníuháskóla í Berkeley árið 1996. Hann var sérfræðingur við eðlisfræðistofu Raunvísindastofnunar Háskólans frá september 1997 og er nú dósent við rafmagns- og tölvuverkfræðiskor Háskóla Íslands.

## Ágrip

Segulspætur eru mikilvægar í iðnaði sem tól til ræktunar þunnra húða. Með segulspætu má rækta þunnar húðir hvort heldur sem er úr málmum eða einangrurum. Í segulspætu er jónum hraðað úr rafgasi að skotmarki og úr því spætt atómum. Spættu atómunum rignir síðan á undirlagið og úr þeim ræktast húð. Skotmarkið ásamt gasinu í klefanum ákvarðar efnasamsetningu húðarinnar. Með hvarfaspættun má rækta oxíð, nítríð eða karbíð. Fjallað er um grunnuppbyggingu segulspæta. Þá eru stuttlega reifuð nokkur rannsóknaverkefni þar sem ræktun þunnra húða gegnir lykilhlutverki.

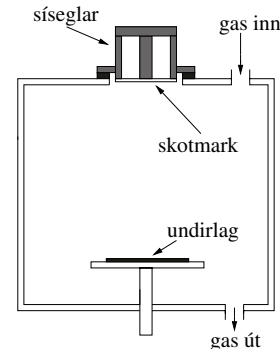
## 1. Inngangur

Segulspætur eru mikið notaðar til ræktunar þunnra húða. Þunnar húðir á bolefni (undirlag) gefa eiginleika sem ekki eru fyrir hendi í bolefni. Dæmi um slíkar húðir eru leiðandi, einangrandi eða hálfleiðandi lög í smárásam, segulefni, harðar húðir, núningsfletir, húðir með tiltekna ljóseiginleika, skrauthúðir, slitþolnar húðir, og tæringarvörn. Einnig má fá fram ýmsa eiginleika með því að rækta fjölmörg lög ólíkra efna. Segulspætur gegna þess vegna lykilhlutverki í mörgum greinum iðnaðar. Hár ræktunarhraði hefur gert segulspættutæknina að einni mest notuðu aðferðinni til ræktunar þunnra húða hvort heldur sem ræktaður er rafsvari, málmur eða melmi.

Undanfarin ár hefur verið unnið að því að byggja segulspætur við Raunvísindastofnun Háskólans [1]. Ræktun þunnra málmhúða í segulspætu eru þegar komnar vel á veg og ræktaðar hafa verið ofurþunnar húðir úr málmum, melmi [2,3] og einangrurum með hvarfaspættun [4] sem og yfirgrindur [5]. Hér verður fjallað um segulspætur, hvernig þær vinna og þær leiðir sem farnar hafa verið til að bæta segulspættutæknina. Þá eru rædd tvö rannsóknaverkefni sem eru í gangi á Raunvísindastofnun Háskólans þar sem þunnar húðir ræktaðar í segulspætu eru í meginhlutverki.

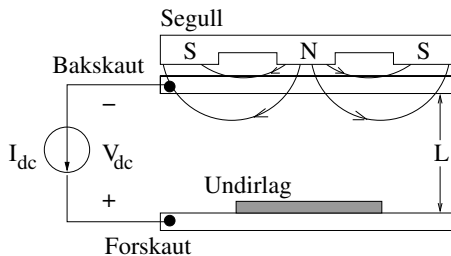
## 2. Uppbygging segulspætu

Spættun í sinni einföldustu mynd fæst fram þegar há spenna er lögð yfir tvö rafskaut í gasfylltum klefa. Við það myndast rafgas á milli skautanna. Jónum úr rafgasinu er hraðað að bakskaütinu og þær spæta úr því atómum. Bakskaütíð er þess vegna gjarnan nefnt skotmark. Segulspættan var þróuð til að bæta spættunina og auka ræktunarhraðann [6]. Uppbygging segulspætu er sýnd á mynd 1. Lofttæmdur klefi er fylltur spættunargasi. Rafgasafhleðsla er mynduð með því að leggja spennu á bakskaütíð. Í segulspættunni er jónum hraðað úr rafgasinu að skotmarkinu sem þær spæta úr. Spættu atómunum rignir síðan á undirlagið sem á ræktast húð. Skotmarkið ásamt gasinu í klefanum ákvarðar efnasamsetningu húðarinnar. Oftast er óhvarfgjarnt argon gas notað og skotmörkin ein ákvarða þá efnasamsetningu ræktuðu húðarinnar. Hægt er að spæta samtímis úr nokkrum skotmörkum og mynda melmi eða spæta til skiptis frá tveimur eða fleiri skotmörkum og mynda lög ólíkra húða og rækta yfirgrindur [1,5].



Mynd 1 Uppbygging segulspætu. Lofttæmdur klefi er fylltur spættunargasi. Rafgasafhleðsla er mynduð með því að leggja spennu á bakskaütíð. Síssegjum er komið fyrir aftan við bakskaütíð (skotmarkið). Segulsviðið hremmir rafeindir og heldur þeim nálægt bakskaütinu. Þetta lengir dualartíma rafeindanna í rafgasinu næst bakskaütinu og veldur þar með aukinni jónun spættunargassins.

Í hefðbundinni flatrí segulspætu er seglum komið fyrir aftan við bakskautið, öðrum fyrir því miðju og hinum ofan við jadar þess eins og sjá má á mynd 2. Segulsviðslínurnar ganga út um miðju bakskautsins og inn í bakskautið aftur á jöðrum þess. Segulsviðið er ýmist myndað með sísegnum, rafsegnum eða hvorutvegga. Hlutverk segulsviðsins er að hremma rafeindir og halda þeim nálægt bakskautinu. Við það lengist dvalartími og brautarlengd rafeindanna í rafgasinu næst bakskautinu og árekstrum fjölgar. Það er gert til að auka jónun rafgassins næst bakskautinu.



Mynd 2 Hefðbundin dc segulspæta. Seglum er komið fyrir aftan við bakskautið, öðrum fyrir því miðju og hinum ofan við jadar þess. Segulsviðslínurnar ganga út um miðju bakskautsins og inn í bakskautið aftur á jöðrum þess. Segulsviðið hremmir rafeindirnar næst bakskautinu og þar myndast rafgas með tiltölulega háum rafeindapéttleika.

Ræktunarhraði í segulspætu er háður spætunarhráðanum frá skotmarkinu, spætunargasinu, efnasamsetningu skotmarks og stærð þess, fjarlægð milli skotmarks og undirlags og hraða spættu agnanna í afhleðslunni. Spætunarhráðinn er aftur háður hreyfiorku og straumbéttleika jónanna. Hreyfiorka jónanna er háð spennunni sem lögð er á bakskautið en straumbéttleikinn ræðst af bakskautsstraumnum. Margfeldi straums og spennu er afl svo að spætunarhráðinn frá bakskautinu er í réttu hlutfalli við meðal aflpéttleika. Aflpéttleikinn takmarkast hins vegar af því að skotmarkið ofhitni ekki og bráðni. Gasþrýstingur í afhleðslunni hefur tvenns konar áhrif: Annars vegar hefur hann áhrif á rafgaspéttleikann sem hækkar með auknum gasþrýstingi og hins vegar fellur ræktunarhráðinn vegna dreifingar spætttra atóma. Ræktunarhraði nær þess vegna hágildi sínu við tiltekinn gasþrýsting, sem gjarnan liggur á bilinu 2-40 mTorr.

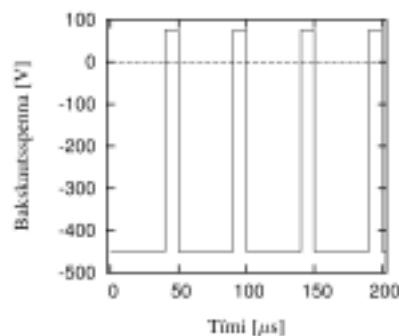
Skotmarkið sem spætt er úr er skífa, gjarnan 2 til 10 mm þykk og 50-150 mm í þvermál sem fest er við vatnskælda koparplötu. Í hefðbundinni dc segulspætu er skotmarkinu (bakskautinu) haldið við fasta neikvæða spennu. Sýnahaldarinn og/eða jarðtengd yfirborð klefans gegna oftast hlutverki forskauts. Afhleðsla í hefðbundinni dc segulspætu er jafnan framkölluð við 1-20 mTorr gasþrýsting og 300-700 V spennu á bakskauti. Þetta veldur straumbéttleika um 5 - 50 mA/cm<sup>2</sup> og aflpéttleika 1 - 40 W/cm<sup>2</sup>. Rafeindapéttleiki og þar með jónapéttleiki nokkrum cm neðan við bakskautið er af stærðarþrepinu 10<sup>16</sup> m<sup>-3</sup>. Rafeindapéttleikinn er afar misleitur við bakskautið og tekur hágildi þar sem segulsviðslínurnar eru samsíða skotmarkinu og fellur að jöðrum og miðju bakskautsins. Hágildi rafeindapéttleikans getur verið allt að stærðarþrepi hærra en rafeindapéttleikinn yfir miðju skotmarksins. Rafeindapéttleikinn fellur með fjarlægð frá skotmarkinu og verður einsleitari.

Eitt af meginvandamálunum við notkun segulspætu er myndun hlaupabrautar í skotmarkið. Vegna þessa nýtist aðeins um 25 - 30 % skotmarksins til spætunar [6]. Eyðing skotmarksins stafar fyrst og fremst af spætun með orkumiklum jónum sem er hraða

frá rafgasinu. Eyðing skotmarksins er misleit þar sem dreifing jónanna framán við skotmarkið er ekki einsleit. Það er misleitni segulsviðsins sem veldur því að spætunarhráðinn er misleitur yfir þvermál bakskautsins. Þetta aftur veldur því að nýting skotmarksins er léleg sem og að ræktaða húðin verður misleit. Einsleitni húðarinnar má bæta með því að snúa undirlaginu eða seglunum eða hafa breytilegt segulsvið.

### 3. Hvarfaspætun

Ræktun einangrandi húðar í segulspætu er umtalsvert erfðari en ræktun málmhúða. Þá er ýmist spætt úr einangrandi skotmarki eða málmkotmarki. Þegar spætt er úr samsettu- eða málmkotmarki og súrefni, nítri eða metan er blandað við rafgasid nefnist það hvarfaspætun.



Mynd 3 Bylgjuform spennunar frá púlsuðum tvíþóla afgjafa. Skotmarkið er þá spætt við dæmigerða spennu á bakskauti (400 - 500 V) í tiltekinn fastan tíma og síðan er lögð á jákvæð spennu í stuttan tíma til að reka hleðslu af yfirborðinu.

Við ræktun með hvarfaspætun koma upp ýmis vandamál vegna uppsöfnunar hleðslu á skotmarkinu. Það ræktast gjarnan einangrandi lag á yfirborð skotmarksins. Líta má á bakskautið sem annað skaut plötupétts, hitt skautið er rafgasid og á milli þessara skauta er þunnt einangrandi lag, sem er rafsvari þéttisins. Þegar neikvæð spennu er lögð á bakskautið dregst jákvæð hleðsla að einangrandi laginu, rafgas megin. Rafsviðsstyrkurinn yfir þetta þunna einangrandi lag getur orðið verulega hár sem getur endað með niðurbroti. Við það getur myndast ljósbogi. Þegar þetta gerist er líklegt að húðin sem verið er að rækta verði fyrir skemmdum. Þetta hefur verið leyst með því að leggja rf spennu á segulspætuna eða með því að púlsta dc spennuna [7]. Spætun með rf spennu er þó fremur hægvirki sér í lagi þegar ræktað er frá einangrandi skotmarki. Ósamhverf tvíþóls dc spætun var þróuð til ræktunar rafsvara húða með hvarfaspætun úr leiðandi skotmarki.

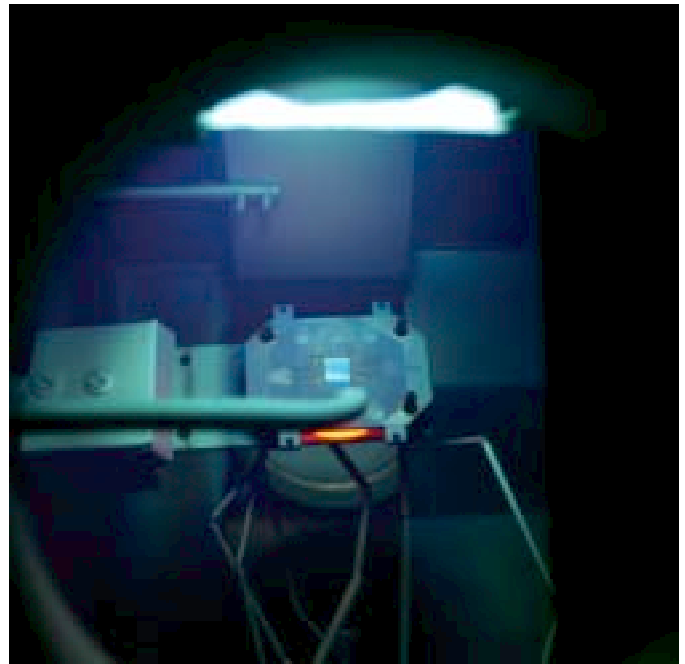
Púlsun segulspætunnar með 10-250 kHz tíðni dregur verulega úr myndun ljósboga. Dæmigert bylgjuform spennunnar er sýnt á mynd 3. Skotmarkið er þá spætt við dæmigerða spennu á bakskauti (400-500 V) í tiltekinn fastan tíma. Þessi tími ákvarðast af því að hleðslan nái ekki að valda niðurbroti og ljósboga. Síðan er lögð á jákvæð spennu í stuttan tíma til að reka hleðslu af yfirborðinu. Ítarlegar hefur verið fjallað um hvarfaspætun á öðrum vettvangi [8].

### 4. Þunnar húðir

Á Raunvísindastofnun Háskólans er segulspæta sem notuð er til ræktunar þunnra húða og er hún sýnd á mynd 4. Þrjú skotmörk eru á segulspætunni sem gerir það kleift að rækta melmi úr þremur mismunandi frumefnum [1]. Einnig má

spæta til skiptis af skotmörkunum þremur og mynda yfirgrindur þar sem skiptast á lög mismunandi efna. Þá má blanda súrefni í rafgasið og rækta oxíð með hvarfaspættun. Mynd 5 sýnir sýnahaldarann í segulspættunni. Efst á myndinni sést rafgas af háum þéttleika næst skotmarkinu. Undirlagið sem ræktað er á hvílir á sýnahaldaranum. Hitari er byggður í sýnahaldarann til þess að stýra megi ræktunarhitastiginu. Þá má leggja spennu á sýnahaldarann til að stýra orku jónahríðar við ræktun. Sýnahaldarinn er þannig hannaður að leggja má grímu yfir undirlagið og þar með er hægt að rækta á það tiltekin mynstur.

[3,11] eða í sérsníðuðum búnaði fyrir lágan vetnisþrýsting [5,10] eða við mjög háan þrýsting [9].



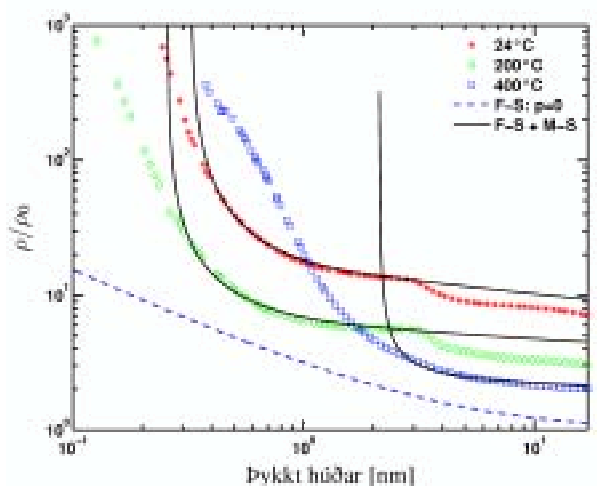
Mynd 5 Sýnahaldari í segulspættu. Rafgas af háum þéttleika sést næst skotmarkinu efst á myndinni. Undirlagið sem ræktað er á hvílir á sýnahaldaranum. Hitari er innbyggður í sýnahaldarann til þess að stýra megi ræktunarhitastiginu. Þá má leggja spennu á sýnahaldarann til að stýra orku jónahríðar við ræktun. Ljósmynd: Árni Sigurður Ingason.



Mynd 4 Segulspæta sem notuð er til ræktunar þunnra húða. Þrjú skotmörk eru á segulspættunni sem gerir það kleift að rækta melmi úr þremur mismunandi frumefnum. Einnig má spæta til skiptis af skotmörkunum þremur og mynda yfirgrindur þar sem skiptast á lög mismunandi efna. Ljósmynd: Árni Sigurður Ingason.

Undanfarin ár hefur verið fengist við rannsóknir á upptöku vetnis í þunnar málmhúðir. Málmurinn er þá hugsaður sem vetnisgeymsla. Þá er mikilvægt að málmurinn sem notaður er sé léttur og ódýr. Skoðuð hefur verið upptaka vetnis í vanadín lögum sem liggja á milli mólíden laga annars vegar [5] og járnлага hins vegar [9] og mynda yfirgrindur. Þá hefur upptaka vetnis í magnesín málmum [3,9,10] verið rannsökuð. Með leiðnimælingum er fylgst með upptöku vetnis í málminn og með því að breyta hitastigi og gasþrýstingi vetnis má skoða varmafræðilega eiginleika eins og bindingu og losun vetnis í málmnum. Þetta má gera *in situ* í ræktunarklefanum

Eitt vandamálið við notkun hreins magnesín máls til geymslu vetnis er að bindiorka vetnis í magnesín hýdríðum er há og erfitt er að losa vetnið úr málmnum við stofuhita. Vegna þessa hefur þess verið freistað að mynda magnesín melmi með örlietu magni af súrefni [3], palladín eða króm [10]. Með því hefur tekist að lækka bindiorkuna eitthvað.



Mynd 6 Hlutfall eðlisviðnáms húðar  $\rho$ , og eðlisviðnáms í bol  $\rho_0$  sem fall af þykkt  $Cr_{0.7}Mo_{0.3}$  húðar, þegar ræktað er við þrjú mismunandi hitastig. Mæld gildi eru borin saman við Fuchs-Sondheimer líkanið (F-S, brotin lína), og samsett F-S og Maydas-Shatzkes líkan (F-S + M-S, heil lína), þar sem gert ráð fyrir að kornastærð sé háð þykkt húðar.



Annað verkefni snýst um að byggja skynjara sem nema á stórar sameindir. Hann er byggður úr samloku þar sem skiptast á leiðandi melmi og einangrari sem hvort um sig eru nokkur atómlög á þykkt. Fyrsta skrefið í þessu verki snýr að því hversu þunna leiðandi húð má mynda á einangrandi MgO undirlag. Valið var að mynda melmi úr  $\text{Cr}_x\text{Mo}_{1-x}$  og hlutfall Cr og Mo valið þannig að grindarfastar melmisins og einangrarans séu sambærilegir [2,12]. Með því að koma fyrir fjórum tengjum á undirlagið var hægt að fylgjast með því hvernig viðnám melmisins fellur á meðan húðin ræktast [13]. Mynd 6 sýnir hlutfall eðlisviðnáms húðar  $\rho$ , og eðlisviðnáms í bol  $\rho_0$ , sem fall af þykkt  $\text{Cr}_{0,7}\text{Mo}_{0,3}$  húðar, þegar ræktað er við þrjú mismunandi hitastig. Sjá má að leiðandi húð er mynduð með innan við einu atómlagi. Valið var að rækta MgO sem einangrara. MgO er ræktað með hvarfaspættun í púlsaðri segulspættu [4]. Á mynd 5 sést rörið sem fæðir súrefni að undirlaginu. Það má líka sjá grænleitan bjarma umhverfis sýnahaldarann, sem stafar af súrefnisrafgasi.

## 5. Lokaorð

Fjallað hefur verið um búnað og tækni til ræktunar þunnra húða með segulspættu.

Segulspættutæknin hefur náð gríðarlegri útbreiðslu í iðnaði og verið í stöðugri þróun þau þrjátíu ár sem liðin eru síðan hún kom fram á sjónarsviðið. Með segulspættu má rækta þunnar húðir hvort heldur sem er úr málmmum eða einangrurum og mynda yfirgrindur. Með hvarfaspættun má rækta oxíð, nítríð eða karbíð. Fjallað var um grunnuppbyggingu segulspættu, og rædd þau helstu rannsóknaverkefni sem snúa að hagnýtingu þunnra húða og eru nú í gangi á Raunvísindastofnun Háskólans.

## Þakkir

Uppbygging rannsóknaraðstöðu hefur verið styrkt af Tækjakaupasjóði og einstök verkefni af Rannsóknarsjóði Háskóla Íslands og Rannsóknarsjóði Íslands. Rannsóknir á vetni í málmmum eru leiddar af dr. Sveini Ólafssyni, sérfræðingi á Raunvísindastofnun Háskólans og hönnun og smíði skynjara er unnin í samvinnu við Svein og dr. Kristinn Johnsen hjá Mentis Cura ehf. Verkefni hafa mikið til verið unnin af þeim Guðmundi Þór Reynaldssyni, Kristni B. Gylfasyni, Jóni Skírni Ágústssyni, Önnu-Karin Eriksson, Birni Víkingi Ágústssyni, Munkhsaikhon Gonchigsuren og Árna Sigurði Ingasyni. Þá eru Árna Sigurði Ingasyni færðar þakkir fyrir ljósmyndirnar sem prýða greinina.

## Heimildir

- [1] Sveinn Ólafsson og Unnar B. Arnalds, Spættun og ræktun með segulspættu, í *Eðlisfræði á Íslandi IX*, ritstjóri Ari Ólafsson, Reykjavík, bls. 143-152, Eðlisfræðifélag Íslands, 1999.
- [2] Ívar Meyvantsson, *Ultra-thin conductors and insulators synthesis and characterization*, M.S. ritgerð í rafmagnsverkfræði, Háskóli Íslands, júní 2003.
- [3] Árni Sigurður Ingason, *Hydrogen in magnesium based alloys*, M.S. ritgerð í vélaverkfræði, Háskóli Íslands, október 2005.
- [4] Jón Skírni Ágústsson, *Electrical characterization of MgO thin films grown by reactive magnetron sputtering*, M.S. ritgerð í rafmagnsverkfræði, Háskóli Íslands, júní 2005.
- [5] Guðmundur Þór Reynaldsson, *Hydrogen in metallic superlattices*, Ph.D. ritgerð í eðlisfræði, Háskóli Íslands, ágúst 2003.
- [6] J. S. Chapin, The planar magnetron, *Research/Development*, pp. 37- 40, January 1974.
- [7] S. Schiller, K. Goedicke, J. Reschke, V. Kirchhoff, S. Schneider, and F. Milde, Pulsed magnetron sputter technology, *Surface and Coatings Technology*, vol. 61, pp. 331-337, 1993.
- [8] Jón Tómas Guðmundsson, Afbrigði segulspættu, *Tímarit um raunvísindi og stærðfræði*, 2. árgangur, bls. 41 – 48, 2004.
- [9] Anna-Karin Eriksson, *A piston-anvil system designed for resistance measurements*, M.S. ritgerð í eðlisfræði, Uppsala University, september 2004.
- [10] Munkhsaikhon Gonchigsuren, *Hydrogen in thin magnesium films*, M.S. ritgerð í eðlisfræði, Háskóli Íslands, mars 2006.
- [11] A.S. Ingason and S. Olafsson, Thermodynamics of hydrogen uptake in Mg films studied by resistance measurements, *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 404, pp. 469-472, 2005.
- [12] K. B. Gylfason, A. S. Ingason, J. S. Agustsson, S. Olafsson, K. Johnsen, and J. T. Gudmundsson, In-situ resistivity measurements during growth of ultra-thin  $\text{Cr}_{0,7}\text{Mo}_{0,3}$ , samþykkt til birtingar í *Thin Solid Films* 2006.
- [13] I. Meyvantsson, S. Olafsson, K. Johnsen, and J. T. Gudmundsson, Preparation and characterization of magnetron sputtered, ultra-thin  $\text{Cr}_{0,63}\text{Mo}_{0,37}$  films on MgO, *Journal of Vacuum Science and Technology A*, vol. 22, pp. 1636-1639, 2004.

**RT** EHF R A F A G N A T E K N I SÍÐUMULA 1 - 108 REYKJAVÍK [rt@rt.is](mailto:rt@rt.is) - [www.rt.is](http://www.rt.is)



Samfelld reynsla frá 1961 í hönnun rafbúnaðar

Í næstum hálfra öld höfum við hannað heildarlausnir á mæli- og stjórnkerfum fyrir iðnað, orkuveitur og rannsóknastofur. sjálfvirkni - fjarskipti - netkerfi

Það er einfalt og spennandi.....  
Kynnist okkur nánar og lítið á heimasíðu okkar [www.rt.is](http://www.rt.is)

